


Rédigé par Jacques Gispert

Association Andromède — Association Marseillaise d'AStronomie (AMAS)

Donné au siège de l'Association Andromède (Observatoire de Marseille)

Astronomia est astrorum lex…
(l'astronomie est la loi des astres)
*Isidore de Séville*

Je chante pour mon vallon en souhaitant que
dans chaque vallon un coq en fasse autant.
*Chantecler, Edmond Rostand*

Ce cours est destiné à toute personne ayant éprouvé de la curiosité pour le ciel, pour le passé de la Terre et son avenir, ayant le désir de comprendre ce que sont les objets dont on parle souvent : planètes, satellites, étoiles, quasars, pulsars, naines blanches, géantes rouges… Mais aussi objets ou phénomènes moins connus, magnétars, sursauts gamma…

Sa lecture ne nécessite aucune connaissance préalable, mais beaucoup de curiosité. Le challenge est de donner des explications simples, d'expliquer sans faire appel aux mathématiques et à la physique formelle. Nous essayerons de décrire les phénomènes, même complexes, d'une manière intuitive, imagée et parfois animée.

En général, vous n'y trouverez pas les belles formules qui permettent de construire les modèles et de décrire ce que nous savons de l'Univers. Toutefois, quelques chapitres plus spécialisés vous permettront, si vous le désirez, d'aller plus loin sur des points particuliers (par exemple la physique nécessaire pour décrire les étoiles ou l'Univers, la cosmologie).

**Ce cours est gratuit** ; le seul but de son auteur est de diffuser, dans la limite de ses moyens, la culture astronomique et l'émerveillement profond qu'elle produit. Il ne présente **aucune publicité** ! En consultant ces pages, vous ne serez jamais agressé…

Ce n'est pas un site web classique : sa structure est plutôt celle d'un livre, avec des chapitres complets. Les liens que vous y trouverez sont des nécessités pédagogiques.

La tâche est immense : expliquer toute l'astronomie, de manière accessible, demande un travail énorme. Le résultat ne saurait être parfait, mais l'ambition de l'auteur est de partager des connaissances. Pardon aux lecteurs pour les inévitables erreurs ou imprécisions qui s'y trouvent malgré tout.

Bonne étude !

**Attention** : le texte est toujours en cours de rédaction, ou de mise à jour. Cette remarque est permanente, car la perfection est bien lointaine…

Et un grand merci à toutes les sources sans lesquelles ce travail n'existerait pas. Il est impossible de les citer, mais la bibliographie en donne une très bonne vision.

Si l'astronautique vous intéresse, consultez le site de Boris Tzaprenko, qui présente les principes de la navigation spatiale.

Et pour vous détendre, pourquoi ne pas lire sa production littéraire de science-fiction, débutée par le roman "Il sera" ? Ce texte est scientifiquement bien documenté. Il est aussi bien écrit, et son aspect distrayant ne sacrifie pas la vraisemblance. C'est une trilogie.

En plus, vous trouverez maintenant des nouvelles courtes, mais passionnantes !

Et ce n'est pas fini…

---

Lexique définissant 1652 mots relatifs à l'astronomie.

## Première partie : les bases

| | |
|---|---|
| **Généralités** | L'astronomie en bref résumé |
| **Cosmogonie antique** | Système géocentrique de Ptolémée |
| **Le calendrier** (Construction, almanach) | Histoire, anecdotes et calculs. Editez votre calendrier en ligne. |
| **Les distances** | Problème central de l'astronomie, dont la solution approchée est récente |
| **Un peu de mécanique** | Le mouvement képlérien et sa solution; application à un tableur |
| **Les instruments** | Lunettes, télescopes, instruments infrarouge, UV, X, Gamma |
| **La taille d'un miroir** | Réalisation pratique d'un miroir |
| **La lumière** | Propriétés de la lumière : réflexion, réfraction, diffusions ; interférences |
| **Les radiotélescopes** | La radioastronomie depuis l'origine |
| **Télescopes millimétriques** | Observation de l'Univers froid |
| **La sphère armillaire** | Instrument pédagogique pour comprendre les mouvements des astres |

## Deuxième partie : le système solaire

| | |
|---|---|
| **Introduction** | Généralités |
| **Les planètes** | Etude de toutes les planètes |
| **Les atmosphères planétaires** | Comparaison des atmosphères actuelles, de leur formation et de leur évolution |
| **Jour solaire** | Explication sur l'origine des jours en fonction des 2 mouvements de la Terre |
| **Les météorites** | Pierres tombées du ciel |
| **Les comètes** | Astres glacés, qui se subliment à proximité du Soleil |
| **Les astéroïdes** (Vesta) | Petits corps circulant entre Mars et Jupiter |
| **La disparition des dinosaures** | Origine astronomique ? |
| **Le Soleil** | Etude de notre étoile. Ses apparences, son fonctionnement |
| **Cosmogonie, formation du système solaire** | Comment le système solaire s'est formé à partir d'un nuage de gaz |
| Nouveau **Les aurores boréales** | … plus généralement, les aurores polaires, sur Terre et ailleurs ! |

## Troisième partie : les étoiles

| | |
|---|---|
| **La physique nucléaire** | Notions essentielles pour la compréhension des étoiles |
| **Les étoiles** | Leur fonctionnement en fonction de leur masse |
| Nouveau **La vie des étoiles, en bref** | Description synthétique de la formation, du fonctionnement, et de la fin de étoiles |
| **Les étoiles doubles** | Etude des étoiles liées gravitationnellement |
| **Les étoiles variables** | |
| variables à éclipses | Doubles vues par la tranche, produisant des éclipses mutuelles |
| variables périodiques | Variables intrinsèques, basées sur un phénomène physique |
| variables explosives | Etoiles explosant, une ou plusieurs fois |
| variables nébulaires | Variables situées dans des nébuleuses |
| variables nouvelles | Variables dans d'autres domaines spectraux que le visible |
| **Les amas d'étoiles** | Amas ouverts et amas globulaires |

## Quatrième partie : l'évolution des étoiles

| | |
|---|---|
| **L'évolution des étoiles** | L'évolution des étoiles couvre toute leur existence, depuis la formation jusqu'à l'effondrement |
| **T Tauri** | La phase avant l'allumage des réactions nucléaires |
| **Géantes rouges** | Phase de fusion de l'hélium |
| **Naines blanches** | Etat d'équilibre quantique, produit par les électrons |
| **Etoiles à neutrons** | Etat d'équilibre quantique produit par les neutrons |
| **Pulsars** | Etoile à neutrons émettant un rayonnement radio intense |
| | Objet produit par l'effondrement complet d'une étoile, trop lourde pour être une naine |

| | |
|---|---|
| **Trous noirs…** | blanche ou une étoile à neutrons |
| **Sursauts gamma et Magnétars** | Emissions brèves et intenses de rayonnements énergétiques, et leur explication |

## Cinquième partie : les galaxies

| | |
|---|---|
| **Introduction** | |
| **Le milieu interstellaire** | Gaz présent entre les galaxies |
| **La raie à 21 cm de l'hydrogène neutre** | Emission de l'hydrogène neutre |
| **La Voie lactée** | Notre Galaxie en détails |
| **Les rayons cosmiques** | Particules très énergétiques qui parviennent à la Terre en provenance de l'espace lointain |
| **Les galaxies** | Leurs types, leur formation, leur dynamique… |
| **Les amas de galaxies** | Regroupements de galaxies maintenues par la gravité |
| **Les galaxies actives** | Galaxies dont le noyau émet plus d'énergie que ce que les étoiles justifient |
| Nouveau **L'évolution des galaxies** | Quelques indications sur la formation des galaxies et des amas |

## Sixième partie : physique et cosmologie

| | |
|---|---|
| **Physique des particules** | Rudiments |
| **Relativité Galiléenne** | Les bases de la relativité, le principe d'inertie |
| **Relativité Restreinte** | Généralisation de la relativité galiléenne aux vitesses quelconques |
| **Relativité Générale** | Généralisation aux grandes masses et aux accélérations |
| **Cosmologie** | Etude de l'Univers dans son ensemble |

## Septième partie : documents divers

| | |
|---|---|
| **Exercices** | Quelques exercices pour vérifier votre compréhension |
| **Observations** | Des indications pour observer le ciel à l'aide de jumelles ou d'un petit télescope |
| **Lexique** | Les mots clé de l'astronomie |
| **Exoplanètes** | Les planètes qui circulent autour d'une autre étoile |
| **Fiches de données** | Diverses fiches regroupant toutes les données nécessaires sur divers domaines de l'astronomie |
| **Formulaire** | Quelques formules physiques |
| **Rappels de Maths…** | Pour aider à comprendre la physique |
| **Bibliographie** | Un échantillon de livres intéressants |
| **Plans d'une sphère armillaire** | Des plans pour construire une sphère armillaire simple mais complète |

## Compléments : les séminaires

## Accès direct aux animations :

| 1e partie | 2e partie | 3e partie |
|---|---|---|
| tracé d'une ellipse<br>loi des aires<br>les épicycles<br>les équants<br>le stéréocomparateur<br>la turbulence<br>les interférences<br>la diffusion Rayleigh<br>le lever héliaque | rétrogradation d'une planète<br>calcul du poids<br>simulation du jour solaire<br>coucher de soleil<br>lever de soleil (films)<br>libration<br>marées<br>bassin de Caloris sur Mercure<br>poids sur Mars<br>carte de Mars (écran 800 × 600)<br>ou (grand écran) | décroissance<br>fusion<br>calculette<br>Ursa Major<br>durée de vie<br>rotation d'une étoile<br>relation masse-luminosite<br>diagramme HR<br>mouvement d'une étoile double<br>variables à éclipses<br>spectre double à éclipses<br>béta Lyræ<br>courbes céphéides |
| **4e partie** | **5e partie** | **6e partie** |
| masse-rayon pour une NB | galaxies filamenteuses<br>galaxies spirales<br>elliptiques à coquilles<br>dimensions des quasars | le principe d'incertitude |

---=OO=---




**Plan**

La science astronomique
Observation
L'œil et ses propriétés
Lieux d'observation
La lumière
Terre, Lune et Soleil
Les lois du mouvement
Mesure du temps
Les étoiles
La Voie Lactée

Ce chapitre présente un ensemble de notions essentielles pour comprendre les bases de l'astronomie.

Le mot Astronomie vient du grec αστρονομια (αστρον *astre* et νομοσ *loi*).

**L'Astronomie est une science**

Les sciences proposent une démarche particulière pour énoncer des lois. Cette démarche consiste à définir un protocole d'expérience (les règles du jeu), à réaliser des expériences suivant ce protocole, puis à en analyser les résultats (les réponses de la Nature).

Donnons un exemple : attachons une bille de plomb à un fil, et attachons le fil à un crochet. On peut faire balancer la bille au bout de son fil (**en l'écartant peu** de la verticale). Elle met un certain temps pour faire un aller-retour. Si nous allongeons le fil, ce temps s'allonge. Nous définissons un protocole d'expérience en décidant : - de faire plusieurs mesures, avec des longueurs de fil de 0,50 mètre, 1 mètre, 1,5 mètre... - Et pour chaque longueur, on notera le temps mis par la bille pour faire un aller-retour. Pour que le résultat soit plus précis, on détermine le temps mis pour faire 10 balancements, et on le divise par 10. On réalise ces expériences, et on note les temps mesurés dans un tableau.

Après cette analyse, on tente de formuler des lois. Dans l'exemple donné, on remarquera qu'on obtient toujours le même nombre (à peu près 4,025) si on divise le carré du temps par la longueur du fil. On va considérer cette relation comme une loi potentielle, qu'il convient de valider. On refait des expériences, en variant la longueur du fil, et chacune doit vérifier la loi.

L'essentiel est que ces expériences doivent être reproductibles, par d'autres personnes, en d'autres lieux. Si les lois obtenues sont contredites par une seule autre expérience, elles sont abandonnées. Cette méthode permet d'avancer vers une connaissance de plus en plus fine et de plus en plus correcte de la nature. Dans notre exemple, il convient de refaire les mesures avec des fils de toutes longueurs, et en tout lieu : on confirmera la relation, si on s'en tient à des mesures simples, disons au dixième de seconde près. Si on augmente la précision des mesures, on s'apercevra que la loi reste vraie dans son principe, mais que la valeur obtenue peut varier d'un lieu à l'autre : ce n'est pas partout exactement 4,025. Il conviendrait donc de raffiner la loi, de la préciser pour qu'elle tienne compte d'un facteur secondaire qu'on avait ignoré jusque là, et incorporé dans cette faussse constante. Les scientifiques ont le courage d'énoncer et de publier des lois précises, vérifiables (ou réfutables...) par tout le monde. D'ailleurs, pour être un grand scientifique, il est bon de réfuter une théorie antérieure, et de proposer la sienne, qui va plus loin dans son adéquation avec la Nature.

Nous verrons plus loin l'explication du mouvement des planètes, mais historiquement, les choses se sont passées ainsi :

- d'abord, constatation que les planètes tournent autour du soleil, sans savoir pourquoi (Copernic) ;
- puis, établissement des lois de Kepler, formules mathématiques permettant de faire des calculs, pour représenter les mouvements, sans savoir pourquoi ;
- ensuite, une première explication formulée par Newton, avec la notion de force, mystérieuse action à distance instantanée ;
- enfin, la théorie géométrique d'Einstein, qui raffine la théorie de Newton, tient compte d'effets secondaires, la précise et lui donne une base plus claire.

L'Histoireen est là, peut-être n'est-elle pas finie...

Notre propos sera donc d'expliquer tout cela, avec les méthodes scientifiques disponibles aujourd'hui. Nous proposerons quelques expériences simples pour aider la compréhension.

Pour en finir avec la méthode scientifique, rappelons qu'il ne faut pas confondre Astronomie et astrologie. L'astrologie **n'est pas** une science, même si elle s'affuble parfois de ses oripeaux. Elle ne fait aucune expérience, elle ne se base que sur une connaissance encyclopédique, empirique, venue de la nuit des temps, sans en maîtriser l'origine. **Rien n'est reproductible**. Mars est associée au sang, à la guerre, à cause de

sa couleur rouge... due à des oxydes de fer ! L'analogie de couleur a donné toute une interprétation, qui n'a plus aucun sens depuis qu'une sonde a analysé le sol de la planète. L'astrologie est basée essentiellement sur l'ignorance.

Les énoncés des astrologues sont toujours vagues. Ils font intervenir des paramètres divers, **selon les circonstances**. Leurs prédictions sont assez floues pour masquer leurs erreurs. Une expérience a été faite dans une université américaine : une lettre personnalisée a été adressée à une centaine d'étudiants, en leur demandant si le portrait qu'elle dressait, étanli d'après leur date de naissance, leur était ressemblant. 90 % d'entre eux ont répondu oui... alors que le portrait était le même pour tous !

Plus grave, l'astrologie ignore les réalités astronomiques sur lesquelles elle prétend se baser, et nous verrons plus loin que même les signes du zodiaque ne correspondent plus maintenant à leur constellation ! Le succès de l'astrologie est dû au flou qui entoure toujours ses prédictions, permettant d'interpréter *a posteriori* de la manière la plus favorable. C'est le contraire de la Science, dont les règles rigoureuses sont sans ambiguité : elles expliquent correctement les phénomènes de la Nature, ou pas.

La notion de science que nous avons maintenant s'est forgée lentement au cours des siècles. Tout ce qui touche au ciel (auquel on n'a pas accès) a toujours eu une connotation magique, religieuse. Kepler, l'un des premiers qui ait appliqué des méthodes scientifiques, qui nous a donné les lois régissant le mouvement des planètes, n'a pas échappé à cette tendance, et il a gagné sa vie en... rédigeant des horoscopes ! Mais à côté de cette activité lucrative, il a fait une immense œuvre scientifique : avant lui, la seule explication possible du ciel était religieuse, tirée de la Bible qu'il fallait lire littéralement (création du ciel et de la Terre, de la Lune et des étoiles, puis de l'Homme, en 7 jours ; âge de la Terre déduit des générations de personnages bibliques...).

Claude Ptolémée, dans l'Antiquité, a défini un système du monde, constitué de cercles (seule courbe parfaite) parcourus par les planètes d'un mouvement uniforme (mouvement parfait). Comme les vrais mouvements ne sont pas uniformes, il a dû compliquer son système en plaçant le centre d'un cercle sur un autre cercle... Pour lui, Soleil, Lune, planètes, étoiles, tournaient autour de la Terre ! En accord avec les apparences immédiates... Cette analyse ne permettait pas de prédire correctement les positions des planètes. Le système géocentrique (la Terre au centre) de Ptolémée, qui n'explique rien, mais se contente de décrire les apparences, était acceptable pour les religieux, et a été le seul enseigné pendant tout le Moyen Age. Dommage, car Aristarque de Samos avait déjà compris que la Terre tourne autour du Soleil en 280 avant JC...

Kepler a montré qu'une étude raisonnée pouvait être plus fructueuse, puisqu'elle lui a permis de découvrir les lois du mouvement. Mais il a dû faire preuve pour cela d'une grande indépendance d'esprit. On sait ce qu'il pouvait en coûter, en pensant au procès de Galilée, et à la fin tragique de Giordano Bruno.

Maintenant, admettons que la Science n'est pas la Vérité !

La Science est la **recherche** de la vérité. Ce n'est pas du tout la même chose... Ce que nous croyons aujourd'hui en matière scientifique n'attend qu'une réfutation future... Mais la réfutation d'une loi porte en germe l'ouverture vers d'autres lois, voire vers d'autres branches de la science. C'est ce qui est arrivé au début du XX$^{me}$ siècle. A la fin du siècle précédent, la Physique était achevée ! Tout était connu et compris..., sauf trois petits détails insignifiants :

- l'avance du périhélie de Mercure,
- le rayonnement du corps noir,
- et l'effet photoélectrique.

Un astrologue aurait invoqué des influences mauvaises, les scientifiques en ont tiré la Mécanique Quantique, la Relativité Restreinte et la Relativité Générale. Une vision complètement nouvelle du Monde, un bouleversement si riche qu'il permet en particulier d'envisager une compréhension globale de l'Univers ! Des applications qui permettent de fabriquer des lasers (optique quantique), des téléviseurs (relativité restreinte dans les écrans vidéo), des GPS (relativité générale)... Sans ces trois petits détails et leurs conséquences, notre vie quotidienne ne serait pas ce qu'elle est. Mais pour en arriver là, il a fallu se remettre totalement en question. Ce qui est le propre des scientifiques, ou plus précisément de la méthode, du système scientifique.

Les scientifiques ne sont pas parfaits, ils commettent sans cesse des erreurs, mais **la méthode scientifique porte en elle les moyens de corriger ses erreurs**.

Laissons donc les aspects religieux ou ésotériques pour essayer de comprendre la réalité de l'Univers qui nous entoure. Tout le monde a entendu parler de planètes, de satellites, de nébuleuses, de galaxies, de quasars, de trous noirs... Ces mots sont apportés par certains journalistes qui font œuvre louable en parlant de science de temps en temps, mais attention aux erreurs parfois (souvent ? ! ) commises. Le but de ces notes sera d'expliquer progressivement toutes ces notions mais... commençons par ce qui nous entoure !

## *Regarder le ciel*

### L'instrument d'observation : l'œil

L'œil est le premier instrument d'observation, et le seul pour la plupart des gens ! Et le seul pendant des millénaires... Il faut apprendre à s'en servir.

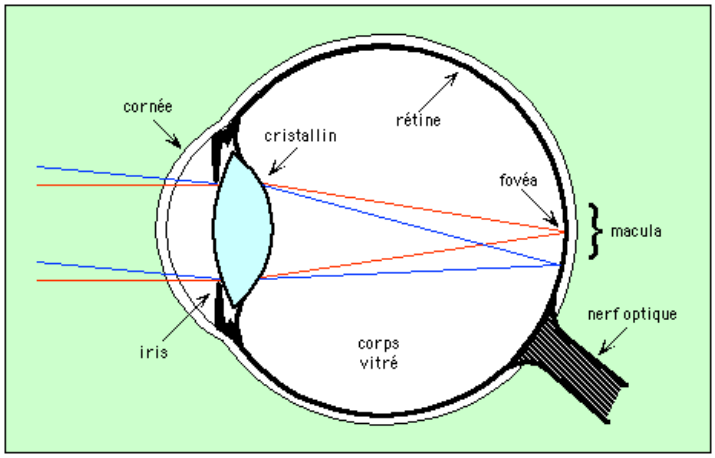
Tout d'abord, savoir qu'il n'est pas parfait, même quand on est tout jeune...

Pensez à une voiture qui vient vers vous la nuit, dans une vaste plaine (pas forcément morne...) : de très loin, vous voyez la tache de ses phares... LA tache ? Elle a pourtant DEUX phares ! Mais maintenant qu'elle s'approche en effet, vous en voyez deux. Vous ne vous êtes jamais posé de question à ce sujet ? C'est tellement naturel, qu'on n'y prête aucune attention, et pourtant, il y a une explication.

### Constitution de l'œil

L'œil comprend une lentille convergente, le cristallin, et une surface sensible, la rétine, sur laquelle se forment les images (il a la même structure

qu'un appareil photo, à moins que ce soit l'inverse).




La rétine est constituée de minuscules cellules juxtaposées, sensibles à la lumière. Chacune indique au cerveau si elle reçoit de la lumière. Le schéma montre que les images de deux étoiles, une bleue et une rouge, vont se former sur la rétine.

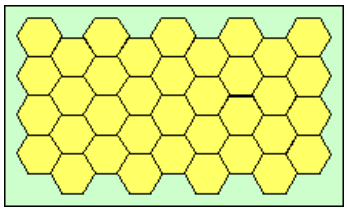
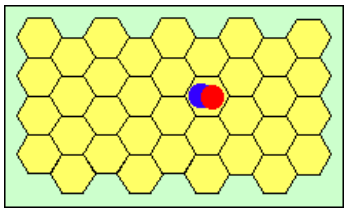
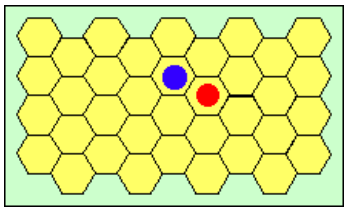


Schéma de la rétine, montrant les cellules sensibles juxtaposées.



Deux images se forment sur la même cellule ; on ne voit qu'un seul point.



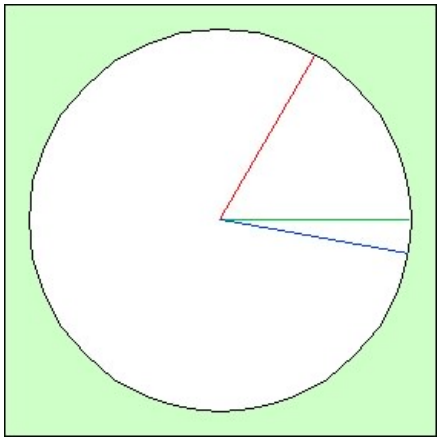
Les deux images sont plus éloignées, et excitent deux cellules différentes. Elles sont bien visibles **séparément**.

L'œil peut donc distinguer séparément deux objets à condition que leurs images se forment sur deux cellules différentes. Sinon, la seule cellule touchée indiquera au cerveau qu'il voit un seul objet. La taille des cellules de la rétine fait que l'œil peut distinguer deux objets à condition qu'ils soient séparés par un angle d'au moins 1' (lire : *une minute*). Lorsque la voiture est trop loin (disons au moins 5 km), l'angle sous lequel on voit ses phares est plus petit que 1', et donc les images des deux phares tombent sur la même cellule de la rétine ; nous ne voyons qu'une seule tache lumineuse.

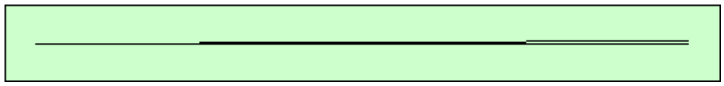
Reprenons la voiture au loin, mais observons-la maintenant avec des jumelles. Nous allons bien distinguer les deux phares. On dit qu'un instrument d'optique a un *pouvoir séparateur*. Cette locution imagée (naturellement ! ) indique qu'il est capable de vous montrer deux objets, et non un seul, là où il y en a effectivement deux. Les jumelles ont un pouvoir séparateur meilleur que l'œil. Un grand télescope a un pouvoir séparateur encore meilleur que des jumelles. En d'autres termes, cela signifie qu'il nous permettra de voir de plus petits détails. Dans le ciel, il y a de nombreuses étoiles doubles, et il faut parfois de puissants instruments pour les distinguer.

Ceci étant, le pouvoir séparateur de l'œil est d'une minute d'arc (notée 1')... La belle affaire !

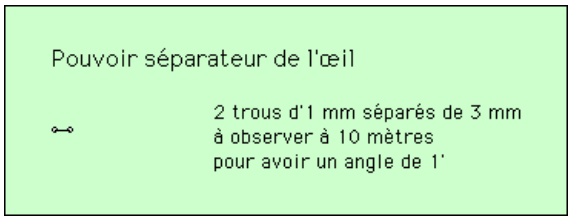
- le cercle est divisé en 360°, (lire : 360 degrés d'arc, ou simplement 360 degrés) ; chaque degré est divisé en 60' (lire : 60 minutes d'arc, ou simplement 60 minutes) et chaque minute est encore divisée en 60" (lire : 60 secondes d'arc, ou simplement 60 secondes). Il y a donc 360 × 60 = 21.600' dans le cercle, ou bien 360 × 60 × 60 = 1.296.000". Mais ceci n'est pas très parlant ;
  Pour comprendre, voici un cercle avec trois rayons. L'angle entre les rayons rouge et vert vaut 60°, et celui entre les rayons vert et bleu vaut 10°. Cette dernière valeur représente donc, à nos yeux, un petit angle.



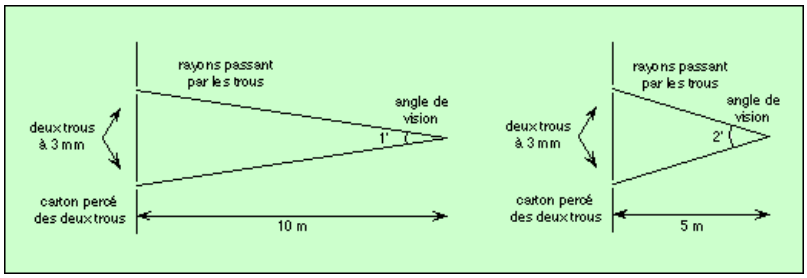
- la pleine lune a un diamètre apparent de 30' ; donc à l'œil nu, on peut y voir des détails trente fois plus petits qu'elle-même ;
- 1' correspond à l'angle sous lequel on voit une pièce de 1 euro (23 mm) à 79 mètres...
- l'angle formé par les deux lignes ci-dessous fait à peu près 20' :



**Expérience** : Réalisez le schéma ci-dessous sur du papier fort, et percez les deux trous représentés sur le dessin. Ils doivent être séparés de 3 mm (entre les centres des trous).




Placez une ampoule derrière, et observez à 10 mètres... Vous aurez la même sensation qu'en regardant deux étoiles séparées d'une minute d'arc.




Si vous ne distinguez qu'un seul trou, c'est que vous êtes au-dessous du pouvoir séparateur de votre œil. En vous rapprochant (partie droite du schéma ci-dessus), vous augmenterez l'angle entre les trous et vous arriverez à les distinguer.

Voici l'angle sous lequel on voit les deux trous, selon la distance à laquelle on se trouve :

| **distance** | 20 m | 15 m | 10 m | 7 m | 5 m | 3 m | 2 m | 1 m |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **angle** | 30" | 40" | 1' | 1' 30" | 2' | 3' 30" | 5' 10" | 10' 20" |

Le pouvoir séparateur de l'œil normal est d'une minute d'arc, mais de multiples défauts peuvent l'altérer.

Le but d'un instrument astronomique est d'augmenter l'angle sous lequel on voit un objet, pour le faire passer au-dessus du pouvoir séparateur de l'œil. Ce qui nous donne l'impression de nous en rapprocher !

**Vision nocturne**

La rétine est constituée de deux sortes de cellules sensibles différentes, les **cônes** et les **bâtonnets**. Les premières détectent la couleur, mais sont relativement peu sensibles, elles servent en vision diurne. Les autres ne voient pas la couleur, mais sont très sensibles à la moindre lumière. Elles sont disposées différemment dans la rétine :

- La plus grande partie de la rétine ne contient que des bâtonnets ;
- Le fond, où se forme l'image d'un objet qu'on regarde en face, contient essentiellement des cônes. On le nomme **macula** (tache) ;
- Le centre de la macula (fovéa) ne contient que des cônes, aveugles la nuit, mais donne la finesse maximum en pleine lumière.

Ainsi, dans des conditions de faible éclairement, ce seront les bâtonnets qui nous permettront de voir, mais en noir et blanc... Ce n'est pas pour rien que la nuit, tous les chats sont gris !

Ces rapides explications vous permettront de comprendre un phénomène bien connu des astronomes : lorsque vous regardez un objet vraiment faible, il ne faut pas chercher à le regarder bien en face, en centrant son image sur la *fovea*, au centre de la rétine. Il vaut mieux regarder un peu à côté, comme pour l'ignorer... Ce seront alors les bâtonnets sensibles qui agiront, et vous aurez la surprise de bien le distinguer... sans couleurs évidement.

La rétine contient 130 millions de bâtonnets, mais seulement (!) 6.500.000 cônes ! Résumons :

| **bâtonnets** : | faible performance | grande sensibilité | partout | noir et blanc | vision nocturne | vision *scotopique* |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **cônes** : | hautes performances | faible sensibilité | au centre de la rétine | couleur | vision diurne | vision *photopique* |

*Scotopique* est synonyme de nocturne, et *photopique* est synonyme de diurne. Ce sont les termes savants... pour mémoire.

## *Lieu d'observation*

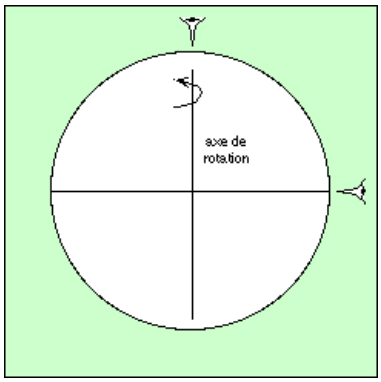
**La Déclaration Universelle des Droits des Astronomes n'est pas encore signée !**

Certains prétendent qu'il y a une difficulté majeure pour la signature. Laquelle ? Nous allons faire une petite expérience :

Placez-vous au centre d'une pièce. Penchez la tête en arrière pour voir le plafond juste au-dessus de vous. Maintenant, tournez sur vous-même : vous voyez toujours la même chose (le plafond et le haut des murs), seule l'orientation change.

Mettez maintenant la tête à l'horizontale : vous voyez une partie du plafond, le mur qui vous fait face, et une partie du plancher. Tournez ; vous voyez à mesure les autres parties du plafond, les autres murs, et les autres parties du plancher !

Donc, si votre regard se porte **perpendiculairement à l'axe de rotation** (deuxième cas), vous découvrirez en tournant la totalité de ce qui vous entoure. Les astronomes se trouvant à différents endroits de la Terre sont confrontés à ce phénomène :




Au pôle (Nord), le regard dirigé vers le ciel est dans l'axe de rotation, on voit la moitié (Nord) de la sphère céleste, qui tourne par rapport au sol. L'autre moitié (Sud) est inaccessible au-dessous de l'horizon !
A l'équateur, le regard tourné vers le ciel est perpendiculaire à l'axe de rotation. Chaque nuit on ne voit qu'une moitié du ciel, mais le déplacement annuel de la Terre autour du Soleil nous présente successivementtoutes les parties de la sphère céleste.
Lorsque les transports étaient lents et hasardeux, on construisait les observatoires là où on était, et s'accomodait des conditions locales. Avec les progrès techniques, il est devenu intéressant de les construire près de l'équateur.
A l'équateur même, les étoiles proches des pôles ne seraient jamais observables correctement, toujours noyées dans les brumes de l'horizon. Les grands observatoires ont donc été construits aux latitudes moyennes, dans les deux hémisphères.

Aujourd'hui, les choses changent encore. En Antarctique, on dispose d'une nuit de cinq mois, pendant laquelle des observations pourront se poursuivre très longtemps, sans interruption par le Soleil. Et pendant l'été austral, c'est le Soleil lui-même qui peut être observé 24 heures sur 24. Bien que les conditions climatiques y soient sévères, des projets sont en cours de réalisation.

**Pollution lumineuse**

La proximité des grandes villes interdit l'observation astronomique, par la quantité de lumière que les divers éclairages jettent dans le ciel. Depuis l'espace, de nombreuses photographies de la Terre ont été faites de nuit ; il est impressionnant de voir les taches lumineuses associées aux grandes villes et aux agglomérations. La région de Londres est particulièrement brillante. Seuls certains déserts, comme le Sahara, sont pour le moment épargnés. Il est bien évident que les grands télescopes, qui chassent la moindre goutte de lumière tombant des étoiles, ne peuvent supporter un tel voisinage.



Signalons une initiative très intéressante : *l'Association Nationale pour la Protection du Ciel et de l'Environnement Nocturnes* (ANPCEN), travaille pour la protection du ciel, au bénéfice des astronomes, mais aussi des animaux qui disparaissent en masse à cause des éclairages. Cette association propose aux communes d'améliorer leur éclairage, à effet de diminuer fortement la consommation électrique, ainsi que la pression humaine sur l'environnement pour la production d'énergie.

Le 26 avril 2008, Le Rove, près de Marseille, a signé la charte du ciel nocturne proposée par cette association, à la suite de Rocbaron, dans le Var (18 août 2007). Espérons que beaucoup d'autres suivront rapidement cet exemple...

**Turbulence atmosphérique**

Il reste encore une difficulté, et non des moindres. Elle est induite par l'atmosphère. C'est la turbulence qui affecte les images. On peut s'en faire une idée en observant une route surchauffée en été. On voit l'air chaud qui tremble au-dessus, et qui déforme les objets situés plus loin. Ce phénomène se produit également dans les couches de l'atmosphère au-dessus de nos têtes, et fait trembler les images. C'est lui qui produit le scintillement des étoiles. Il limite le pouvoir séparateur d'un instrument à 0,5" au mieux. Cette limite est le seeing.

Pour diminuer l'importance de la turbulence, la solution la plus simple consiste à diminuer l'épaisseur de l'atmosphère, ce qui se réalise très facilement en installant les télescopes à haute altitude.

Un autre avantage de l'altitude se trouve dans la grande sécheresse de l'air. La vapeur d'eau présente dans les basses couches de l'atmosphère gêne les observations en filtrant certaines radiations, et par son dépôt sur les instruments sous forme de rosée. Enfin, en se condensant, elle produit les nuages. A haute altitude, on se trouve souvent au-dessus des nuages.

**Lieux favorables**

Pour trouver un site favorable à l'observation, il faut découvrir un endroit où :

1. le temps est toujours beau (absence de nuages),
2. la vapeur d'eau est presque absente de l'atmosphère (observations en IR),
3. l'atmosphère est la plus légère possible (il n'en reste plus que la moitié au-dessus de 4.000 m),
4. le ciel est accessible dans sa plus grande partie (proche de l'équateur),
5. la présence humaine (lumières) est quasiment nulle,
6. la turbulence est minimale.

Le beau temps (1) et l'absence de vapeur d'eau (2) indiquent les déserts (qui satisfont 5). D'ailleurs, les déserts se trouvent dans la zone équatoriale (4 en plus). Plus on s'élève en altitude, plus la couche d'atmosphère au-dessus de la tête diminue (3). Enfin, la proximité de la mer assure une stabilité des températures, et par conséquent des différences faibles entre jour et nuit. Ceci est favorable pour diminuer la turbulence (6). Au bout du compte, les déserts proches de la mer et à haute altitude sont les régions les plus indiquées pour installer les observatoires modernes.

En résumé, les meilleurs sites se trouveront donc en altitude, proches de la mer (ou en plein milieu, sur une île...), loin des villes et dans une zone au climat désertique.

Il y a des lieux sur Terre qui conjuguent ces trois conditions :

- les grands volcans, dans les îles Hawaii (Mauna Kea, 4.200 m...) ;
- les Canaries (Roque de los Muchachos, 2.600 m) ;
- le désert d'Atacama, dans la Cordillère des Andes, au Chili (La Silla 2.400 m, Cerro Tololo 2.400 m, Cerro Paranal 2.635 m...).

Dans ces zones, l'air est très sec, la turbulence atmosphérique très faible, et les nuages rares. Aucune grande ville ne se trouve à proximité. Presque tous les grands télescopes modernes sont installés en ces lieux. Au Cerro Paranal, on atteint les 360 nuits de beau temps par an !!

Les sites d'Amérique du sud sont toutefois sujets à des séismes fréquents, car situés sur une plaque tectonique (Nazca) en mouvement. Les coupoles du VLT ont été construites aux normes antisismiques...

Pour être complet, il faut toutefois signaler un nouveau lieu d'excellente qualité : c'est l'Antarctique ! La nuit y dure 6 mois, autorisant des observations de très longue durée... Le froid glacial qui y règne pendant la nuit (c'est-à-dire pendant l'hiver), supprime toute vapeur d'eau dans l'atmosphère. L'altitude y est élevée : 3.000 mètres au Dôme C. Toutes ces conditions sont parfaites pour l'astronomie, à la condition de protéger le matériel... et les astronomes, du froid. Une étude précise faite par Eric Fossa (Observatoire de Nice) indique qu'au niveau du sol (pardon, de la glace), la turbulence est très élevée, rendant toute observation illusoire (vents catabatiques). Mais à une vingtaine de mètres au-dessus du sol, l'air est d'une stabilité impressionante, meilleure que dans tous les autres sites mondiaux. Malgré les difficultés très grande d'installation d'un observatoire sur pilotis dans un tel lieu, Eric Fossa pense bien parvenir à réaliser son rêve d'observatoire vraiment austral !

Maintenant, nous savons l'essentiel sur la constitution de notre œil, et nous savons où mettre nos télescopes. Il est temps de s'intéresser aux messages que les astres nous envoient, tout d'abord la lumière visible.

**La lumière**

La lumière est restée le seul moyen de connaissance de l'Univers, jusqu'au XX$^{me}$ siècle. Ses propriétés ont été exploitées à fond par les astronomes pour en tirer la position, la couleur, la température, la composition chimique, le magnétisme, la vitesse... des étoiles et des objets plus curieux qu'ils ont découverts par la suite.

Plus généralement, la lumière n'est qu'un rayonnement électromagnétique parmi tant d'autres, et nos moyens modernes d'observation nous permettent de les utiliser tous. Chaque gamme donne des renseignements particuliers, et l'ensemble nous permet d'atteindre une grande richesse d'information sur les objets qui nous entourent. Les rayons électromagnétiques sont assez complexes pour porter un grand nombre d'informations, de natures diverses.

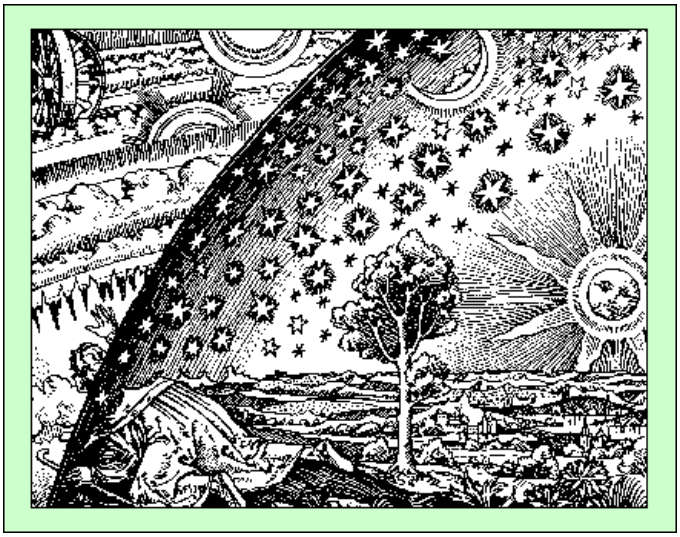
Depuis les années 1920, la théorie de la Relativité d'Einstein permet de comprendre l'état actuel et l'évolution de l'Univers dans son ensemble. Cette théorie est basée sur la vitesse de la lumière, qui est très proche de 300.000 kilomètres par seconde.

A cette vitesse, la lumière met 1,3 secondes pour aller de la Terre à la Lune, 8 minutes pour aller du Soleil à la Terre, 6 heures pour aller du Soleil à Pluton...

Mais elle met 4,2 années pour nous parvenir de l'étoile la plus proche. Ceci a une conséquence très importante : nous voyons l'étoile la plus proche non telle qu'elle est actuellement, mais telle qu'elle était il y a 4,2 années !

Et plus on voit loin, plus les objets qu'on observe sont vieux. Les objets les plus lointains qu'on puisse voir actuellement sont situés à près d'une dizaine de milliards d'années-lumière, autant dire qu'on les voit maintenant tels qu'ils étaient il y a une dizaine de milliards d'années. Beaucoup de ces objets ont sans doute disparu, en tout cas ils ont considérablement évolué depuis, mais nous ne pouvons pas le savoir.

Toutefois, en observant des objets à des distances différentes, donc à des âges différents, on peut arriver à reconstituer leur évolution. Supposez que vous ignoriez tout des arbres, et qu'on vous emmène dans une forêt. Il vous serait assez facile de reconnaître des sapins (par exemple), même s'ils sont tous d'âges différents. Vous auriez vite compris comment ils poussent.



Le système de l'Univers, dessin du Moyen-Age

A l'heure actuelle, nous disposons d'instruments capables de capter tous les rayonnements électromagnétiques (presque...), depuis les ondes radio jusqu'aux rayons gamma. Il se trouve que les astres émettent toutes ces sortes d'ondes, chacun ayant une gamme de fréquences déterminée par sa nature physique, et par l'énergie disponible. Beaucoup de ces rayonnements ne parviennent pas au sol, car ils sont arrêtés par l'atmosphère. Il faut donc construire des observatoires orbitaux capables de travailler dans ces domaines d'ondes. Toute une nouvelle branche de l'astronomie s'est constituée depuis l'avènement des fusées et des satellites.

**Terre, Lune et Soleil**

Quand on regarde le ciel, on peut y voir deux objets montrant une surface sensible : la Lune et le Soleil (il en existe trois autres, la galaxie d'Andromède dans l'hémisphère nord, et les deux galaxies satellites de la nôtre, le Grand et le Petit Nuage de Magellan, dans l'hémisphère sud).

Tout le reste se présente comme de simples points lumineux plus ou moins brillants.

Ces points lumineux conservent toujours les mêmes positions relatives. Ils forment sur le ciel des dessins plus ou moins évidents, qu'on a nommés *constellations*. L'ensemble constitue la *sphère des fixes* des Anciens.

Mais 5 points lumineux se particularisent : ils se déplacent par rapport à la sphère des fixes. Pour cela, les Grecs les ont nommés *planètes*, mot qui signifie *astre errant*. Remarquez qued'après cette éthymologie, le Soleil et la Lune sont aussi des planètes ; mais cette appellation, basée sur le seul mouvement et faisant fi desprofondes différences physiques, n'est plus de mise en astronomie.

Dans cette belle ordonnance du ciel, il arrive parfois qu'un intrus apparaisse : les *comètes* ne pouvaient donc qu'être maléfiques, annonciatrices de guerres ou de calamités (mais des guerres, il y en a malheureusement toujours une pour associer à une comète, et si jamais il n'y en avait pas, une simple sécheresse, une gelée tardive au printemps... permettait de justifier ce caractère maléfique des comètes).

Il reste enfin un phénomène rare, celui des *novæ* (pluriel de *nova* = nouvelle). Ce sont des étoiles qui explosent, et deviennent subitement beaucoup plus lumineuses, permettant de les voir à l'œil nu. Les chinois les appelaient joliment *étoiles invitées*.

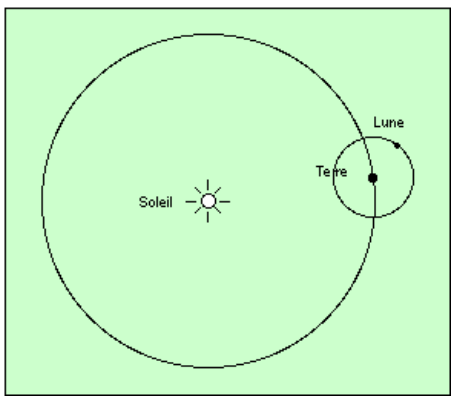
Voilà donc le ciel des Anciens (il y a sans doute encore beaucoup d'Anciens à l'heure actuelle, qui n'ont jamais cherché à en savoir davantage... et qui en restent aux apparences).

Jusqu'au Moyen Age, la Terre était souvent vue plate, et n'avait rien de commun avec la Lune ou le Soleil. Mais maintenant nous savons bien que c'est une sphère (certains grands esprits de l'Antiquité le savaient déjà, voir la fiche historique).

La Terre est une planète. Une planète est un corps qui ne produit pas de lumière, par opposition aux étoiles. La Terre tourne autour du Soleil, qui est une étoile.

La Lune est un satellite de la Terre (elle tourne autour de la Terre). Un satellite (naturel) est un corps semblable à une planète, mais qui tourne autour d'une planète.

La Lune nous paraît grosse car elle est relativement proche. Pour l'instant, nous ne nous occuperons que de la Terre et du Soleil.




## *Les lois du mouvement*

**Expérience**

Lançons une bille d'acier sur une table horizontale bien lisse, elle continue en ligne droite. Si nous voulons qu'elle aille plus vite, il faut la pousser encore. Si nous voulons qu'elle aille moins vite, il faut la freiner. Donc, pourquoi s'arrêterait-elle ? Simplement parce qu'il y a une force invisible, occasionnée par les frottements sur la table et la résistance de l'air. On peut diminuer les frottements en remplacant la table par un marbre très bien poli. Si on pouvait supprimer totalement les frottements, la bille continuerait indéfiniment en ligne droite. C'est le *principe d'inertie* :

**Un corps, non soumis à des forces extérieures,**
**continue indéfiniment son mouvement uniforme en ligne droite**

Ce principe a été découvert par Galilée. Vous pourrez trouver des détails dans le chapitre Relativité Galiléenne.

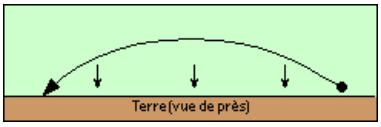
Plaçons un aimant sur la table. Plaçons ensuite la bille d'acier à quelque distance, et lâchons-la sans la lancer. La bille se met en mouvement en direction de l'aimant, elle va de plus en plus vite et fini par se coller à l'aimant. **L'aimant exerce donc une attraction sur la bille**.

Laissant l'aimant sur la table, lançons la bille. Pour respecter le principe d'inertie, elle devrait aller tout droit. Pour répondre à l'attraction de l'aimant, elle devrait aller vers lui. **Elle va concilier les deux en suivant une trajectoire courbée**.

Les planètes sont soumises à des lois semblables :

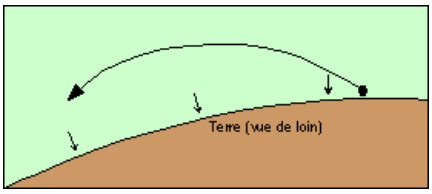
- le Soleil exerce sur elles une *attraction gravitationnelle*, qui ressemble à l'attraction de l'aimant sur la bille ;
- lancée sur son orbite, la planète devrait aller tout droit pour satisfaire au principe d'inertie. Mais attirée par le soleil, sa course est infléchie, et elle tourne autour.

**Mouvement d'un satellite**

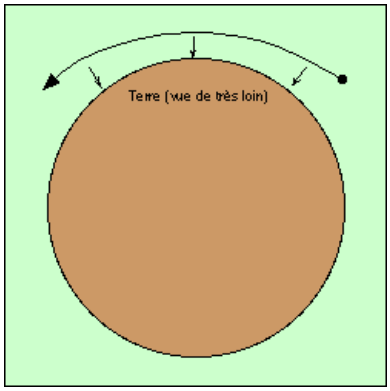



A toute petite échelle, on voit la Terre plate. On lance un caillou, il va retomber un peu plus loin en décrivant une belle courbe (une parabole).

A échelle régionale, si on lance une petite fusée, disons avec une vitesse de 5.000 km/h, elle va suivre une même trajectoire, mais plus grande.




La Terre étant courbée, elle retombera beaucoup plus loin. Remarquez les flèches, qui indiquent la direction de la pesanteur : au-dessus, elles semblaient parallèles. Ici, elles ne le sont manifestement plus.




Enfin, si nous lançons maintenant une fusée à plus de 28.000 km/h, elle va aller tellement loin, qu'elle va passer de l'autre côté de la Terre. Et là, elle va encore tomber sur la Terre, mais celle-ci étant toute ronde se dérobe sans cesse ! Ainsi, la fusée n'arrivera plus à retomber sur la Terre, elle va devoir tourner autour... Les flèches indiquant la direction de la pesanteur sont dirigées vers le centre de la Terre.

Un satellite est donc un objet en chute libre, dont le corps attracteur se dérobe sans cesse par sa forme ronde.

Entre la première expérience et la dernière, la forme de la courbe change un peu : d'une parabole, elle passe à une ellipse. Ce changement est dû à la direction de la pesanteur : lorsqu'on peut considérer la pesanteur toujours dans la même direction (premier schéma), le mouvement est une parabole ; lorsque la direction de la pesanteur varie le long de la trajectoire, toujours dirigée vers le centre de la Terre, c'est une ellipse. Mais ce sont deux courbes très proches, on les appelle généralement des coniques. Ce nom générique vient de leur découverte : ellipse, parabole et hyperbole sont les courbes que l'on obtient en coupant un cône par un plan. Le cercle n'est qu'un cas particulier d'ellipse, où l'excentricité est nulle (le plan de coupe est perpendiculaire à l'axe du cône).

**La Gravitation Universelle**

C'est l'attraction gravitationnelle qui agit sur nous et nous plaque au sol. Autrefois, on ne se posait pas de questions : on imaginait la Terre plate, et il était évident qu'il y avait le **haut** et le **bas**. Lorsqu'on a pensé que la Terre pourrait être ronde, on ne comprenait pas comment les Chinois pouvaient marcher la tête en bas !

L'explication est que la Terre attire tout à elle par la gravité. Qu'on soit en France ou aux antipodes, on est attiré vers le **centre** de la Terre, et le bas est toujours du côté de ce centre, donc du sol. Par analogie, la bille se dirige vers l'aimant, quel que soit le côté où on la lâche.

On dit que la gravité est universelle, parce que c'est une propriété de la matière : tout objet matériel attire tous les autres. La pomme de Newton

attire la Terre proportionnellement à sa masse qui est très faible. La Terre attire la pomme proportionnellement à sa masse qui est très grande. Le résultat est que la pomme tombe vers la Terre beaucoup plus que ce que la Terre tombe vers la pomme !

Une autre analogie aide à comprendre : si on se trouve dans une petite barque, et que l'on pousse le quai à l'aide d'un aviron, la petite barque va s'éloigner du quai qui ne bouge pas (presque). Si au lieu de pousser le quai, on pousse une grosse barque, on verra la grosse barque se déplacer un peu !<:p>

Reprenons la bille.

Lâchons-la sans vitesse à diverses distances de l'aimant. Elle est attirée plus ou moins fortement : de plus près, la force est plus importante.

Si nous la faisons passer près de l'aimant, elle subira une grande force, et tombera dessus. Pour éviter cela, il faut la lancer plus vite, l'inertie sera alors suffisante pour lui éviter de tomber.

Il en va de même de l'attraction gravitationnelle : le Soleil attire les planètes vers lui, d'autant plus fortement qu'elles sont plus proches. Par conséquent, pour ne pas tomber sur le Soleil, une planète proche doit tourner plus vite qu'une planète lointaine. On peut vérifier cela sur le tableau suivant, qui donne la liste des 9 planètes principales avec leurs caractéristiques orbitales :

| planète | distance | | vitesse km/s | année | inclinaison équateur | inclinaison orbite | excentricité |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | millions de km | UA | | | | | |
| **Mercure** | 58 | 0,39 | 48 | 88 j | 7° | 7° | 0,21 |
| **Vénus** | 108 | 0,72 | 35 | 224 j | 3° 4' | 3° 23' | 0,01 |
| **Terre** | 150 | 1 | 30 | 365 j | 23° 26' | 0° | 0,02 |
| **Mars** | 228 | 1,52 | 24 | 1 an 321 j | 23° 59' | 1° 51' | 0,09 |
| **Jupiter** | 778 | 5,19 | 13 | 11 ans 314 j | 3° 5' | 1° 18' | 0,05 |
| **Saturne** | 1.430 | 9,53 | 9,6 | 29 ans 167 j | 26° 44' | 2° 29' | 0,06 |
| **Uranus** | 2.876 | 19,2 | 6,8 | 84 ans 7 j | 97° 55' | 0° 46' | 0,05 |
| **Neptune** | 4.506 | 30 | 5,4 | 164 ans 280 j | 28° 48' | 1° 46' | 0,01 |
| ***Pluton*** | 5.914 | 39,4 | 4,7 | 248 ans 157 j | 122° | 17° 12' | 0,25 |

**tableau I**

Dans ce tableau, UA signifie Unité Astronomique. Nous l'expliquerons plus loin, mais disons simplement que c'est la distance de la Terre au Soleil. Dans cette unité, on voit très facilement que Neptune est 30 fois plus loin du Soleil que nous. Brrr...

Pour la durée de l'année, il faut remarquer que deux phénomènes vont dans le même sens :

- plus on est loin du Soleil, plus la distance à parcourir pour faire un tour est grande. C'est comme pour un coureur de fond qui a davantage de chemin à parcourir quand il est à l'extérieur que quand il est à la corde. A vitesse égale, on mettrait donc plus de temps ;
- mais d'autre part, plus on est loin moins on va vite ! Neptune se déplace presque 10 fois plus lentement que Mercure.

Pour parcourir un chemin beaucoup plus grand à une vitesse plus faible, il faudra beaucoup, beaucoup plus de temps. C'est bien ce que l'on voit aussi sur le tableau.

Le dieu Mercure est toujours représenté avec de petites ailes aux pieds. Il est donc bien choisi pour représenter la championne des planètes !

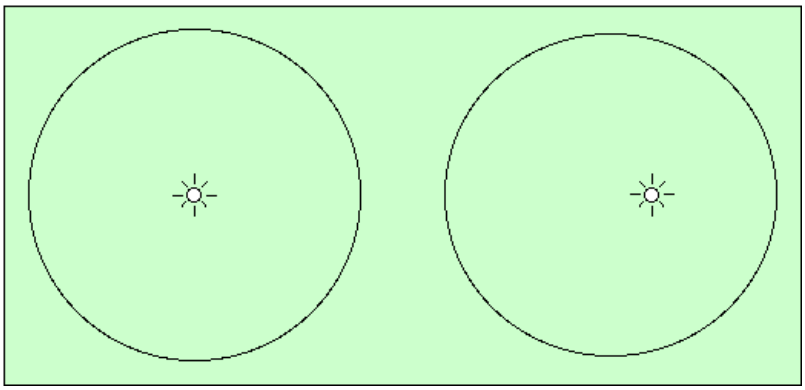
Quand à Pluton, son nom est placé en italique, parce que l'Union Astronomique Internationale a décidé de la déclasser ! Pluton n'est plus considéré comme une planète, mais simplement une planète naine parmi de nombreuses conseurs. On verra ceci en temps utile.

**Orbites des planètes**

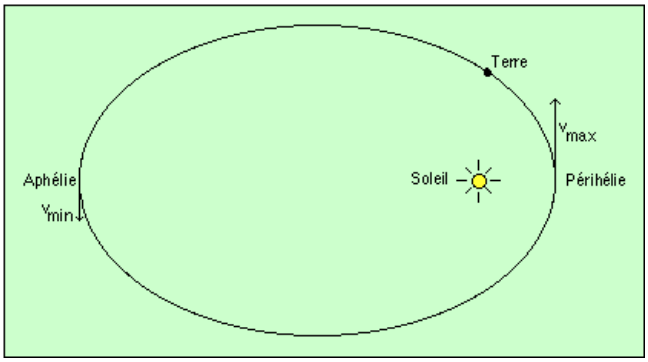
Les orbites des planètes sont en général des ellipses, et le Soleil est toujours placé à l'un des foyers de l'ellipse. L'excentricité indique le taux d'aplatissement de l'ellipse. Une excentricité nulle indique un cercle, une excentricité égale à 1 indique une autre conique, qui n'est plus une ellipse, et qui ne se referme pas sur elle-même : c'est une parabole. On remarque que dans le tableau, toutes les excentricités sont comprises entre 0,01 et 0,25. Toutes les planètes ont donc bien des orbites elliptiques, et la plupart sont presque des cercles.

**Tracer une ellipse**

(Animation et explications). On peut donner une appréciation de ces orbites : 0,01 indique une ellipse très proche d'un cercle ; 0,25 est une forte excentricité, indiquant une distance très variable de la planète au Soleil. Mercure et Pluton se particularisent sous cet aspect. Le schéma ci-dessous montre deux ellipses, dont les excentricités sont 0,02 à gauche (la Terre), et 0,25 à droite (Pluton). On y voit la position qu'occupe le soleil par rapport à l'aplatissement. Celui-ci n'est pas très sensible, même dans celle de droite, mais on voit très bien que le soleil est décalé. Il s'ensuit que la distance de la planète au soleil est fortement variable à droite.



Si la trajectoire d'une planète est une ellipse marquée (forte excentricité), elle se rapproche et s'éloigne du Soleil au cours du temps. Lorsqu'elle est plus proche, elle subit une gravité plus forte, elle doit aller plus vite ; et lorsqu'elle est plus loin, elle ralentit. La vitesse d'une planète sur son orbite est donc constamment variable (dans le tableau précédent, les vitesses indiquées pour les planètes sont les vitesses moyennes ; dans le schéma ci-après, l'excentricité est très exagérée pour mieux illustrer le propos).




Le schéma montre la Terre sur son orbite (d'excentricité très, très fortement exagérée) autour du Soleil. Le point où elle se trouve le plus près est le *périhélie*, le point le plus lointain est *l'aphélie*.

C'est Kepler qui a montré que les planètes se déplacent sur des orbites elliptiques, et qui a découvert les lois du mouvement. Il a analysé les positions de la planète Mars relevées pendant de nombreuses années par Tycho-Brahé. Cette découverte est empirique : il a simplement recherché l'excentricité et le demi grand axe d'une ellipse qui passerait par les points mesurés, sans pouvoir expliquer pourquoi la planète suivrait cette trajectoire. Il n'avait aucune notion de la cause, mais il a su parfaitement formaliser les effets. C'est Newton, un peu plus tard, qui nous donnera la loi de la gravitation universelle. A partir de cette loi, il est aisé de retrouver par le calcul les lois de Kepler (d'autant plus que Newton a utilisé les lois de Kepler pour obtenir la gravitation universelle). Donc la loi de Newton explique d'une certaine manière, par une mystérieuse force attractive qui agit instantanément à grande distance, les lois de Kepler.

Cette explication sera jugée insatisfaisante au début du XX$^{e}$siècle, et Einstein donnera une nouvelle théorie, la Relativité Générale, qui supprime la notion newtonienne de force, et la remplace par une explication géométrique du mouvement.

## *Les lois de Kepler*

On appelle *rayon vecteur* la ligne imaginaire qui relie, à tout instant, la planète au Soleil.

1. les planètes se déplacent sur des orbites planes elliptiques, dont le Soleil occupe l'un des foyers.
2. le rayon vecteur, reliant la planète au Soleil, balaye des aires égales en des temps égaux (loi des aires).
3. le rapport des cubes des demi grands axes aux carrés des périodes est constant : $a^3 / T^2$ = constante (loi harmonique).

La *loi des aires* précise ce que l'on a constaté : en 24 heures, la planète doit se déplacer beaucoup plus au périhélie qu'à l'aphélie pour balayer une même aire. La loi des aires traduit la conservation de l'énergie.

Dans la troisième loi, a est le demi grand axe de l'orbite, et T la période de révolution (la durée de l'année). La loi indique donc que pour toutes les planètes, le cube du demi grand axe divisé par le carré de la période, donne la même valeur ! Ce qui s'écrit : $a_T^3 / T_T^2 = a_P^3 / T_P^2$ en prenant la Terre (indice T) et une planète quelconque (indice P).

Cette loi est extrêmement utile, car il est facile de mesurer la période de révolution d'une planète quelconque. Connaissant cette période, la loi donne le demi grand axe de la planète par simple comparaison avec la Terre (voir *calcul de la distance* un peu plus bas).

Dans cette loi harmonique, on peut choisir les unités de telle sorte qu'elle apparaisse plus simple. Prenons pour cela **l'unité astronomique pour unité de longueur, et l'année pour unité de temps**. Le demi grand-axe de la Terre $a_T$ = 1 UA, et la période de révolution de la Terre $T_T$ = 1 an. Ainsi, $a_T^3 / T_T^2 = 1 / 1 = 1$. Par conséquent, $a_P^3 / T_P^2 = 1$, et donc la loi se réduit à :

$$a_P^3 = T_P^2$$

Animation montrant la loi des aires

Le plan de l'orbite terrestre est appelé *écliptique*, car c'est là que se produisent les éclipses (le Soleil est forcément toujours dans l'écliptique, et les éclipses font intervenir le Soleil).

La troisième loi permet de calculer les distances au Soleil : il est assez facile de mesurer le temps mis par une planète pour faire le tour du Soleil (sa période) ; connaissant la période et la distance de la Terre au Soleil, on en déduit donc celle de la planète au Soleil. En prenant la distance de la Terre au Soleil comme unité (l'unité astronomique), on peut même connaître les rapports des distances des planètes entre elles, sans connaître la distance de la Terre au Soleil en km. Ce fut longtemps le cas, car cette mesure absolue est assez difficile à faire.

**Remarque** : la 3$^{me}$ loi de Kepler est approximative ; elle est satisfaite si on considère que les masses des planètes sont négligeables devant celle du Soleil. La théorie de Newton en donne une expression très légèrement différente, plus exacte.

Pour en savoir plus, voir : Mécanique Céleste.

**Terminologie**

Pour des raisons historiques, lorsqu'un astre tourne autour d'un autre plus massif, le point où les deux astres sont les plus proches, et le point où ils sont les plus éloignés, portent des noms différents selon l'astre central :

| astre central | plus proche | plus lointain |
|---|---|---|
| le Soleil (Hélios) | *périhélie* | *aphélie* |
| la Terre (Gée) | *périgée* | *apogée* |
| la Lune (Sélénée) | *périsélénée* | *aposélénée* |
| un astre générique (aster) | *périastre* | *apoastre* |

Périhélie vient du grec *péri* = proche et *Hélios* = Soleil. Aphélie vient de *apo* = loin, et *Hélios*.
Apogée et périgée viennent des mêmes préfixes, et du suffixe *Gé* qui désigne la Terre. Périsélénée et aposélénée dérivent pareillement de *Séléné* = la Lune. Enfin périastre et apoastre se comprennent simplement.

*Année anomalistique* : intervalle de temps qui s'écoule entre deux passages successifs de la Terre à son périhélie.

*Année tropique* : intervalle de temps qui s'écoule entre deux passages successifs de la Terre au point vernal.

---

**Calcul de la distance**

Calculer la distance de Jupiter au Soleil d'après la distance de la Terre au Soleil et la durée de l'année jovienne (facile à mesurer), en utilisant la 3$^{me}$ loi de Kepler. En parlant de distance, on considère simplement le demi grand axe de l'orbite, qui en donne une bonne idée. On note $a_T$ le demi grand axe de la Terre, $a_J$ celui de Jupiter. Et on note $T_T$ la période de révolution de la Terre (la durée de l'année), et $T_J$ celle de Jupiter (la durée de l'année jovienne). On prend pour unité de distance l'Unité Astronomique, et pour unité de temps le jour.

Période de Jupiter : $T_J$ = 11 ans et 314 jours ; $T_T$ = période de la Terre : 365 jours ; distance de la Terre au Soleil : $a_T$ = 1 UA. $a_J$ est donc l'inconnue du problème.

Traduisons d'abord la période de Jupiter en jours pour qu'elle soit comparable à celle de la Terre : $T_J = 11 \times 365 + 314 = 4.329$ jours.

**Réponse** : on calcule $a^3 / T^2$ pour la Terre et pour Jupiter. Pour Jupiter, le résultat dépend de l'inconnue. On écrit ensuite que ces deux valeurs sont égales :

$$\frac{a_T^3}{T_T^2} = \frac{1^3}{365^2} = \frac{1}{133.225}$$

$$\frac{a_J^3}{T_J^2} = \frac{a_J^3}{4.329^2} = \frac{a_J^3}{18.740.241}$$

$$\frac{a_J^3}{18.740.241} = \frac{1}{133.225}$$

$$a_J^3 = \frac{18.740.241}{133.225} = 140{,}666 \quad \Rightarrow \quad a_J = 5{,}2$$

et $\mathbf{a_J = 5,2\ UA}$ (comparez à la valeur donnée dans le tableau donné plus haut).

La seule question que l'on peut se poser à ce sujet, c'est comment mesurer la période de révolution de Jupiter. Ceci n'est pas tout à fait évident, parce que la Terre se déplace elle aussi : nous n'observons pas Jupiter depuis un point fixe. Mais le calcul est très simple.

En utilisant la forme de la loi harmonique donnée plus haut, nous pouvons faire ce même calcul plus simplement peut-être :

$a_J^3 = T_J^2$. Réécrivons la période de Jupiter en années : 314 jours correspondent à 314 / 365,25 = 0,859 année. Donc $T_J = 11,859$ années. Par conséquent :

$a_J^3 = 11,859_J^2 = 140,652$. Il ne reste qu'à extraire la racine cubique :

$$a_J = 5,19\ UA$$

## *La mesure du temps*

La mesure du temps est un problème difficile à résoudre lorsqu'on ne dispose pas de moyens techniques importants. Nous en avons pourtant une notion intuitive plus ou moins bonne. Mais on sait bien que le temps ne passe pas aussi vite lorsqu'on attend que lorsqu'on s'amuse ! Il s'agit là bien sûr du temps subjectif. Scientifiquement, on veut mesurer un temps objectif, mais il n'est pas facile à définir.

Pour mesurer le temps, il faut des repères. Ceux-ci seront soit naturels, soit artificiels. Dans les deux cas, ils sont basés sur des phénomènes périodiques, ou tout au moins réguliers.

Le premier instrument de mesure du temps est la *clepshydre*, ou horloge à eau. L'écoulement de l'eau, relativement régulier, indiquait l'heure. L'eau a été remplacée par le sable, dans les sabliers, sur le même principe. Plus tard, beaucoup plus tard, on a remplacé un écoulement par un phénomène périodique : le mouvement d'un pendule. Mais un pendule laissé à lui-même s'amorti très vite, à cause des frottements. Pour assurer un garde-temps efficace, il faut lui restituer l'énergie perdue, et ceci se fait grâce au système d'échappement. Ces horloges mécaniques, d'une précision de plus en plus grande, ont permi de mesurer les mouvements des astres. L'horlogerie a eu une importance capitale, car seule la conservation du temps peut permettre, sur un navire en pleine mer, de déterminer la longitude. La création d'horloges de marine précises a sans douté marqué l'apogée de ces mécanismes. Aujourd'hui, les oscillateurs mécaniques sont remplacés par des oscilateurs électriques (quartz piezzo-électrique) ou même atomiques (horloges atomiques).

Pendant très longtemps, le mouvement des astres a été considéré comme parfaitement régulier, et la rotation de la Terre a été prise comme étalon de temps. On en a tiré le temps solaire moyen, qui nous sert tous les jours. Les horloges mécaniques étaient périodiquement recalées sur le temps astronomique.

La notion de jour elle-même, bien qu'évidente pour nous, pose un problème majeur : quand commence une journée ? Diverses réponses ont été données, celle que nous employons maintenant fait commencer le jour à minuit, d'autres le faisaient commencer au lever du Soleil, ou au coucher, ou à midi...

Voici pour le début, mais qu'en est-il de la durée ? Ceci aussi semble naturel, le jour dure 24 heures bien régulières... Mais si vous plantez un bâton vertical dans le sol, et si vous notez à quelle heure de votre montre l'ombre est la plus courte, vous aurez des surprises : ce n'est jamais à la même heure, et c'est rarement à midi ! L'heure que marque un cadran solaire (le bâton est un *gnomon*, son ancêtre), donne le *midi vrai* du lieu où l'on se trouve. Complication supplémentaire, mais les voyages en avion nous ont bien habitués au décalage horaire, qui n'est rien d'autre que la constatation du fait qu'il n'est pas midi partout au même moment !

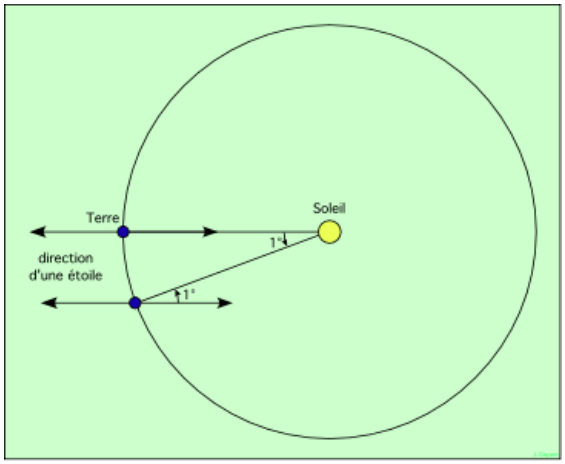
### Jour sidéral

Le *jour sidéral* est l'intervalle de temps qui s'écoule entre deux passages d'une même étoile au méridien. Les étoiles étant à des distances extrêmement grandes, il délimite un tour complet de la Terre sur elle-même.

### Jour solaire

Le jour sidéral n'intéresse par grand-monde, à part les astronomes. C'est le jour solaire qui règle notre vie. Le *jour solaire vrai* est l'intervalle de temps entre deux midis vrais successifs. Puisqu'il est sans cesse variable, il ne serait pas possible de régler une montre sur ce feu follet. Alors, on définit le *jour solaire moyen*, comme étant la durée moyenne du jour solaire vrai sur une longue période.

Quelle est la différence entre le jour sidéral et le jour solaire moyen ? Supposons que l'orbite de la Terre soit parfaitement circulaire (elle n'en est pas loin) :




Dans la première position dessinée, le Soleil, la Terre et une étoile sont alignés. Après un tour exactement sur-elle-même, la Terre se retrouve tournée vers la même étoile, mais le Soleil n'est pas au rendez-vous, parce que la Terre s'est déplacée sur son orbite, en lui tournant autour. Pour retrouver le Soleil en face, il lui faut faire encore une petite fraction de tour. L'angle qu'il lui faut faire est égal à l'angle que font ses deux positions successives par rapport au Soleil. Or il est très facile à évaluer : La Terre fait un tour en 365 jours, ce qui est peu différent de 360. Donc, la Terre fait à peu près un degré par jour. Il lui reste donc à faire un degré sur elle-même. Puisqu'elle fait un tour complet (360°) en 24 heures = 24 x 60 x 60 = 86.400 secondes, elle fait un degré en 86.400 / 360 = 240 secondes = 4 minutes. Si on fait le calcul avec 365 jours, on trouve 3 mn 56 s. C'est la différence entre le jour sidéral et le jour solaire moyen. Il est facile de voir que c'est le jour solaire moyen qui est le plus long, donc :

| jour solaire moyen = jour sidéral + 3 mn 56 s |
|---|

L'orbite de la Terre n'étant pas vraiment un cercle, le jour solaire vrai est légèrement variable. La différence entre le jour solaire moyen et le jour solaire vrai se nomme *équation du temps*. Elle est parfois dessinée sur les cadrans solaires.

Basé sur la loi de Newton, le temps des éphémérides est un temps plus théorique, qui est censé être parfaitement régulier. C'est celui des équations.

**L'année sidérale**

Comme pour repérer le jour, on repère l'année par rapport aux étoiles, c'est l'année sidérale qui vaut 365,25636042 jours solaires moyens. Cette valeur correspond aussi à l'intervalle de temps entre deux passages de la Terre au périhélie.

Mais il y a un problème, c'est celui de la précession des équinoxes. Les saisons ne suivent pas exactement ce rythme, parce qu'elles sont déterminées par le mouvement apparent du Soleil par rapport à l'équateur. Or celui-ci tourne lentement, entraînant l'équinoxe de printemps dans une ronde au ralenti : **le printemps va la rencontre du Soleil**. L'année des saisons se nomme *année tropique*. On constate qu'elle vaut 365,2422 jours solaires moyens. Elle est donc plus courte que l'année sidérale 365,25636042 - 365,2422 = 0,01416 jour, ou 20 minutes 23 s.

| année tropique = année sidérale - 20 mn 23 s |
|---|

A raison d'un déplacement de 0,01416 jour par an, il faudra 365 / 0,01416 ans pour faire un tour complet, c'est-à-dire **25.000 ans** à peu près. C'est la période de la précession. Elle correspond à une avance de 360° / 25.000 = 360 x 60 x 60 / 25.000 = 50" d'arc par an. C'est la valeur de la précession annuelle.

Nous n'entrerons pas ici dans les détails de la mesure du temps. Mais il en est un aspect qui intéresse tout le monde, par son côté pratique de tous les jours, c'est celui qui concerne la mesure des périodes relativement longues, de l'heure à l'année ou au siècle. Ces durées sont un peu plus faciles à apréhender que les plus courtes, et ont été étudiées et maîtrisées avant. Elles donnent lieu à l'établissement d'un calendrier, qui fait l'objet d'une étude à part.

## *Le Soleil*

Bien qu'il nous apparaisse infiniment plus brillant, le Soleil est une étoile. La seule différence est qu'il se trouve très près de nous (à l'échelle astronomique) alors que les étoiles sont beaucoup plus loin. Pour donner un ordre de grandeur, les étoiles les plus proches sont 300.000 fois plus loin que le Soleil ! Pour imaginer la différence, considérez une ampoule de 60 W située à 1 mètre de vous, et une autre identique à 300 km...

La nature du Soleil est restée longtemps incomprise, il fallut attendre le début du XX$^{e}$ siècle pour la comprendre.

**La couronne solaire**

Au cours d'une éclipse totale de Soleil, on peut d'abord voir le disque noir de la Lune grignoter le Soleil. On peut suivre une éclipse de Soleil sur le sol, sous un arbre. En effet, il y a de petits interstices entre les feuilles qui laissent filtrer un peu de soleil. Par ces petits trous, on obtient une image projetée du Soleil sur le sol. A mesure que la Lune le masque, on voit les petites tâches rondes sous les arbres se transformer en croissants ! Un petit trou par où passe la lumière s'appelle un *sténopée*.

Petit à petit, la Lune recouvre le Soleil de plus en plus, pour finalement le cacher complètement. A ce moment-là on découvre un spectacle magnifique, et insoupçonné : la *couronne*. Le Soleil est constitué de plusieurs parties, la plus évidente étant la *photosphère*, le disque visible. Mais au-delà de la photosphère, le Soleil possède ce qu'il est convenu d'appeler une atmosphère. Celle-ci est encore divisée en plusieurs couches : la plus basse est nommée *chromosphère*, car elle est de couleur rose. Ce n'est qu'une mince pellicule, qui n'est pas facile à distinguer. Mais la couche au-dessus, la couronne, s'étend très loin du Soleil, et ne possède pas la forme sphérique. Elle est irrégulière, avec des jets plus ou moins importants selon la date à laquelle se produit l'éclipse. Il faut savoir en effet que le Soleil possède un cycle d'activité de 11 ans, et que l'extension de la couronne en dépend.

La brillance de la couronne n'est que le millionième de celle de la photosphère, autant dire que la moindre parcelle de photosphère encore visible suffit à la masquer. Justement, quelques instants avant la totalité, le Soleil est presque tout caché, mais on peut en voir encore de minuscules fragments dans les creux du relief lunaire ! Ces parcelles visibles sont nommées *grains de Baily*. Le moindre d'entre eux suffit à masquer la couronne.

Pendant les éclipses totales, on peut parfois voir d'immenses flammes s'élever dans la couronne : ce sont les *protubérances*, jets de gaz très chauds montant dans l'atmosphère du Soleil, guidés par un champ magnétique. Elles durent de quelques dizaines de minutes à quelques heures. Elles apparaissent au bord du Soleil, où elles se détachent sur le fond de la couronne. Les protubérances qui se forment sur le disque du Soleil sont visibles d'une autre manière.

La photosphère étant beaucoup trop brillante, il n'est possible de voir la couronne que pendant les éclipses totales, qui sont très rares ! Aussi les astronomes se sont longtemps demandé comment faire pour l'observer en dehors de ces instants privilégiés. La réponse a été apportée par Bernard Lyot, qui a réussi à résoudre tous les problèmes d'optique posés. L'instrument s'appelle le *coronographe*. Grâce à lui, on peut faire des observations de la couronne à tout moment, et l'étude du Soleil a beaucoup avancé.

Cette étude est très importante, car le Soleil est la seule étoile que nous ayons vraiment sous la main ! Toutes les autres sont trop lointaines pour être observées en détail, tout ce que l'on savait d'elles il y a peu de temps encore provenait d'une analyse globale de la lumière qu'elles émettent. On commence seulement maintenant à disposer d'instruments qui donnent quelques détails de la surface des étoiles les plus proches.

L'application des théories physique à l'étude du Soleila permis de construire ce que l'on appelle le modèle standard, qui décrit la composition du Soleil, depuis le centre jusqu'aux plus hautes couches de l'atmosphère, comment se produit l'énergie que le Soleil rayonne, comment elle est propagée depuis le cœur jusqu'à l'espace, etc.

Bien sûr, toutes les étoiles ne sont pas semblables au Soleil,il en est même de très différentes. Mais il est très important de vérifier que toutes les prévisions du modèle standard sont réalisées. Toutes ? Non ! Là aussi une irréductible observation sème la perturbation, alors que tout le reste semble si bien représenter le fonctionnement de notre étoile. Mais ce mal qui répand la terreur, le *neutrino* puisqu'il faut l'appeler par son nom, était susceptible de remettre en cause soit le modèle standard du Soleil, soit carrément la théorie des particules élémentaires. Mais ceci est une autre histoire...

**Les comètes**

Les comètes sont des objets éphémères, qui apparaissent un beau jour sans signes précurseurs, évoluent, puis disparaissent. Imprévisibles, elles ont cristallisé toutes les peurs et les superstitions des hommes depuis qu'ils existent. Leur explication correcte est très récente. Leur observation détaillée encore plus : minuscules objets de quelques kilomètre de diamètre, situés à des distances de centaines de millions de kilomètres, elles n'apparaissent que comme de minuscules points faiblement lumineux dans les meilleurs télescopes. Seules les sondes spécialement conçues, envoyées dans leur voisinage (*Giotto*, *Vega*, *Stardust*...) ou même destinées à se poser à leur surface (*Rosetta*), sont susceptibles de nous donner des renseignements précis.

## *La mesure des distances*

Pour couper une robe, une couturière utilise un *mètre en ruban*. Mais cette unité n'a plus de sens pour mesurer la distance de Marseille à Grenoble. On utilise alors une unité plus appropriée, le kilomètre. Cet exemple pratique nous montre que pour un même type de mesure, on peut choisir des unités différentes selon l'échelle à laquelle on se place. Il en est de même dans les mesures astronomiques.

Au Moyen-Age, il était difficile d'imaginer ce qu'il y avait au-delà d'une trentaine de kilomètres (sauf pour les pèlerins ou les compagnons). Maintenant, tout le monde a une idée précise de ce qu'est la Terre. La Terre est une petite planète qui tourne autour d'une étoile très quelconque, le Soleil. Entre le Soleil et ses planètes, on peut mesurer les distances en kilomètres. La Terre n'est qu'à 150.000.000 de kilomètres du Soleil, mais Pluton est à 5.900.000.000 de km. Il n'est pas très pratique d'écrire des nombres pareils, et ce qu'on voudrait surtout retenir, c'est que **Pluton est beaucoup plus loin que la Terre** !

Les astronomes ont défini diverses unités de distance, chacune adaptée à un domaine particulier. Ces distances sont *l'unité astronomique*, *l'année-lumière*, *le parsec*.

Ce n'est pas seulement la difficulté d'écriture des nombres qui a incité les astronomes à définir une unité de distance nouvelle ; c'est bien plus la très grande difficulté de mesurer les distances dans le système solaire directement dans une unité terrestre. Il a fallu attendre des mesures de parallaxe précises, récentes, pour établir le lien entre les distances terrestres et les distances astronomiques. Voyez le principe de la mesure de la distance de Vénus expliqué dans un autre chapitre. Le résultat est une mesure de la distance Vénus-Soleil, **en fonction** de la distance Terre-Soleil. Donc, si on prend cette dernière comme unité (distance Terre-Soleil = 1), alors la distance Vénus-Soleil est de 0,7.

Les astronomes ont alors pris comme unité la distance de la Terre au Soleil, ils l'ont nommée *Unité Astronomique* (UA). On peut maintenant dire que la Terre est à 1 UA du Soleil, et Pluton à 5.900.000.000 / 150.000.000 = 39 UA. Le Soleil est 39 fois plus loin que d'ici, il ne doit pas faire très chaud sur Pluton...

On a ensuite mesuré la distance de l'étoile la plus proche de nous : 39.700.000.000.000 km.

Traduisons ce nombre en UA : 39.700.000.000.000 / 150.000.000 = 265.000 UA

C'est encore un nombre bien grand, si on pense que toutes les étoiles sont plus loin que ça, et même beaucoup plus loin.

Mais ce nombre nous apprend déjà que l'étoile la plus proche est tout de même 265.000 fois plus loin de nous que le Soleil !

D'où la définition d'une nouvelle unité plus grande, *l'année-lumière* : c'est la distance parcourue par la lumière en une année. Pour avoir une idée de ce que cela représente en unités habituelles, convertissons 1 AL en km : la lumière se déplace à 300.000 km/s ; 1 AL = 60 × 60 × 24 × 365 × 300.000 km = 9.460.800.000.000 km ~ 10.000.000.000.000 km = $10^{13}$ km = 10.000 milliards de kilomètres... La valeur précise de l'année-lumière est 0,946073047 $10^{13}$ km, et celle de l'unité astronomique est 149.597.870 km.

Calculer la distance de l'étoile la plus proche de nous en AL : 39.700.000.000.000 / 9.460.800.000.000 = 4,2 AL

L'étoile la plus proche est 8.000 fois plus loin que Neptune.

Pour donner une autre idée des distances, calculons la distance-lumière de Pluton au Soleil : le temps mis par la lumière pour parcourir les 5.900.000.000 km entre le Soleil et Pluton est : 5.900.000.000 km / 300.000 km $s^{-1}$ = 19.666 secondes = 327 minutes ~ 6 heures. Donc Pluton est à 6 heures-lumière du Soleil, ou bien encore 1/4 de jour, donc 1/4/365 d'année *i.e.* 0,000 685 AL. C'est moins d'un millième d'année-lumière.

Tout ceci montre que tout est plein de vide !

Représentons le Soleil par une tête d'épingle en verre, d'un millimètre de diamètre. Cette tête d'épingle représente le Soleil de 1,4 million de kilomètres de diamètre. A la même échelle, le diamètre de l'orbite de Pluton est de 4 mètres.

On peut imaginer une tête d'épingle au milieu d'une pièce de 8 mètres de côté (y compris la hauteur du plafond...).

## *La mesure des températures*

La température d'un objet massif, tels que ceux qui nous entourent, est une notion *a priori* subjective. On a d'abord remarqué que certains matériaux présentaient des variations de volume en fonction de la température : un métal se dilate à la chaleur, et se contracte au froid. Ceci ne constitue pas encore une mesure, car il faut pour cela disposer d'un repère fixe.

La température a été objectivée en 1742 par Anders Celsius, astronome suédois, professeur à l'université d'Uppsala. Il a remarqué qu'un mélange d'eau froide et de glace conservait la même température, même si on l'exposait à un froid plus intense, ou à la chaleur. On peut le constater justement en y plongeant un morceau de métal, dont les variations de longueur dénoteront d'éventuelles variations de température. Tant qu'il reste à la fois de l'eau et de la glace, la température du mélange ne varie pas. On a donc un point fixe.

Pour établir une échelle, il faut de plus un coefficient multiplicateur, la distance entre deux barreaux successifs. Pour cela, un second point fixe est souhaitable. Il a été trouvé par le mélange d'eau et de vapeur, qui conserve lui aussi la même température tant qu'il reste à la fois de l'eau et de la vapeur. Entre ces deux points fixes, Celsius a établit 100 graduations, utilisant donc une division centésimale. La graduation se nomme donc *degré Celsius*, en référence à son créateur, ou *degré centigrade* en référence au nombre de divisions.

L'explication de ces deux phénomènes a été trouvée : pour transformer de l'eau en glace, il faut lui retirer de la chaleur ; pour transformer de la glace en eau, il faut lui en fournir la même quantité. Donc, s'il y a à la fois de l'eau et de la glace, lorsqu'on fourni de la chaleur, de la glace l'absorbe pour se transformer en eau, et lorsqu'on retire de la chaleur, de l'eau se transforme en glace. Donc, les variations de température sont absorbées par ces transformations.

Dans le cas de l'eau et de la vapeur, il en est de même. Les variations de température sont gommées.

A l'origine, la température de la glace fondante a été notée 100° et celle de l'eau bouillante 0°. Une permutation de ces deux valeurs a amené l'échelle à celle que nous utilisons tous les jours.

Mais les physiciens ont rencontré un problème. Comme on fait plus blanc que blanc, on peut faire plus froid que froid : il existe des températures négatives. L'échelle Celsius n'a pas de bornes, ni dans les valeurs positives, ni dans les valeurs négatives. Or cette méthode de mesure a été construite en l'absence d'explication de la chaleur. Qu'est ce qui différencie un objet chaud d'un objet froid ?

Il a fallu comprendre que la matière est faite d'atomes, que l'on peut voir ici comme de petites billes, pour arriver à comprendre : la chaleur mesure l'agitation des atomes ! Une particule animée d'une vitesse possède une énergie cinétique. C'est le cas de tous les objets macroscopiques (essayez donc de vous laisser tomber une boîte de petits poi(d)s sur le pied...). Les molécules de l'air (formées de plusieurs atomes) sont animées d'une grande vitesse. Lorsqu'elles viennent heurter notre peau (à 20° C, la vitesse d'une molécule d'oxygène $O_2$ est de 340 m/s = 1220 km/h, la molécule d'azote est légèrement moins lourde, donc légèrement plus rapide), elles nous communiquent leur énergie cinétique. Chacune en apporte très peu, mais elles sont si nombreuses... Alors, l'impression de chaleur que nous ressentons n'est que l'apport d'énergie produit par des milliards de molécules qui viennent nous percuter. Donc, plus les particules vont vite, plus l'objet qu'elles composent est chaud.

Mais qu'arrive-t-il si les molécules qui composent un objet sont immobiles ? Elle ne nous communiquerons plus d'énergie du tout. Il sera donc difficile de faire plus froid ! C'est là la notion de zéro absolu : il existe une température minimale ! Alors qu'il n'existe pas de température maximale, si ce n'est celle qu'aurait un corps dont les atomes iraient à la vitesse de la lumière !!

Des expériences ont montré que cette température est de l'ordre de -273,5° C. On en déduit l'échelle absolue, ou échelle Kelvin (nommée ainsi parce qu'elle a été définie par Lord Kelvin) : le zéro est la température minimum possible, donc approximativement -273,5° C, et les graduations sont les mêmes que dans l'échelle Celsius. Donc le zéro Celsius correspond à 273,5 Kelvins. La conversion est facile :

$$\mathbf{T_K = T_C + 273,5}$$

Une température estivale de 26,5° C correspond à 300 Kelvins. La température de la photosphère solaire, qui est de 5.777 Kelvins, vaut donc 5.500° C.

La notion de température que nous avons est basée sur notre immersion dans un environnement de densité élevée. De l'air chaud nous chauffe. Mais que se passe-t-il si on chauffe à 1.000 Kelvins de l'hydrogène à une densité de quelques atomes au $cm^3$ ? Que ressentirait-on si on pouvait exposer sa main à un tel gaz ? Bien que chaque atome percuterait notre peau à très grande vitesse, et y déposerait une énergie importante (à l'échelle de l'atome), ceci ne représenterait pratiquement rien pour nous, et serait strictement insensible (bien que ça pourrait faire des dégats au niveau microscopique).

La chaleur qu'un corps nous communique est due à un grand nombre de chocs à chaque seconde, dans un milieu dense. Dans un milieu très raréfié, même si la température est très élevée, l'apport d'énergie reste très faible sinon négligeable.

## *La composition des astres*

Pour les étoiles, c'est très simple. Elles se forment à partir du milieu interstellaire, qui a été créé juste après le Big Bang. Sa composition comprend à peu près 75 % d'hydrogène et 25 % d'hélium. Ces valeurs sont arrondies, car on ne les connait qu'à quelque chose près, et le milieu interstellaire contient des traces d'éléments légers, essentiellement du lithium, peut-être un peu de bérylium et de bore. Rien d'autre, à l'origine. Plus tard, les étoiles massives ont synthétisé des éléments plus lourds, qui viennent contaminer le milieu pour moins de 2 %.

Les autres objets (planètes, comètes, astéroïdes...) sont formés d'éléments plus lourds. Les éléments les plus légers, ont été éliminés par les conditions physiques (température notamment). Ils sont donc constitués essentiellement d'éléments plus lourds, oxygène, carbone, azote, calcium.... Or ces éléments ont tendance à se combiner, aux températures qui règnent loin des étoiles, pour former des molécules ; aussi, il n'est pas étonnant de trouver une large panoplie du parfait chimiste dans l'Univers.

Les planètes sont formées des composés chimiques les plus simples, *oxydes*, *carbonates*, *silicates*... On trouve également des métaux à l'état natif, c'est-à-dire non combiné. C'est le cas dans les météorites, car ils proviennent du cœur d'une planète détruite, et les conditions physico-chimiques qui régnaient là ne permettaient pas la constitution de molécules. Une petite remarque au sujet des éléments plus lourds que le fer : il ne peuvent pas être synthétisés dans les étoiles, et trouvent leur origine dans des événements violents de l'Univers, comme les explosions d'étoiles.

Mais il y a aussi des matériaux volatils. L'eau est le premier exemple, et le plus répandu. Elle se présente sous trois formes selon la température et la pression : l'eau liquide, la glace et la vapeur. Ce mot de glace a été créé pour la phase froide de l'eau. Mais maintenant, on l'applique à d'autres situations, plus précisément à d'autres éléments chimiques : on connait bien la glace carbonique, qui a des usages industriels importants. C'est du gaz carbonique ($CO_2$) liquéfié, puis gelé. Elle a un aspect blanc, et ressemble beaucoup à la glace d'eau. Mais on peut faire subir le même traitement à d'autres gaz, pas exemple l'azote. Dans des conditions encore plus sévères de température, l'azote se liquéfie et se gèle. On trouve donc de la glace carbonique sur Mars, de la glace d'azote sur Triton. On nomme donc *glace* tout gaz, ou tout élément volatil, gelé.

Il y a de la glace d'eau partout !

### Les étoiles

Les étoiles sont d'autres soleils. Elles se sont formées d'une manière semblable, sont constituées des mêmes matériaux, brillent pour la même raison. Elles nous apparaissent minuscules et pâles parce qu'elles sont beaucoup plus loin que le Soleil. Mais certaines sont beaucoup plus lumineuses et beaucoup plus chaudes.

Dans un instrument, même modeste, on peut en voir des milliers. Il est impossible de donner un nom à chacune. Pour s'y retrouver, les astronomes ont alors établi des catalogues d'étoiles, que nous verrons dans le chapitre qui leur est consacré.

## *Les pulsars*

Toujours en radio, on a observé des objets variables, mais dont la période est extrêmement courte : quelques secondes, puis pour certains beaucoup moins... De tels signaux périodiques ont été attribués à une civilisation extraterrestre ! Jusqu'au jour où on a compris qu'il s'agissait d'une étoile dont la taille avait considérablement diminué, et qui tournait très, très vite sur elle-même. Comme ses signaux étaient pulsants, par association phonétique avec les quasars, on a nommé ces objets *pulsars*.

On a depuis trouvé encore d'autres curiosités, nommées blazards, magnétars...

## *La Voie Lactée, ses dimensions, son nombre d'étoiles*

La Voie Lactée est cette bande légèrement lumineuse qu'on peut voir l'été lorsqu'on a la chance de disposer d'un beau ciel, sans lumières parasites (loin de toute agglomération). La nature de cette bande laiteuse (d'où le nom et la légende) a été source de débat chez les astronomes : soit il s'agissait de matière gazeuse, soit c'était un rassemblement de très nombreuses étoiles trop éloignées de nous pour être distinguées séparément. C'est cette seconde explication qui est la bonne, bien qu'il y ait également du gaz dans l'espace.

Notre Voie Lactée est donc formée de quelques 150 milliards d'étoiles, et contient aussi des nuages de gaz sombres ou lumineux, des rassemblements d'étoiles de forme quelconque et lâches ou bien nettement sphériques et compacts... Vue depuis la Terre sous la forme d'une

bande lumineuse qui fait le tour du ciel, elle a la forme d'un disque aplati.

A l'œil nu, on peut distinguer trois objets qui ont un peu le même aspect : la nébuleuse d'Andromède dans l'hémisphère nord, et les deux nuages de Magellan dans l'hémisphère sud. Ces deux derniers semblent être des lambeaux détachés de la Voie Lactée. En fait, ce sont d'autres Voies Lactées, nous dirons plus exactement d'autres galaxies. Il en est de même de la nébuleuse d'Andromède, qui est de même nature que la Voie Lactée, mais située beaucoup plus loin, à 2,2 millions d'années-lumière. Pour cette raison, on l'appelle maintenant la Grande Galaxie d'Andromède.

## *Les galaxies*

L'histoire des galaxies est récente. Les objets de Messier, petites taches floues dans le ciel, posaient un problème aux astronomes : quelle est leur nature ? Avec les instruments du XIX$^{e}$ siècle, il était impossible de la découvrir. Etaient-ce des nuages de gaz flottant dans l'espace, ou bien de grands rassemblements d'étoiles, trop proches les unes des autres pour être distinguées depuis la Terre ? A cause de leur aspect, on les a toutes appelées nébuleuses. Certaines présentant une structure spiralée ont pris le nom de nébuleuses spirales.

L'Univers était constitué de la Terre, du Soleil et des planètes, disons du *système solaire* dans son ensemble, et d'étoiles. Au milieu (en apparence) des étoiles se trouvaient les nébuleuses. La question était de savoir si les nébuleuses étaient du gaz à la même distance que les étoiles, ou bien constituées d'étoiles, et alors beaucoup plus loin. En résumé, l'Univers était-il constitué d'un unique ensemble d'étoiles et de nébuleuses, ou bien de plusieurs ensembles d'étoiles, dont certains apparaissaient sous la forme de nébuleuses ?

Enfin, à la mise en service du téléscope Hooker de 2,50 m au Mont Wilson, on a pu résoudre la nébuleuse d'Andromède en étoiles, montrant donc que certaines nébuleuses étaient d'immenses groupes d'étoiles, situés très loin de nous. La Voie Lactée est notre formation d'étoiles, et les nébuleuses spirales sont des formations semblables. On a donné le nom de **galaxies** à ces formations. La Voie Lactée est souvent notée **Galaxie**, avec une majuscule. Cette découverte a multiplié par 1.000.000 la dimension de l'Univers, et notre façon de le concevoir.

On a depuis observé des millions de galaxies. Chacune contient une centaine de milliards d'étoiles !

### Les étoiles dans une galaxie

Lorsqu'on regarde une belle galaxie comme celle d'Andromède, on a l'impression de voir des étoiles qui se touchent. La réalité est bien différente. Cette illusion est due à l'éloignement et à la perspective. Considérons notre voisinage solaire :

Une tête d'épingle en verre a un diamètre de l'ordre du millimètre. 5 $10^{7}$ fois plus font 5 $10^{7}$ mm = 50 km. On peut donc représenter les étoiles dans une galaxie comme des têtes d'épingles situées à 50 kilomètres les unes des autres !!! On comprend mieux que les collisions d'étoiles soient vraiment exceptionnelles, même dans le cas où deux galaxies se rencontrent.

### Les amas de galaxies

Les galaxies se groupent à leur tour en **amas** de galaxies, reliées par la gravité. Les amas en contiennent de quelques centaines à quelques milliers. Ils se regroupent en super amas. L'image que nous avons maintenant de la structure de l'Univers est celle d'une mousse de savon, dans laquelle les parois des bulles sont des amas de galaxies. Nous sommes loin de la Terre au centre de l'Univers !

Ce que nous voyons d'un amas de galaxies représente seulement 1/400$^{e}$ de sa masse ! Où sont passés les 399/400$^{e}$, nul ne le sait à l'heure actuelle... Et c'est un problème passionnant à résoudre !

### Les quasars

Les observations radio ont montré l'existence de sources très intenses, mais dont on ne pouvait pas mesurer la position à cause du faible pouvoir séparateur des instruments. Lorsqu'on a réussi à déterminer précisément la position d'une de ces sources, on a été fort surpris de ne pas trouver d'étoile ou autre objet visible à son emplacement. On a fini par associer la radiosource à une toute petite étoile très faible. Par ses propriétés, cet objet n'était pas une étoile, bien qu'il en ait l'aspect. On l'a alors appelé *source radio quasi-stellaire*, en anglais *quasi-stellar radio source*, qui a été contracté en *quasar*.

Lorsqu'on a réussi à déterminer sa distance à la Terre, la surprise fut grande: elle était très, très loin, et donc dépensait une énergie qu'on ne savait pas expliquer. Ce fut le début d'une longue histoire...

## *La cosmologie*

Après avoir étudié chaque astre séparément, puis par groupement, il sera temps de considérer l'Univers dans son ensemble. C'est le but de la cosmologie (science du cosmos). Elle étudie l'espace (renommé espace-temps) et l'influence de ce qu'il contient (les galaxies étant considérées comme des particules d'épreuve...). De tous temps, l'Homme a cherché à comprendre ce qui l'entoure, depuis les modèles plutôt philosophiques des Anciens, jusqu'aux tentatives scientifiques de la fin du XIX$^{e}$ siècle. Mais il a fallu attendre la théorie de la Relativité Générale pour s'en faire une idée quelque peu acceptable... Cependant, nous ne sommes pas au bout de nos peines, et les interrogations à ce sujet se sont déplacées, mais existent toujours.

Les théories de l'Univers dans son ensemble rejoignent curieusement celles des particules élémentaires chères aux physiciens. Il semble bien difficile d'expliquer l'infiniment grand et l'infiniment petit séparément. Une solution acceptable doit forcément expliquer les deux du même coup!<:p>

Pour cela, il faudra arriver à concilier les deux grandes théories du XX$^{e}$ siècle, la Relativité Générale et la Mécanique Quantique, la première

expliquant l’infiniment grand, la seconde l’infiniment petit. L’ennui est que les deux théories s’ignorent, alors que l’Univers est fait de particules...

---=OO=---




*Qui a jamais vu, chez les cuisiniers, un simple d'esprit faisant tourner le four autour du rôti ?*

*Alexandre Friedmann*

La *cosmogonie* (du grec *cosmo* = monde, *gon* = engendrer) est l'étude de la formation du Monde. Toutes les civilisations se sont préoccupées de connaître les origines du Monde, avec les moyens à leur disposition. Pour cette raison, les cosmogonies traditionnelles se limitaient à l'Univers visible à l'œil nu, c'est-à-dire essentiellement au système solaire, et à la voûte étoilée.

Il ne faut pas la confondre avec la *cosmologie* (du grec *cosmo* = monde, *logos* = discours), qui est l'étude physique de l'Univers dans son ensemble, et dont l'apparition est très récente (pour parler de cosmologie, il fallait d'abord comprendre la physique, et savoir qu'il y avait autre chose au-delà du système solaire).

L'étude du ciel est aussi ancienne que l'Humanité elle-même ; mais par définition, nous n'avons aucune trace écrite provenant de la préhistoire.

Toutefois, de nombreux monuments mégalithiques (Stonehenge, vallée des Merveilles, monuments mégalithiques bretons, Amérique centrale…) témoignent, par leur orientation, de préoccupations astronomiques, au moins en ce qui concerne les saisons.

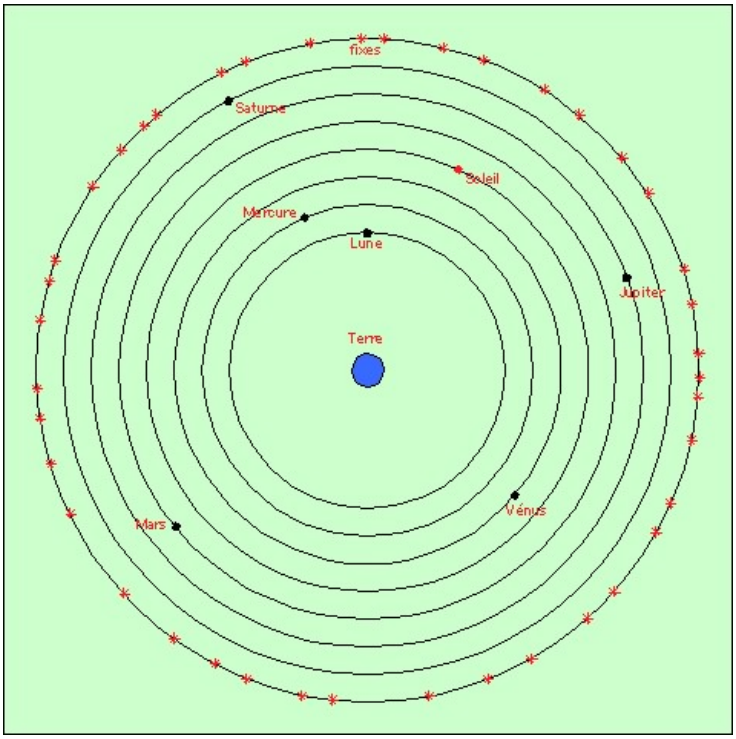
Les premières traces écrites nous parviennent de Mésopotamie (du grec *meso* : entre, et *potamos* : fleuve), sous la forme de tablettes d'argile vieilles de 6.000 ans. Leurs apports sont encore très présents aujourd'hui, autant dans la vie courante que dans l'astronomie moderne. On leur doit la définition :

- des constellations ;
- du zodiaque (du grec *zôô* vivre, *zoidon* figure d'animal, et *zoidiakos* qui concerne les constellations d'animaux) ;
- des douze heures de la journée et de la nuit (origine dans les décans).

Pour définir les contellations et les heures, les Mésopotammiens ont utilisé les levers héliaques.

Il existe autant de cosmogonies que de peuples différents dans l'Antiquité. Chacun a vu midi à sa porte, et conçu sa propre description du Monde (l'Univers connu à l'époque). L'étude de ces cosmogonies est intéressante, mais la plupart n'ont pas influencé la pensée occidentale. C'est la cosmogonie grecque qui a défini la conception du Monde de tout l'Occident, jusqu'à la fin du Moyen-Age. C'est celle-là que nous allons aborder. Il faut comprendre que la vision qu'elle donnait a été instituée au rang de dogme, que chacun recevait dans sa culture dès l'enfance, et ces idées devenaient donc des vérités absolues, une tradition, que rien ni personne ne pouvait remettre en cause. Aussi, il a été très difficile à quelques esprits éclairés de proclamer qu'il existait une autre façon de concevoir le monde. Ces remarques éclairent un peu la difficile progression des idées au sortir du Moyen-Age.

L'astronomie grecque a fondé l'étude scientifique du ciel, avec un **modèle du monde**, censé expliquer les mouvements des astres, la prévision des éclipses. En 530 avant J.C., **Pythagore** (l'homme du théorème) pense que la Terre est sphérique, centrale, entourée de 7 (nombre magique) sphères de cristal concentriques, portant les astres mobiles, et une sphère extérieure portant les étoiles, et nommée *sphère des fixes*.




Les sphères mobiles sont écartées dans les mêmes proportions que les notes de musique (toujours un soucis de perfection). En tournant, elles produisent des notes de musique selon leur taille et leur vitesse ; l'ensemble donne un accord parfait. C'est la *musique des sphères*.

Ce système, dans lequel la Terre occupe le centre, et tout lui tourne autour, est nommé *système géocentrique*.

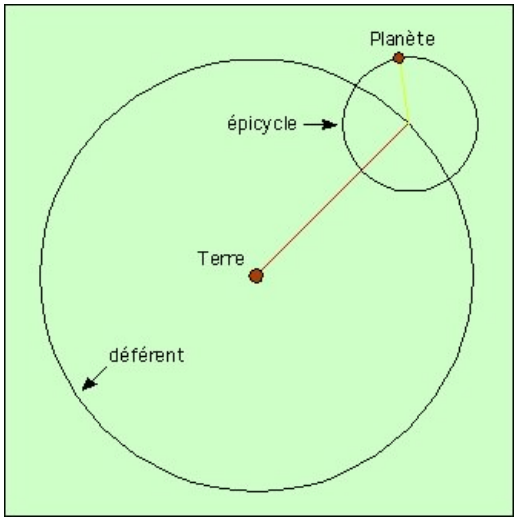
**Aristarque de Samos**, 3 siècles avant J.C., pense que planètes et étoiles tournent autour du Soleil. Il a su calculer les distances relatives entre la Terre, la Lune et le Soleil. En 250 avant J.C., **Erathostène** calcule le rayon de la Terre par des mesures d'angle entre Syenne (aujourd'hui Assouan) et Alexandrie. C'est le premier *système héliocentrique*.

En 150 avant J.C., **Hipparque** dresse le premier catalogue d'étoiles ; il les classe en 6 **grandeurs** selon leur éclat. Son classement est à la base de la notion actuelle de magnitude. Il définit les constellations, en reprenant celles des Mésopotamiens.

Les Grecs considéraient deux parties dans l'Univers : le *monde sublunaire*, auquel nous appartenons (la Terre et son atmosphère), et le *monde supralunaire*, auquel appartient le Soleil (pendant une éclipse de Soleil, il est évident que le Soleil est derrière la Lune, donc plus loin). Le monde sublunaire est celui de la corruption (nous parlons ici d'Astronomie, ne l'oubliez pas…), il est soumis au temps qui le dégrade ; le monde supralunaire est celui de la perfection, c'est le royaume des dieux. En particulier, le Soleil est rond et sans taches (le cercle est LA figure géométrique parfaite).

Cette perfection devait se trouver également dans les orbites, qui ne pouvaient être que des cercles (**Claude Ptolémée**). Et même si l'expérience montre clairement que les cercles ne conviennent pas, on combinera des cercles pour arriver à un résultat cohérent avec la précision des observations à l'œil nu, même si le modèle obtenu est complètement artificiel et très complexe. C'est ainsi que le même Ptolémée a imaginé que les planètes tournaient sur des cercles… dont les centres tournaient eux-mêmes sur d'autres cercles autour de la Terre (noblesse oblige)…

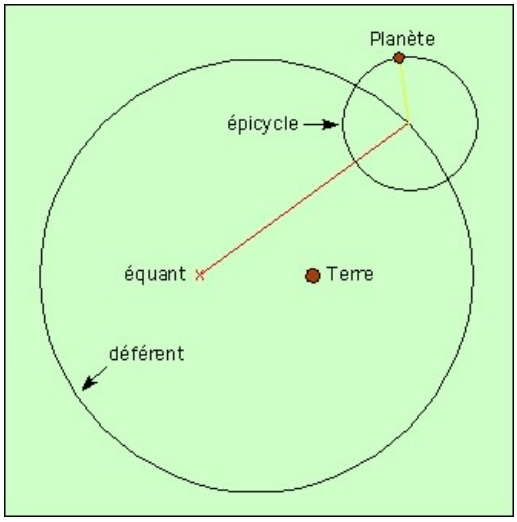
En 150 après J.C., Claude Ptolémée écrit le livre qui fixe la science astronomique grecque. Son titre est *Syntaxe Mathématique*. Il ne nous est pas parvenu directement, mais il a été conservé par les Arabes, sous le nom d'*Almageste* (qui signifie *le plus grand*). Les Arabes l'ont réintroduit en Espagne, et il sera le seul ouvrage enseigné en Europe jusqu'au XV$^{me}$ siècle. Il est regrettable que le système du monde décrit dans ce livre soit géocentrique, en sacrifiant aux apparences, alors que nombre de savants avaient établi un bien meilleur système au moins trois siècles plus tôt. Le système de Ptolémée est très complexe, mais il reproduit les positions des planètes au second ordre (mathématiquement).




Animation montrant le système décrit ci-dessus.

Ce modèle présente bien les rétrogradations des planètes supérieures, mais pas correctement la variation de vitesse sur l'orbite.

Ptolémée a compliqué le modèle en déplaçant la Terre à une certaine distance du centre du déférent. Le point symétrique, nommé équant, est la référence du mouvement uniforme : c'est la ligne (en rouge sur le schéma) qui le joint au centre de l'épicycle qui tourne uniformément.




Animation montrant le système décrit ci-dessus.

Vers l'an 1500, la situation est la suivante :

- la Terre est plate, située au centre du Monde ;
- les planètes (du grec *planeta* = errant, ce sont le Soleil, la Lune, Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne) tournent autour d'elle, ainsi que les étoiles ;
- le monde supralunaire est parfait ;
- le cercle est la figure fermée parfaite, par conséquent les orbites des planètes (supralunaires) doivent être circulaires ;
- le mouvement circulaire est forcément uniforme (à vitesse constante, c'est parfait) ;
- ceci est en contradiction flagrante avec les observations ;
- Ptolémée fait tourner les planètes sur de petits cercles, qui eux-mêmes tournent sur de grands cercles… Il arrive ainsi à reproduire assez corectement les positions des planètes ;
- son système n'explique absolument rien ;
- les comètes ne sont pas des astres, mais des signes divins !

**Le système craque…**

1. En 1054, une supernova explose ; elle est observée par les chinois qui consignent par écrit ce qu'ils voient (*étoile invitée*). A l'heure actuelle, il en reste le pulsar du Crabe, et une nébuleuse planétaire. Cette étoile apparaît aux observateurs comme une étoile nouvelle, une *nova* (le terme supernova sera inventé plus tard). Or les étoiles ont été créées une fois pour toutes, et collées sur la sphère des fixes. Cette apparition est donc une contradiction bien génante… Elle est semble-t-il passée inaperçue en Europe (non mentionnée dans les textes, qui ont peut-être préféré l'ignorer…). Mais deux autres supernovæ, de Tycho et de Kepler, seront utilisées pour réfuter définitivement l'ancien système du monde.
2. La surface du Soleil est à première vue immaculée ; or en 1610, lorsque Galilée tournera sa lunette vers le Soleil (ce que nous ne ferons pas car c'est très dangereux ! ), il découvrira des taches à sa surface, rendant caduc le dogme du monde supralunaire parfait… Il a aussi observé les montagnes et les cratères de la Lune, montrant que c'était un corps assez semblable à la Terre.

3. Galilée découvrira aussi les satellites de Jupiter, prouvant que la Terre n'est pas le centre de tout. A partir de là, tout deviendra possible en matière d'idées. Cette libération intellectuelle va entraîner une floraison de théories et de progrès.
4. Un autre grave problème a surgi lorsqu'en mesurant la distance des comètes, on s'aperçut qu'elles recoupaient les orbites des planètes ! Le cristal des sphères n'y aurait pas résisté.

Cette brève étude nous montre que l'Antiquité, ne disposant pas de moyens d'observation adaptés, a pris souvent une **position philosophique** plutôt que scientifique pour la description de l'Univers. Le remplacement des dogmes par des faits déduits de l'observation a rencontré une résistance très profonde, car les observations étaient bien sûr réservées à quelques privilégiés, heureux possesseurs des instruments nécessaires. Le changement des idées s'est appuyé sur une confiance croissante dans les dires des savants, et décroissante dans les affirmations des Anciens.

Il faudra attendre Kepler pour découvrir que les orbites sont des ellipses et non des cercles, et qu'elles sont parcourues à vitesse variable et non constante !

La cosmologie moderne s'appuie sur les observations les plus récentes, au jour le jour. Elle embrasse tout l'Univers observable. On pourrait dire la même chose des cosmologies anciennes, mais il existe une différence fondamentale :

- les cosmologies anciennes ne considéraient que la partie de l'Univers observable grâce à nos yeux. Ce sont les faiblesses de vision de l'observateur qui définissaient la frontière entre ce qui était observable et ce qui ne l'était pas ;
- la cosmologie moderne considère tout ce qui est observable à l'aide des rayonnements électromagnétiques : l'expansion de l'Univers, le temps de propagation de la lumière, imposent leurs limites. Nos instruments pourraient voir plus loin, s'il y avait de la lumière à voir…

---=OO=---




**Table des matières**

**Première partie**
Introduction
Définition du calendrier
Principes généraux
Quelques définitions
La semaine ; les noms des jours
Histoire des calendriers
Préhistoire et monuments mégalithiques
L'histoire
Calendrier chaldéen ou babylonien
Calendrier égyptien
Calendrier hébreu ancien
Calendier israélite moderne
Calendrier musulman
Calendrier chinois
Calendrier maya
Calendrier aztèque
Calendrier persan
Calendrier grec
Calendrier romain
Calendrier julien
Calendrier grégorien
Calendrier républicain
Calendrier universel
Période julienne

**Deuxième partie**
Calcul de la règle solaire grégorienne
Cycle de Méton
Vers un calendrier solaire parfait
Calcul du Jour Julien, (date julienne)
Calcul du Jour Julien, (date grégorienne)
Jour julien modifié
Durée
Retrouvons le jour de la semaine
Comput Ecclésiastique
Cycle solaire
Indiction romaine
Nombre d'or
Lettre dominicale
Détermination du jour de la semaine
Calendrier lunaire
Calcul de l'épacte grégorienne
Calcul de la pleine lune pascale
Date de Pâques
Construction d'un almanach
Conclusion
Synthèse
Exercices
Schéma chronologique
Bibliographie
Index

**Introduction**

Le calendrier est un objet d'usage quotidien, que l'on pense bien connaître, et pour lequel toute explication semble inutile. En fait, il s'agit d'un objet complexe, dont l'élaboration se poursuit depuis l'aube de l'humanité. Il est basé sur l'étude de phénomènes astronomiques, mais prend en compte toutes les croyances et superstitions qui ont vu le jour au fil des âges. Une bonne compréhension d'un calendrier fait par conséquent intervenir, outre l'astronomie, l'histoire du peuple qui l'a créé, et cette histoire porte sur plusieurs millénaires…

Les religions ont toutes influencé la mesure du temps, ne serait-ce que pour préciser la date des fêtes à célébrer. Jusqu'à une époque très récente, elles ont joué un rôle moteur dans la compréhension des mouvements des astres. Les principes essentiels de ces religions doivent donc être connus.

Le calendrier est un substrat astronomique sur lequel se sont développés les besoins de l'humanité : techniquement, de multiples solutions sont possibles, elles sont départagées par les contraintes *a priori* que l'homme a ajouté. Un calendrier est inséparable de la civilisation qui l'a utilisé ou l'utilise.

Les débuts de l'astronomie ont été la mesure et la prévision des positions des astres. La bibliothèque d'Assurbanipal à Ninive (650 avant J.C.) contenait un grand nombre de tablettes d'argile consacrées à l'astronomie, les plus anciennes remontant au XX$^{e}$ siècle avant J.C. Elles mentionnent la marche en zig-zag des planètes, les constellations et les levers héliaques (tous les mots particuliers rencontrés dans cette introduction seront définis dans le corps du texte), une description précise du zodiaque tel qu'on le connait aujourd'hui, des tables des éclipses passées, et des tentatives de prévision des futures. On dispose d'un almanach de l'année 568 avant J.C. année 37 du règne de Nabuchodonosor II. Les positions de la lune et des planètes y sont bien mentionnées, ainsi que les conjonctions. Le ciel y est décomposé en 12 parties, au lieu de

4 auparavant (une par saison).

Mais à côté de cela, on trouve aussi des conseils prophétiques : "*quand Mercure sera visible au mois de Kislou, il y aura des voleurs dans le pays*" (comme nos astrologues actuels, ils ne se mouillaient pas beaucoup !). Les grecs ont fait de l'astronomie une science, dépouillée de toutes ces superstitions, et basée sur l'analyse raisonnée des observations.

La plus ancienne interprétation du mouvement des astres consiste à invoquer des puissances divines. De là à penser que ces puissances agissent par la même occasion sur le destin des humains, il n'y a qu'un pas qui a été franchi en Mésopotamie dès le III$^{e}$ millénaire avant J.C.

L'autre interprétation est celle des lois régissant les interractions des astres entre eux. Elle est de nature scientifique, et la précision impressionnante des trajectoires des sondes spatiales montre que cette approche est la bonne.

Les mouvements des astres sont lents (tout au moins leur déplacement apparent dans le ciel) ; aussi faut-il des observations s'étendant sur de très longues durées pour accéder à la précision nécessaire. Et pour repérer les époques de ces observations, un calendrier est requis.

Mais on aboutit vite à un cercle vicieux : pour définir ce calendrier, il faut connaître les mouvements des astres principaux, le Soleil et la lune… Il est alors évident que l'étude de ces mouvements et la définition des calendriers se sont élaborés en même temps, toute découverte d'un côté entraînant un progrès de l'autre.

Les erreurs, parfois graves, introduites dans la définition des premiers calendriers, ont produit des décalages au cours des années ou des siècles. Ces décalages, par leur mesure, ont permis en retour de corriger le calendrier, et de préciser la durée de l'année ou de la lunaison !

Tous les calendriers ont des défauts, provenant d'une connaissance astronomique très imparfaite pour les plus anciens, d'incompatibilités entre les mouvements des divers astres pour les suivants, et des contraintes sociales ou religieuses pour les plus récents. L'habitude fait que ces défauts ne nous apparaissent pas dans le calendrier que nous utilisons ; pire encore, ils font partie de notre patrimoine, et nous refuserions peut-être de les supprimer… Des tentatives de réforme ont été faites ; elles ont abouti à des échecs car elles rompaient avec la tradition.

**Définition du calendrier**

Le nom *Calendrier* vient du latin *Calendæ*, qui est le nom du premier jour du mois à Rome.

| | |
|---|---|
| **Petit Larousse :** | Tableau des jours de l'année / Système de division du temps |
| **Petit Robert :** | Almanach, Agenda / Système de division du temps en années, mois et jours. |

Le *calendrier* ; désigne donc d'une part le petit manuel représentant les jours d'une année particulière, et d'autre part, le système conventionnel de division du temps sur de longues périodes. Il n'est concerné par les courtes périodes que pour la définition du jour (début précis). La seconde partie de la définition du Petit Robert nous indique de plus que les éléments essentiels sont **le jour**, **le mois** et **l'année** ; ce sont eux qu'il faudra accorder de manière cohérente. On remarque que le jour est commode pour les durées courtes, le mois pour les durées moyennes, et l'année pour les longues durées.

Nous examinerons ces deux aspects du Calendrier, nous attachant d'abord à définir un système de division du temps satisfaisant certaines contraintes naturelles ou historiques, puis essayerons de produire un *almanach* particulier, correspondant au calendrier en usage actuellement dans la quasi-totalité des pays du monde.

Le mot almanach nous vient de l'arabe. C'est le nom donné à des calendriers égyptiens. Il a été introduit à Rome et en Grèce sous les formes *Almanachus* et *Almanakon*. L'almanach a longtemps été le seul livre laïque possédé par le peuple. Cette tradition de diffusion générale se maintient à l'heure actuelle par le calendrier des postes, qui a sa place dans de nombreux foyers. De nos jours, il a pris un aspect rébarbatif ; mais dans un passé pas si lointain, il était une émanation de l'art populaire, et reste en ce sens un témoin de son temps. Il subsiste encore en France quelques almanachs, en général rattachés à des traditions locales (*Armana Prouvençau*, *Almanach du Vieux Savoyard*, *le Messager Boiteux* …). Enfin, il est impossible d'omettre l'Almanch Vermot, avec un esprit si particulier !

**Principes généraux**

Un système de division du temps doit obéir à des règles de construction très strictes, sur lesquelles tout le monde est d'accord. Il doit permettre de **prévoir** certains événements importants, comme par exemple le début de l'année ou la date des fêtes. Nous verrons que ce caractère prédictif est d'apparition relativement récente.

Pour mesurer de longues durées, la première possibilité est une simple numérotation des jours. Mais elle fait vite apparaître de grands nombres, ce qui la rend très désagréable pratiquement. L'inaptitude des premiers peuples à gérer de tels nombres leur a interdit ce genre de solution ; aucun calendrier historique n'est basé sur ce principe si simple. Cependant, on a défini assez récemment la *Période Julienne*, qui est une telle numérotation ; mais elle est réservée à l'usage des chronologistes et des astronomes dans le cadre de leur travail.

Pour rendre une numérotation plus pratique, on peut définir des multiples de la base de numération utilisée : définir des groupes de jours, par exemple 10, 100 ou 1000… ces groupements artificiels n'ont aucun rapport avec la durée de l'année, et la lecture d'une date ne nous renseigne pas sur la saison à laquelle elle correspond. Une solution de ce genre a été utilisée par les Mayas.

Enfin, pour les peuples de l'Antiquité, qui avaient un contact avec la nature bien plus proche que nous, la présence et l'aspect des astres ont représenté des horloges naturelles bien plus attrayantes que les nombres abstraits. Aussi, tous les calendriers historiques, à l'exception de ceux d'Amérique centrale, sont basés sur les mouvements des astres.

Les deux astres les plus importants de notre ciel ont donc imposé leurs périodicités (La Genèse dit que Dieu créa la lumière le premier jour, le Soleil et la Lune le quatrième seulement. La Bible ne considère donc ces astres que comme signes du temps).

- l'année solaire
- le mois défini à partir des phases de la lune.

Le jour n'est pas simple, car il est variable au cours de l'année : la journée est pratiquement deux fois plus longue en été qu'en hiver pour les latitudes moyennes. Pourtant, il est le rythme biologique fondamental de tous les êtres vivants à la surface de la Terre.

L'année des saisons est évidente par le cycle des variations de température, mais très difficile à définir précisément. Les variations sont lentes, le Soleil ne change pas d'aspect au cours de l'année, seule sa position dans le ciel varie. Tous les phénomènes qui dépendent des saisons, comme la végétation ou le climat, n'ont qu'une périodicité approchée : la chaleur de l'été ne revient pas à date fixe. Cependant la hauteur du Soleil qui en est la cause a un cycle très précis. Il faut en tenir compte pour l'agriculture, et donc maîtriser sa connaissance.

Les premières civilisations ont eu de grandes difficultés pour déterminer la durée de l'année, du fait de leurs connaissances astronomiques très limitées. Surtout, il existe plusieurs sortes d'années (qui seront précisées plus loin), définies par des phénomènes astronomiques différents, et malheureusement celle qui détermine les saisons, l'*année tropique*, n'est pas directement accessible à l'observation.

Après le jour et l'année, la dernière unité de temps est le mois (la semaine sera définie plus loin). Il provient directement de l'aspect de la lune, et sa durée est variable et toujours proche de la lunaison (intervalle entre deux pleines lunes, qui vaut à peu près 29 jours et demi). Son origine lunaire est attestée par l'éthymologie : en grec, lune se dit μηνη (mêné) et mois μην (mên) ; en anglais, *Moon* et *month*, en allemand *Mond* et *monat*…

Le mois lunaire est aussi important que l'année, d'abord pour fournir un repère temporel plus court, ensuite parce que la lune est restée fort longtemps (jusqu'au XIX$^{e}$ siècle) le seul éclairage nocturne. La succession des phases est mieux marquée que les saisons, plus facilement observable, et de ce fait les premiers calendriers ont été lunaires. Près de l'équateur, les saisons sont moins marquées ; dans ces contrées, un calendrier primitif ne pouvait être que lunaire.

Mais la durée des lunaisons est très variable, aussi leur prévision correcte a été longtemps impossible. Tous les calendriers basés sur le mois lunaire étaient donc non prédictibles, sujets à des corrections empiriques destinées à les recaler lorsque les erreurs s'avéraient trop importantes. De plus, même en moyenne, le mois lunaire ne contient pas un nombre entier de jours.

| Soleil | lune |
|---|---|
| aspect toujours semblable<br>périodicité très floue<br>mais très régulière | aspect très changeant<br>périodicité très visible<br>mais très irrégulière |

La lune est le miroir aux alouettes des concepteurs de calendriers : elle semble très facile a aborder, mais c'est un piège mortel dans lequel la plupart des peuples sont tombés. Il leur a fallu ensuite des millénaires pour résoudre à peu près le problème. Par contre, la périodicité du Soleil (des saisons) est difficile à mesurer ; mais au cours du temps, l'observation des défauts du calendrier donne la solution pour le corriger.

Certains calendriers ont été établis à la fois sur la Lune et le Soleil, pour tenter de s'accorder aux deux astres simultanément. On les dit *mixtes* , ou *luni-solaires*. Les périodes solaire et lunaire étant incommensurables (il n'y a pas un nombre entier de lunaisons dans une année solaire, même en valeurs moyennes), ces constructions ne peuvent être qu'imparfaites.

Notre calendrier, pour sa partie qui ne concerne pas la date de Pâques, est exclusivement solaire. Nos mois sont des unités abstraites n'ayant plus aucun lien avec les phases de la Lune qui en sont l'origine. Cependant de nombreuses fêtes, d'origine religieuse mais donnant lieu à des jours chomés, dépendent de la date de Pâques, qui est liée à la lunaison. Notre calendrier grégorien est donc solaire, avec des fêtes luni-solaires.

Tout calendrier permettant de repérer les jours, implique la définition d'une origine. On appelle *ère* cette date, qui ne peut qu'être définie par rapport à un autre système, plus ancien.

La diversité des calendriers pose alors le problème de l'équivalence, c'est-à-dire du passage d'un calendrier à un autre. Si ce changement est facile à faire entre le calendrier grégorien et le calendrier julien en raison de leur lien de filiation, il en est tout autrement si on s'intéresse à un calendrier plus ancien, moins bien défini.

En particulier, pour ceux qui ont été élaborés de manière empirique pour suivre les phases de la lune ou les saisons, il est indispensable de posséder les tables de correction, ce qui est rare pour les plus anciens. On peut donc posséder des dates parfaitement définies dans un calendrier et ne pas pouvoir les rattacher à notre calendrier actuel, par conséquent être incapable de définir précisément la durée qui s'est écoulée depuis. Ce fait, à la rigueur tolérable pour l'historien, est parfois regrettable pour l'astronome qui a du mal à utiliser des observations anciennes.

Un peu en marge du calendrier, l'usage de l'heure d'été, avec un changement d'heure à date variable, ne se prête pas au calcul ; pour connaître l'instant d'un événement dans un temps uniforme, il faut recourir là aussi à des tables.

**Quelques définitions**

*Equinoxe* vient du latin *æqua nox* signifiant "nuit égale" (au jour). C'est le moment où les durées du jour et de la nuit sont égales. Cela se produit deux fois pas an, aux équinoxes de printemps et d'automne. Astronomiquement, les équinoxes sont définis par les instants où le centre du Soleil traverse le plan de l'équateur au cours de l'année. Les équinoxes sont donc les points de l'équateur où il coupe l'orbite de la Terre autour du Soleil.

*Solstice* vient du latin *sol stat*, signifiant que le Soleil est stationnaire, restant d'un jour à l'autre à la même hauteur au-dessus de l'horizon à midi. Les solstices sont relativement faciles à mesurer, à l'aide d'un *gnomon*, simple bâton planté dans le sol dont la longueur de l'ombre indique la hauteur du Soleil.

Les *Tropiques* ; sont deux cercles, sur la Terre ou sur la sphère céleste. Sur la sphère céleste, ils délimitent les points extrêmes, les plus proches des pôles, atteints par le Soleil au cours de l'année. Sur Terre, ce sont les endroits où le Soleil passe au zénith (exactement à la verticale) une fois et une seule dans l'année. Ceci se produit au moment des solstices: Tropique du Cancer dans l'hémisphère nord correspondant au solstice

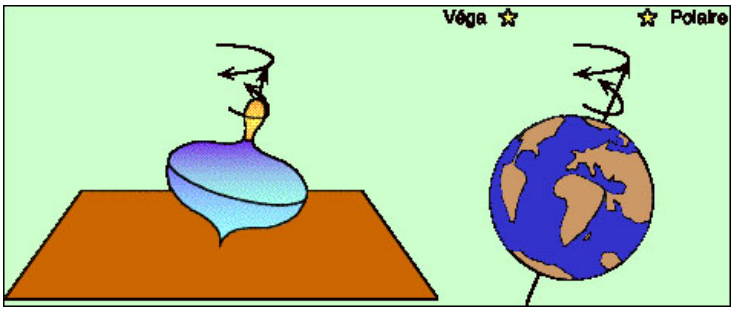
d'été, et Tropique du Capricorne dans l'hémisphère sud correspondant au solstice d'hiver. D'après Bigourdan, le mot tropique viendrait du grec "τροπαι ηλιου"(*tropaï éliou*), qui signifie *les révolutions du Soleil*. Le verbe τρεπω signifie *tourner* (τροπαι βορεαλ= solstice d'hiver); les grecs disent *après que le Soleil a tourné* pour *est passé en hiver* (ou en été). Pour indiquer la direction d'une île, Homère dit en effet qu'elle est *plus au nord que le tournant du Soleil*.

Trois valeurs déterminent les éléments essentiels du calendrier :

- *l'année tropique* est l'intervalle de temps entre deux équinoxes de printemps moyens consécutifs (l'équinoxe vrai est très légèrement variable). C'est l'année des saisons dont on a l'habitude, qui règle le calendrier. Sa durée est de 365,2422 jours, ce qui fait 365j 5h 48min 46s. Astronomiquement, on considère qu'elle commence lorsque la longitude tropique du Soleil atteint 280°, c'est-à-dire dans la journée du 31 décembre. ; mais ceci n'a aucun rapport avec le début conventionnel de l'année calendaire.
- *l'année sidérale* est l'intervalle de temps entre deux passages successifs du Soleil au même point par rapport aux étoiles. Sa durée est de 365j 6 h 9 min 10 s ou 365,25636 j.
- *la lunaison* ou *révolution synodique*, est l'intervalle de temps entre deux nouvelles lunes consécutives. Cet intervalle est ortement variable, car il dépend des positions relatives du Soleil, de la Terre et de la Lune, et cumule donc les inégalités de mouvement de ces astres. On définit donc la *lunaison moyenne*, dont la valeur est de : 29,53059 jours ou 29 j 12 h 44 min 2,9 s.

*Précession des équinoxes*. L'année sidérale est plus longue que l'année tropique de 365,25636 - 365,24220 = 0,01416 j (20 min 23,5 s). Donc le Soleil revient plus vite à l'équinoxe que devant une étoile donnée. Ou encore l'équinoxe se déplace lentement à la rencontre du Soleil. L'axe de rotation de la Terre, ou ligne des pôles, perpendiculaire à l'équateur, décrit donc un cône sur le ciel. Le pôle nord décrit donc sur la voûte céleste un cercle qui l'amènera à 27' de l'étoile α Umi (α UMi est dans la constellation de la Petite Ourse, en latin *Ursa Minoris*, nommée α parce que c'est la plus brillante, de magnitude 2,1) aux alentours de l'an 2100 ; il en est actuellement à un peu plus d'un degré, et c'est elle qui sert d'étoile polaire grâce à son éclat. Dans 12 000 ans, Véga sera la polaire !

Le mouvement de précession de la Terre est exactement le même que celui qui fait décrire un cône à l'axe d'une toupie. Vous pouvez imaginer que la toupie représente la Terre, et que son axe de rotation désigne à chaque instant un point du plafond, qui représente le pôle nord.




Tournant chaque année de 0,01416 j (20 min 23,5 s), l'équinoxe fait donc un tour complet en 365,25636 / 0,01416  25 795 ans *i.e.* à peu près 26 000 ans (période de la précession). La période de la précession étant très longue, on a l'impression de revoir exactement les mêmes étoiles au même moment de l'année ; en fait, il y a un décalage progressif, qui n'est sensible que sur de très longues périodes.

*Lever héliaque*. C'est un phénomène dont l'étymologie provient du nom grec du Soleil, *Helios*. Au cours de l'année, le Soleil parcourt tout le Zodiaque, et reste à peu près un mois dans chaque constellation. Lorsqu'il est dans le Lion par exemple, cette constellation est invisible, et en particulier l'étoile Régulus qui en fait partie. Lorsque le Soleil sort du Lion, Régulus va se dégager de plus en plus de la clarté solaire, jusqu'à redevenir visible dans l'aube. On appelle lever héliaque de Régulus le premier jour où elle peut être observée à nouveau.

Bien que l'observation d'un lever héliaque soit délicate, et parfois entachée d'erreur, c'est une méthode assez fine de détermination de l'année, par ailleurs très floue. Il faut noter toutefois que le lever héliaque d'une étoile se reproduit lorsque le Soleil reprend la même position par rapport aux étoiles, et qu'il mesure donc l'année sidérale et non l'année tropique. Mais la précision de sa détermination étant de l'ordre d'un jour, la différence de 20 minutes entre les deux types d'années n'est pas génante.

Un calendrier purement lunaire présente une année de l'ordre de 29,53059 × 12 = 354,36708 jours, qui se décale très vite par rapport aux saisons (définies par l'année tropique de 365,2422 jours, qui a donc 11 jours de plus). Par contre, la Lune est toujours nouvelle au début du mois, et pleine le 15, ce qui est en accord avec la définition du mois.

Inversement, un calendrier posant par principe que l'année est solaire, et qu'elle est toujours constituée du même nombre de mois (12 mois, fin de l'année correspondant avec la fin d'un mois) implique que le mois ne correspond plus à la lunaison (puisque 12 lunaisons ne comptent que 354 jours), et par conséquent la Lune peut être pleine à n'importe quelle date.

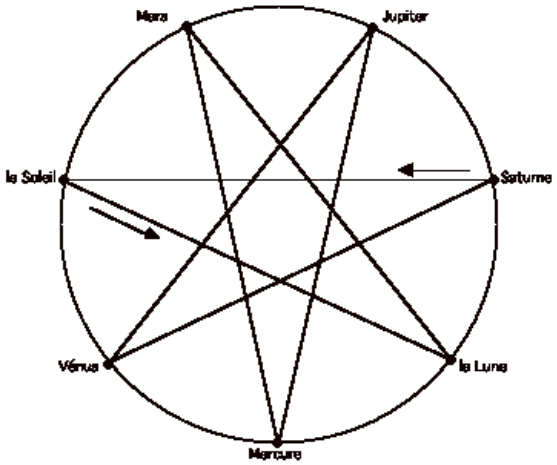
Une solution acceptant l'indépendance des deux phénomènes, avec de vrais mois lunaires et une année solaire, verrait la fin de l'année tomber à date variable, car janvier par exemple reviendrait tous les 354,36708 jours (et pas forcément en fin de jour). Dans ces conditions, si on fêtait une nouvelle année le 31 décembre à minuit, la suivante serait le 11 janvier à 8 heures 48… Aimeriez-vous réveillonner le 11 janvier à 8 h 48 du matin ?

Il faut bien comprendre que les contraintes à prendre en compte sont autant de nature humaine (fin de l'année = fin de mois = fin de jour, régularité des semaines, retour des anniversaires dans les mêmes circonstances…) que de nature astronomique (périodes moyennes, variabilité…).

**La semaine ; les noms des jours**

L'origine lointaine de la semaine, provenant des phases de la lune, se retrouve dans les textes babyloniens, avec les 7 jours différents, mais sans la continuité à laquelle nous sommes habitués. En fin de mois, on revenait au premier jour de la semaine pour inaugurer le mois suivant (comme si tous les premiers du mois chez nous étaient des lundis). Les Hébreux, héritant de cette tradition, ont fondé la semaine que nous connaissons, avec sa continuité. D'autres civilisations ont utilisé un groupement des jours différent : 4 jours en Afrique occidentale, 5 dans le centre de l'Asie, 6 en Assyrie, 10 en Egypte. Une coïncidence a voulu qu'à l'époque sept astres mobiles aient été connus (visibles à l'oeil nu). Le chiffre 7 a donc pris une signification importante, et les 7 jours de la semaine ont été associés à ces astres comme on peut le voir sur le schéma ci-après.

Cette association montre aussi l'intérêt que les Anciens portaient aux figures géométriques régulières (ici, un heptagone étoilé !). Les astres dont les noms figurent sur ce schéma sont les *Planètes* que connaissaient les anciens.




**Attention** : le Soleil et la Lune ne sont pas des planètes dans la terminologie moderne ; le mot planète vient du grec πλανητοσ (*planetos*), qui signifie *errant*. Dans ce sens étymologique, le Soleil et la Lune en font partie. Les planètes sont supposées tourner autour de la Terre, et l'ordre obtenu en suivant les branches de l'heptagone étoilé est celui de leurs distances supposées à la Terre. Il n'a bien sûr aucune justification astronomique, le centre réel du système étant le Soleil.

A partir de Saturne, en suivant la flèche on obtient successivement : le Soleil, la Lune, Mars, Mercure, Jupiter et Vénus. La correspondance entre les *planètes* ou dieux et les noms des jours est donnée par le tableau ci-dessous :

| **dieu ou *planète*** | | **nom du jour** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| latin | scandinave | latin | français | anglais | allemand | provençal | italien |
| Soleil | Soleil | Solis dies | dimanche | sunday | sonntag | dimenche | domenica |
| lune | lune | Lunae dies | lundi | monday | montag | dilun | lunedi |
| Mars | Tyr | Martis dies | mardi | tuesday | dienstag | dimar | martedi |
| Mercure | Odin | Mercurii dies | mercredi | wednesday | mittwoch | dimecre | mercoledi |
| Jupiter | Thor | Jovis dies | jeudi | thursday | donnerstag | dijou | giovedi |
| Vénus | Frigg | Veneris dies | vendredi | friday | freitag | divendre | venerdi |
| Saturne | Saterne | Saturni dies | samedi | saturday | samstag | disate | sabato |

On remarquera que les noms des jours (latin *dies* : jour, provenant d'une racine indo-européenne *diew* : lumière) dérivent du nom du dieu latin ou scandinave correspondant, ou de la *planète*. On notera cependant :

- dimanche vient de *Dies Dominica* = jour du Seigneur, ce qui est évident en italien ; ces mots ne dérivent pas du nom du Soleil. C'est le cas pourtant en anglais et en allemand.
- mittwoch signifie littéralement milieu de semaine ; donnerstag signifie jour de Thor ;
- en provençal, *di* (*dies*) est placé en tête (di-lun = jour-*de la* Lune) alors que *di* en français, *tag* en allemand et *day* en anglais sont placés après (sauf pour dimanche en français).

En Bulgare, les noms des jours sont formés de manière différente :
dimanche se nomme Nédélia ; c'est le nom d'une sainte orthodoxe.
lundi se dit *après dimanche* (Ponédelnik).
mardi, jeudi et vendredi se nomment d'après leur rang à partir du dimanche ;
mercredi se dit *milieu* (comme en allemand) ;
enfin, samedi dérive directement de Sabbat.

# Histoire des calendriers

## *La préhistoire et les monuments mégalithiques*

La préhistoire nous a laissé quelques monuments qui attestent déjà du soucis de comprendre le



mouvement des astres. Le plus célèbre d'entre eux est celui de Stonehenge (ci-contre), dont l'orientation permet, depuis le centre, de voir le Soleil se lever dans la plus grande porte au solstice d'été.

Une pierre de la Vallée des Merveilles ne laisse pénétrer le Soleil levant qu'aux équinoxes.

On trouve de tels alignements en Amérique centrale dans les grandes pyramides à degrés.

Des représentations picturales des astres principaux se trouvent dans le monde entier ; on peut penser que les intempéries ont détruit d'innombrables autres oeuvres, moins bien placées.

## *L'histoire*

Les plus anciens textes connus concernent l'observation du ciel et ont 6 000 ans. Ils proviennent de Mésopotamie. Ils sont à la base des calendriers égyptien, babylonien, hébreu ancien, donc indirectement du nôtre. D'autres calendriers anciens proviennent de Chine et d'Amérique latine.

Les renseignements à propos de ces calendriers sont parfois imprécis, et même faux ou contradictoires. Les notes qui suivent donnent des indications sur les plus importants, et nous développerons tout particulièrement les calendriers julien et grégorien, puisque ce dernier est en usage presque universel maintenant.

L'ordre de présentation choisi n'est pas l'ordre historique, ce qui serait difficile puisque plusieurs calendriers ont existé simultanément. Nous grouperons plutôt les grandes familles de calendriers, montrant ainsi les apports des uns aux autres et leur évolution. Pour les plus anciens, l'absence de traces écrites ne permet pas de préciser les influences ; ceci introduit une part d'arbitraire dans l'ordre de présentation.

### Calendrier chaldéen ou babylonien

Les plus anciennes tablettes d'argile datent de 3800 ans avant J.C., sous le règne de Sargon l'Ancien, et montrent que l'astronomie était déjà développée depuis longtemps.

Elles nous indiquent les plus anciennes observations astronomiques connues. La civilisation des Chaldéens ou Babyloniens remonte au moins à 4000 ans avant J.C. La précision de leur savoir a servi de base à la science grecque. Ils connaissaient le mouvement des planètes, les éclipses, la précession des équinoxes ; ils ont divisé le cercle en 360° et le degré en 60 minutes. Ils utilisaient le *gnomon* ; (bâton planté verticalement dans le sol, dont on mesure l'ombre ; il permet de définir les solstices) et le cadran solaire. Ils ont jeté les bases des premiers calendriers.

> Les peuples anciens ont naturellement compté sur leurs doigts, ce qui a donné la base de numération 10 ; mais 12 a aussi été utilisé car il possède 4 diviseurs propres, contre deux seulement pour 10. Dans le commerce, on utilise encore de nos jours la douzaine. De ces deux bases, on a dérivé la base 60, qui possède les diviseurs de 10 et ceux de 12.

Les Babyloniens ont défini le *zodiaque* : c'est la bande de ciel dans laquelle se meuvent les planètes. Pour indiquer où se trouve une planète à un instant donné, ils ont divisé le zodiaque en douze parties, et les ont nommées ; étant un peuple pastoral, ils ont choisi des noms évoquant leur travail agricole : la zone où se trouvait le Soleil au moment de la naissance des agneaux a pris le nom de *Bélier* ; celle où ils utilisaient les boeufs pour labourer s'est nommée *Taureau* ; celle dans laquelle le Soleil levant cesse de progresser vers le nord de jour en jour, pour redescencre vers le sud a pris le nom de l'écrevisse (*Cancer* = Crabe) qui marche à l'envers ; les *lions* qui s'approchaient des villes à une certaine époque ont donné leur nom à une zone ; la saison des pluies a donné le *Verseau* ; la *Balance* correspond à la période où nuit et jour sont égaux ; le *Sagittaire* indique la chasse aux bêtes sauvages… Ces noms d'animaux ont donné le nom de la bande : *zodiaque* vient du grec *zôô* vivre, *zoidon* figure d'animal, et *zoidiakos* qui concerne les constellations d'animaux

Ceci a été défini 4 300 ans avant J.C. ; le Soleil était alors dans le Taureau au moment de l'équinoxe de printemps. Mais depuis, les choses ont changé : avec la lente dérive de la précession des équinoxes, le Soleil est maintenant dans les Poissons au moment de l'équinoxe, et sera bientôt dans le Verseau (l'équinoxe faisant un tour complet en 26.000 ans, il parcourt 59° en 4.300 ans ; ce qui représente presque deux constellations, puisque chacune occupe 30° sur le ciel). Alors, les noms, ou signes, ne correspondent plus avec les constellations qui accueillent le Soleil.

Le calendrier babylonien est empirique, fondé sur l'observation au jour le jour, sans prévision possible ; il était suffisant pour la société pastorale qui l'utilisait. La Lune a imposé une unité de mesure en rapport avec son évolution : le mois. Les mois se succèdent avec des durées de 29 et 30 jours. Les Babyloniens ont essayé d'accorder leur calendrier sur les saisons, en utilisant une période de 12 mois, l'année. Les éléments essentiels étaient déjà en place. Ils découlent de manière évidente des phénomènes naturels les plus perceptibles.

Cette année dure $29 \times 6 + 30 \times 6 = 354$ jours, d'où un déficit de 11 jours par rapport à l'année solaire (définissant les saisons). Au bout de 3 ans, il manque 33 jours, à peu près un mois. Par décret royal, l'un des mois de l'année est redoublé pour combler ce déficit. En moyenne, le calendrier babylonien comptait donc deux années de 12 mois, suivies d'une de 13. L'adjonction étant empirique, et pas toujours correctement effectuée, la chronologie babylonienne est inutilisable. L'année de 13 mois porte le nom d'*année embolismique* (du grec το εμβολισμα = pièce rajustée à un vêtement).

Le calendrier babylonien est donc un calendrier lunaire, avec ajustement très approximatif sur le Soleil ; de ce fait, on peut le dire luni-solaire. A cause de l'empirisme des ajouts, il est impossible de donner une valeur moyenne de l'année, et on a constaté des années communes de 353, 354 et 355 jours, et des années embolismiques de 383, 384 et 385 jours (nous retrouverons ces valeurs dans le calendrier israélite, mais avec une plus

grande régularité ; cette similitude n'est cependant qu'apparente, car les causes sont toutes différentes).

Pour détecter la dérive, les Babyloniens utilisaient le lever héliaque d'une étoile brillante. Le mois embolismique sera utilisé par de nombreux peuples ; et l'ajout d'un jour bissextil procède de la même méthode, en donnant plus de souplesse à l'ajustement (les à-coups étant moins importants).

Le début du mois est déterminé également par l'observation : le grand prêtre déclare le mois commencé dès qu'il a pu observer le croissant de la Lune après le coucher du Soleil. Le mois et le jour commencent donc au coucher du Soleil. Si le ciel était nuageux le jour où la Lune aurait dû se montrer, il attendait le lendemain ; si le temps était encore défavorable, il déclarait malgré tout le mois commencé, de sorte que l'erreur n'excédait pas 1 jour. L'année commençait au printemps avec le mois de Nisanu.

Les mois ont, semble-t-il, été découpés en 6 périodes de 5 jours, avec des sacrifices à la fin de chaque période. Ceci serait en relation avec l'usage du système sexagésimal (à base 60, comme nos heures de 60 minutes, et nos minutes de 60 secondes) connu depuis la plus haute antiquité à Babylone (*Bab Iloû* : porte de Dieu).

Mais les mois ont été découpés d'autre part en semaines de sept jours, les deux derniers jours des mois de 30 jours ne portant pas de noms, et la semaine reprenant au début le mois suivant. Il n'y avait donc pas la continuité de la semaine que nous connaissons, qui se reproduit indéfiniment sans relation avec les mois et les années.

Chaque jour était dédié à l'une des planètes (au sens *astre errant*, incluant Lune et Soleil). Le dernier jour était consacré à Ea (Saturne) qui était censé apporter la paresse ; il est à l'origine du Sabbah, et de notre dimanche de repos ! L'Eglise dit que ce sont les apôtres qui ont transféré le jour de repos du Sabbah (samedi) au dimanche. Grâce aux tablettes d'argile, les noms babyloniens et assyriens des mois nous sont connus :

| n° | nom babylonien | nom assyrien | n° | nom babylonien | nom assyrien |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Nisanu | Nisanu | 7 | Tashritu | Tasritu |
| 2 | Aïru | Aïru | 8 | Arajshamma | Arah-Samna |
| 3 | Sivanu | Sivanu | 9 | Kisilivu | Kisilev |
| 4 | Douzu | Douzu | 10 | Thebitu | Tebetu |
| 5 | Abu | Abu | 11 | Shabatu | Sebatu |
| 6 | Eliulu | Ululu | 12 | Addaru | Adaru |

Une tablette d'argile datant de 2 000 ans avant J.C. témoigne d'un de ces ajouts, effectué par le roi Hammourabi. Une étude statistique des mois ajoutés montre que les Babyloniens utilisaient une période de 19 ans dès l'an 200 de Nabonassar, *i.e.* vers 550 avant J.C., comprenant 7 années embolismiques aux rangs 3, 6, 8, 11, 14, 17 et 19. Curieusement, l'année 17 du cycle est allongée par un redoublement du mois Ululu, alors que les autres le sont par un mois Adaru II.

**Calendrier égyptien**

Son origine remonte à 10 000 ans ! C'est le premier calendrier qui ait délaissé le rythme lunaire, pour se baser exclusivement sur le Soleil. Pour le peuple cultivateur égyptien, le retour de la crue fertilisante du Nil était bien plus important que les phases de la lune. Ce calendrier comprend néanmoins 12 mois de 30 jours divisés en 3 décades ($12 \times 30 = 360$ est l'origine de la division du cercle en 360 °). L'année est trop courte, et se décale très vite sur les saisons (1 mois en 6 ans).

Vers 4.230 avant J.C. lui succède le *calendrier vague*. Aux 12 mois de 30 jours précédents s'ajoutent 5 jours épagomènes, hors mois, pour totaliser 365 jours. Il a été utilisé pendant plus de 4.000 ans. Encore trop court de presque un quart de jour, ce calendrier n'est pas ancré sur les saisons. Au $V^{e}$ millénaire, à Memphis, le *lever héliaque* de Sirius coïncidait avec la crue du Nil. Le début de l'année, le $1^{er}$ Thot, fut fixé à ce jour-là. Mais l'année étant trop courte, le lever héliaque de Sirius se fit le 2, puis le 3 Thot… Les Egyptiens constatèrent rapidement que la dérive était d'un jour en 4 ans. Ceci donnait une année de 365,25 jours, valeur connue 4.000 ans avant notre ère. Le décalage n'a pas arrêté les Egyptiens qui ont conservé leur calendrier. Au bout de 1.461 années vagues, l'accord se refit. On appelle cette durée *période Sothiaque* (*Sothys* est le nom égyptien de Sirius).

| nom de la saison | caractéristique | noms des mois | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Akhet | inondation | Thot | Phaophi | Athyr | Choiak |
| Peret | végétation | Tybi | Mechir | Phamenoth | Pharmuti |
| Shemon | récoltes | Pachon | Payni | Epiphi | Mesori |

La durée de l'année est fonction de l'observation de son début et de sa fin (début de la suivante). Si le lever héliaque de Sirius est connu à un jour près, l'erreur sur l'année est de deux jours. Mais sur les 4.000 ans d'usage du calendrier vague, l'erreur reste la même, et doit être divisée par 4.000. Les Egyptiens auraient pu connaître, au terme de l'emploi du calendrier vague, la valeur de l'année à $2 / 4.000^{e}$ de jour près, *i.e.* à $2 / 4.000^{me}$ de $24 \times 60 \times 60$ s = 43,2 s. Il faut bien remarquer que cette valeur ne dépend d'aucun appareil de mesure du temps !

L'année vague, sans aucun ajout empirique de jours ou de mois, est un excellent calendrier pour l'astronome, car toutes les années ont 365 jours. Pour calculer une durée, il suffit de multiplier le nombre d'années écoulées par 365. Ce n'est pas vrai avec les autres calendriers.

Le roi Ptolémée III Evergète (Evergète signifie : *le bienfaiteur*) a essayé d'améliorer le calendrier par le décret de Canope en 238 avant J.C. en ajoutant un jour épagomène tous les 4 ans. Ce calendrier préfigure le calendrier julien, pour lequel il a certainement été pris pour modèle. Mais le peuple ne l'a jamais utilisé.

Les Egyptiens ont divisé l'année en périodes de 10 jours, et ont associé à chaque décade une étoile dont le lever héliaque marquait le début. Ces étoiles étaient nommées *décans* (à cause des dix jours). Elles avaient un autre rôle : elles définissaient une division de la nuit. Le décan $D_1$ qui

marquait une décade se levait chaque jour un peu plus tôt ; puis un nouveau décan $D_2$ se levait à son tour, et marquait la décade suivante. Alors, le lever de $D_1$ indiquait le début de la dernière heure de la nuit, qui s'achevait au lever de $D_2$. Au cours d'une nuit d'été, 10 décans se levaient successivement, et divisaient la nuit en 10 heures ; auxquelles s'ajoutaient une heure de crépuscule et une d'aube, ce qui faisait 12. C'est là l'origine de nos journées de 24 heures.

**Calendrier hébreu ancien**

Les Hébreux ont emprunté leur calendrier aux Babyloniens ; il est donc essentiellement lunaire avec ajustement solaire. Les noms des mois sont semblables dès la sortie d'Egypte en 1645 avant J.C. au mois de Nisan ( avril). Moïse impose une année religieuse qui commence en ce mois. Le calendrier est défini par le code d'Hammourabi. Comparer les noms des mois Hébreux ci-dessous avec ceux des mois Babyloniens :

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Nisan | Iyar | Sivan | Tamouz | Ab | Elul |
| Tishri | Marchesvan | Kislev | Tebet | Sebat | Adar |

Les Hébreux attachaient une grande importance à la célébration des anniversaires dans les conditions qui entouraient l'événement. Ceci nécessite le rattachement au Soleil, qui se fait par ajout de mois entiers. Le 13$^{e}$ mois est aussi en usage chez les Macédoniens sous Alexandre.

La fête de Pâques (Pessah, signifiant *passage*) se célébrait le 15 Nisan, la Lune étant pleine (dans un calendrier lunaire, la Lune est toujours pleine le 15). Le 16 avait lieu une offrande d'orge précoce. Ces circonstances doivent donc se répéter aux anniversaires, chaque année. Lorsque les orges précoces ne mûrissaient pas à temps, le grand prêtre ordonnait le redoublement du mois Adar ( mars). Le calendrier hébreu est donc copié sur le calendrier babylonien, avec les mêmes défauts d'irrégularité et de non prévisibilité.

Afin qu'il n'y ait jamais deux jours de fêtes consécutifs, l'année ne pouvait commencer ni un mercredi, ni un vendredi ni un dimanche. Si le premier jour de l'année tombait sur l'un de ces jours, on le reculait d'un jour, augmentant l'année finissante d'un jour et diminuant d'autant l'année commençante. Ceci donne 6 sortes d'années :

communes de 12 mois { régulière de 354 jours ; abondante de 355 jours ; défective de 353 jours

embolismiques de 13 mois { régulière de 384 jours ; abondante de 385 jours ; défective de 383 jours

**Calendrier israélite moderne**

C'est l'évolution du calendrier hébreu. Les Juifs ont adapté le cycle de Méton dès qu'ils l'ont connu, c'est-à-dire au IV$^{e}$ siècle de notre ère. Les années de 13 mois prennent place aux rangs 3, 6, 8, 11, 14 et 19 du cycle. Il date du quatrième siècle de notre ère.

A l'heure actuelle, le calendrier israélite est toujours basé sur le même principe, mais en utilisant les phases calculées de la Lune et non plus observées. Les phases sont calculées par les tables astronomiques en usage à l'heure actuelle. On notera de ce fait une grande différence avec le calendrier grégorien, qui utilise un comput conventionel. Les années sont comptées à partir de la création du monde qui, dans la tradition juive, est datée de l'an 3761 avant notre ère.

**Calendrier musulman**

Avant l'Islam, les arabes définissaient une année de 12 mois, portant pour noms :

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Mutamer | Nadjir | Jawan | Sawan | Hinum | Ronna |
| Asam | Adel | Natik | Waghel | Hewah | Barak |

Les noms ont été changés sous le règne de Kêlab, trisaïeul de Mahomet, en 412 de notre ère. Ce calendrier dérivait sur les saisons, et à l'apparition de l'Islam, le pèlerinage à La Mecque, censé se faire en automne, se mit à dériver. On décida donc d'ajouter un mois pour rattrapper ; cet ajout n'étant pas suffisant, Mahomet fit son pèlerinage, 3 mois avant sa mort, en avril ; il interdit à l'avenir l'ajout du treizième mois, probablement pour mettre fin aux ajustements trop imprécis. Le calendrier est donc redevenu purement lunaire.

Les mois ont changé de noms :

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Mouharram | 30 | Safar | 29 | Rabi'-oul-Aououal | 30 | Rabi'-out-Tani | 29 |
| Djoumada-l-Oula | 30 | Djoumada-t-Tania | 29 | Radjab | 30 | Cha'ban | 29 |
| Ramadan | 30 | Chaououal | 29 | Dou-l-Qa'da | 30 | Dou-l-Hidjja | 29 ou 30 |

La durée de l'année musulmane est 6 × 30 + 6 × 29 = 354 jours (le dernier mois étant de 29 jours) ; 12 lunaisons moyennes comptent 12 × 29,530588 = 354,367056 jours. La différence avec l'année musulmane est 0,367056 jours *i.e.* 8 h 48 min 34 s par an. Au bout de 30 ans la différence atteint 0,367056 × 30 = 11,01168 jours. Le calendrier prévoit donc d'ajouter 11 jours dans un cycle de 30 années musulmanes. La différence est ainsi réduite à 11,01168 - 11 = 0,01168 jours *i.e.* 16 min 49 s. Au bout de 100 années musulmanes (un peu moins de 97 de nos années), elle correspond à 0,01168 × 100 = 1,168 jour. Depuis la création de leur ère, les musulmans ont donc été obligés de rattraper par un

autre mécanisme les divergences observées entre leur calendrier et la Lune réelle.

Les années de 354 jours sont appelées *années communes*, les années de 355 jours sont dites *années abondantes*. Dans le cycle de 30 ans, il y a 11 années abondantes. Par conséquent la durée moyenne de l'année musulmane est :

$$354 \times 19 + 355 \times 11 = 10.631 \text{ j} ;$$

$$10.631 / 30 = 354{,}366 \text{ j}$$

Ces 30 années lunaires comptant exactement 30 × 12 mois, la durée moyenne de la lunaison est :

$$10.631 / (30 \times 12) = 29{,}530556 \text{ j}$$

Il est bien évident que l'année de 354,366 jours se promène dans l'année solaire à grande vitesse. C'est ainsi que le mois de Ramadan, qui est celui du jeûne musulman, se déplace d'à peu près 11 jours chaque année solaire (donc par rapport au calendrier grégorien), ce qui fait en gros un tour complet en 30 ans. Notons que les musulmans ont basé leurs mois sur l'apparition du mince croissant dans le crépuscule. Celui-ci n'étant pas visible avant une trentaine d'heures après la conjonction, les mois musulmans sont décalés par rapport aux lunaisons.

Les musulmans utilisent bien sûr la semaine, et les noms des jours sont :

| dimanche | lundi | mardi | mercredi | jeudi | vendredi | samedi |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Youm el Ahad | Youm el Thani | Youm el Thaleth | Youm el Arbaa | Youm el Thamis | Youm el Djouma | Youm el Effabt |

L'ère musulmane est l'*Hégire*, dont l'origine est la fuite de Mahommet, qui est parti de la Mecque vers Médine où il est arrivé le vendredi 16 juillet 622 julien. Pour cela, Youm el Djouma est le jour de la grande prière.

**Calendrier chinois**

La définition d'un calendrier a été ordonnée par le roi Yao il y a plus de 4.000 ans. Ce calendrier lunaire divise l'année en 12 mois alternativement de 29 et 30 jours. Pour rester en accord avec les saisons, les chinois ajoutaient un mois de temps en temps. Ils ont connu la valeur de 365,25 jours pour l'année depuis la dynastie Shang au moins, ce qui reporte à 1600 ans avant J.C.

Grâce à leurs calculs, ils ont découvert le cycle de Méton avant l'heure, cycle qu'ils nommaient *Tchang*. Dans la période de 19 ans, ils intercalaient le treizième mois dans les années 3, 6, 9, 11, 14, 17 et 19. Le premier mois de l'année est celui qui voit l'entrée du soleil dans les Poissons. Depuis l'an 104 avant J.C., le début de l'année tombe entre le 21 janvier et le 20 février.

Les prévisions étant difficiles, il revenait au souverain, après consultation des astronomes, de fixer la longueur du mois et le moment d'intercalation d'un mois supplémentaire. Ceci ne donne pas une chronologie précise. Mais les chinois ont utilisé à côté de ce calendrier un cycle de 60, qui ignore l'astronomie, et donc n'est pas sujet aux difficultés induites par les astres. Cette chronologie-là est particulièrement fiable, et s'étend sur plus de 3 millénaires.

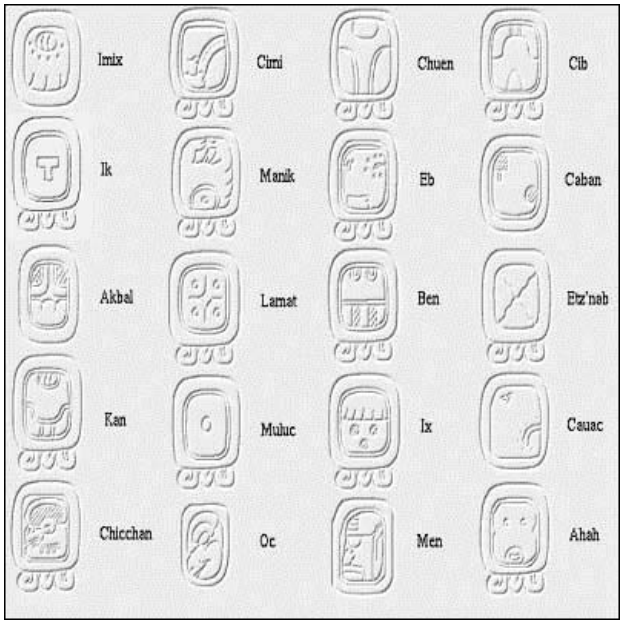
Les chinois ont défini les dix *troncs célestes*, nommés : *Jia* , *Yi*, *Bing* , etc. ; et les douze *rameaux terrestres*, nommés : *Zi*, *Chou* , *Yin*, etc. Des animaux sont associés aux rameaux terrestres depuis le sixième siècle. A chaque saut du cycle, on passe d'un tronc au suivant, et d'un rameau au suivant. On revient dans l'état initial après 60 combinaisons. Partant de *Jia*-*Zi*, la moitié des combinaisons possibles seulement est utilisée. Le tableau suivant donne le cycle :

| | | *rameaux terrestres* | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **Zi rat** | **Chou bœuf** | **Yin tigre** | **Mao lièvre** | **Chen dragon** | **Si serpent** | **Wu cheval** | **Wei chèvre** | **Shen singe** | **You coq** | **Xu chien** | **Hai cochon** |
| *troncs célestes* | **Jia** | 1 | | 51 | | 41 | | 31 | | 21 | | 11 | |
| | **Yi** | | 2 | | 52 | | 42 | | 32 | | 22 | | 12 |
| | **Bing** | 13 | | 3 | | 53 | | 43 | | 33 | | 23 | |
| | **Ding** | | 14 | | 4 | | 54 | | 44 | | 34 | | 24 |
| | **Wu** | 25 | | 15 | | 5 | | 55 | | 50 | | 35 | |
| | **Ji** | | 26 | | 16 | | 6 | | 56 | | 46 | | 36 |
| | **Geng** | 37 | | 27 | | 17 | | 7 | | 57 | | 47 | |
| | **Xin** | | 38 | | 28 | | 18 | | 8 | | 58 | | 48 |
| | **Ren** | 49 | | 39 | | 29 | | 19 | | 9 | | 59 | |
| | **Gui** | | 50 | | 50 | | 30 | | 20 | | 10 | | 60 |

C'est grâce à ce calendrier que les astronomes ont pu dater précisément l'explosion de la supernova qui a donné naissance à la nébuleuse du Crabe en 1054.

**Calendrier maya**

Les Mayas utilisaient une numération vigésimale (à base 20). Les nombres sont représentés par des têtes de divinités vues de profil (glyphes), associés à des chiffres. Cette pratique s'est étendue à leur calendrier. C'est le seul peuple de l'Amérique précolombienne qui nous ait laissé un système complet d'écriture. Le jour est appelé *kin* (Soleil en Maya), et à chacun sont associés un nom et un glyphe :



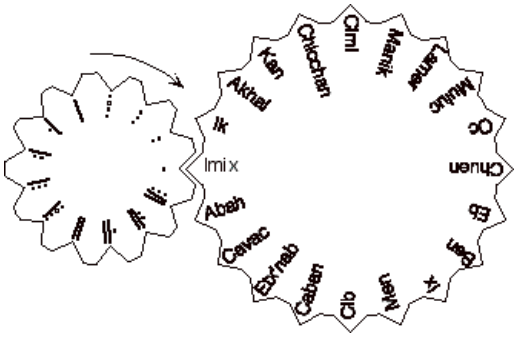




Il existe deux autres unités de rang supérieur, que nous pourrions par analogie appeler mois et année : un *uinal* comprend vingt jours, et un *tun (pierre)*, qui devrait comprendre naturellement 20 uinal (dans leur système à base 20), est ramené à 18 pour correspondre à peu près à l'année solaire (ceci totalise 360 jours au lieu de 365,24). Les mois portent aussi des noms et ont des glyphes associés.

Ci-contre, les glyphes et les noms des mois.

Pour les durées plus longues, les Mayas utilisent des groupes de 20 tun = *katun* (7.200 jours), et des groupes de 20 katun = *baktun* (144.000 jours). Une date est le compte de jours écoulés (écrit dans la numération vigésimale) depuis l'origine du calendrier Maya, 3113 avant notre ère. Cette date très ancienne est certainement antérieure à la civilisation Maya, et semble avoir été choisie pour des raisons obscures, sans doute religieuses. Le nombre de baktun, de katun, de tun, de uinal et de kin détermine une date.




Un système parallèle existe, qui indique le rang du jour dans un cycle de 260 jours. Il constitue *l'almanach rituel* des Mayas. Nommé *tzolkin* (cercle sacré), il indique également l'âge de la Lune, l'équivalence avec l'année solaire, et le nom de la divinité patronne du jour. Les Mayas connaissent la valeur de l'année solaire de 365,25 jours, mais ne l'utilisaient pas dans leur calendrier. Cependant, ils établissaient des corrections qui attestent de leurs connaissances astronomiques.

Schéma montrant l'association entre les noms des jours (dans un cycle de 20), et leur rang dans un cycle de 13. Au bout de 260 jours, on revient à la situation initiale.

La représentation des nombres figurée sur la roue de gauche est la suivante :




L'étude des mouvements de la Lune et de Vénus est très poussée, et a atteint des valeurs tout à fait correctes. Vénus était la plus importante de toutes les planètes, et était appelée *Quetzalcoatl Ku Kulcan*, serpent oiseau. Les Mayas avaient obtenu la valeur de 584 jours pour la révolution synodique de Vénus. Cette durée avait une grande importance religieuse. Le jour du lever héliaque était particulièrement risqué, et les rites qui l'accompagnaient très importants.

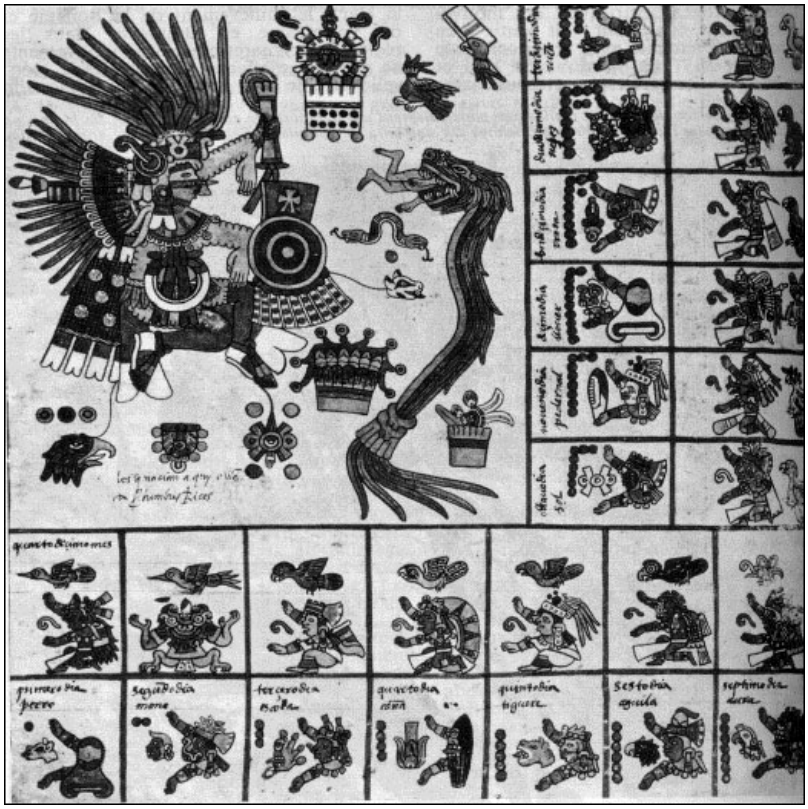
Pour obtenir ce résultat, les Mayas ne disposaient pourtant d'aucun instrument de mesure digne de ce nom, ils utilisaient l'architecture (soigneusement calculée) pour établir des alignements. C'est pourquoi leurs monuments ont des orientations précises, de même que certains détails architecturaux tels que des fenêtres placées pour viser une étoile particulière.

On a déterminé de telles orientations pour les pyramides d'Egypte. De là à penser que le volume de la grande pyramide divisé par la racine cubique de l'âge du dernier pharaon est exactement le nombre Pi…

**Calendrier aztèque**

Les aztèques ont hérité des Olmèques et des Mayas l'usage de la divination mêlée à l'astronomie. Ils rédigeaient des *tonalamatl* (= livre du destin), dans lesquels ils associaient aux jours les dieux auxquels ils étaient consacrés. Ils y faisaient figurer pour chaque jour le dieu de la lumière et le dieu de l'obscurité, et l'oiseau de ces divinités. Ce sont des calendriers rituels et divinatoires, divisés en 20 sections de 13 jours. Ils dérivent directement des tzolkins mayas.

L'année solaire était constituée de 18 mois de 20 jours, et de 5 jours considérés comme maléfiques, les *nemontemi*. On distingue donc 3 années, de longueurs différentes : une année divinatoire (de 260 jours), une année solaire (de 365 jours) et une année vénusienne de 584 jours (répétant les mêmes positions de la planète par rapport au soleil).



Encyclopédia Universalis, article"Calendrier" page 792

Page du Codex Borbonicus représentant l'une des 20 sections de 13 jours d'un tonalamatl. Remarquer les divinités et les oiseaux associés. (Bibl. Assemblée Nationale)

**Calendrier persan**

Les Perses ont adopté un calendrier solaire, ce qui est beaucoup plus facile à faire qu'un calendrier lunaire, du fait de la grande régularité du mouvement apparent du Soleil, si l'on parvient à mesurer la durée de l'année tropique. Ils ont trouvé une solution très astucieuse pour obtenir un calage à long terme sur les saisons, ce qui fait qu'ils connaissaient précisément, au moins implicitement, cette durée.

Leur principe de base est le même que le nôtre : des années communes de 365 jours, et des années longues de 366. Ils ajoutaient un jour à une année sur quatre. Mais ils faisaient cela sept fois de suite, donc pendant 28 ans ; ensuite, ils rompaient la série en ne mettant qu'un seul jour de plus dans les 5 années qui suivaient. Ceci nous donne une durée du cycle de : $7 \times (3 \times 365 + 366) + 4 \times 365 + 366 = 12.053$ jours répartis en $28 + 5 = 33$ ans.

La durée moyenne de l'année est donc de $12.053 / 33 = 365{,}24242424$ jours

Le nombre de jours ajoutés en 33 ans est de 8 ; donc la durée moyenne de l'année s'écrit aussi $365 + 8 / 33 = 365{,}24242424$ j. Nous verrons plus loin un calcul très simple permettant d'obtenir cette fraction. Cette valeur est vraiment très proche de l'année tropique réelle, et nous verrons que l'approximation obtenue est légèrement **meilleure** que celle de notre calendrier grégorien !

Les Perses auraient pu ajouter les huits jours supplémentaires en une seule fois, au terme de la période de 33 ans. Ceci aurait été une procédure extrêmement simple, avec le seul inconvénient de permettre un décalage croissant avec les saisons en cours de période.

**Calendrier grec**

Il y eut plusieurs calendriers grecs anciens, toutes les villes n'étant pas en accord sur ce sujet. Mais les différences étant minimes, nous nous intéresserons plus particulièrement à celui d'Athènes.

Le calendrier grec n'est pas directement à la base de notre calendrier actuel. Son intérêt principal tient à la participation de grands astronomes connus pour d'autres travaux : Eudoxe, Callipe, Hipparque, Ptolémée, Méton… Il montre aussi que des affinements successifs sur une durée importante ont permis d'obtenir des valeurs de l'année et surtout de la lunaison qui sont vraiment très proches des valeurs établies à l'heure actuelle. On remarquera ainsi que le calendrier a bien rendu à l'astronomie l'aide qu'elle lui a apportée.

Le calendrier grec fut d'abord purement lunaire, avec des mois de 30 jours, puis avec des mois alternés de 29 et 30 jours (bien que la durée des mois soit trop longue par rapport à la lunaison). Ceci donnait une année de 6 × 30 + 6 × 29 = 354 jours. L'ajustement aux saisons est resté très mauvais pendant longtemps.

Au 8$^{e}$ siècle avant J.C., Hésiode a composé un calendrier de la vie courante, destiné aux agriculteurs, indiquant le repère des étoiles par rapport aux cultures. Des prévisions météo s'y ajoutent, puis des indications sur les jours fastes et néfastes. Ce sont les *parapegmes*, ancêtres des almanachs (παραπηγμα : tables astronomiques, pour consigner la division du temps).

Les Grecs ont longtemps ajusté leur calendrier par rapport à l'année par adjonction empirique de mois. Ensuite, ils ont systématisé la correction en ajoutant un mois plein (30 jours) tous les deux ans. L'usage du mois embolismique a été adopté définitivement en 430 avant J.C. à Athènes.

Ceci donne une année trop longue. Par la suite, ils n'ont plus ajouté qu'un mois tous les 3 ans ce qui produit une année trop courte… Enfin, ils ont découvert *l'octaétéride*, comprenant 8 années, la 3$^{me}$, la 5$^{e}$ et la 8$^{e}$ ayant 13 mois. Les mois sont alternativement *pleins* (30 jours) et *caves* (29 jours) sauf les 3 mois complémentaires qui étaient pleins.

La durée de l'octaétéride est donc : 5 × (6 × 30 + 6 × 29) + 3 × (6 × 30 + 6 × 29 + 30) = 2.922 j sur 8 ans, ce qui fait 2.922 / 8 = 365,25 jours. Cette durée semble connue depuis -775. C'est exactement la même que celle du calendrier julien.

D'autre part, l'octaétéride utilise une valeur de la lunaison trop courte. En effet, le nombre total de mois dans l'octaétéride est : 8 × 12 + 3 = 99. Il leur correspond 2 922 jours, donc la durée moyenne d'un mois est de 2 922 / 99 = 29,51515. L'erreur par rapport à la lunaison moyenne est :

29,53059 - 29,51515 = 0,0154385 j ( *i.e.* 22 min 14 s).

Sur une octaétéride complète, l'erreur s'élève à 0,0154385 × 99 = 1,5284115 ; et sur 10 octaétérides (80 ans), elle atteint 15 jours, ce qui fait que la Lune est pleine quand le calendrier la voudrait nouvelle ! L'octaétéride semble connue dès le VIII$^{e}$ siècle avant J.C. en Grèce.

La solution fut une période de 19 ans nommée *cycle de Méton* (Méton, astronome grec qui vivait à Athènes vers 430 avant J.C.) qui indique que 19 ans = 235 lunaisons (voir la seconde partie de ce texte pour le calcul du cycle). Après 19 ans, les phases reviennent aux mêmes dates des mêmes mois. Cette découverte fut publiée en 433 avant J.C. Le cycle de Méton organise comme suit les 235 mois parmi les 19 années :

| | | | |
|---|---|---|---|
| 5 années de | 355 jours, | qui totalisent | 1.775 j |
| 7 | 354 | | 2.478 j |
| 6 | 384 | | 2.304 j |
| 1 | 383 | | 383 j |
| | | total | 6.940 j |

L'année moyenne correspondante fait 6.940 / 19 = 365,78 j ; la lunaison 6.940 / 235 = 29,5319 j.
Ces valeurs sont toutes deux trop longues. Elles sont moins bonnes que celles fournies par l'octaétéride, mais elles s'accordent mieux entre elles. Le décalage se fait maintenant par rapport au Soleil, mais il est plus difficile à détecter.

Les Athéniens, émerveillés, ont fait graver en chiffres d'or les nombres du cycle de Méton sur les colonnes du temple de Minerve. C'est pourquoi le rang d'une année dans le cycle de Méton porte le nom de *Nombre d'or* (les Babyloniens connaissaient probablement le cycle de Méton au VIII$^{e}$ siècle avant notre ère).

La connaissance de ce cycle en 433 avant J.C. est incertaine. Il est par contre sûr qu'il était utilisé en 342 avant J.C..

A cette époque, Callipe propose une amélioration en groupant 4 cycles en une seule période de 76 ans, mais en supprimant 1 jour ; donc la *période de Callipe* comprend 4 × 19 = 76 années. Elle compte d'autre part 6.940 × 4 - 1 jours = 27 759 jours. L'année de Callipe moyenne vaut : 27.759/76 = 365,25 j (comme l'année julienne).

De même, la période de Callipe comprend 235 × 4 = 940 lunaisons. D'où la lunaison moyenne de 27.759/940 = 29,53085 j. L'erreur sur la lunaison est : 29,53085 - 29,53059 = 0,00026 j (22 s) !

En 130 avant notre ère, Hipparque fut le premier à découvrir que l'année est plus courte que 365,25 jours. Sur 4 cycles de Callipe, il retrancha encore un jour ; ceci donne les chiffres suivants :

4 × 76 = 304 ans 4 × 27.759 - 1 = 111.035 j pour la période

donc 111.035 / 304 = 365,2467 jours (365 jours 5 h 55 min), ce qui fait 6 min d'erreur sur l'année.

Le nombre de lunaisons est 4 × 940 = 3.760 ;

La lunaison moyenne 111.035 / 3.760 = 29,5305851 j (29 jours 12 h 44 min 2 s)

ce qui correspond à moins d'une seconde d'erreur !! Ceci vers 130 avant J.C….

> On remarquera que pour augmenter la précision, on s'adresse à des périodes de plus en plus longues. Puisque l'élément correcteur est de durée constante (1 jour), pour effectuer des corrections plus fines, il faut diminuer son importance relative.

On peut remarquer aussi que la précision sur la lunaison est bien meilleure que sur l'année ; c'est parce que la lunaison est beaucoup plus facile à observer que les saisons, et que sa période est plus courte. La lune changeant rapidement d'aspect, il est facile de déterminer ses phases à moins d'un jour près.

Les Grecs n'ont cependant pas suivi ces résultats, et leur calendrier est resté approximatif et basé sur l'octaétéride. Ils n'utilisaient pas la semaine, mais la décade.

**Calendrier romain**

A la fondation de Rome (753 avant J.C.), les Romains ont utilisé l'année primitive dite de Romulus (premier roi de Rome). Elle comprenait 10 mois totalisant 304 jours (4 mois de 31 jours et 6 mois de 30). Ils la tenaient d'un ancien peuple, les Albains. Ce calendrier est curieux, avec des mois ne correspondant pas à la lunaison (et donc une dérive de la lune), et une année ne correspondant pas plus au soleil ! on pourrait presque dire que ce calendrier n'est ni solaire, ni lunaire… Les années sont numérotées à partir de la fondation de Rome, à partir de 1 (les Romains ne connaissaient pas le chiffre zéro).

| Martius | Aprilis | Maïus | Junius | Quintilis |
|---|---|---|---|---|
| 31 j | 30 j | 31 j | 30 j | 31 j |
| Sextilis | September | October | November | December |
| 30 j | 30 j | 31 j | 30 j | 30 j |

L'origine éthymologique des 4 premiers mois est la mythologie : Martius est le nom du dieu de la guerre ; Aprilis vient de Aperta, autre nom d'Apollon ; Maïus vient de Maïa, déesse mère de Mercure ; Junius vient de même de Junon, femme de Jupiter. Pour les autres, le nom est tout simplement leur numéro dans l'année : Quintilis = cinquième, Sextilis = sixième… On voit sur le tableau que l'année commençait le 1$^{e}$ mars.

Cette année étant beaucoup trop courte par rapport à l'année tropique, on ajoutait le nombre de jours suffisant pour rattraper l'erreur après le mois de December. Ce rattrapage était empirique, les jours ajoutés ne portaient pas de nom.

Sous Numa Pompilius (second roi de Rome, 715-673 av. J.C.) on systématisa le rattrapage en ajoutant deux mois, ce qui porta l'année à 355 jours (4 mois de 31 jours, 7 de 29 et 1 de 28). Ces mois ont pris les noms de Januarius (29 jours) et Februarius (28 jours), consacrés à Janus, roi du Latium et dieu de la paix, et à Febbruo, dieu des morts. Februarius fut placé après December, et Januarius après Februarius.

Vers l'an 400 de Rome (vers 350 avant J.C.) on déplaça Februarius entre Januarius et Martius. L'année est essentiellement lunaire, avec une durée de 355 jours. Bien que la longueur des mois ne cadre pas avec la lunaison, les 12 mois totalisent à peu près 12 lunaisons (355 jours contre 354,6). Pour les besoins de l'agriculture, il fallait cependant assurer un calage à peu près correct sur l'année des saisons, aussi il fut décidé d'ajouter un mois, nommé *Mercedonius*, de 22 ou 23 jours, et qui, curieusement, était placé au milieu de Februarius !

Les nombres impairs étaient censés plaire aux dieux. Les Romains ont donc déplacé des jours de manière à n'avoir que des mois de longueur impaire, sauf Februarius qui a la double infortune d'être le plus court et d'avoir un nombre pair de jours. La constitution d'une année commune, sans mois intercalaire, était donc :

| Martius | Aprilis | Maïus | Junius | Quintilis | Sextilis |
|---|---|---|---|---|---|
| 31 j | 29 | 31 j | 29 j | 31 j | 29 j |
| September | October | November | December | Januarius | Februarius |
| 29 j | 31 j | 29 j | 29 j | 29 j | 28 j |

Les jours portaient des noms :

*Calendes* (nouvelle lune)
*Nones* (premier quartier ; neuvièmes, nb de jours entre Nones et Ides)
*Ides* (pleine lune ; du verbe *Iduare* : diviser)

Calendes, en latin *Calendæ*, de *Calendus* = devant être appelé. Chaque 1$^{e}$ du mois, on convoquait solennellement le peuple de Rome pour lui faire connaître les jours fériés. Les Calendes étaient dédiés à la déesse Junon, qui a pris de ce fait le surnom de *Calendaris*.

La pleine lune devait tomber le 14 ou le 15. Mais les nombres pairs étant considérés comme néfastes, on préférait la faire tomber artificiellement le 13 dans le premier cas.

Pour désigner les autres jours, les Romains comptaient à l'envers ! Ainsi :

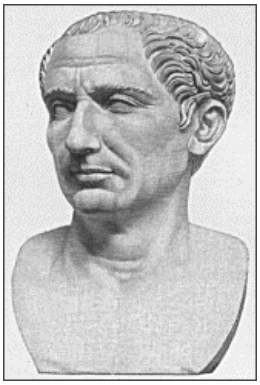
Le 2 était le IV$^{e}$ avant les Nones.
Le 3 était le III$^{e}$ avant les Nones
Le 4 était la veille des Nones

Le 3 est nommé 3$^{e}$ avant les Nones, car le jour des Nones lui-même est compté. Il en est de même avec les Ides et les Calendes. Nous verrons plus loin que cette numérotation a donné son nom au jour bissextil.

A l'époque républicaine, les Calendes sont consacrées à Junon et Janus, les Ides à Jupiter.

Incapables de recaler correctement leur calendrier sur les saisons, les Romains donnèrent au collège des Pontifes le droit de choisir la durée du mois intercalaire. Les Pontifes ont alors allongé ou raccourci l'année en cours pour favoriser les consuls en exercice ou leurs successeurs. Cette corruption appela la réforme du calendrier.

**Calendrier julien**



Jules César est né à Rome en juillet 101 avant J.C. De caractère ambitieux, la guerre des Gaules, qui a duré 9 ans, a été pour lui un moyen de prendre le pouvoir : il s'est constitué une armée solide et dévouée qui lui a, par la suite, permis de lutter contre ses adversaires en Italie même, et de prendre le pouvoir.

Bien qu'il n'ait pas fondé l'empire, son nom est resté comme symbole du pouvoir ; il a donné le mot allemand *Kaiser* (empereur) et le mot slave *Tsar* (qui signifie roi en Russe, Bulgare…).

Soupçonné de vouloir prendre le titre de roi, il a été assassiné aux Ides de mars 44 par une conjuration attachée à la République, menée par Brutus. Brutus était le fils de sa maîtresse Servilia, et César le considérait comme son propre fils. C'est pourquoi on lui prête cette exclamation : *Tu quoque, mi fili !* toi aussi, mon fils !

Caius Octavius, petit-neveu de César, est né à Rome en 63 avant J.C. Dans son testament, César l'a adopté et lui a donné son nom. Il a pris plus tard le nom d'Auguste (*Augustus*) sous lequel il est connu. C'est lui qui a réellement fondé l'empire romain, qui devait durer 5 siècles. Il est mort le 14 août 14 après J.C.

Pour mettre fin aux désordres du calendrier, Jules César, en l'an 708 de Rome (46 avant J.C.) impose une réforme qui apparaît à la fois audacieuse, car il a fixé les années sans l'intervention des pontifes, mais timide en ce qui concerne la structure des mois, qui ont conservé leurs irrégularités.

Pour calculer le calendrier, il fit venir d'Alexandrie l'astronome Egyptien Sosigène. Ils choisirent une durée de l'année moyenne de 365,25 jours, bien qu'un siècle plus tôt Hipparque savait déjà que cette valeur était trop forte. On a donc un cycle comprenant 3 années de 365 jours, suivies d'une année de 366.

Le jour ajouté doubla le 24 février (puisque c'est là qu'on insérait traditionellement Mercedonius). Le 24 février s'appelait 6$^{e}$ avant les Calendes de mars, *i.e. Sextius Ante Calendas Martias*. Donc en le redoublant, on obtint le ***Bis Sextius*** *Ante Calendas Martias*, d'où le nom de *bissextil*.

L'année 708 de Rome étant en grave désaccord avec les saisons, César l'allongea à 455 jours (une année anormale servira de nouveau quelques siècles plus tard pour réformer le calendrier julien et passer au grégorien). On la nomme *Année de confusion*. De plus, César a ramené le début de l'année au 1$^{e}$ janvier. *L'ère Julienne* (à ne pas confondre avec la période julienne, que nous verrons plus loin) débute le 1$^{e}$ janvier de l'an 45 avant notre ère. Mercédonius disparaît, et ses jours sont répartis aux mois de 29 jours. C'est ainsi que les mois, d'origine lunaire, ont perdu leur correspondance de durée approximative avec la lunaison. Cette structure de l'année est parvenue jusqu'à nous ; seul le début de l'année a connu au Moyen Age de nombreuses vicissitudes, au hasard des années et des pays. Les noms des mois de l'année julienne à l'origine étaient :

| Januarius | Februarius | Martius | Aprilis | Maïus | Junius |
|---|---|---|---|---|---|
| 31 j | 28 (29) j | 31 j | 30 j | 31 j | 30 j |
| Quintilis | Sextilis | September | October | November | December |
| 31 j | 31 j | 30 j | 31 j | 30 j | 31 j |

Les noms *Quintilis* (cinquième), *Sextilis* (sixième), *September* (septième), *October* (huitième), *November* (neuvième) et *December* (dixième) ne correspondent donc plus à leurs numéros. Ils subsistent néanmoins.

Aux Calendes de janvier, les Romains fêtaient la nouvelle année ; ils veillaient à ne pas prononcer de paroles de mauvais augure, se rendaient des visites, et échangeaient de menus cadeaux, nommés *strena*. C'est l'origine de nos étrennes.

La réforme de Jules César a été mal comprise, et mal appliquée pendant quelques années : les pontifes intercalèrent une année bissextile tous les trois ans. Il s'ensuivit un décalage auquel l'empereur Auguste remédia en décrétant qu'il n'y aurait pas d'années bissextiles pendant 12 ans.

En 44 avant J.C., Marc-Antoine donna au mois Quintilis, pendant lequel Jules César était né, son nom *Julius*, qui est devenu juillet. De même, en 8 avant J.C., le Sénat donna à Sextilis le nom de l'empereur Auguste : *Augustus*, qui est devenu août. *Julius* et *Augustus* n'ayant pas le même nombre de jours, ce qui ne plaçait pas les deux monarques sur pied d'égalité, quelques transferts subsidiaires ont amené l'année à ce que nous connaissons actuellement. La structure de l'année n'a pas changé depuis ; seule la répartition des jours bissextils sera légèrement modifiée plus tard. On peut donc dire que notre calendrier a plus de 2.000 ans.

La numérotation des jours par les Calendes a subsisté jusqu'au XVI$^{e}$ siècle. Ce sont les peuples Barbares qui ont institué la numérotation à l'aide des chiffres arabes.

L'année 0 n'existe pas. L'invention du zéro est d'ailleurs tardive, car c'est un concept abstrait ; elle est due aux hindous au V$^{e}$ siècle de notre ère. Le zéro est dérivé de la marque du vide, qui était nommée *sunya* et figurée par un petit cercle. Il est devenu *sifr* en arabe, puis *zephirum* en latin, qui donna *zephiro* et donc zéro. On note que le nom arabe du zéro, *sifr*, a donné le nom générique de tous les chiffres.

Le premier siècle a donc commencé avec l'an 1, et pour compter 100 ans, il s'est achevé **à la fin** de l'année 100. Le deuxième siècle a commencé au premier janvier 101. Par conséquent, le XXI$^{e}$ siècle commença le premier janvier 2001, et l'an 2000 est la dernière année du XX$^{e}$ siècle !

Arthur C. Clarke, auteur d'un livre, suivi par Stanley Kubrik qui en a tiré un film, ne s'y sont pas trompés : le titre est bien ***2001**, l'Odyssée de l'espace*. Ils ont placé l'action dans un futur proche, mais qui marquait une véritable rupture : le début d'un millénaire, un vaste avenir devant soi…

**Date de Noël**

Les fêtes célébrées actuellement dans la partie du monde de tradition chrétienne ont diverses origines, et leurs dates en découlent. Les deux principales fêtes sont Noël et Pâques, dont nous allons voir l'origine.

Très anciennement, dès que les hommes en ont été conscients, ils ont célébré le retour du soleil, au moment où les jours commençaient à rallonger, c'est-à-dire au solstice d'hiver ; les Romains célébraient à cette date *Dies Solis Invicti* (le jour du soleil invaincu). Au début de la chrétienté, le soucis d'éradiquer ces anciennes fêtes a conduit à les remplacer par d'autres, d'inspiration religieuse. Ce serait pourquoi *Noël* du latin *Natalis*) a été fixé au 25 décembre, qui est très proche du solstice. L'Eglise d'Orient a célébré la Nativité le 6 janvier jusqu'au 6$^{e}$ siècle. Un décret apostolique de l'an 376 a fixé la date du 25 décembre. En Espagne, le 6 janvier est toujours une grande fête.

**Date de Pâques**

La Pâque est une fête juive à l'origine (voir le calendrier hébreu). Elle est célébrée le 14$^{e}$ jour du mois de Nisan (début du printemps). Le calendrier israélite étant lunaire, la lune était toujours pleine à cette date, et son éclairage facilitait les déplacements. Le Christ célébrait la Pâque, et il est mort à l'heure où les prêtres égorgeaient les agneaux au temple. Mais la tradition chrétienne à Rome voulait qu'on célèbre la fête de Pâques (avec un s) un dimanche, car la résurection avait eu lieu ce jour-là. Après de très longues discussions, Pâques a été défini par le concile de Nicée en 325 de notre ère comme :

Le premier dimanche qui suit (strictement) la première pleine lune de Printemps.

A l'époque, la valeur connue de l'année est de 365,25 jours, et l'équinoxe tombait le 21 mars. Les membres du concile ont cru que cette date était définitive, et l'ont utilisée pour déterminer la date de Pâques. La règle ci-dessus devient donc : *le premier dimanche qui suit (strictement) la première pleine lune après le 21 mars*. Un procédé de calcul, nommé Comput (du latin *computare* = calculer), permet d'obtenir la date de Pâques à partir de cette formule.

| **Pâques est le dimanche qui suit le quatorzième jour de la Lune qui atteint cet âge au 21 mars ou immédiatement après** |
|---|

**Ere chrétienne**

En 532 julien, le moine Denys le Petit (*Dionysus Exiguus*) calcula que le Christ avait dû naître en 754 de Rome. Il en profita pour proposer cette année pour début d'une nouvelle ère. Cette proposition ne s'est imposée qu'au VIII$^{e}$ siècle sous Charlemagne dans le royaume des Francs.

Il résulte de cette modification que le calendrier julien était en vigueur avant même l'année choisie pour origine. Il existe donc des années avant J.C. Mais on n'a jamais défini d'année 0. Ainsi, l'année qui précède immédiatement l'année 1 après J.C. est l'année 1 avant J.C. Une autre façon de désigner les années antérieures à notre ère est la notation relative (avec des nombres négatifs). La correspondance est :

| … | -2 | -1 | **0** | 1 | 2 | 3 | **4** | … |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| … | 3 av. J.C. | 2 av. J.C. | **1 av. J.C.** | 1 ap. J.C. | 2 ap. J.C. | 3 ap. J.C. | **4 ap. J.C.** | … |

L'année 4 après J.C. est bissextile (son millésime est divisible par 4). Comptant 4 années vers le passé, on s'aperçoit que l'an 1 av. J.C. doit donc l'être aussi. Mais son millésime 1 n'est pas divisible par 4. Par contre, dans la notation relative, les années bissextiles sont bien les années 0, -4, -8 etc. dont les millésimes sont divisibles par 4.

Il est facile de calculer une durée dans la notation relative, par soustraction des millésimes, beaucoup moins dans l'autre. Toutefois, les historiens utilisent la première.

**Jésus-Christ est né avant J.C. !**

Le début de notre ère ayant été fixé par Denys le Petit au 1$^{e}$ janvier qui suit la naissance du Christ, celui-ci serait donc né le 25 décembre de l'an 1 avant J.C….ce qui est déjà bien étrange ! Mais il y a pire.

Il n'est pas possible de déterminer historiquement la date de naissance du Christ, les registres ayant été perdus. On peut la déterminer approximativement en recoupant avec d'autres événements. Rome a ordonné un recensement sous le règne d'Hérode le Grand, pour lequel Marie et Joseph se sont rendus à Bethléem, où Jésus est né. Or, Hérode est mort en l'an 4 avant J.C. (année 750 de Rome). Les Evangiles nous donnent aussi de nombreuses indications, qui mettent en évidence les années 747, 748 et 749 de Rome (donc 7, 6 ou 5 avant J.C.). Le début de l'ère chrétienne, qui était censé correspondre avec l'année de la naissance du Christ, est donc erroné. Et le Christ est né aux alentours de 5 av. J.C. !

**Autres éléments**

L'*indiction romaine* (voir le calendrier des postes) était une période de 15 ans intermédiaire entre le mois et l'année, un peu comme le lustre (5 ans). Elle servait pour les impôts ! passons… L'indiction donnée par le calendrier est le rang de l'année dans un cycle de 15 ans.

Le *cycle dominical*, ou *cycle solaire*, est le produit de deux cycles : la période de 7 correspondant aux jours de la semaine, et une période de 4 correspondant aux années communes et bissextiles. Au bout de 7 × 4 = 28 ans, les jours reviennent aux mêmes dates du mois.

Le troisième élément, le nombre d'or (voir le paragraphe relatif au calendrier grec) est utilisé pour le calcul de la date de Pâques, puisqu'il permet d'obtenir l'âge de la lune. La lunaison vraie s'écarte beaucoup de la lunaison moyenne. Ces variations rendent très difficile la prévision des phases, qui seule permet d'établir à l'avance un calendrier. Le calendrier julien et son successeur grégorien sont les seuls ayant des caractères lunaires à utiliser une méthode prédictive. A l'époque de Jules César, il n'était pas question d'établir une théorie de la lune. Le cycle de Méton a fourni une méthode alternative, basée sur la répétition. Par l'observation soignée des phases au cours d'un cycle, il est possible d'établir un tableau de prévision des phases des cycles suivants, avec une erreur de moins d'un jour sur une période de 320 ans. Le tableau ci-dessous donne donc toutes les nouvelles lunes d'un cycle de Méton en fonction du nombre d'or :

| **Nb d'Or** | **janv** | **fév** | **mars** | **avril** | **mai** | **juin** | **juil** | **août** | **sept** | **oct** | **nov** | **déc** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 23 | *21* | 23 | *21* | 21 | *19* | 19 | *17* | 16 | *15* | 14 | *13* |
| 2 | 12 | *10* | 12 | *10* | 10 | *8* | 8 | *6* | 5 | *4* | 3 | *2* |
| 3 | *1* | | *1* | 29 | 29 | *27* | 27 | *25* | 24 | *23* | 22 | *21* |
| 4 | 20 | *18* | 20 | *18* | 18 | *16* | 16 | *14* | 13 | *12* | 11 | *10* |
| 5 | 9 | *7* | 9 | 7 | 7 | *5* | 5 | *3* | *2* | 2,*31* | 30 | *29* |
| 6 | 28 | *26(27)* | 28 | *26* | 26 | *24* | 24 | *22* | 21 | *20* | 19 | *18* |
| 7 | 17 | *15* | 17 | *15* | 15 | *13* | 13 | *11* | 10 | *9* | 8 | *7* |
| 8 | 6 | *4* | *6* | 5 | 4 | 3 | *2* | 1,*30* | 29 | *28* | 27 | *26* |
| 9 | 25 | *23* | 25 | *23* | 23 | *21* | 21 | *19* | 18 | *17* | 16 | *15* |
| 10 | 14 | *12* | 14 | *12* | 12 | *10* | 10 | *8* | 7 | *6* | 5 | *4* |
| 11 | *3* | 2 | *3* | 2 | *1,31* | *29* | 29 | *27* | 26 | *25* | 24 | *23* |
| 12 | 22 | *20* | 22 | *20* | 20 | *18* | 18 | *16* | 15 | *14* | 13 | *12* |
| 13 | 11 | *9* | 11 | *9* | 9 | 7 | 7 | *5* | 4 | *3* | 2 | *1,31* |
| 14 | 30 | *28(29)* | 30 | *28* | 28 | *26* | 26 | *24* | 23 | *22* | 21 | *20* |
| 15 | 19 | *17* | 19 | *17* | 17 | *15* | 15 | *13* | 12 | *11* | 10 | *9* |
| 16 | 8 | *6* | 8 | *6* | 6 | 4 | 4 | *2* | *1* | 1,*30* | 29 | *28* |
| 17 | 27 | *25(26)* | 27 | *25* | 5 | *23* | 23 | *21* | 20 | *19* | 18 | *17* |
| 18 | 16 | *14* | 16 | *14* | 14 | *12* | 12 | *10* | 9 | *8* | 7 | *6* |
| 19 | 5 | *3* | *5* | 4 | *3* | 2 | 1,30 | *28* | 27 | *26* | 25 | *24* |
| **Nb d'Or** | **janv** | **fév** | **mars** | **avril** | **mai** | **juin** | **juil** | **août** | **sept** | **oct** | **nov** | **déc** |

Les lunaisons de 29 et 30 jours alternent presque toujours. Les chiffres en italique correspondent au début des lunaisons de 30 jours. Les parenthèses en février concernent les années bissextiles.

**Les fêtes mobiles**

Fêtes liées à Pâques :

| | |
|---|---|
| *Septuagésime* | neuvième dimanche avant Pâques |
| *Quinquagésime* | (dimanche de Carnaval) 7 semaines avant Pâques |
| *Mercredi des Cendres* | début du carême 3 jours après<br>Le Carême compte 40 jours, dimanches exclus |
| *Pentecôte* | (signifie Cinquantième) 7 semaines après Pâques |
| *Ascension* | le jeudi 10 jours avant la Pentecôte |
| *Trinité* | dimanche après Pentecôte |
| *Fête-Dieu* | dimanche après la Trinité |
| *Epiphanie* | elle était célébrée le 6 janvier (fête provenant de l'Eglise d'Orient) ;<br>elle a maintenant été fixée au premier dimanche de janvier. |

L'Avent est le début de l'année liturgique : le premier dimanche de l'Avent est le plus proche du 30 novembre ; c'est donc une fête légèrement mobile.

**Calendrier grégorien**

Nous avons vu que la durée de l'année choisie par César était trop longue : 365,25 jours au lieu de 365,2422 jours. Ceci fait une différence de 11 minutes par an. Bien que faible, cette erreur va s'accumuler, et en 129 ans atteindre un jour. Ainsi, à long terme, le calendrier dérive encore par rapport aux saisons. Une nouvelle réforme va s'imposer.

Cette nouvelle réforme du calendrier ne s'est pas faite en un jour, et n'est pas l'œuvre d'une seule personne. Dès le milieu du XIII$^{e}$ siècle, Jhon de Holywood, moine écossais, a proposé de modifier l'ajout des jours bissextils juliens. Puis des astronomes espagnols, sur ordre d'Alphonse X de Castille, ont déterminé la valeur de l'année tropique : 365 j 5 h 49 min 12 s (seulement 26 secondes de trop). Au XIV$^{e}$ siècle, le pape Clément IV fit faire une étude sur ce sujet, mais mourut avant de prendre une décision. Puis le cardinal Pierre d'Ailly saisit le concile de

Constance en 1417 sur ce problème, sans résultat. Le cardinal Nicolas de Cusa fit une proposition au concile de Bâle en 1439, sans succès encore. A la fin du XV$^{e}$ siècle, le pape Sixte IV fit venir Regiomontanus (Jean Muller de Koenigsberg) pour travailler sur la question, mais le malheureux est mort avant d'avoir donné ses résultats… Le concile de Latran en 1514, celui de Trente en 1563 ont remis la question sur le tapis. Pie V ne put venir à bout de la réforme. Enfin, ce fut Grégoire XIII qui, en 1582, parvint au but. On a donc donné son nom au nouveau calendrier. On peut cependant trouver dans les livres une autre appellation : la réforme grégorienne étant en fait une retouche du calendrier Julien, celui-ci a souvent été nommé *vieux style*, et le grégorien *nouveau style*.



Dès le début de son règne, Grégoire XIII a nommé une commission, composée de savants, dont Clavius et Aloïsio Lilio (auteur d'un projet qui servit de base de discussion). Pour remettre le calendrier en accord avec les saisons, il fallait supprimer des jours ; mais comment ? Au temps de Jésus, l'équinoxe tombait le 25 mars ; mais il tombait déjà le 21 lors de l'important concile de Nicée. Laquelle des deux dates choisir ? Le nombre de jours à retrancher n'était pas le même…

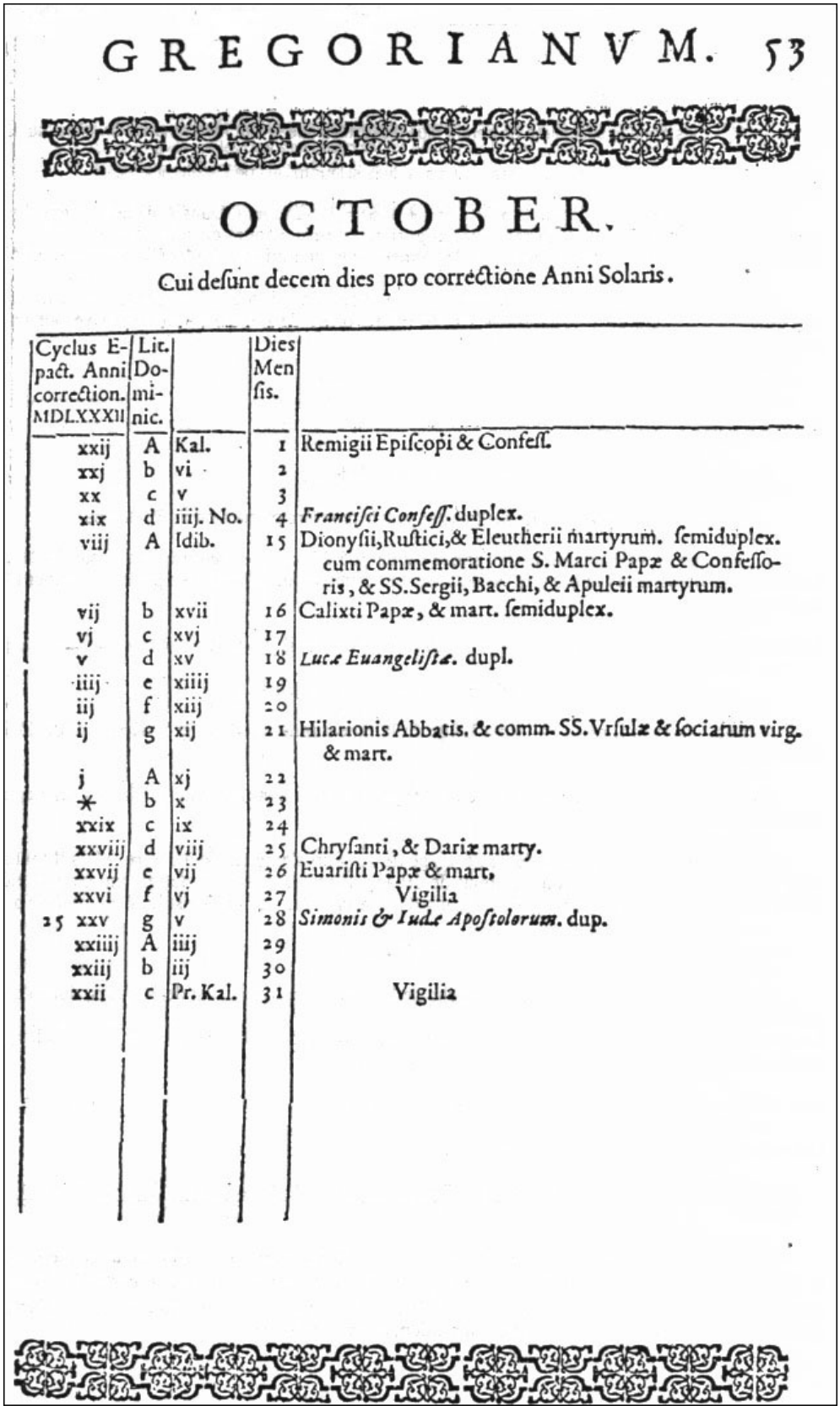
On peut signaler que la proposition de Clavius n'a pas fait l'unanimité ! En particulier François Viète, inventeur de l'algèbre, l'a pris à parti sur les principes de la réforme, employant des arguments pas toujours très judicieux. Viète a publié en 1600 un calendrier modifié, afin de corriger les erreurs qu'il imputait à Clavius : *Relatio Kalendarii vere gregoriani*.

Une fois la décision de retrancher 10 jours prise, à quel moment le faire ? En une seule fois (comme César en a rajouté pour *l'année de confusion*), ou bien en supprimant le caractère bissextil des années à venir, jusqu'à ce que l'accord se refasse (méthode analogue à celle employée par Auguste) ? Le pape a choisi le 21 mars pour date de l'équinoxe, et décidé de retrancher les 10 jours de recalage en une seule fois. Il en a averti les rois, les églises… Après leur consentement, il publia la bulle *Inter Gravissima* le 24 février 1582, qui instaura sa réforme. Ainsi, en Italie le lendemain du 4 octobre 1582 a été le 15 octobre 1582. En France, l'application a un peu tardé, et c'est seulement en décembre que la suppression a été faite : le lendemain du 9 décembre 1582 a été le 20 décembre (sous le règne d'Henri III).

L'ajustement étant refait, il fallait éviter qu'un nouveau décalage se produise ; grâce à la bonne valeur connue à l'époque pour l'année tropique, Clavius a montré qu'il fallait supprimer 1 jour bissextil tous les 400 ans ; ceci est très simple, et nous le verrons dans la seconde partie. Grégoire XIII a décidé, par soucis de simplicité, de supprimer le caractère bissextil des années séculaires (dont le millésime se termine par deux 0) si leur millésime n'est pas divisible par 400.

| | |
|---|---|
| Règle 1 | **les années séculaires ne sont bissextiles que si leur millésime est divisible par 400** |
| Règle 2 | **les années non séculaires sont bissextiles si leur millésime est divisible par 4** |

Donc, 1600 et 2000 restent bissextiles, alors que 1700, 1800 et 1900 ne le sont plus.



GREGORIANVM. 53

# OCTOBER.

Cui desunt decem dies pro correctione Anni Solaris.

| Cyclus E-pact. Anni correction. MDLXXXII | Lit. Do-mi-nic. | | Dies Men sis. | |
|---|---|---|---|---|
| xxij | A | Kal. | 1 | Remigii Episcopi & Confess. |
| xxj | b | vi | 2 | |
| xx | c | v | 3 | |
| xix | d | iiij. No. | 4 | *Francisci Confess.* duplex. |
| viij | A | Idib. | 15 | Dionysii, Rustici, & Eleutherii martyrum. semiduplex. cum commemoratione S. Marci Papæ & Confessoris, & SS. Sergii, Bacchi, & Apulei martyrum. |
| vij | b | xvii | 16 | Calixti Papæ, & mart. semiduplex. |
| vj | c | xvj | 17 | |
| v | d | xv | 18 | *Lucæ Euangelistæ.* dupl. |
| iiij | e | xiiij | 19 | |
| iij | f | xiij | 20 | |
| ij | g | xij | 21 | Hilarionis Abbatis. & comm. SS. Vrsulæ & sociarum virg. & mart. |
| j | A | xj | 22 | |
| ✳ | b | x | 23 | |
| xxix | c | ix | 24 | |
| xxviij | d | viij | 25 | Chrysanti, & Dariæ marty. |
| xxvij | e | vij | 26 | Euaristi Papæ & mart. |
| xxvi | f | vj | 27 | Vigilia |
| 25 xxv | g | v | 28 | *Simonis & Iudæ Apostolorum.* dup. |
| xxiiij | A | iiij | 29 | |
| xxiij | b | iij | 30 | |
| xxii | c | Pr. Kal. | 31 | Vigilia |

page montrant le premier calendrier grégorien, pour le mois d'octobre 1592 ;
provenance inconnue…

*Cui defunt decem dies pro correctione Anni Solaris* : suppression de 10 jours pour corriger l'année solaire

La suppression de 10 jours est un rattrapage de même nature que l'ajout des jours bissextils ou des mois embolismiques. Simplement, il est plus brutal que ce à quoi nous sommes habitués. Rapellez-vous qu'Auguste a choisi une solution plus douce pour résoudre exactement le même problème, en supprimant l'ajout des jours bissextils pendant 12 ans.

La réforme, n'a pas été adoptée dans tous les pays en même temps. Par exemple :

| | |
|---|---|
| 1582 | Italie, Espagne, Portugal, France (sous Henri III, 9 - 20 décembre), Pays-Bas catholiques |
| 1584 | Autriche, Allemagne catholique, Suisse catholique |
| 1586 | Pologne |

| | |
|---|---|
| 1587 | Hongrie |
| 1610 | Prusse |
| 1700 | Allemagne protestante, Pays-Bas protestants, Danemark, Norvège |
| 1752 | Royaume-Uni, Suède |
| 1753 | Suisse protestante |
| 1873 | Japon |
| 1911 | Chine |
| 1917 | Bulgarie |
| 1919 | Roumanie, Yougoslavie |
| 1923 | URSS, Grèce |
| 1926 | Turquie |

Tous ces pays utilisaient antérieurement le calendrier julien, à l'exception de la Chine et du Japon qui avaient un calendrier national, et de la Turquie qui se servait du calendrier musulman.

L'examen de ces dates justifie une remarque de Kepler : *"Les protestants aiment mieux être en désaccord avec le soleil que d'accord avec le Pape"* ! Lorsqu'enfin ils se rallièrent au nouveau calendrier, ils modifièrent le calcul de la date de Pâques, modification connue sous le nom de *correction de Weigel*. Cette correction fut abandonnée en 1778 par Frédéric le Grand.

L'application de la réforme provoqua des troubles à Riga, à Londres… Le peuple n'admettait pas qu'on touche à son calendrier. Bien que le calendrier grégorien ait encore des défauts, une nouvelle réforme serait difficile à faire admettre !

Certaines dates historiques, concernant des pays non encore ralliés au calendrier grégorien, sont écrites dans les deux calendriers. Ainsi, on note 10/23 janvier 1920 (10 janvier 1920 julien = 23 janvier 1920 grégorien). Il faut noter qu'au Moyen Age on écrivait en latin ; et les noms romains des jours (Calendes, Ides, Nones) ont perduré jusqu'au XVI$^{e}$ siècle dans des actes publics.

Enfin, le calcul de la date de Pâques a été modifié pour tenir compte de ces changements :

- à chaque année séculaire non bissextile, on retranche un jour à l'Epacte. Cette règle se nomme *Métemptose*.
- pour corriger l'erreur du cycle de Méton, on ajoute une unité à l'Epacte tous les 300 ans quand une année séculaire arrive. Cette règle se nomme *Proemptose*. La première fut opérée en 1800.
- la Proemptose de l'an 4200 est retardée à l'an 4300 et il en est de même tous les 2.500 ans.

Deux remarques importantes :

- le caractère religieux du calendrier lui vient des fêtes ; à part elles, il suit le plus précisément possible le cours des saisons, et c'est ce qui le rend acceptable par tout le monde ;
- il est le mélange de nombreuses cultures et traditions : les Hébreux, les Romains, les Barbares (Thor…) ont participé à sa définition ; ce trait participe à son acceptation, et rendra très difficile son abandon.

Vous trouverez en seconde partie de cet opuscule des formules expliquées permettant de faire tous les calculs sur ce calendrier.

Le calendrier julien est parfois appellé "ancien style", par opposition au grégorien, qui est dit "nouveau style".

**Calendrier républicain**

La République a été proclamée le 22 septembre 1792, par hasard le jour de l'équinoxe d'automne. Ce hasard a amené les révolutionnaires à prendre ce jour pour début de l'ère républicaine (premier Vendémiaire an I). Le calendrier républicain a été créé le 6 octobre 1793. Les noms des mois ont été proposés par Fabre d'Eglantine ; ils sont magnifiques par leurs consonances, et sont en rapport avec la saison :

| mois | Etymologie des noms des mois | débute le | termine le |
|---|---|---|---|
| Vendémiaire | Vendemia (Latin) = vendange | 22 septembre | 21 octobre |
| Brumaire | brume (Français) | 22 octobre | 20 novembre |
| Frimaire | frimas (Français) | 21 novembre | 19 décembre |
| Nivôse | nivis (Latin) = neige | 21 décembre | 19 janvier |
| Pluviôse | pluviosus (Latin) = pluvieux | 20 janvier | 18 février |
| Ventôse | ventosus (Latin) = venteux | 19 février | 20 mars |
| Germinal | germination (Français) | 21 mars | 19 avril |
| Floréal | floraison (Français) | 20 avril | 19 mai |
| Prairial | prairie (Français) | 20 mai | 18 juin |
| Messidor | messis (Latin) = moisson | 19 juin | 18 juillet |
| Thermidor | thermos(Grec) = chaud | 19 juillet | 17 août |
| Fructidor | fructus(Latin) = fruit | 18 août | 16 septembre |

Les 12 mois comportent 30 jours (12 × 30 = 360). Les années normales comprennent 5 jours de plus, placés après Fructidor, et appelés *Sans-culottides*. Une année sur quatre est dite *sextile* ; elle comprend un jour de plus nommé *jour de la Révolution*. Ceci fait une année moyenne de

365,25 jours, comme l'année julienne. La période de quatre années est appelée *Franciade*, et se termine par le jour de la Révolution.

L'année commence le 1e Vendémiaire, pour la raison suivante : la royauté a été abolie par la Convention Nationale le 21 septembre 1792, et le décret est paru le 22. Or ce jour-là était l'équinoxe d'automne, où jour et nuit sont égaux, où la Terre entière (pôles compris) est éclairée par le Soleil. Le symbolisme avec l'égalité proclamée entre les citoyens était frappant, et a conduit les révolutionnaires à choisir cette date pour début de l'année et de leur ère. On pourrait y voir *a posteriori* une ombre au tableau : à l'équinoxe d'automne, la déclinaison du Soleil est décroissante…

La Révolution a donné des noms pour remplacer (et chasser) les noms des jours provenant de l'astrologie ancienne, et ceux des saints. Ainsi, la semaine est supprimée, et remplacée par la décade ; chaque jour de la décade sera doté d'un nom, selon un système très pratique. Le nom du jour est dérivé de son numéro dans la décade :

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1 primidi | 2 duodi | 3 tridi | 4 quartidi | 5 quintidi |
| 6 sextidi | 7 septidi | 8 octidi | 9 nonidi | 10 décadi |

Il était très simple de savoir quel jour on était (contrairement à notre calendrier grégorien) : si on est un quartidi, c'est le 4, le 14 ou le 24. Comme on sait toujours si on est au début, au milieu ou à la fin du mois, l'ambiguïté est levée.

L'erreur systématique du calendrier julien se retrouve ici ; de plus, les calculs du calendrier républicain sont approximatifs, car le début de l'année était fixé par l'observation de l'équinoxe d'automne ! Il renouait donc avec l'empirisme des anciens… Si on ajoute à cela que les noms des mois sont relatifs au climat de Paris, que les termes de Franciade, Sans-culottide… sont liés à un événement français, on voit que ce calendrier, contrairement au système métrique, n'avait aucun caractère d'universalité. Il n'est pas étonnant qu'il ait été rapidement abandonné.

**Calendrier universel**

Les réformes du calendrier ont souvent rencontré une forte opposition, due à la force des habitudes. Certaines ont été abandonnées, par exemple celle de Ptolémé III Evergète qui a réformé le calendrier vague, mais n'a pas été suivi par le peuple. De même, le calendrier Républicain n'a duré que 12 ans. Tout ceci montre quelles précautions il faut prendre lorsqu'on envisage de réformer le calendrier, même si cette transformation paraît nécessaire. Toute tentative dans ce sens doit prendre en compte les habitudes, et surtout ne pas rompre avec la chronologie. Les anniversaires font partie de la civilisation.

Nous avons vu que notre calendrier grégorien est un excellent calendrier solaire, et l'erreur qui subsiste sur la durée de l'année est plus faible que la variabilité de cette année ; nulle réforme ne s'impose sur ce plan. Les critiques qu'on pourrait lui faire portent sur la répartition des jours en mois, dont nous avons vu l'origine historique. Une plus grande régularité apporterait quelques améliorations, mais le prix à payer serait l'abandon d'une tradition. Dans ces conditions, il apparaît extrêmement difficile de fixer le calendrier.

On peut toutefois envisager des modifications par l'adoption de jours blancs, placés hors semaine. Le principe est de fixer les dates (le 28 mars serait toujours un jeudi…). L'année devrait pour cela être un multiple de la semaine. Or 7 × 52 = 364. Il manque donc un jour au moins.

Si on conserve l'essentiel du calendrier grégorien, qui a fait ses preuves avec plus de 400 ans d'existence, et qui est d'usage à peu près universel, on voit que le 1e janvier se décale d'un jour chaque année (car 365 jours = 52 semaines de 7 jours plus 1 jour ; le décalage est de 2 jours pour les années bissextiles). Si on désire que toutes les années commencent par le même jour (lundi par exemple) il est alors nécessaire d'envisager que le dernier jour des années communes ou le dernier jour et le bissextil des années bissextiles soient des jours blancs, hors semaine, *i.e.* sans nom.

Grégorien + dates fixes  brisure de la continuité de la semaine

Cette brisure étant admise, on peut considérer plusieurs arrangements des jours et des mois dans l'année :

- simple suppression du nom du 31 décembre (jeudi, mardi…)
- année de 12 mois, mais avec des trimestres identiques de 91 jours respectivement de 31, 30 et 30 jours, plus le jour blanc ; le bissextil est blanc aussi. C'est le calendrier universel (Armelin et Mamin, 1887 ; soutenu par Camille Flammarion).
- année de 13 mois égaux de 28 jours = 4 semaines ; 13 × 28 = 364 jours plus 1 jour blanc. C'est le calendrier fixe, dit *positiviste*, basé sur les propriétés subjectives des nombres, proposé par Auguste Comte en 1849. Cette solution est inacceptable, car des superstitions sont attachées au nombre 13, qui d'autre part est premier.

| **calendrier universel** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| janvier<br>avril<br>juillet<br>octobre | | | | | | | février<br>mai<br>août<br>novembre | | | | | | | mars<br>juin<br>septembre<br>décembre | | | | | | |
| D | L | M | M | J | V | S | D | L | M | M | J | V | S | D | L | M | M | J | V | S |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | . | . | . | 1 | 2 | 3 | 4 | . | . | . | . | . | 1 | 2 |
| 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |
| 29 | 30 | 31 | . | . | . | . | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | . | . | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |

31 décembre et 31 juin : jours blancs ; si l'année est bissextile, Pâques le 8 avril

Il existe une autre solution, sans jours blancs :

- 400 années tropiques = 400 × 365,2422 = 146.096,97 jours
- 400 années grégoriennes = 146.097 jours (voir le Calendrier Grégorien).

Il se trouve que 146.097 jours = 7 × 20.871 jours = 20.871 semaines. Donc il est possible de créer une période de 400 ans au cours de laquelle un minimum de calendriers distincts est nécessaire.

20.871 n'est pas divisible par 4, ce qui impose d'avoir des siècles de longueurs différentes : 3 siècles de 5.218 semaines, et un de 5.217. La répartition des semaines dans les années du siècle se fait en utilisant des années ayant un nombre entier de semaines : les années communes avec 52 semaines = 52 × 7 = 364 jours, suivies d'années longues ayant une semaine de plus (le caractère bissextil passe du jour à la semaine ; rapellez-vous que dans les temps anciens, on ajoutait des mois entiers). Une année plus longue d'une semaine tous les 5 ans convient, car 4 × 364 + (364 + 7) = 1.827 jours et 1.827 / 5 = 365,4.

Un calendrier de ce type est plus uniforme que le grégorien, mais marque des ruptures plus importantes. Est-il vraiment souhaitable d'atteindre une plus grande uniformité ? La diversité de notre calendrier n'a-t-elle pas un certain charme ? …

**Période Julienne**

Une solution très simple pour établir une chronologie consiste à numéroter les jours à partir d'une origine conventionnelle. Si cette méthode n'a été adoptée par aucune civilisation, c'est qu'elle amène l'emploi de grands nombre malcommodes à utiliser. Cependant, les astronomes sont habitués à ce genre d'exercice, et se servent d'une numérotation dont l'origine est le

1$^{e}$ janvier 4 713 avant J.C. à midi.

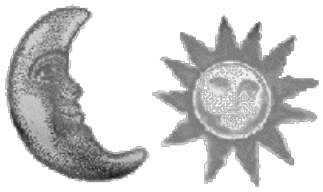
En plaçant le début du jour à midi, les astronomes occidentaux s'assuraient que toute une nuit d'observation s'étendait sur une même date. Cette numérotation présente par ailleurs un grand intérêt en histoire, pour établir la concordance entre les différents calendriers.

La *période julienne*, ou *période de Scaliger* a été imaginée par Joseph Scaliger en 1583, dans son ouvrage *Opus Novum de Emmendatione Temporum* (étude nouvelle de la correction du temps). C'est une suite de 7.980 ans, obtenue en multipliant le cycle dominical (28 jours) par le cycle de Méton (19 ans) et par l'indiction romaine (15 ans) : 28 × 19 × 15 = 7.980. En divisant le rang d'une année dans la période de Scaliger par 15, 19 et 28, les restes donnent l'indiction romaine, le nombre d'or et le cycle solaire.

Son origine, qui semble tout à fait arbitraire, est choisie parce que ce jour-là les trois nombres en question valaient 1 (lundi 1$^{e}$ janvier d'une année bissextile). Chaque année, l'annuaire du Bureau des Longitudes publie des tables de correspondance permettant un calcul facile de la période julienne pour une date donnée.

Le calcul des durées est le point fort de cette période : le nombre de jours séparant deux dates est obtenu par soustraction des valeurs correspondantes de la période julienne.

Le cycle actuel de Scaliger s'achèvera le 31 décembre 3 267 julien, ou le 22 janvier 3 268 grégorien.



## *Deuxième Partie*

Dans cette partie consacrée aux calculs du calendrier, nous utiliserons uniquement la division entière (appelée *division euclidienne*) pour représenter tous les calculs. Chaque formule sera amenée de manière logique, à partir des règles du calendrier ou des phénomènes astronomiques. Si l'aspect des formules peut paraître rébarbatif de prime abord, leur calcul est extrêmement simple.

L'utilisation de ces formules permettra de résoudre tous les problèmes liés au calendrier grégorien, en particulier quelques exercices amusants placés à la fin de la section. Le plus courant de ces problèmes consiste à retrouver, quelques années après, quel jour de la semaine correspond à une date donnée, de naissance par exemple.

**Calcul de la règle solaire grégoriene**

Le calendrier julien présente une dérive par rapport aux saisons, qui reste faible sur une courte durée, mais devient gênante à l'échelle du millénaire. Or un calendrier moderne doit atteindre cette portée. L'erreur se matérialise simplement en comparant les durées moyennes de l'année tropique et de l'année julienne :

| | | |
|---|---|---|
| Année Julienne | = | 365, 2500 jours |
| Année Tropique | = | 365, 2425 jours |
| différence | = | 0, 0075 jours |

La valeur de l'année tropique indiquée ici est celle connue en 1582 (voir le paragraphe sur le calendrier grégorien). L'année julienne est trop longue de 0,0075 jours. Le siècle julien est donc trop long de 0,75 jours = 3/4 jour. Donc 4 siècles juliens sont trop longs de 3 jours, ce qui justifie les deux premières règles grégoriennes (si on refait le calcul avec une valeur plus moderne de l'année tropique 365,2422 on ne change pas le résultat).

Dans un siècle julien, il y a 25 × (3 × 365 + 366) = 36 525 jours. Dans 4 siècles juliens il y en a donc 4 × 36 525 = 146 100. Or la réforme grégorienne retire 3 jours en 4 siècles, donc il en reste 146 100 - 3 = 146 097. La durée moyenne de l'année est donc ramenée à 146 097 / 400 = 365,2425.

Ce calendrier est donc exact par rapport à la valeur de l'année tropique qui a servi de base pour son calcul. Par rapport à la valeur moderne, l'erreur est de 365,2425 - 365,2422 = 0,0003 jours. Il subsiste une dérive de 3 jours en 10.000 ans. C'est du même ordre de grandeur que la dérive des valeurs astronomiques. On peut le considérer comme parfait sur ce plan-là.

**Cycle de Méton**

C'est une période raisonnable assurant une égalité approchée entre l'année solaire a et le mois lunaire l. Prenons comme valeurs a = 365,25, et l = 29,53. Ces valeurs sont à peu près ce qu'on pouvait connaitre à l'époque de Méton. Elles doivent vérifier :

$$29{,}53\ p = 365{,}25\ k \qquad \text{avec k et p entiers}$$

Divisant tout par 29,53 on obtient :

$$p = 365{,}25 / 29{,}53\ k = 12{,}3688\ k$$

$$\text{donc } p = 12{,}3688\ k = (12 + 0{,}3688)\ k = 12\ k + 0{,}3688\ k$$

k étant entier, 12 k l'est aussi. Pour que p soit entier, il suffit donc que 0,3688 k soit entier. On souhaite bien sûr que cet entier soit le plus petit possible. Pour déterminer la plus petite valeur acceptable, calculons les premiers multiples de 0,3688 :

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | **8** | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,3688 | 0,738 | 1,106 | 1,475 | 1,844 | 2,213 | 2,582 | **2,950** | 3,319 | 3,688 |
| 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | **19** | 20 |
| 4,057 | 4,426 | 4,794 | 5,163 | 5,532 | 5,901 | 6,270 | 6,638 | **7,007** | 7,376 |

Il faut rechercher les multiples les plus proches d'un entier. On voit que la valeur k = 8 donne 2,950 qui est approchée d'un entier à 5 centièmes près ; il lui correspond p = 12,3688 × 8 = 98,950, donc p = 99 à 50 millièmes près. C'est une période de 8 ans comptant 99 mois ; on vient de retrouver l'*octaétéride des Grecs*.

Le multiple 11 donne une approximation légèrement meilleure (43 millièmes) k = 11, p = 136. Le gain par rapport à l'octaétéride est très faible, et ne justifie pas vraiment l'allongement de la période de 8 à 11 ans. Le système n'a pas été employé.

Enfin, le multiple 19 donne une valeur entière approchée à 7 millièmes près ! C'est cette valeur qui a été trouvée par Méton, et qui est à la base du cycle portant son nom.

On a choisi donc k =19 ; p  12,3688 k = 12,3688 × 19 = 235,007  235.

Il s'ensuit que 19 années juliennes correspondent à 235 lunaisons :

$$19 \times 365{,}25 = 6\,939{,}75 \text{ jours} \qquad 235 \times 29{,}53059 = 6\,939{,}688 \text{ jours}$$

L'égalité est obtenue à 6 939,75 - 6 939,688 = 0,062 jours *i.e.* 1 h 29 min par rapport à l'année julienne. Par rapport à l'année tropique exacte, l'erreur est :

19 × 365,2422 = 6 939,6018 ; 6 939,688 - 6 939,6018 = 0,0862 jours *i.e.* 2 h 4 min.

Cette erreur se traduit par 1 jour d'écart entre la lune vraie et la lune calculée au bout de 228 ans :

0,0862 × N >= 1  N >= 1 / 0,0862 = 11,6009 ; N entier  N = 12 cycles, donc 12 × 19 = 228.



Les calculs présentés sont assez sensibles aux valeurs de la lunaison et de l'année. Il faut surtout les voir comme un moyen de recherche pour guider l'intuition. Il est difficile de savoir quelles valeurs de l'année et de la lunaison Méton a pu utiliser.

L'erreur du cycle de Méton, faible mais non négligeable, présente toutes les caractéristiques lunaires du calendrier julien : elle autorise le calcul de la date de Pâques, mais porte en elle la nécessité de la réforme Grégorienne. Au bout de 3 × 228 ans = 684 ans, l'erreur était de 3 jours et passait difficilement inaperçue.

**Quelques solutions vers un calendrier solaire parfait**

Pour l'année solaire, on peut calculer directement, de manière très simple, diverses solutions possibles. Il suffit de mettre la durée de l'année tropique 365,2422 jours, sous la forme 365 + a / b avec a et b entiers bien sûr. Ainsi, nous saurons immédiatement qu'il faut ajouter *a* jours dans une période de *b* années. En effet, s'il faut par exemple rajouter la fraction 7/29 de jours par an, sur une période de 29 années, il faudra rajouter 7 jours.

La recherche empirique de ces nombres peut être fastidieuse et aléatoire, mais il existe une façon très simple de les trouver :

**1-** a = 365,2422 ; si on néglige la partie décimale, on obtient **a 365.** Elle correspond à une année fixe de 365 jours, meilleure approximation entière utilisée dans de nombreux calendriers primitifs. L'erreur par rapport à l'année tropique est de 0,2422 jour *i.e.* **5 h 48 min**.

**2-** Le calendrier julien utilise une année de 365 j 1/4. C'est une valeur approchée ; il faudrait à la place de 4 un nombre un peu plus grand, que nous appellerons p. Cherchons sa valeur :

$$a = 365,2422 = 365 + \frac{1}{p}$$

d'où :

$$\frac{1}{p} = 365,2422 - 365 = 0,2422$$

et :

$$p = \frac{1}{0,2422} = 4,12882$$

La valeur exacte est donc

$$a = 365,2422 = 365 + \frac{1}{4,12882}$$

Ceci signifie qu'il faudrait ajouter 1 jour tous les 4,12882 ans ; ce n'est pas très pratique !

En négligeant 0,12882 on retrouve l'approximation julienne 365 + 1 / 4. On ajoute 1 jour dans chaque période de 4 ans, ce qui donne une année moyenne de 365,25 j. L'erreur par rapport à l'année tropique est de 365,25 - 365,2422 = 0,0078 jour *i.e.* **11 min**.

**3-** Refaisons le même travail sur le nombre obtenu 4,12882 :

$$4,12882 = 4 + \frac{1}{p_1}$$

d'où

$$\frac{1}{p_1} = 4,12882 - 4 = 0,12882$$

et

$$p_1 = \frac{1}{0,12882} = 7,76282$$

donc

$$4,12882 = 4 + \frac{1}{7,76282}$$

Reportons cette valeur dans l'expression trouvée plus haut :

$$a = 365,2422 = 365 + \frac{1}{4,12882} = 365 + \frac{1}{4 + \frac{1}{7,76282}}$$

En négligeant 0,76282 on obtient une approximation :

$$a \approx 365 + \frac{1}{4 + \frac{1}{7}} = 365 + \frac{7}{29}$$

En calculant la fraction, on obtient 365,24138 jours. L'erreur par rapport à l'année tropique est de 365,24138 - 365,2422 = -0,00082 jour *i.e.* **1 min 11 s**.

C'est une approximation dans laquelle on aurait une année commune de 365 jours, avec adjonction de 7 jours supplémentaires en 29 ans.

**4-** Pour faire toujours mieux , on utilise encore le même procédé avec le nombre 7,76282 :

$$7,76282 = 7 + \frac{1}{p_2}$$

d'où

$$p_2 = \frac{1}{7,762820 - 7} = 1,3109$$

a = 365,2422 = **365** + 1/(**4** +1 / (**7** + 1 / **1**,3109))

$$a = 365,2422 = 365 + \frac{1}{4 + \frac{1}{7 + \frac{1}{1,3109}}}$$

si on néglige la partie décimale, on obtient

$$a \approx 365 + \frac{1}{4 + \frac{1}{7 + \frac{1}{1}}} = 365 + \frac{1}{4 + \frac{1}{8}} = 365 + \frac{8}{33}$$

L'année moyenne vaut 365,2424. L'erreur par rapport à l'année tropique est de 365,2424 - 365,2422 = 0,0002 jour *i.e.* **17 s**.

On reconnait là la solution utilisée par le calendrier Persan. L'histoire ne nous dit pas s'ils ont utilisé cette méthode pour l'obtenir. La méthode utilisée est connue sous le nom de *fractions continues*.

Le tableau suivant donne les résultats de ce calcul poussé à 12 itérations, sous forme synthétique. Les coefficients sont ceux de la fraction obtenue, par exemple 4 et 7 à la troisième ligne ; p donne le nombre de jours à ajouter, au cours d'une période de q année ; p / q représente l'excès à 365 jours, et doit être aussi proche que possible de 0,2422 ; enfin, la colonne validité indique le nombre d'années au bout duquel la dérive atteint 1 jour. La valeur donnée dépend fortement de la valeur de l'année tropique. Pour les grandes valeurs, il ne faut y voir qu'un ordre de grandeur.

| coefficients | | | | | | | | | | | p | q | p/q | validité (années) | calendrier |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 365 | | | | | | | | | | | 0 | 1 | 0.000000000000 | 4 | vague |
| 365 | 4 | | | | | | | | | | 1 | 4 | 0.250000000000 | 128 | julien |
| 365 | 4 | 7 | | | | | | | | | 7 | 29 | 0.241379310345 | 1 221 | - |
| 365 | 4 | 7 | 1 | | | | | | | | 8 | 33 | 0.242424242424 | 4 420 | persan |
| 365 | 4 | 7 | 1 | 3 | | | | | | | 31 | 128 | 0.242187500000 | 95 000 | - |
| 365 | 4 | 7 | 1 | 3 | 5 | | | | | | 163 | 673 | 0.242199108470 | 900 000 | - |
| 365 | 4 | 7 | 1 | 3 | 5 | 1 | | | | | 194 | 801 | 0.242197253433 | 1 000 000 | - |
| 365 | 4 | 7 | 1 | 3 | 5 | 1 | 1 | | | | 357 | 1474 | 0.242198100407 | 10 000 000 | - |
| 365 | 4 | 7 | 1 | 3 | 5 | 1 | 1 | 4 | | | 1622 | 6697 | 0.242197999104 | 1 000 000 000 | - |
| 365 | 4 | 7 | 1 | 3 | 5 | 1 | 1 | 4 | 24 | | 39285 | 162202 | 0.242198000025 | 40 000 000 000 | - |
| 365 | 4 | 7 | 1 | 3 | 5 | 1 | 1 | 4 | 24 | 1 | 40907 | 168899 | 0.242197999988 | 84 000 000 000 | - |
| 365 | 4 | 7 | 1 | 3 | 5 | 1 | 1 | 4 | 24 | 1 | 2 | 121099 | 500000 | 0.242198000000 | ∞ | - |

On remarquera que la fraction 1.622 / 6.697 a une durée de validité qui atteint déjà le milliard d'années… la dernièredivision est exacte, et donne le nombre de départ.

Cette méthode ne donne pas tous les calendriers envisageables ; la meilleure preuve en est que le calendrier grégorien n'y figure pas… mais elle permet de trouver une approximation aussi précise qu'on le souhaite de la valeur connue de l'année tropique. L'absence du calendrier grégorien tient à la complexité des ajouts : tous les 4 ans, sauf… On remarque tout de même que la fraction 194/801 consiste à rajouter 194 jours en 801 ans. Or le calendrier grégorien ajoute 194 jours en 800 ans !

Il ne faut cependant pas aller trop loin dans la précision : tous ces calculs sont basés sur la valeur de l'année tropique, qu'on connaît avec une certaine erreur de mesure. Il est inutile que le calendrier soit plus précis. Même en supposant qu'on soit capable de faire une mesure parfaite, elle serait valable à un instant donné ; or les paramètres de l'orbite terrestre varient dans le temps, ce qui fait que la durée de l'année tropique n'est pas non plus constante. Il serait donc illusoire de rechercher une précision beaucoup plus grande que celle fournie par le calendrier grégorien.

**Calcul du Jour Julien, à partir d'une date julienne**

La période julienne (période de Scaliger) que nous avons vue plus haut, est un repère continu du temps, basé sur une numérotation des jours ; elle est étendue par un codage de l'heure. Elle s'exprime par un nombre décimal, dont la partie entière est le rang du jour, et la partie décimale indique l'heure. Nous allons rechercher d'abord une formule donnant le rang d'un jour, pour le calendrier julien.

Supposons que toutes les années aient 365 jours ; on aurait la correspondance :

premier janvier -4712 JJ = 0 × 365
premier janvier -4711 JJ = 1 × 365

JJ signifie jour julien

premier janvier -4710 JJ = 2 × 365
premier janvier -4709 JJ = 3 × 365

365 est multiplié par le nombre d'années écoulées depuis l'origine, qui peut s'écrire a + 4712 pour l'année a. Donc on peut déjà noter :

premier janvier a JJ = (a + 4712) × 365

Prenons maintenant en compte les années bissextiles. Il y en a une régulièrement tous les 4 ans, et la première année (-4712) est bissextile. Il faut donc ajouter au compte de jours le nombre d'années bissextiles écoulées AVANT l'année considérée. Il ne faut pas ajouter 1 pour -4712, mais à partir de la suivante. Donc on ajoute un terme de la forme :

**{**(a + 4712 + k) / 4**}**

où les accolades indiquent la partie entière.

On détermine la valeur de k de telle sorte que ce terme prenne la valeur 1 pour a = -4711. Donc il faut que -4711 + 4712 + k = 4, donc 1 + k = 4 et k = 3.

premier janvier a JJ = (a + 4712) × 365 + **{**(a + 4712 + k) / 4 **}**

Cette formule donne le JJ du premier janvier de toute année julienne a. Il faut maintenant l'étendre pour obtenir le JJ d'une date quelconque dans l'année.

Commençons par le jour j de janvier ; si j = 1, il ne faut rien ajouter ; si j = 2, il faut ajouter 1… donc de manière générale, il faut ajouter j - 1.

Si maintenant on s'adresse à un jour d'un autre mois, il faut ajouter encore le nombre de jours totalisés par les mois précédents. Soit le tableau, que nous nommerons VM pour 'veille du mois' :

| janv | fév | mars | avril | mai | juin | juil | août | sept | oct | nov | déc |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 31 | 59 | 90 | 120 | 151 | 181 | 212 | 243 | 273 | 304 | 334 |

Il faut donc ajouter : VM[m] + j - 1

Enfin, si l'année est bissextile, le jour bissextil étant intercalé en février, il faut l'ajouter pour les 10 derniers mois de l'année. Donc il faut un terme qui ajoute 1 pour tous les jours des mois de mars à décembre des années bissextiles. On notera biss(a, m) ce terme qui dépend de l'année (pour savoir si elle est bissextile) et du mois :

$$\text{biss}(a,m) = \begin{cases} 1 \text{ si a est bissextile et si m} > 2 \text{ ( m = 1 janvier, m = 2 février…) ;} \\ 0 \text{ sinon} \end{cases}$$

Le JJ pour un jour quelconque j/m/a de l'année est :

$$j/m/a = \quad JJ = (a + 4712) \times 365 + \{(a + 4712 + 3) / 4\} + VM[m] + \text{biss}(a, m) + j - 1$$

Enfin, il faut convertir l'heure et les minutes en fractions de jours. Si h est l'heure, h / 24 est la fraction de jour recherchée ; pour h = 24, elle donne 1 ; pour h = 12, elle donne 0,5. Pour les minutes, puisqu'il y en a 24 × 60 = 1440 par jour, la fraction est min / 1440. On en profite pour caler le début du jour à midi en retranchant 12 h. De ce fait :

$$JJ = (a + 4712) \times 365 + \{(a + 4712 + 3) / 4\} + VM[m] + \text{biss}(a, m) + j - 1 + (h - 12) / 24 + \text{min} / 1440$$

Cette formule est valable jusqu'au 4 octobre 1582 inclus.

**Calcul du Jour Julien, à partir d'une date grégorienne**

Il y a continuité et similitude entre les calendriers julien et grégorien. Donc il suffit d'adapter la formule ci-dessus (on le fait d'abord en ignorant le terme correspondant à l'heure). Pour cela, on retranche d'abord les 10 jours supprimés par Grégoire XIII :

$$1/1/a = \quad JJ = (a + 4712) \times 365 + \{(a + 4712 + 3) / 4\} - 10$$

Puis on supprime les jours bissextils du calendrier julien qui ne le sont plus dans le grégorien. Ils concernent les années séculaires dont le millésime n'est pas divisible par 400. Il faut retrancher 1 pour chaque année séculaire, donc retrancher un terme de la forme :

**{**(a + k) / 100**}**

Ce terme doit prendre la valeur 1 pour la première fois l'année qui suit la première année séculaire après 1582. Donc il vaut 1 en 1601 (il compte le nombre d'années bissextiles AVANT l'année considérée). En remplaçant a par 1601, on trouve :

1601 + k = 100, donc k = -1501 ; le terme cherché est : **{**(a - 1501) / 100**}**

Maintenant, il faut ajouter 1 pour chaque année séculaire qui reste bissextile dans le calendrier grégorien. Même procédé, terme semblable : il doit prendre la valeur 1 pour l'année qui suit la première année séculaire bissextile, donc 1601 (car 1600 est divisible par 400) :

Sa forme est : **{**(a + k) / 400**}**

1601 + k = 400, donc k = -1201 et le terme est : **{**(a - 1201) / 400**}**

La formule devient donc :

JJ = (a + 4712) × 365 + **{**(a + 4712 + 3) / 4**}** - 10 - **{**(a - 1501) / 100**}** + **{**(a - 1201 / 400**}** + VM[m] + biss(a, m) + j -1

Il est possible de simplifier cette formule, en utilisant une propriété simple de la division :

$$\{(a + b\,k / k\} = \{a / k\} + b$$

**Preuve** : Soit

| | | | |
|---|---|---|---|
| $q = (a + b\,k) / k)$ | alors $a + b\,k = q\,k + r$ | avec $0 \leq r < k$ | (div. euclidienne) |
| donc | $a = q\,k - b\,k + r = (q - b)\,k + r$ | avec $0 \leq r < k$ | |
| donc | q - b est le quotient entier de a par k | $q - b = (a / k)$ | $q = (a / k) + b$ |

**{**(a + b k) / k**}** = **{**a / k**}** + b **cqfd**

On peut appliquer cette transformation pour le terme **{**(a + 4712 + 3) / 4**}** en le réécrivant **{**(a + 3 + 4712) / 4**}** et en remarquant que 4712 = 4 × 1178 :

**{**(a + 4712 + 3) / 4**}** = **{**(a + 3) / 4**}** + 1178

De même, **{**(a - 1501) / 100**}** = **{**(a - 1 - 1500) / 100**}** = **{**(a - 1) / 100**}** - 15

et **{**(a - 1201) / 400**}** = **{**(a - 1 - 1200) / 400**}** = **{**(a - 1) / 400**}** - 3

Le jour julien devient :

JJ = (a + 4712) × 365 + **{**(a + 3) / 4**}** + 1178 - 10 - **{**(a - 1) / 100**}** + 15 + **{**(a - 1) / 400)**}** - 3

JJ = (a + 4712) × 365 + **{**(a + 3) / 4**}** - **{**(a - 1) / 100**}** + **{**(a - 1) / 400**}** + 1180

et enfin, en remettant les termes correspondant au jour et à l'heure :

$$\begin{aligned} JJ = {} & (a + 4712) \times 365 + \{(a + 3) / 4\} - \{(a - 1) / 100\} + \{(a - 1) / 400\} + 1180 + \\ & VM[m] + biss(a, m) + j + \\ & (h - 12) / 24 + min / 1440 \end{aligned}$$

La formule est présentée sur trois lignes, pour séparer les termes correspondant au premier janvier (première ligne), à un jour quelconque de l'année (seconde ligne), et à l'heure.

Cette formule est valable à partir du 15 octobre 1582.

N.B. On ne peut pas effectuer la même simplification sur la formule julienne, à cause des années négatives.

**Exemple** : 17 décembre 1999 à 20 h 30

(1999 + 4712) × 365 + **{**(1999 + 3) / 4**}** - **{**(1999 - 1) / 100**}** + **{**(1999- 1) / 400**}** + 1180 = 2449515 + 500 - 19 + 4 + 1180 = 2 451 180

JJ = 2 451 180 + VM[12] + biss(1999, 12) + j - 1 + ((20 - 12) / 24) + (30 / 1440) = 2 451 530,35417

Le jour julien commençant à midi est à cheval sur deux journées en temps universel. Si JJ représente un instant quelconque du 11 octobre 1989, on a $2\,447\,811{,}5 \leq JJ < 2\,447\,812{,}5$

**Jour julien modifié**

Le jour julien produit de grands nombres, inutiles si la durée considérée est raisonnable. D'autre part, l'ancien usage des astronomes qui commençaient le jour à midi ne correspond pas aux habitudes civiles, et est abandonné même en astronomie.

On définit donc le *jour julien modifié* en retranchant 2 400 000,5 au jour julien. On écrit MJD pour *modified julian date*. L'origine de cette échelle est le 17 novembre 1858 à 0 h. Cette nouvelle échelle a été reconnue par l'Union Astronomique Internationale en 1973.

Exemple : le même 17 décembre 1999 à 20 h 30 a pour MJD 2 451 530,35417 - 2 400 000,5 = 51 529,85417

**Durée**

Le grand intérêt du jour julien est l'absence de rupture dans la numérotation des jours. Le jour julien est le nombre de jours écoulés depuis le 1er janvier -4712. Si on retranche les JJ (ou les MJD) correspondants à deux dates différentes, on obtiendra le nombre de jours écoulés entre elles.

**Exemple** : la comète de Halley est passée au périhélie le 16 novembre 1835, et le 20 avril 1910. Quelle est sa période approximative ?

| | |
|---|---|
| pour le 20 avril 1910 à midi | $JJ_1 = 2\ 418\ 782$ |
| pour le 16 novembre 1835 à midi | $JJ_0 = 2\ 391\ 599$ |
| la durée est : | $JJ_1 - JJ_0 = 27\ 183$ jours *i.e.* **74 ans 154 jours** |

**Retrouvons le jour de la semaine**

Le JJ étant le nombre de jours écoulés depuis le 1$^e$ janvier -4712, on le divise par 7 ; le quotient est le nombre de semaines entières écoulées, et le reste est le décalage par rapport à l'origine, qui est un lundi (voir la définition du JJ). Avant de faire la division, il faut cependant ajouter 0,5 pour recaler sur un jour civil, et supprimer les chiffres après la virgule, qui représentent les heures :

$$s = \mathbf{[}\ JJ + 0{,}5\ \mathbf{]}_7$$

Les parenthèses indiquent qu'il faut prendre la partie entière. La correspondance sera :

| lundi | mardi | mercredi | jeudi | vendredi | samedi | dimanche |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |

**Attention**, ce n'est pas le même tableau que précédemment (l'origine choisie n'est pas la même).

**Exemple** : pour le 17 décembre 1999 à 20 h 30, nous avons trouvé JJ = 2 451 530,35417

donc $\mathbf{[}\ 2\ 451\ 530{,}35417 + 0{,}5\ \mathbf{]}_7 = \mathbf{[}\ 2\ 451\ 530{,}85417\ \mathbf{]}_7 = \mathbf{[}\ 2\ 451\ 530\ \mathbf{]}_7 = 4$ c'est donc un vendredi

**Comput Ecclésiastique**

C'est sous ce nom que l'on désigne l'ensemble des calculs relatifs au calendrier grégorien. Son but premier est la date de Pâques, mais il comprend également la lettre dominicale, le nombre d'or, le cycle solaire et l'indiction romaine. Ces indications figurent, en tout petits caractères, sur le calendrier des postes. De Pâques, découlent toutes les fêtes mobiles (Pentecôte en particulier).

**Caractère bissextil**

Dans le calendrier julien, une année est bissextile si et seulement si son millésime est divisible par 4 (le reste de sa division par 4 est nul), autrement dit si la formule :

$$\mathbf{[}a\mathbf{]}_4 = 0$$

est vraie.

Dans le calendrier grégorien, le rattrapage qui élimine le caractère bissextil de certaines années séculaires complique un peu. Une année est bissextile si et seulement si son millésime vérifie la formule :

$$(\mathbf{[}a\mathbf{]}_{400} = 0)\ \textbf{ou}\ ((\mathbf{[}a\mathbf{]}_{100} \neq 0)\ \text{et}\ (\mathbf{[}a\mathbf{]}_4 = 0))$$

Le premier terme est vrai si une année est séculaire et son millésime est divisible par 4. Le seconde terme est vrai si l'année n'est pas séculaire ($\mathbf{[}a\mathbf{]}_{100} \neq 0$) et si son millésime est divisible par 4.

**Cycle solaire**

C'est une période de 4×7 ans = 28 ans, qui regroupe le cycle des années bissextiles (1 sur 4), et le cycle des jours de la semaine, qui se décalent d'un par an (voir le calendrier julien). Ses valeurs vont de 1 à 28, et reprennent ensuite à 1, 2…

Tout d'abord, notons que l'année origine de la période julienne est l'année 4713 av. J.C., qu'elle commence par un lundi, et qu'elle est bissextile. On va déduire les caractéristiques d'une autre année à partir de celle-là. En notation relative, elle correspond à -4712. Considérant une année *a* quelconque, le nombre d'années écoulée avant *a* est donné par *a* + 4712. Par exemple, si *a* = -4712, on obtient 0 ; si *a* = -4711, on obtient 1…

Le tableau ci-dessous donne, pour quelques années, les valeurs de *a* + 4712, le quotient q de *a* + 4712 par 28, leur reste r, et enfin le cycle solaire cherché S :

| **a** | **a + 4712** | **q** | **r** | **S** |
|---|---|---|---|---|
| -4712 | 0 | 0 | 0 | 1 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| -4711 | 1 | 0 | 1 | 2 |
| -4710 | 2 | 0 | 2 | 3 |
| … | … | … | … | … |
| -4686 | 26 | 0 | 26 | 27 |
| -4685 | 27 | 0 | 27 | 28 |
| -4684 | 28 | 1 | 0 | 1 |
| -4683 | 29 | 1 | 1 | 2 |
| … | … | … | … | … |

On voit très simplement que le cycle solaire recherché S s'obtient en calculant le reste de la division de *a* + 4712 par 28, et en lui ajoutant 1. Ce qui se résume par la formule :

$$S = \mathbf{[}\ a + 4712\ \mathbf{]}_{28} + 1$$

Les crochets $\mathbf{[\ ]}_{28}$ signifient que l'on prend le reste de la division par 28. La formule se lit donc :

a + 4712 modulo 28, plus 1.

**Exemple** : a = 1999 ; a + 4712 = 1999 + 4712 = 6711 ; 6711 divisé par 28 donne un quotient de 239 et un reste de 19 ; donc $\mathbf{[}6711\mathbf{]}_{28} = 19$, et enfin : $S = \mathbf{[}\ 1999 + 4712\ \mathbf{]}_{28} + 1 = 19 + 1 = \mathbf{20}$.

**Indiction romaine**

C'est une période de 15 ans, intermédiaire entre l'année et le siècle, en usage à Rome. Ses valeurs vont de 1 à 15 ; elle vaut 1 en -4712. C'est le même calcul que pour le cycle solaire, en remplaçant 28 par 15 :

$$I = \mathbf{[}\ a + 4712\ \mathbf{]}_{15} + 1$$

**Exemple** : a = 1999 ; a + 4712 = 6711 ; 6711 divisé par 15 donne un quotient de 447 et un reste de 6; donc $[6711\ \mathbf{]}_{15} = 6$, et enfin : $S = \mathbf{[}\ 1999 + 4712\ \mathbf{]}_{15} + 1 = 6 + 1 = \mathbf{7}$.

**Nombre d'or**

Le nombre d'or est le rang de l'année dans le cycle de Méton, de période 19 ans. Il vaut également 1 en -4712, puisque cette année a justement été choisie parce que tous ces cycles valent 1. En procédant comme ci-dessus pour l'indiction, on obtient :

$$N = \mathbf{[}\ a + 4712\ \mathbf{]}_{19} + 1$$

Ceci appelle une remarque : on a procédé toujours de la même façon, mais il se trouve que 4712 est divisible exactement par 19 ; le reste est 0. C'est pourquoi la formule simplifiée $N = \mathbf{[}\ a\mathbf{]}_{19} + 1$ ne présente que le millésime *a* dans les crochets.

**Exemple** : a = 1999 ; 6711 divisé par 19 donne un quotient de 353 et un reste de 4 ; donc $\mathbf{[}6711\mathbf{]}_{19} = 4$, et enfin : $N = \mathbf{[}6711\ \mathbf{]}_{19} + 1 = 4 + 1 = 5$.

**Lettre dominicale**

La *Lettre Dominicale* sert à indiquer quel jour de la semaine est le premier janvier. De lui découle toute l'année. Son origine est à rechercher dans l'habitude des Romains de placer, dans leurs calendriers, une lettre à partir du A en face de chaque jour, en recommençant au A après le G (voir l'illustration du calendrier pour octobre 1582). Voici un début du calendrier correspondant à quelques années (par exemple 1988, 1932, 1802 à gauche, et 1987, 1789, 1852 à droite) :

| | | |
|---|---|---|
| A | 1 | vendredi |
| B | 2 | samedi |
| **C ou CB** | **3** | **dimanche** |
| D | 4 | lundi |
| … | … | |

| | | |
|---|---|---|
| A | 1 | jeudi |
| B | 2 | vendredi |
| C | 3 | samedi |
| **D ou DC** | **4** | **dimanche** |
| … | … | … |

La lettre dominicale pour les années à gauche sera C si elles sont communes (1802), ou CB si elles sont bissextiles (1988, 1932), et à droite D (1987, 1789) ou DC (1852). A partir de là, on peut connaître tous les jours de l'année. Nous allons maintenant établir une formule permettant de trouver la lettre dominicale en fonction du millésime.

L'année commune vaut 365 jours = 7×52 + 1 *i.e.* 52 semaines entières + 1 jour. Donc si une année commence un lundi, la suivante commencera

un mardi, etc. Les jours sont donc décalés d'une quantité L qui est proportionnelle au millésime a :

$$L_0 = a$$

La règle julienne ajoute un jour bissextil tous les 4 ans. Donc le nombre de jours bissextils ajoutés est le quotient de a par 4. Ce qui produit un décalage supplémentaire (ce terme représente le nombre d'années bissextiles avant l'année a, **a comprise**) :

$$L_1 = L_0 + \mathbf{\{}a / 4\mathbf{\}} = a + \mathbf{\{}a / 4\mathbf{\}}$$

La règle grégorienne **supprime** le caractère bissextil des années séculaires dont le millésime n'est pas divisible par 400, ce qui revient à :

supprimer un jour par année séculaire : $L_2 = L_1 - \mathbf{\{}a / 100\mathbf{\}}$

ajouter un jour par année séculaire bissextile : $L_3 = L_2 + \mathbf{\{}a / 400\mathbf{\}}$

> le jour bissextil étant compté dans L, la valeur obtenue concerne la fin d'une année bissextile ; pour janvier et février (année bissextile seulement), il faut prendre L - 1.

$L_3 = L_2 + \mathbf{\{}a / 400\mathbf{\}} = L_1 - \mathbf{\{}a / 100\mathbf{\}} + \mathbf{\{}a / 400\mathbf{\}} = a + \mathbf{\{}a / 4\mathbf{\}} - \mathbf{\{}a / 100\mathbf{\}} + \mathbf{\{}a / 400\mathbf{\}}$

Enfin, $L_3$ donne le décalage total. Puisqu'il n'y a que 7 jours de la semaine, il faut prendre le reste de la division de $L_3$ par 7 (LG signifie Lettre dominicale *Grégorienne*) :

$LG = \mathbf{[}\ a + \mathbf{\{}a / 4\mathbf{\}} - \mathbf{\{}a / 100\mathbf{\}} + \mathbf{\{}a / 400\mathbf{\}}\ \mathbf{]}_7$

Pour 1999, le calcul donne : $L_3 = 1999 + \mathbf{\{}1999 / 4\mathbf{\}} - \mathbf{\{}1999 / 100\mathbf{\}} + \mathbf{\{}1999 / 400\mathbf{\}} = 1999 + 499 - 19 + 4 = 2483$ ;

$LG = \mathbf{[}\ 2483\ \mathbf{]}_7 = 5$

Nous savons (il suffit de regarder un calendrier) que le 1er janvier était un vendredi (on peut faire cela pour n'importe quelle année). Donc 5 correspond au vendredi. On en déduit le tableau de correspondance entre les valeurs trouvées et les noms des jours :

| dimanche | lundi | mardi | mercredi | jeudi | vendredi | samedi |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |

Pour une année quelconque, on appelle A le 1er janvier, B le 2, C le 3 etc. Par conséquent, il faut mettre A en face du numéro qu'on vient de trouver (dans l'exemple de 1999, en face de 5). Ensuite on met B en face du chiffre suivant… jusqu'à tomber sur le dimanche.

| | dimanche | lundi | mardi | mercredi | jeudi | vendredi | samedi |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| LG = 6 | B | | | | | | A |
| LG = 5 | C | | | | | A | B |
| LG = 4 | D | | | | A | B | C |
| LG = 3 | E | | | A | B | C | D |
| LG = 2 | F | | A | B | C | D | E |
| LG = 1 | G | A | B | C | D | E | F |
| LG = 0 | A | | | | | | |

Si LG = 2 par exemple, on met A en face de la colonne 2 (mardi). Donc B en face de 3 etc. et F en face de 0 (dimanche). La lettre dominicale est donc F dans ce cas. On a donc le tableau de correspondance :

| LG | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| lettre | A | G | F | E | D | C | B |

Pour 1999 nous avons trouvé LG = 5. Donc la lettre dominicale est C.

Pour les années bissextiles, le calcul de LG ajoute 1 pour toutes les années bissextiles avant a, **y compris a** (par le terme a / 4). Par conséquent, on obtient la lettre correspondant à la **deuxième partie** de l'année (après le 29 février). Pour janvier et février, il faut une autre lettre dominicale, donnée par LG - 1 et placée avant. Les lettres sont donc celles correspondant à LG - 1 et L. Attention, la lettre correspondant au début de l'année est valable jusqu'au 24 février inclus, car l'Eglise a gardé l'habitude, depuis César, de redoubler le 24 février et non le dernier jour du mois. La seconde lettre est donc valable dès le 25 février.

Pour 1984, $LG = \mathbf{[}\ 1984 + \mathbf{\{}1984 / 4\mathbf{\}} - \mathbf{\{}1984 / 100\mathbf{\}} + \mathbf{\{}1984 / 400\mathbf{\}}\ \mathbf{]}_7$

$LG = \mathbf{[}\ 1984 + 496 - 19 + 4\ \mathbf{]}_7 = \mathbf{[}\ 2465\ \mathbf{]}_7 = 1$

1984 n'est pas une année séculaire, et son millésime est divisible par 4, donc elle est bissextile. Ses lettres dominicales sont AG.

Le calcul précédent a été fait pour le calendrier grégorien. Pour le calendrier julien, il suffit dans l'expression de supprimer les deux termes correspondant aux années séculaires, et de retrancher 10 pour compenser les 10 jours supprimés à octobre 1582. La formule est donc (LJ est la Lettre dominicale *Julienne*) :

$$L\,J = \mathbf{[}\ a + \mathbf{\{}a / 4\mathbf{\}} - 10)\mathbf{]}$$

L'utilisation de la formule est identique.

Dans la suite, on utilisera simplement la lettre L pour désigner la lettre dominicale. Ceci se justifie car elle joue le même rôle dans les deux calendriers.

**Détermination du jour de la semaine**

Connaissant la lettre dominicale, qui correspond au premier dimanche de l'année, il est facile de déterminer le jour de la semaine correspondant à n'importe quelle date. Il suffit d'ajouter le nombre de jours écoulés depuis le premier janvier jusqu'à la date recherchée, et de lui retrancher toutes les semaines entières possibles (autrement dit, de prendre le reste de la division par 7 de ce nombre). Nous avons déjà vu pour le calcul du jour julien, l'expression du nombre de jours écoulés dans une années à une date donnée ; on l'ajoute donc à L :

$$S = L + VM[m] + biss(a,m) + j - 1$$

et on prend le reste :

$$s = \mathbf{[}\ L + VM[m] + biss(a, m) + j - 1\mathbf{]}_7$$

**Exemple** : recherchons quel jour était le 21 juillet 1969 :

$$L = \mathbf{[}\ 1969 + \mathbf{\{}1969 / 4\mathbf{\}} - \mathbf{\{}1969, 100\mathbf{\}} + \mathbf{\{}1969, 400\mathbf{\}}\ \mathbf{]}_7 = \mathbf{[}\ 1969 + 492 - 19 + 4\ \mathbf{]}_7 = \mathbf{[}\ 2446\ \mathbf{]}_7 = 0$$

$$s = \mathbf{[}\ 0 + 181 + 0 + 21 - 1\mathbf{]}_7 = \mathbf{[}\ 201\mathbf{]}_7 = 5$$ c'est donc un vendredi.

**Calendrier Lunaire**

Nous avons vu comment était définie la date de Pâques, qui constitue l'essentiel du calendrier lunaire grégorien. Il reste maintenant à établir les formules permettant de la calculer pour une année quelconque.

La lunaison moyenne est de 29,53059 jours. Dans une année, il y a 12 lunaisons moyennes pleines :

29,53059 ×12 = 354,36708 jours

365,2422 - 354,36708 =10,87512 ; il reste 11 jours. L'âge de la lune augmente donc grossièrement de 11 jours d'une année à l'autre.

On appelle *Epacte* l'âge de la lune au 1$^{e}$ janvier (*i.e.* le nombre de jours écoulés depuis la dernière Nouvelle lune).

L'épacte se calcule à l'aide de ce décalage de 11 jours d'une année à l'autre. Mais il faut aussi tenir compte du cycle de Méton. Au bout de 19 ans, les phases de la lune reviennent aux mêmes dates, donc l'épacte doit revenir aussi. Au lieu de relier l'épacte au millésime, on la relie au nombre d'or. Nous allons d'abord faire le calcul dans le calendrier julien.

Le nombre entier de jours le plus proche de la lunaison moyenne est de 30 jours, donc l'épacte prendra 30 valeurs, de 0 à 29. Le nombre d'or croît d'une unité chaque année, jusqu'à retomber à 1. L'épacte croît de 11 chaque année, elle est donc de la forme :

$$e = \mathbf{[}\ 11\ n + b\ \mathbf{]}_{30}$$

b est une constante d'ajustement à déterminer. On choisit pour cela une année dont on connaît l'épacte (prise dans un annuaire par exemple) :

pour 1924, e = 3 donc b = -3 $e = \mathbf{[}\ 11\ n - 3\ \mathbf{]}_{30}$ épacte julienne

Les valeurs obtenues en calculant cette formule sont :

| Nombre d'or | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Epacte | 8 | 19 | * | 11 | 22 | 3 | 14 | 25 | 6 | 17 | 28 | 9 | 20 | 1 | 12 | 23 | 4 | 15 | 26 |

L'épacte 0 est notée * par convention. Ce tableau, et la formule qui permet de l'établir, sont valables pour le calendrier julien, avant la réforme.

**Calcul de l'épacte grégorienne**

- à chaque année séculaire non bissextile, on retranche un jour à l'Epacte. Cette règle se nomme *Métemptose*.

- pour corriger l'erreur du cycle de Méton, on ajoute une unité à l'Epacte tous les 300 ans, quand une année séculaire arrive. Cette règle se nomme *Proemptose*. La première fut opérée en 1800.

- la Proemptose de l'an 4200 est retardée à l'an 4300 et il en est de même tous les 2500 ans.

L'épacte brute est de la forme : $e_1 = 11\ n$ n est le Nombre d'Or

La Proemptose se traduit par :

$e_2 = e_1 + \{a / 300\}$ ajoute 1 tous les 300 ans quand arrive une année séculaire.

La Métemptose se traduit par 2 termes:

$e_3 = e_2 - \{a / 100\} + \{a / 400\}$ retrancher un jour à chaque année séculaire non bissextile :

- retrancher 1 à chaque année séculaire.
- ajouter 1 à chaque année séculaire bissextile ;

Enfin, pour obtenir des valeurs de 0 à 29, il faut prendre le reste de la division par 30 de ce terme :

$$e = [\ 11\ n - \{a / 100\} + \{a / 400\} + \{a / 300\} + c\ ]_{30}$$

c constante pour ajuster la série

Si a = 1977, n = 22, e = 10 (valeur prise dans une table, ou sur le calendrier des postes) c = -3

$$e = [\ 11\ n - \{a / 100\} + \{a / 400\} + \{a / 300\} - 3]_{30}$$

Cette formule ne tient pas compte de la règle de retardement de la Proemptose, qui ne sera probablement jamais appliquée. Elle est valable à partir de 1583, et jusqu'en 4199 inclus. Il serait assez simple de modifier la formule pour en tenir compte, mais cette règle ne sera sans doute jamais appliquée, car une réforme du calendrier interviendra probablement avant. Aussi nous ne ferons pas ce travail.

| |
|---|
| L'épacte grégorienne ne tient compte du caractère bissextil de l'année que par l'intermédiaire du nombre d'or, dont les valeurs changent tous les 365,2425 jours. |

**Calcul de la pleine lune pascale**

Pâques est le dimanche qui suit le 14$^e$ jour de la lune qui atteint cet âge au 21 mars ou immédiatement après.

L'épacte e donnant l'âge de la lune au matin du premier janvier, son âge au matin du 21 mars est A = e + 80 (décalage dû à janvier, février et 21 jours de mars, sans tenir compte ici non plus des années bissextiles)

- Si e = 23, $[A]_{30} = 13$ (la lune a 14 jours, elle n'est pas encore pleine) le décalage d = 0.
- Si e = 24, $[A]_{30} = 14$ (la lune est alors pleine le matin du 21 mars), la pleine lune pascale est la suivante, donc retardée de d = 29 jours.
- Si e = 25, $[A]_{30} = 15$, elle est retardée de d = 28 jours…

On peut vérifier que e + d = 53, à 30 près (pour e ≤ 23, il faut ajouter 30). Puisqu'on prend le reste de la division par 30, les multiples de 30 seront éliminés. Donc d = 53 - e. La date de la pleine lune est :

$$PL = 21 + [53 - e]_{30}$$

Malgré la précision excellente sur le mouvement moyen de la Lune, l'épacte n'est pas suffisante pour suivre fidèlement le mouvement réel qui est très complexe. Une autre correction, de nature empirique, se fait lors de l'utilisation de l'épacte. Voici cette modification sur le calcul de PL :

- Pour les épactes de 0 à 23, et de 26 à 29, PL est donnée par la formule générale.
- Pour e = 24, la formule donne PL = 50, on la corrige en prenant PL = 49.
- Pour e = 25, la formule donne PL = 49.
  - On conserve cette valeur si le nombre d'or n ≤ 11.
  - Si n > 11, on prend PL = 48.

**Date de Pâques**

Maintenant qu'on connait la date de la pleine lune pascale, il faut calculer le jour de la semaine lui correspondant. PL étant une date en mars, on applique la formule vue plus haut. Le jour de la pleine lune $J_{PL}$ est :

$$J_{PL} = \mathbf{[}\ PL - 1 + 3 + L\ \mathbf{]}_7 = \mathbf{[}\ PL + L + 2\ \mathbf{]}_7$$

Pâques ne pouvant tomber le 21 mars, considérons le lendemain : $J_{PL} + 1$.

Si $J_{PL} + 1 = 0$ (dimanche) c'est Pâques ; si $J_{PL} + 1 = 1$, Pâques est 6 jours plus tard ; etc.

Donc le décalage de Pâques par rapport au lendemain de la pleine lune est :

$$\mathbf{[}\ - J_{PL} - 1\ \mathbf{]}_7 = \mathbf{[}\ - PL - L - 2 - 1\ \mathbf{]}_7 = \mathbf{[}\ 4 - PL - L\ \mathbf{]}_7$$

PL pouvant atteindre 49, et L 6, afin d'avoir toujours une valeur positive il faut ajouter un multiple de 7 plus grand : 56 est le plus petit qui convient. La date de Pâques est donc :

Si Pâques ≤ 31, c'est la date de Pâques en mars. Sinon, il faut retrancher 31 pour obtenir la date en avril.

**Construction d'un almanach**

Les formules précédentes se prêtent très bien à la l'écriture d'un programme permettant d'éditer le calendrier pour une année quelconque. Mais si on ne dispose pas d'un ordinateur, ou si on ne se sent pas très à l'aise dans ce genre de sport, on peut faire les calculs à la main, ils ne sont pas trop longs ni compliqués. Voici comment procéder :

On détermine d'abord si l'année est bissextile ou non (formule). Puis on calcule les indications du comput : cycle solaire, indiction romaine, nombre d'or et lettre dominicale (ou les 2 lettres si l'année est bissextile). On passe alors au calendrier lunaire, avec pour but le calcul de la date de Pâques. Nous avons obtenu le nombre d'or, on en déduit l'épacte, puis la pleine lune pascale et enfin la date de Pâques en incluant les petites corrections qui s'imposent si l'épacte est 24 ou 25 (voir les explications détaillées plus haut).

Il ne reste plus qu'a construire le calendrier lui-même. Nous utiliserons pour cela un modèle très simple et très compact. Le résultat pourra tenir sur le format d'une carte de crédit. Nous écrirons les noms des mois en abrégé : Jv, Fv, Ms, Av, Mi, Jn, Jl, At, Sp, Oc, Nv, Db. Nous allons commencer par ordonner les mois : on écrit sur une ligne à gauche Jv (pour janvier) ; février commence 31 jours plus tard, 31 = 4 × 7 + 3. Donc février commence 4 semaines et trois jours plus tard, par conséquent on décale février de trois cases vers la droite :

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Jv | | | Fv | | | |

Février comptant 28 jours (on suppose l'année commune), mars arrive exactement 4 semaines plus tard ; il sera dans la même colonne que février :

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Jv | | | Fv<br>Ms | | | |

Ensuite, mars comptant 31 jours, avril sera 3 cases plus loin vers la droite :

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Jv | | | Fv<br>Ms | | | Av |

En continuant ainsi, on obtient facilement le tableau pour tous les mois d'une année commune (lorsque le décalage nous amène à sortir du tableau vers la droite, on continue de compter à partir du début) :

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Jv<br>Oc | Mi | At | Fv<br>Ms<br>Nv | Jn | Sp<br>Db | Av<br>Jl |

Pour une année bissextile, il faut refaire la même chose, mais en comptant 29 jours pour février. On obtient donc :

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Jv<br>Av<br>Jl | Oc | Mi | Fv<br>At | Ms<br>Nv | Jn | Sp<br>Db |

Maintenant, nous pouvons mettre les noms des jours en face des noms des mois. Mais ceci dépend de l'année. Prenons l'exemple de 1999 ; le premier janvier était un vendredi ; nous mettrons donc vendredi (Ve) en face de janvier. Dans la case suivante, samedi (Sa), etc.

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Jv<br>Oc | Mi | At | Fv<br>Ms<br>Nv | Jn | Sp<br>Db | Av<br>Jl |
| Ve | Sa | Di | Lu | Ma | Me | Je |

On constate alors que le premier mai est un samedi, le premier septembre un mercredi… Les 8, 15, 22 et 29 sont le même jour que le premier ; donc :

| 1999 | | | | | | Jv Oc | Mi | At | Fv Ms Nv | Jn | Sp Db | Av Jl |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 8 | 15 | 22 | 29 | | Ve | Sa | Di | Lu | Ma | Me | Je |

Complétons le tableau avec les autres jours, en décalant vers le bas pour les quantièmes 2, 3… et en décalant les noms des jours dans la partie droite :

| 1999 | | | | | | Jv Oc | Mi | At | Fv Ms Nv | Jn | Sp Db | Av Jl |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 8 | 15 | 22 | 29 | | Ve | Sa | Di | Lu | Ma | Me | Je |
| 2 | 9 | 16 | 23 | 30 | | Sa | Di | Lu | Ma | Me | Je | Ve |
| 3 | 10 | 17 | 24 | 31 | | Di | Lu | Ma | Me | Je | Ve | Sa |
| 4 | 11 | 18 | 25 | | | Lu | Ma | Me | Je | Ve | Sa | Di |
| 5 | 12 | 19 | 26 | | | Ma | Me | Je | Ve | Sa | Di | Lu |
| 6 | 13 | 20 | 27 | | | Me | Je | Ve | Sa | Di | Lu | Ma |
| 7 | 14 | 21 | 28 | | | Je | Ve | Sa | Di | Lu | Ma | Me |

Cet exemple concerne l'année 1999 ; pour une année commençant par un autre jour, il suffit de mettre l'abréviation du jour dans la première case, et de compléter vers la droite et vers le bas en décalant d'un jour à chaque fois. Bien sûr, le tableau pour une année bissextile se construit exactement de la même manière.

Nous avons établi plus haut la correspondance entre la valeur de L et le jour de la semaine (reproduit ici avec les abréviations) :

| Di | Lu | Ma | Me | Je | Ve | Sa |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |

Pour commencer le remplissage, nous mettrons dans la première case l'abréviation indiquée par la valeur trouvée de L (si l'année est bissextile, on considérera seulement la première des deux lettres). Il ne reste plus qu'à reporter les indications du comput. Voici à titre d'exemple les almanachs obtenus pour les années 2000 et 2001 (une bissextile et l'autre commune) :

| 2000 bissextile | | | | | Ja Av Jl | Oc | Mi | Fv At | Ms Nv | Jn | Sp Db |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | **8** | **15** | **22** | **29** | Sa | Di | Lu | Ma | Me | Je | Ve |
| **2** | **9** | **16** | **23** | **30** | Di | Lu | Ma | Me | Je | Ve | Sa |
| **3** | **10** | **17** | **24** | **31** | Lu | Ma | Me | Je | Ve | Sa | Di |
| **4** | **11** | **18** | **25** | | Ma | Me | Je | Ve | Sa | Di | Lu |
| **5** | **12** | **19** | **26** | | Me | Je | Ve | Sa | Di | Lu | Ma |
| **6** | **13** | **20** | **27** | | Je | Ve | Sa | Di | Lu | Ma | Me |
| **7** | **14** | **21** | **28** | | Ve | Sa | Di | Lu | Ma | Me | Je |
| **LD** : BA **NO** : 6 **CS** : 21 **IR** : 8<br>**Epacte** : 24 **Pâques** le 23 avril | | | | | | | | | | | |

| 2001 | | | | | Ja Oc | Mi | At | Fv Ms Nv | Jn | Sp Db | Av Jl |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | **8** | **15** | **22** | **29** | Lu | Ma | Me | Je | Ve | Sa | Di |
| **2** | **9** | **16** | **23** | **30** | Ma | Me | Je | Ve | Sa | Di | Lu |
| **3** | **10** | **17** | **24** | **31** | Me | Je | Ve | Sa | Di | Lu | Ma |
| **4** | **11** | **18** | **25** | | Je | Ve | Sa | Di | Lu | Ma | Me |
| **5** | **12** | **19** | **26** | | Ve | Sa | Di | Lu | Ma | Me | Je |
| **6** | **13** | **20** | **27** | | Sa | Di | Lu | Ma | Me | Je | Ve |
| **7** | **14** | **21** | **28** | | Di | Lu | Ma | Me | Je | Ve | Sa |
| **LD** : G **NO** : 7 **CS** : 22 **IR** : 9<br>**Epacte** : 5 **Pâques** le 15 avril | | | | | | | | | | | |

Les opérations décrites ci-dessus se prêtent bien à la programmation, dans tout langage informatique. On peut par exemple les appliquer dans un tableur, en définissant quelques cellules auxilières cachées. Voici une version en php, qui permet le calcul en direct.

**Conclusion**

Pratiquement tous les calendriers anciens sont exclusivement lunaires, parce que les phénomènes lunaires sont plus faciles à observer. Pour ajuster le retour des saisons (nécessaire pour les fêtes du solstice, l'agriculture …), on remarque qu'un groupe de 12 lunaisons les ramène grossièrement. Mais la dérive est trop importante pour être tolérée. Alors on ajoute un $13^{e}$ mois lorsque c'est nécessaire.

Cette première correction introduit dans la représentation du phénomène continu de la révolution des astres, une discontinuité qui sera le principe de tous les calendriers plus évolués. La question sera seulement de savoir quand l'introduire, et de quelle durée. Cette première approche peut être rapide, les erreurs qu'elle corrige étant très importantes (11 jours par an). Ensuite, les modalités d'ajout d'un mois supplémentaire sont

difficiles, à cause de la grande variabilité de la Lune.

On constate donc une longue période de tâtonnements, qui dans les bons cas (si la civilisation qui a créé le calendrier n'est pas éteinte, ou si les principes religieux ou les habitudes prises ne l'empêchent pas) aboutit à la connaissance de cycles, ou groupes d'années qui ramènent à peu près les mêmes conditions. Dès lors, le tableau des phénomènes observés pendant l'un des cycles permet de prévoir les suivants. Mais bien sûr, cette répétition n'est qu'approchée, et elle marque à peu près le terme de l'évolution des calendriers luni-solaires. La connaissance de ces cycles qui s'étalent sur de longues périodes (quelques dizaines d'années) permet d'obtenir de très bonnes valeurs pour les durées de l'année et de la lunaison.

A partir de là, il devient possible d'établir un calendrier purement solaire, débarrassé des difficultés inhérentes à l'accord avec la Lune, et dont la précision peut être très grande. Les exceptions à ce schéma sont :

- le calendrier vague, qui est exclusivement solaire dès le début, mais s'appuie sur l'année sidérale et non sur l'année tropique ;
- le calendrier musulman qui reste exclusivement lunaire.

**Synthèse**

| **calendrier** | **origine** | **type** | **année[1] moy.** | **ajout[4]** | **subdiv.** |
|---|---|---|---|---|---|
| Babylonien | 4 000 av. J.C. | lunaire | | 1 m / ¼ 3 a | semaine |
| Egyptien | 10 000 av. J.C | solaire | 360 j | aucun | décade |
| Vague | 4 236 av. J.C. | solaire | 365 j | aucun | décade |
| Hébreu | 1 645 av. J.C. | lunaire | | 1 m / ¼ 3 a | semaine |
| Israélite | | lunaire | | 1 m / ¼ 3 a | semaine |
| Musulman | 16 / 7 / 622 jul. | lunaire | 354,366 | 11 j / 30 a | semaine |
| Chinois | 4 000 av. J.C. | lunaire | 365,05 | 7 m / 19 a | cycle 60 j |
| Maya | | aucun[3] | 360 | aucun | 260 j |
| Maya rituel | | vigésimal | 260 j | aucun | |
| Persan | | solaire | **365,2424 j** | 8 j / 33 a | |
| Grec | | lunaire puis mixte | 365,25 | 3 m /8 a | décade |
| Romain | 753 av. J.C. | lunaire | 304 puis 355 | 1 m / ? | décade |
| Julien | 46 av. J.C. | mixte[2] | 365,25 | 1 j / 4 a | semaine |
| Grégorien | 1 582 | mixte[2] | 365,2425 | 97 j / 400 a | semaine |
| Républicain | 22 / 9 / 1792 | solaire | 365,25 | 1 j /4 a | décade |

1. Pour les calendriers empiriques, il n'est pas possible de définir une durée moyenne de l'année.
2. Les calendriers julien et grégorien sont solaires, avec des fêtes lunaires.
3. Le calendrier Maya comporte 18 mois de 20 jours ; il est basé sur la numération vigésimale, et non sur l'astronomie.
4. Ajout de rattrapage, en nombre de jours par an : m pour mois, j pour jour. Le symbole ¼ signifie que le calendrier est empirique, et que le nombre d'années qui suit est approximatif. Pour le calendrier romain, les ajouts ont été trop variables pour donner une période.

Les chinois ont découvert de leur côté le cycle de Méton.

Ce texte n'est pas exhaustif, et laisse de côté quelques calendriers intéressants. Le but était de faire une étude assez représentative de la diversité dans ce domaine. Pour quelques compléments, voir le site de l'IMCCE.

**Exercices**

Les formules données plus haut décrivent les liens qui existent entre les différents éléments du calendrier grégorien. Grâce à elles on peut maintenant résoudre tous les problèmes concernant le calendrier :

- trouver quel jour de la semaine vous êtes né ;
- déterminer quel jour tombe Noël en l'an 2 000 ;
- trouver quels sont les vendredi 13 de 1999 ;
- trouver la date de Pâques pour une année quelconque ;
- déterminer les années de naissance de l'arrière grand-père, du grand-père, du père et du fils (qui est un de mes amis…) sachant qu'ils sont nés tous les 4 un dimanche 29 février ;
- Shakespeare et Cervantes sont tous deux morts le 23 avril 1616. Lequel est mort avant l'autre ?
- un dicton nous dit que les jours s'allongent : "pour S$^{te}$ Luce, du saut d'une puce ; pour S$^{t}$ Antoine du repas d'un moine" ; l'ennui, c'est que S$^{te}$ Luce est le 13 décembre, avant le solstice d'hiver qui tombe vers le 23 (donc quand les jours diminuent encore)… où est l'erreur ?
- construire le calendrier de l'année 2000 en utilisant la méthode donnée plus haut, et comparer le résultat avec celui proposé ;
- etc.

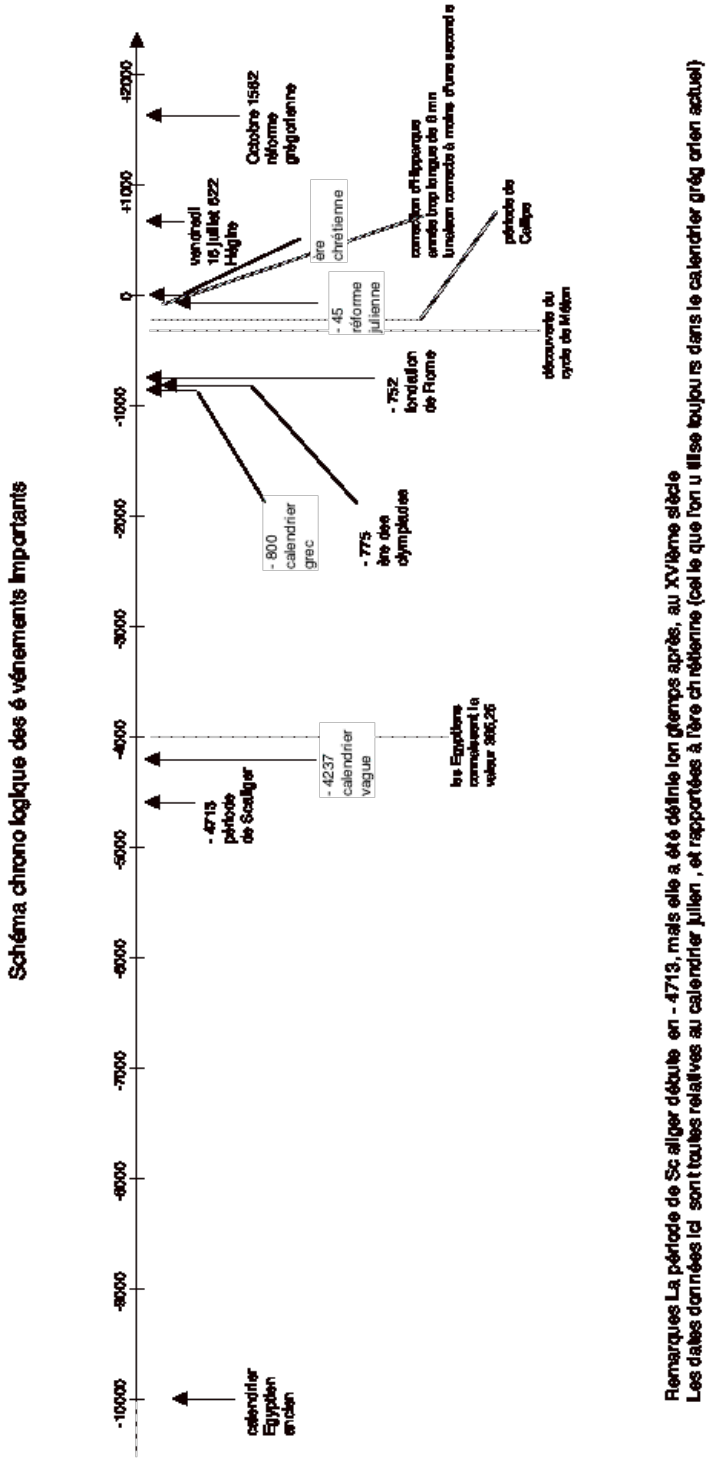
**Quelques réponses**

Shakespeare est mort le 23 avril 1616 en Angleterre, où la réforme grégorienne n'a été appliquée qu'à partir de 1752. Il s'agit donc du 23 avril Julien.

Cervantes est mort le 23 avril 1616 en Espagne, où la réforme a été appliquée dès 1582. Donc il s'agit ici du 23 avril grégorien.

Et puisqu'on a supprimé 10 jours au calendrier julien pour obtenir le grégorien, le 15 octobre 1582 grégorien avance de 10 jours sur le même 15 octobre julien. Il en sera de même jusqu'à ce qu'une année séculaire non bissextile dans le calendrier grégorien accroisse l'écart. Mais l'année 1600 est bissextile dans les deux calendriers ; l'écart en 1616 est resté de 10 jours. Donc, Cervantès est mort 10 jours avant Shakespeare !

Le dicton relatif à S$^{te}$ Luce est ancien, il date d'avant la réforme grégorienne. A ce moment-là, le solstice d'hiver tombait 13 jours plus tôt, le 12 décembre. Pour S$^{te}$ Luce, les jours rallongeaient donc de quelques secondes…




**Bibliographie**

| | | | |
|---|---|---|---|
| Chauve-Bertrand | *La question du Calendrier* | La renaissance du livre | Paris 1920 |
| Paul Couderc | *Le Calendrier* | Que Sais-je ? | 1946 |
| Lucien Tartois | article *Le Calendrier* | Encyclopédie la Pléïade | Paris 1962 |
| | article *Le Calendrier* | Encyclopedia Universalis | |
| | article *Connaissances scientifiques* | Quid ? | |
| Caratini Roger | *L'astronomie* | Bordas | |
| | article *Le Calendrier* | Encyclopédie atlas du ciel | édition Atlas |
| André Danjon | *Astronomie Générale*, p127 et 128 | Albert Blanchard | 1980 |
| Oudin J.M. | *Les secrets des calendriers à la portée de tous* | imp. St Luc | Tournai 1939 |
| Lévy J. | *La date de Pâques* | annuaire du bureau des longitudes | 1975 |
| | *Données sur les calendriers* | annuaire du Bureau des Longitudes | année en cours |
| Bigourdan G. | | annuaire du Bureau des Longitudes | 1917 |
| Jean Lefort | *La saga des calendriers* | bibliothèque Pour la Science | 1998 |
| Jean-Pierre Verdet | *Une histoire de l'astronomie* | collection Point, ed. Seuil | |
| Agnès Acker | *Astronomie, introduction* | Masson | 1992 |
| | *La semaine a-t-elle une origine astronomique ?* | Ciel et Espace | janv-fév 1987 |
| Emile Biémont | *Rythmes du temps* | De Boeck | |


**Index**


A

almanach

année :

- abondante (hébreu ancien)
- commune
- babylonienne
- hébreu ancienne
- musulmane
- persanne
- romaine
- embolismique (hébreu ancien)
- sidérale
- tropique

B

baktun

bissextil

C

calendrier

- aztèque
- des postes
- égyptien
- grégorien
- hébreu ancien
- julien
- persan
- romain
- universel

cycle

- dominical
- de Méton
- solaire

D

décans

E

Epacte

Equinoxe

ère

H

Hégire

I

indiction romaine

J

jour de la Révolution

K

katun

kin

L

Lever héliaque

lunaison

lunaison moyenne

luni-solaires

M

Mayas

mixtes

O

octaétéride

P

parapegmes

période

- julienne
- de Callipe
- de Scaliger
- sothiaque

planètes

précession des équinoxes

R

révolution synodique

S

Sans-culottides

semaine

solstice

Sothys

T

tonalamatl

tun

tzolkin

U

uinal

V

Vénus

vieux style

| | | |
|---|---|---|
| chaldéen ou babylonien | mois | Z |
| chinois | N | zodiaque |
| grec | nemontemi | |
| israélite moderne | Noël | |
| maya | Nombre d'or | |
| musulman | nouveau style | |
| républicain | | |
| vague | | |




Planche représentant les constellations australes, extraite de l'édition de 1554 de l'Almageste de Claude Ptolémée.
Cet ouvrage a été imprimé pour la première fois en 1538.

Ce texte a fait l'objet d'une publication dans la revue de l'Association Marseillaise d'Astronomie (AMAs), sous l'ISSN 1287 - 8278

---=OO=---




La mesure des distances est un problème impossible à traiter avec de faibles moyens, et qui reste difficile aujourd'hui, malgré l'arsenal d'intruments dont on dispose. Il se pose pour tous les objets célestes, et il n'existe pas de solution unique.

La première des remarques est qu'on ne peut pas utiliser les méthodes de la vie courante, qui consistent à placer un étalon de longueur en face de l'objet à mesurer : impossible d'aller jusqu'à l'objet dont on mesure la distance, et si même on pouvait y aller il ne serait pas possible de dérouler un mètre en ruban...

Toutes (presque) les méthodes astronomiques de mesure des distances sont donc indirectes.

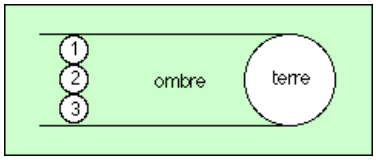
On distingue des **méthodes géométriques**, applicables pour les objets proches, puis des **méthodes physiques** pour les objets plus lointains, et enfin des **méthodes cosmologiques** pour les plus distants. La première catégorie était accessible aux observateurs de l'Antiquité, et leur a permis d'obtenir des résultats parfois forts corrects. Les secondes n'avaient pas de sens avant le XX$^{e}$ siècle, par manque de connaissances physiques. Nous allons voir dans ce chapitre la progression des idées dans ce domaine.

# Méthodes géométriques

## *Méthodes antiques*

### Diamètre et distance de la Lune

Aristarque de Samos a imaginé une méthode pour mesurer le diamètre et la distance de la Lune ; Avec une assez bonne approximation, on peut considérer que les premier et dernier quartiers sont alignés. Il s'ensuit que le Soleil est beaucoup plus éloigné que la Lune. On peut donc supposer que l'ombre de la Terre est un cylindre (en réalité c'est un cône, mais son angle au sommet est très faible, et cette approximation est acceptable). En observant la Lune au cours d'une éclipse totale, Aristarque vit qu'elle restait dans l'ombre du Soleil pendant presque deux heures. Or en une heure, elle se déplace sur le ciel de son propre diamètre.

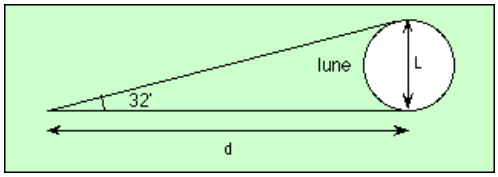



En position 1, la Lune est juste totalement éclipsée. Au bout d'une heure, elle se trouve en 2, ayant avancé de son propre diamètre. Au bout de 2 heures, elle se trouve en 3, toujours totalement dans l'ombre. Elle en sort alors. Ainsi : **la Lune est trois fois plus petite que la terre**.

Si L est le diamètre de la Lune, et T celui de la terre : L = 0,3 T.

On voit la Lune sous un angle de 32' à peu près ; on a donc : tg 32' = L / d = 0,3 T / d = 0,0093

d'où d = 0,3 T / 0,0093 = 32 T = 64 R




La valeur correcte est de 60 R. Aristarque avait donc trouvé une excellente approximation. Remarquons que cette mesure est **relative** ! Elle exprime la distance de la Lune par rapport au rayon de la Terre. C'est très souvent, en Astronomie, qu'on rencontrera ce genre de problème. Il est plus facile d'obtenir des rapports que des valeurs absolues.

Le diamètre de la Terre ayant été mesuré, la Lune et son orbite sont maintenant connues.

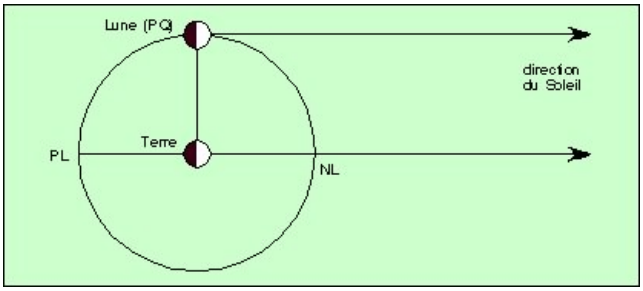
### Distance Terre-Soleil

La distance du Soleil a été mesurée par Aristarque de Samos, qui a défini une méthode dérivée de l'observation de la Lune.

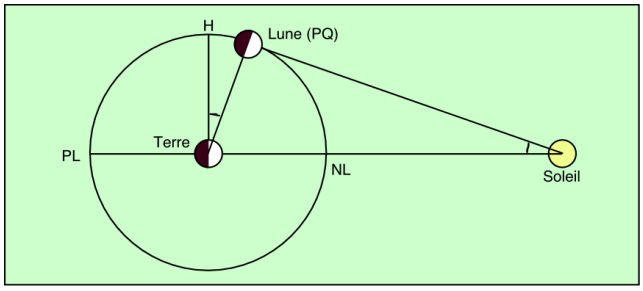
Le *Premier Quartier PQ* se produit lorsqu'on voit exactement la moitié de la Lune éclairée. Ce qui prouve que l'angle Terre-Lune-Soleil est

droit, et ceci ne dépend pas de la distance du Soleil (c'est vrai sur les deux dessins ci-dessous).

Si le Soleil était à l'infini, le Premier Quartier serait exactement à mi-chemin entre la Nouvelle Lune et la Pleine Lune :




Ce n'est pas le cas, le Soleil est à distance finie. Par conséquent, le Premier Quartier est plus proche de la Nouvelle Lune que de la Pleine Lune (l'arc d'orbite à parcourir est plus court). Si on suppose que l'orbite de la Lune est un cercle, parcouru à vitesse constante, l'intervalle de temps entre la Nouvelle Lune et le Premier Quartier est plus court que l'intervalle entre le Premier Quartier et la Pleine Lune. Aristarque a mesuré le temps écoulé entre la Nouvelle Lune et le Premier Quartier, puis entre le Premier Quartier et la Pleine Lune. Il a trouvé une différence de 6 heures ; il en a déduit un angle de 3°.




En résolvant le triangle, il trouve que le Soleil est 20 fois plus loin que la Lune.

| |
|---|
| Les angles LTH et LST sont égaux (leurs côtés sont respectivement perpendiculaires : LT  LS ; HT  ST) |
| L'angle LTH étant mesuré, LST lui est donc égal. Son sinus donne : |
| sin LST = LT / ST  ST = LT / sin LST. |
| Calculant sinus LST, la distance Terre-Soleil ST est obtenue en fonction de la distance LT. |

La difficulté de cette méthode tient dans l'observation de l'instant précis du Premier Quartier. Observant évidemment à l'œil nu, Aristarque s'est trompé assez largement sur le décalage ; la vraie valeur est de seulement 35 minutes. Il s'ensuit que le Soleil est, non pas 20 fois, mais 387 fois plus éloigné que la Lune.

Nous retiendrons l'astuce de ces premiers astronomes qui ont su trouver des résultats pertinents sans l'appareillage complexe dont nous disposons maintenant. L'important était surtout que le Soleil se trouve beaucoup plus loin de nous que la Lune. Et comme il a le même diamètre apparent, c'est qu'il est aussi beaucoup plus gros.

D'autre part, on savait déjà, par des méthodes géométriques simples, que la Lune est à 60 rayons terrestres de nous (60 × 6.379 = 382.740 km au lieu de 384.000 km de valeur moyenne, ce qui est une excellente précision). Donc le Soleil se trouvait à des millions de km de la Terre, ce qui est déjà assez loin pour permettre certaines approximations.

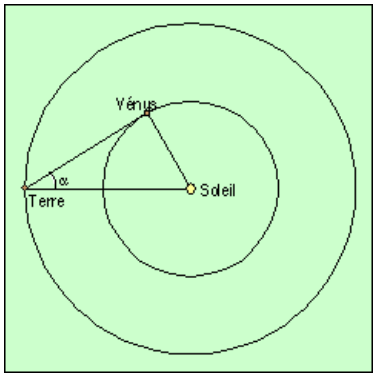
**Distance Vénus-Soleil**

Si on considère que la Terre tourne autour du Soleil, ce qu'avait envisagé Aristarque de Samos au III$^{e}$ siècle avant JC, on peut définir simplement les distances **relatives** des planètes au Soleil. Prenons le cas de Vénus.

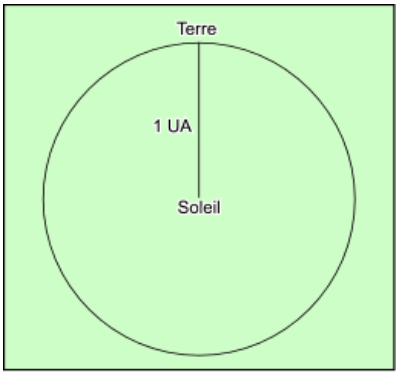
En tournant autour du Soleil, elle se voit parfois le matin, parfois le soir. Entre les deux, elle se rapproche du Soleil, passe devant ou derrière, puis s'en éloigne à nouveau. Au moment où elle occupe une position extrême (**plus grande élongation**, son plus grand éloignement angulaire au Soleil), on peut mesurer l'angle qui la sépare du Soleil. A partir de cet angle, il est très facile de calculer la distance de Vénus au Soleil, en prenant celle de la Terre pour unité :

Il est facile de mesurer l'angle α. On remarque qu'au moment de la plus grande élongation (α maximum), la droite joignant la Terre à Vénus est tangente à l'orbite de Vénus.

Par conséquent, elle est perpendiculaire au rayon joignant Vénus au Soleil. Le triangle TVS étant donc rectangle en V, le sinus de l'angle α est : sin α = SV / ST.




Copernic remarqua que cet angle maximum était de 46°.
Par suite : SV = sin α ST = sin 46° ST = 0,7 ST.



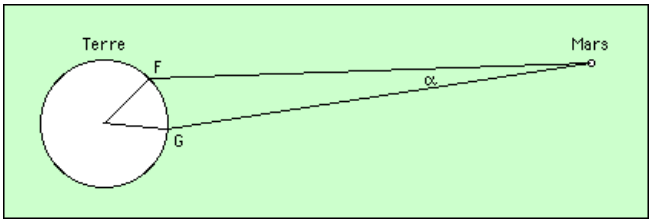

SV = 0,7 ST. En choisissant ST, la distance de la Terre au Soleil, comme unité (appelée *Unité Astronomique* et notée UA), on obtient la distance de Vénus au Soleil dans cette nouvelle unité : **Vénus est à 0,7 UA du Soleil**. C'est cette méthode relative qui a déterminé le choix de la distance Terre-Soleil pour unité astronomique.

On peut vérifier avec les données modernes que 150 × 0,7 = 105 millions de km, ce qui est un excellent ordre de grandeur pour la distance de Vénus au Soleil.

L'unité astronomique vaut 149.597.870 km.

> **Exercice** : trouver une méthode **très** simple, ne nécessitant aucun instrument particulier, pour mesurer l'angle entre le Soleil et Vénus (en effectuant cette mesure plusieurs fois, de jour en jour, on obtiendra le maximum nécessaire pour la méthode citée plus haut).
> (vous ne devez *pas* cliquer sur ce lien !)

Il est beaucoup plus difficile de mesurer une distance en kilomètres. La première évaluation de ce genre a été faite par Giovanni Domenico Cassini (dit Jean-Dominque Cassini), en mesurant la parallaxe de Mars entre la France et la Guyane. Cette parallaxe est l'angle α ci-dessous. Connaissant la distance entre ces deux points F et G sur Terre, il en déduisit la distance dans la même unité entre les deux planètes.

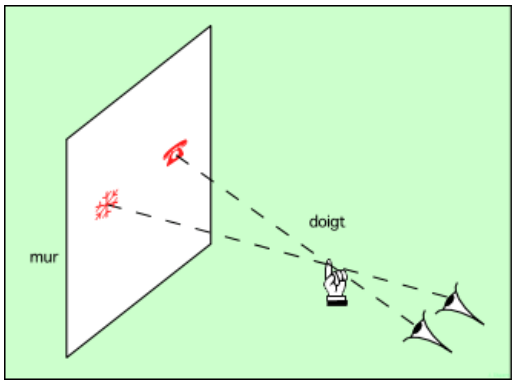



Une méthode semblable, mais bien plus précise (méthode des passages), est décrite dans le chapitre consacré à Vénus.

## *Parallaxe*

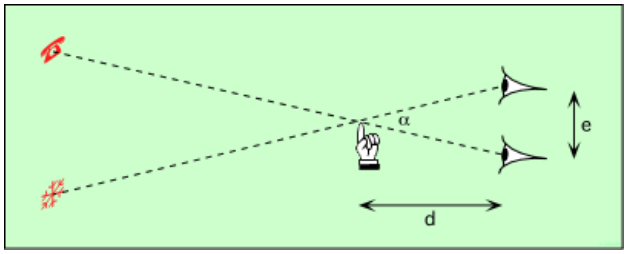
La méthode des parallaxes est excellente, mais elle est très délicate à mettre en œuvre. Il a fallu attendre des moyens d'observation évolués pour pouvoir l'utiliser, mais alors elle a révolutionné notre connaissance de notre entourage stellaire.

Pour comprendre son principe, faisons une petite expérience. Tendons le bras en avant, index levé. On voit le doigt se profiler devant le mur d'en face. Si on ferme l'œil droit, on va voir le doigt devant l'image du téléphone. Sans bouger, fermons maintenant l'œil gauche. Le doigt ne se projette plus devant le téléphone, mais devant le flocon de neige. On va profiter de cela pour mesurer la distance du doigt :



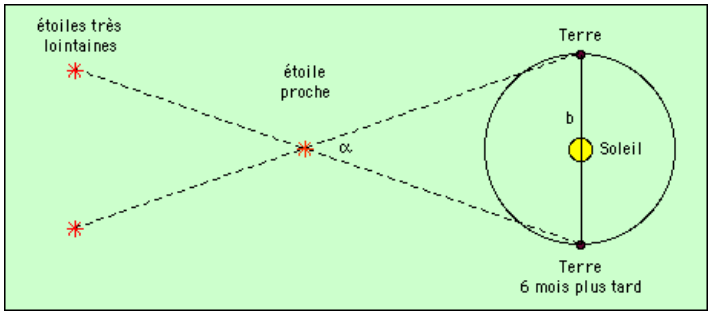

La distance entre les deux yeux produit un effet de perspective, que l'on nomme *parallaxe*. Cet effet est d'autant plus marqué que l'objet observé est plus proche, c'est-à-dire que sa distance est plus petite devant l'écart entre les yeux. On peut le mesurer par l'angle que font les rayons lumineux sur le dessin.

Historiquement, c'est Thalès qui a le premier décrit la méthode ; il l'a utilisée pour mesurer de loin la hauteur d'une pyramide.




Dans le triangle formé par les yeux et le doigt, on connait la distance e entre les yeux, et on mesure l'angle α. On en déduit la distance d. C'est ce que notre cerveau fait en permanence (vous voyez bien que vous savez calculer un *sinus* !). Si on ferme un œil, on perd la notion de profondeur.

L'idée des astronomes a été d'augmenter l'écart entre les yeux ! Pour simuler cela, ils ont pris deux photos du ciel à 6 mois d'intervalle. Sur ces photos, il y a des étoiles très lointaines, qui jouent le rôle du mur, et des étoiles proches qui jouent le rôle du doigt. La distance entre les deux yeux (les deux photos) est la dimension de l'orbite de la Terre ! 300 millions de kilomètres. Avec cela, on peut espérer mesurer la distance des étoiles les plus proches.



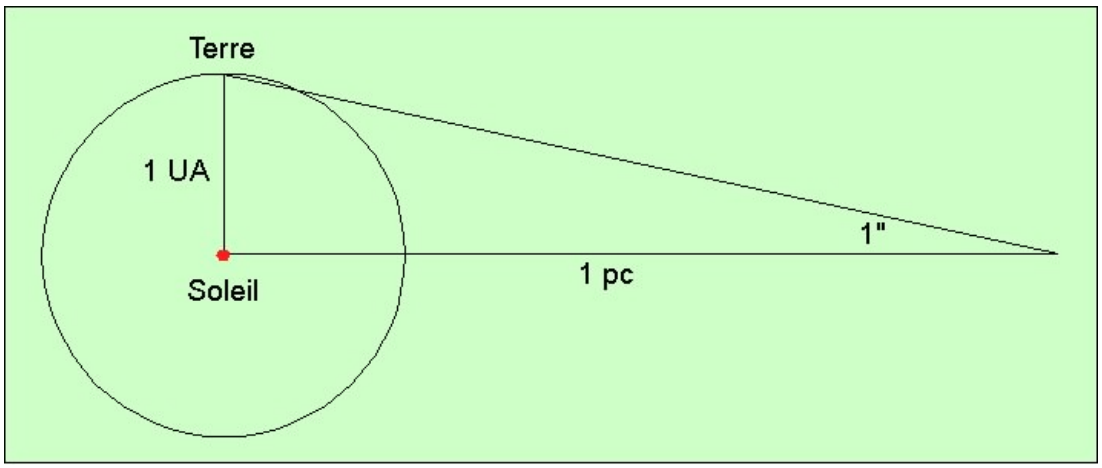

On connait la base du triangle ; c'est le diamètre de l'orbite terrestre. On mesure l'angle α ; il ne reste plus qu'à résoudre le triangle, pour calculer l'un des côtés. **La connaissance de l'angle α est donc équivalente à celle de la distance**.

| La relation utilisée est : A / sin a = B / sin B = C / sin C<br>où A, B et C sont les côtés<br>a, b, c les angles respectivement opposés aux côtés |
|---|

On nomme **parallaxe** l'angle sous lequel on voit le **rayon** de l'orbite terrestre (et non pas son diamètre comme sur le schéma ci-dessus ; par l'observation, on mesure l'angle α, et on le divise par deux pour obtenir la parallaxe de l'étoile). On utilise le rayon de l'orbite terrestre, **parce que c'est l'unité astronomique**.

**Parsec**

Cette méthode a donné une nouvelle unité de distance : le **parsec** est la distance correspondant à une **par**allaxe d'une **sec**onde.




C'est donc :

| **1 parsec = distance à laquelle on voit l'Unité Astronomique sous un angle d'une seconde** |
|---|

Abbréviation : **pc**

**Remarque 1** : le parsec est défini à partir de l'unité astronomique, donc les distances entre les étoiles peuvent être mesurées dans la même unité que les distances dans le système solaire (homogénéité du système d'unités astronomiques). Ce n'est pas le cas avec l'année-lumière, dont la définition ne fait intervenir que les propriétés de la lumière. On peut toutefois établir des formules de transformation des unités, qui permettront

de passer de l'une à l'autre :

1 pc = 3,26 années-lumière = à peu près 3 $10^{13}$ km

Cette méthode des parallaxes a permi de mesurer depuis le sol les distances stellaires avec une précision de 10 à 20 % jusqu'à une distance de 30 pc.

Pour sa cohérence avec l'unité astronomique, le parsec présente un grand intérêt, et les astronomes ont tendance à l'utiliser à la place de l'année-lumière.

**Remarque 2** : l'année-lumière a un grand intérêt pédagogique. Si on veut avoir une idée des distances dans l'Univers, il suffit de dire que la Terre est à 8 minutes-lumière du Soleil, alors que l'étoile la plus proche est à 4,2 années-lumière. On peut dire que l'écart entre 8 minutes et 4,2 années saute aux yeux ! C'est beaucoup plus parlant que de comparer en km (que signifient 150.000.000 et 40.000 milliards de kilomètres ?).

**Mesures des parallaxes depuis le sol**

Les étoiles sont si loin, que leurs parallaxes sont très faibles, et bien difficiles à mesurer. Impossible à l'œil nu en tous cas, et cette impossibilité à suscité des oppositions au système héliocentrique de Copernic : puisqu'on ne voit pas de déplacement annuel des étoiles, c'est que la Terre est fixe !

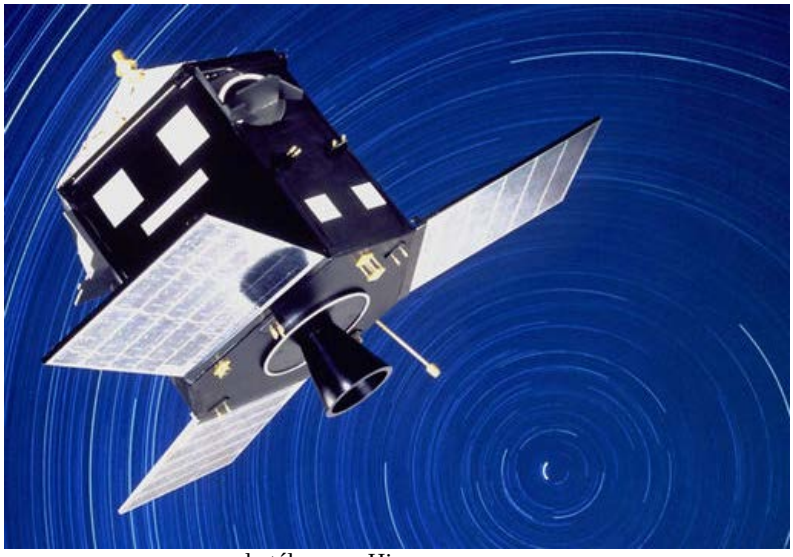
Il a fallu attendre donc d'avoir de bons instruments pour mettre la parallaxe des étoiles les plus proches en évidence. C'est Bessel qui a publié la première mesure en 1838, de la parallaxe de l'étoile 61 Cygni (0,29", 11,36 AL, soit 3,48 pc ; 61 Cyg est aussi la première étoile dont on ait mesuré le mouvement propre). Cette mesure fut une justification supplémentaire de l'héliocentrisme.

La petitesse de la parallaxe de toutes les étoiles (sauf les toutes proches), rend très difficile sa mesure, et les instruments au sol, avec la turbulence atmosphérique, sont bien limités. Pour progresser, il faut se débarrasser de l'atmosphère, donc observer depuis l'espace. Avant cela, on disposait seulement des positions de 300 étoiles avec une précision de 10 %.

Même depuis l'espace, seules les étoiles les plus proches seront mesurables. On imagine déjà que pour les plus lointaines, il faudra trouver des méthodes indirectes. La parallaxe est une mesure **équivalente** aux mesures que l'on fait sur Terre, par comparaison avec un étalon. De ce fait, elle sera la base de toute détermination de distance dans l'Univers, d'où son importance.

**Hipparcos**

Le satellite Hipparcos (**Hi**gh **P**recision **PAR**allax **CO**llecting **S**atellite) de l'Agence Spatiale Européenne (**ESA**), lancé par Ariane IV le 8 août 1989 depuis la base de Kourou, observant hors de l'atmosphère, a augmenté 50 fois la précision des mesures, sur un nombre d'étoiles multiplié par 80 ! Ses résultats ont amené les astronomes à revoir tout le système de mesures de l'Univers.



le télescope Hipparcos image ESA

Il était équipé d'un petit télescope de Schmidt de 29 cm de diamètre, lui permettant d'atteindre la magnitude 12,4. Il observait simultanément deux régions écartées de 58° l'une de l'autre. Il était en rotation lente (un tour en 2 h 8 minutes), provoquant un balayage systématique du ciel. C'est ce balayage qui permettait de mesurer les positions.

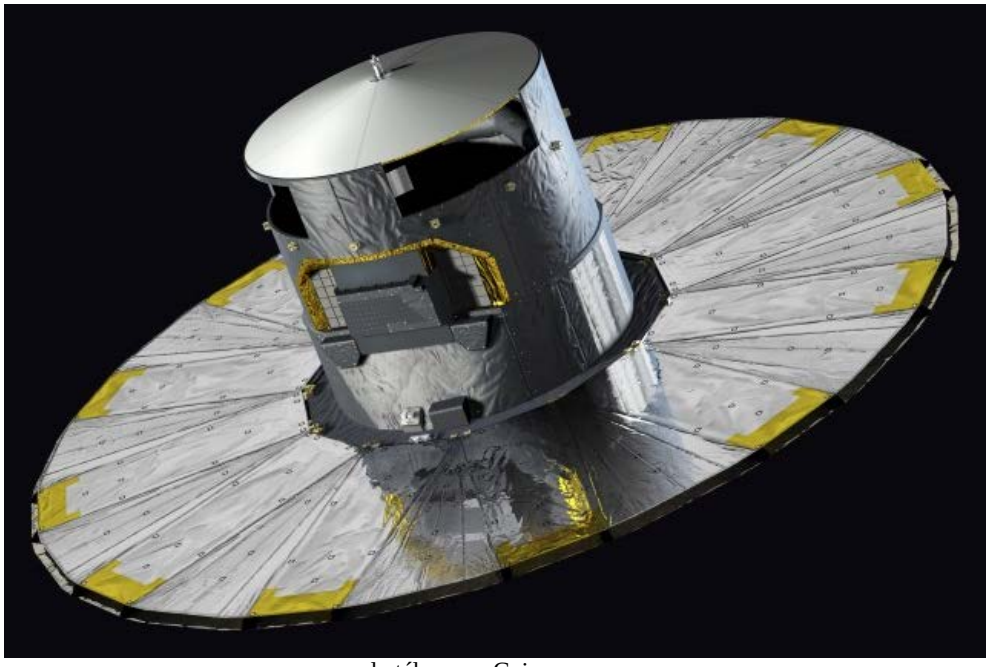
Il a observé 120.000 étoiles à moins de 500 AL de la Terre, avec une précision de l'ordre du millième de seconde d'arc. Il a produit trois catalogues :

- la *catalogue Hipparcos*, contenant 120.000 étoiles mesurées à 1 mas ;
- le *catalogue Tycho*, contenant plus d'un million d'étoiles à une précision de 20 à 30 mas ;
- le *catalogue Tycho2*, qui est une extension du précédent, contenant 2.500.000 étoiles, avec une précision un peu améliorée. Il couvre 99 % de toutes les étoiles de magnitude inférieure à 11.

Le résultat le plus spectaculaire d'Hipparcos a été la modification de toutes les distances dans l'Univers. La révision des erreurs antérieures sur la distance des étoiles, base de toutes les distances dans l'Univers, ont entraîné une augmentation de la taille estimée de l'Univers. Correlativement, l'âge de l'Univers a été révisé à la baisse.

**Gaia**

L'Agence Spatiale Européenne a construit un successeur d'Hipparcos, nommé Gaia. Gaia fait partie du programme scientifique de l'ESA *Horizon 2000*, comprenant Rosetta, Herschel, Planck, Lisa, BepiColombo et Gaia. Il a été lancé le 19 décembre 2013 depuis la base européenne de Kourou, par une fusée Soyouz Fregat. Gaia est arrivé à son poste, autour du point de Lagrange L2, le 8 janvier 2014.



le télescope Gaia image ESA

Cet instrument est exceptionnel. Il a été entièrement réalisé en carbure de silicium SiC (monture, support, miroir… afin de garantir la meilleure stabilité thermique pour la fiabilité des mesures. Il comporte deux télescopes séparés d'un angle de 106,5°. Les faisceaux qui en émergent sont combinés. Cette méthode et plus efficace que celle utilisée sur Hipparcos (optique de combinaison à la sortie plus petite et plus légère, angle mécaniquement constant).

Gaia est 50 fois plus précis qu'Hipparcos, et mesurer plus d'un milliard d'étoiles jusqu'à la magnitude 20 (position, photométrie, spectre). Ce nombre représente quelque chose comme 1 % des étoiles de la Voie Lactée. La durée de la mission est de 5 ans.

A cette magnitude limite, il déterminera les positions du milliard d'étoiles à la précision de 300 µas (micro arc-seconde). C'est 10.000 fois plus d'étoiles qu'Hipparcos, à une précision plus de 3 fois meilleure. Notez bien que, passant de la magnitude 12 à la magnitude 20, on observe des étoiles considérablement plus éloignées : une étoile de M = 5 (assez semblable au Soleil), à 250 pc apparaît à la magnitude m = 12 ; on la voit à m = 20 si elle est à 10.000 pc, soit 40 fois plus loin ! Jusqu'à cette distance (30.000 AL), la précision sur la distance sera meilleure que 20 %.

Pour les étoiles proches, Gaia obtiendra une précision bien meilleure : jusqu'à la magnitude 12, c'est à mieux que 7 µas que l'on obtiendra les mesures. Ceci représente une pièce d'un euro sur la Lune. A cette précision, il faut tenir compte des effet de lentille gravitationnelle produits par le Soleil bien sûr, mais aussi par les planètes, et même certains satellites ! La précision sera meilleure pour les étoiles rouges (type spectral M), que pour les bleues.

La précision de position atteinte pourrait permettre la découverte de 10 à 20.000 exoplanètes, par la mesure des changements provoqués par leur circulation orbitale. Ce n'est plus seulement la vitesse (radiale), mais aussi le mouvement propre (tangentiel) de l'étoile qui trahit la planète ! Un changement radical dans la façon de cosidérer les exoplanètes.

Gaia apportera aussi de nombreux renseignements sur les propriétés physiques des étoiles : luminosité, température, composition chimique… Mais aussi un catalogue des astéroïdes, des naines brunes, des quasars (500.000). Enfin, toute explosion de la précision en science a apporté son lot de découvertes inattendues. Gageons que ce sera le cas aussi pour Gaia.

Gaia embarque aussi un détecteur de photométrie, et un spectromètre (vitesse radiale). Ces trois instruments sont alignés dans le plan focal, de sorte qu'un astre passe successivement sur les trois. Ainsi, on peut dire qu'ils travaillent en parallèle.La photométrie en plusieurs couleurs donnera une indication sur le décalage spectral des objets mesurés.

Le premier but de Gaia est la constitution d'un catalogue d'étoiles en trois dimensions, avec les vitesses. Mais grâce au spectromètre, des données physiques sur les étoiles seront aussi mesurées. Le résultat sera une connaissance extrêmemnt approfondie de toutes les étoiles dns un volume important autour du Soleil. Sachant que des propriétés de celles-ci on extrapole les propriétés de l'Univers, on mesure l'importance de cette mission.

Le satellite étant destiné à balayer tout le ciel plusieurs fois, il est évident que tous les objets assez brillants seront observés. Ceci inclus des astéroïdes, des comètes, et d'autres objets beaucoup plus lointains. Ces observations seront des retombées du programme principal.

# Méthodes physiques

## *Méthodes actives*

### Laser

Une première méthode utilise le laser, et sert pour mesurer la distance Terre-Lune (télémétrie laser-Lune). Des lasers de puissance tirent des éclairs vers les réflecteurs laser qui ont été déposés à la surface de la Lune par les missions *Apollo* ainsi que les rovers soviétiques *Lunokhod*. Ces réflecteurs sont des *coins optiques*, c'est-à-dire des coins de cube, aluminiés à l'intérieur, qui renvoient tout rayon lumineux qui les frappe, quelle que soit l'incidence, vers l'émetteur (l'usinage de ces coins est très précis, les angles font 90° à mieux qu'une seconde près). La précision des mesures est de l'ordre du centimètre. L'observatoire de la Côte d'Azur abrite l'un des lasers-Lune :

> Station de télémétrie laser MéO, télescope de 1,54 m de diamètre, laser YAG (Yttrium, Aluminium, Grenat) émettant 10 tirs par seconde, retour 1 photon tous les 100 tirs, précision d'horloge de 7 ps (7 $10^{-12}$ s), précision de mesure 15 à 30 ps qui donne un résultat à quelques millimètre près.

Le résultat le plus spectaculaire de ces expériences est la mesure précise de l'éloignement annuel de la Lune, dû aux marées, et qui se monte à 3,8 cm / an.

Il n'est pas possible d'utiliser le laser sur des cibles planétaires (le nombre de photons retournés serait bien trop faible, surtout en l'absence de réflecteurs)).

### Radar

Pour les planètes donc, on utilise un radar. Ou tout au moins quelque chose qui fonctionne sur ce principe. L'idée est la même que pour le laser : il s'agit d'éclairer la surface d'une planète, et de capter l'éclair en retour. Au lieu d'être dans le domaine visble, la *lumière* utilisée ici est de longueur d'onde bien plus grande, ce sont des micro-ondes. L'ennui ici est qu'on ne dispose pas de réflecteurs à la surface, et donc le rendement est mauvais. Très peu de puissance radio nous revient, ce qui limite l'emploi de la méthode.

Les paraboles des radars n'ont pas la surface suffisante pour envoyer un faisceau jusqu'à une planète, même proche. On utilise donc un radiotélescope, dont le miroir est très grand. Un émetteur est placé au foyer du miroir, à côté du récepteur. L'instrument est utilisé successivement en émission puis en récpetion (c'est le principe qui est appliqué pour les radars routiers…). Le plus grand ayant été utilisé est celui d'Arecibo.

La radioastronomie est passive, en ce sens qu'elle détecte des ondes émises par les astres, alors que la méthode décrite ici est active, elle envoie un faisceau vers la planète dont on veut connaître la distance. La précision est meilleure que le kilomètre.

Appliquée à Vénus, cette méthode donne une excellente valeur de la distance et permet, en retour, de fixer l'Unité Astronomique : sa valeur est de 149.597.870 km. Les difficultés ont amené des résultats fantaisistes au début, mais à partir de 1961, des données correctes ont été obtenues.

Mars a été observée depuis Arecibo, et des détails de surface ont été mis en évidence. Sur Mercure, plus lointaine, la distance est le résultat à attendre.

La méthode a été appliquée pour cartographier des astéroïdes passant près de la Terre. Par exemple 216 Kleopatra, qui a la forme d'un gros nonos !

Le radar a été utilisé aussi, toujours pour mesurer des distances, mais dans des circonstances très différentes. Embarqué à bord d'une satellite placé en orbite autour de Vénus, le faisceau est assez étroit grâce à la proximité, pour ne sonder qu'une petite partie du terrain placé en-dessous. Si on connait très bien l'orbite du satellite, la mesure de la distance sol-satellite point par point permet de reconstituer toute l'altimétrie de la planète. C'est ainsi que Vénus, toujours cachée sous d'épais nuages et impossible à photographier, a pu être cartographiée. Cette cartographie précise a mis en évidence les volcans, et toutes les formations géologiques, certaines n'existant que sur Vénus.

Pareillement, la sonde Cassini a cartographié la surface de Titan, également couverte de nuages. Elle a mis en évidence, outre les altitudes, des différences de réflexivité du sol, qui ont permi de détecter des lacs d'hydrocarbure à la surface. Mis en rapport avec les photos prises sous les nuages par le module européen Huygens, c'est toute la connaissance de Titan qui en a été bouleversée.

Dans ces expériences de cartographie, ce sont toujours les distances qui sont mesurées (essentiellement), mais dans un but dérivé. On s'éloigne un peu de la mesure pure des distances.

La méthode des parallaxes est excellente, et fournit une grande précision, à condition de pouvoir mesurer l'angle sous lequel on voit une étoile par rapport aux étoiles du fond. Mais cette précision ne peut être atteinte que dans le voisinage immédiat du Soleil

Il existe de nombreuses méthodes, basées sur des phénomènes différents ; nous allons en survoler quelques unes. Mais auparavant, voyons une analogie plus parlante.

## *Méthodes passives*

### Analogie des mesures dans une ville

Imaginons qu'on veuille réaliser le plan d'une ville, en restant sur le toit d'un immeuble. On ne pourrait pas mesurer directement la distance des autres immeubles, et de plus, certains bâtiments en cacheraient d'autres.

La distance des immeubles très proches peut être mesurée directement par trigonométrie (voir plus loin) : en se déplaçant sur le toit, on les voit se détacher devant des points différents repérés sur les collines au loin. La mesure de ce déplacement permet de calculer très simplement la distance. Mais plus les immeubles sont lointains, plus faible est leur déplacement apparent devant le paysage. Lorsque ce déplacement devient trop faible, sa mesure n'est plus possible, et donc la distance ne peut plus être calculée.

Mais avec un peu d'astuce, on peut s'en sortir tout de même ! L'idée de base est que les immeubles sont plus ou moins semblables, qu'ils soient proches ou lointains. On peut vérifier cette idée sur les plus proches, dont a on mesuré les distances. Une fois la méthode éprouvée sur ceux-là, on l'extrapolera vers les immeubles plus lointains.

Considérons par exemple la luminosité des fenêtres (la nuit). On peut calculer la luminosité moyenne des fenêtres sur l'ensemble des immeubles proches. On vérifie en même temps que les fenêtres beaucoup plus ou beaucoup moins lumineuses que la moyenne sont très rares. Cette moyenne est donc significative. Puisqu'on connaît la distances des immeubles sur lesquels on a fait cette analyse, on en déduit la luminosité moyenne des fenêtres en fonction de la distance.

Observons maintenant les fenêtres d'un immeuble plus lointain, trop lointain pour que sa distance puisse être mesurée par trigonométrie. La luminosité apparente des fenêtres introduite dans la relation précédente donnera la distance.

Nous faisons en permanence cette gymnastique mentale sans en prendre conscience. La précision est moins bonne, mais l'ordre de grandeur représente une très bonne approximation.

Si la ville est très grande, on ne pourra pas mesurer la luminosité des fenêtres pour les immeubles les plus lointains. Il faudra se contenter de critères concernant non plus un détail de l'immeuble, mais l'immeuble dans son ensemble. Il est évident qu'il existe des immeubles de tailles très différentes. Mais si on regarde les plus hauts parmi ceux dont on a déterminé la distance, on s'aperçoit qu'ils sont à peu près de la même hauteur (correspondant peu que peu à ce qu'on sait faire, techniquement ou financièrement). Alors, pour les faubourgs lointains, on pourra évaluer la distance à laquelle se trouve un quartier dans son ensemble, à la condition qu'il s'y trouve quelques grands immeubles, dont on mesurera la luminosité globale. Mais on ne pourra pas préciser la distance d'un immeuble en particulier.

Enfin, si la ville est vraiment très grande, on pourra établir des statistiques sur les quartiers eux-mêmes, et s'en servir pour déterminer la distance des plus lointains.

C'est un ensemble de méthodes de ce genre qu'on utilise en astronomie, étant donné que la Terre, sur son orbite, représente le toit de l'immeuble auquel nous sommes attachés. Depuis notre observatoire, qui se déplace de 300 millions de kilomètres au cours de l'année, nous voyons les étoiles proches se déplacer légèrement par rapport au plus lointaines, et ceci permet de mesurer leurs distances par trigonométrie. Ensuite, ayant analysé les propriétés physiques des étoiles proches, de distance connue, on peut extrapoler ces mêmes propriétés vers les plus lointaines, et en déduire une distance approximative. Bien évidemment, ces méthodes sont de moins en moins précises à mesure qu'on s'éloigne, puisque les erreurs de chacunes des méthodes utilisées pour y parvenir s'accumulent.

**Adaptation à la Séquence Principale**

Cette méthode s'applique à un amas d'étoiles, et est basée sur le diagramme HR. Ce dernier est construit en plaçant les points figuratifs d'un groupe d'étoiles sur un graphique dont l'axe des abscisses porte la température effective, et l'axe des ordonnées la magnitude absolue.

Que se passerait-il si, au lieu de la magnitude absolue (en général inconnue), on mettait la magnitude visuelle ? La magnitude visuelle dépend de la distance, la magnitude absolue en est débarrassée. Si on considère deux étoiles de même température effective, et situées à des distances différentes, elles seront placées sur une même verticale, puisque la température effective en abscisse est la même, mais à des hauteurs différentes, puisque leur éclat sera diminué différemment selon leur distance.

Si on fait la même chose pour toutes les étoiles d'un amas, dont les dimensions sont petites devant la distance, on peut considérer que toutes ses étoiles sont affaiblies de la même façon par l'éloignement, qui est à peu près le même pour toutes. Donc, leurs magnitudes visuelles seront égales à leurs magnitudes absolues plus une constante, la même pour toutes. Par conséquent, le diagramme HR élaboré avec les magnitudes apparentes sera une ligne parallèle à la Séquence Principale, décalée vers le haut ou le bas de cette constante. Puisqu'on connait très bien le diagramme HR construit avec les magnitudes absolues, il suffira de décaler la ligne représentative des magnitudes visuelles pour l'amener en superposition avec la Séquence Principale. La valeur du décalage représente le module de distance, et permet de calculer la distance.

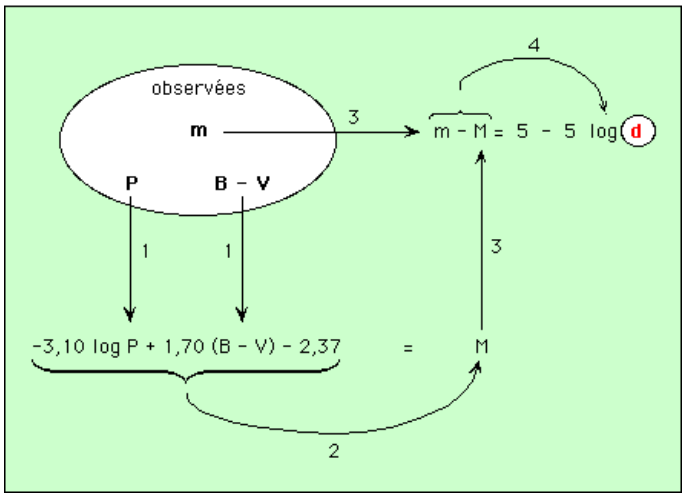
**Les Céphéides**

La méthode que nous allons considérer date du début du XX$^{e}$ siècle, et repose sur les propriétés d'étoiles semblables.

Comme nous venons de le voir, la méthode géométrique, appliquée du sol ou de l'espace, permet de mesurer les distances des étoiles proches. Connaissant ces distances, on connait l'éclat des étoiles concernées, et on peut étudier leur comportement. Certaines de ces étoiles, comme $\delta$ Cephée, présentent des variations de luminosité ; on les appelle *étoiles variables*. Mais les Céphéides varient périodiquement, **de manière très précise**. Et une astronome, Miss Henrietta Leavitt, a montré au début du XX$^{e}$ siècle, que leur période était liée à leur luminosité (ou magnitude absolue). Par conséquent, pour les Céphéides proches, dont la distance est connue par la méthode géométrique, la magnitude absolue est connue aussi ; on mesure la période, on en déduit la relation.

Cette relation étant maintenant connue, on peut l'appliquer à d'autres Céphéides plus lointaines, dont on ignore la distance. On mesure leur magnitude apparente et leur période. De la période on déduit la magnitude absolue en utilisant la relation ; on dispose maintenant de la magnitude visuelle et de la magnitude absolue. Il est aisé d'en déduire la distance.

En détails, on mesure m la magnitude visuelle totale, B et V les magnitudes visuelles restreintes à la partie Bleue et Visible- ou jaune - du spectre, obtenues derrière des filtres. La période s'obtient en traçant la courbe de lumière (m par rapport au temps), sur une durée de l'ordre du mois. La période est le temps qui s'écoule entre deux maxima successifs de la courbe de lumière. Si on mesure sur plusieurs mois, on améliore la précision sur la période.




La période P et B - V (observés) permettent de calculer la magnitude absolue, grâce à la relation ci-dessus (flèches 1 et 2) ; et la relation entre la magnitude visuelle, la magnitude absolue et la distance permet donc de déduire la distance (flèches 3 et 4).

La chance veut que les Céphéides soient des étoiles très brillantes, que l'on voit de loin. Elles permettent donc de mesurer les distances des amas d'étoiles et des galaxies qui les contiennent. On dit que ce sont des indicateurs de distance secondaires.

C'est sur l'étude des Céphéides que repose tout le système de mesure des distances dans l'Univers.

La distance, tirée de la relation m - M = 5 - 5 log d s'exprime par :

$$d = \exp((5 - m + M) / 5)$$

A partir d'une certaine distance, il n'est plus possible de voir des Céphéides. Pour mesurer les distances, on utilise alors des objets plus lumineux, visibles de plus loin. Ces objets sont en particulier les noyaux de galaxies. Bien évidement, la précision des ces mesures, très indirectes, est plus faible.

Toute la connaissance de l'Univers est donc basée sur les mesures géométriques pour les objets proches, puis sur les Céphéides plus loin, puis sur la luminosité globale de très gros objets plus loin encore. Plus on s'éloigne, plus la précision des mesures diminue.

**Mira Ceti**

Les étoiles de type Mira sont aussi très brillantes, et obéissent à une relation semblable à celle des Céphéides. Elles sont aussi utilisées pour déterminer les distances.

**Loi de Tully-Fisher**

En 1977, Tully et Fisher ont découvert une relation empirique entre la vitesse de rotation d'une spirale et sa luminosité. Nommée *loi de Tully-Fisher*, cette relation s'exprime par :

$$L \propto V^4$$

La vitesse V est la vitesse de rotation du disque galactique, L est la luminosité de la galaxie. L'étude de quelques galaxies assez proches pour que la distance puisse être déterminée par les Céphéides, permet de calibrer la relation, c'est-à-dire de déterminer la constante de proportionalité.

Il est facile de la déterminer par l'observation, tout au moins pour les galaxies dont on est capable de prendre un spectre relativement détaillé. Considérons une raie spectrale, Hα par exemple. On la verra en absorption provenant des différentes parties de la galaxie. La contribution du bulbe donne une raie spectrale dont le décalage vers le rouge est dû à la distance à laquelle se trouve la galaxie (expansion de l'Univers). Décalons l'ensemble du spectre de cette quantité, pour le voir comme si la galaxie était au repos par rapport à nous. Les parties externes du disque, dans leur rotation s'approchent et s'éloignent de nous. Le bord qui s'approche produit un décalge vers le bleu, le bord qui s'éloigne un décalge vers le rouge. L'ensemble de la galaxie présente donc une raie spectrale non pas verticale dans le spectre, mais inclinée. L'angle dont lequel elle s'incline permet de déterminer la vitesse de rotation apparente (en projection sur le ciel, selon l'inclinaison de la galaxie par rapport à nous).

L'aspect de la galaxie donne par ailleurs une approximation de l'angle sous lequel elle se présente à nous. La connaissance de cet angle permet de déterminer la vitesse de rotation réelle de la galaxie.

Nous avons vu comment, par l'observation, déterminer la vitesse de rotation d'une spirale. Il ne reste maintenant qu'à appliquer la relation de Tully-Fischer pour en obtenir la luminosité, c'est-à-dire la magnitude absolue M.

Enfin, la mesure de la magnitude apparente m permet, toujours avec la même relation, de déterminer la distance.

**Loi de Faber-Jackson**

C'est l'équivalent de la loi de Tully-Fischer pour les galaxies elliptiques. Elle joue donc le même rôle.

Les galaxies elliptiques étant maintenues par la pression, et non par la rotation, la loi de Tully-Fischer ne s'applique évidemment pas. Mais au lieu de la vitesse de rotation, on peut utiliser la dispersion de vitesses, qui caractérise la pression dans le cœur de la galaxie. C'est ce qu'ont fait Sandra Moore Faber et Robert Earl Jackson, et ils ont obtenu la relation empirique :

$$L \propto \sigma^4$$

Cette relation a été ensuite analysée et critiquée par D. Gudehus, qui a proposé une relation plus complexe, ayant davantage de paramètres.

# Méthode cosmologique

**Loi de Hubble**

Cette loi, en réalité découverte théoriquement par Alexandre Friedman et Georges Lemaître, s'exprime par :

$$V = H\, d$$

où V est la vitesse apparente d'éloignement de la galaxie, et d sa distance. H est la constante de Hubble, qui n'est en fait que la valeur actuelle d'une variable. Elle représente le taux d'expansion de l'Univers, et varie donc avec la répartition de la masse en son sein.

A petite distance (si l'on peut dire), cette loi donne une distance qui a un sens, V étant mesurée par le décalage spectral. Mais si d est grande, elle devrait tenir compte de la variation de la "constante" H avec le temps (et l'éloignement).

La valeur de H est très difficile à établir correctement, et n'est pas encore universellement acceptée. On donne aujourd'hui : $H_0 = 72$ km $s^{-1}$ $Mpc^{-1}$

La vitesse étant croissante avec l'éloignement, on peut chercher à quelle distance elle atteint la vitesse de la lumière :

$V = 300.000$ km $s^{-1} = 72$ km $s^{-1}$ $Mpc^{-1}$ d  d = 300.000 km $s^{-1}$ / 72 km $s^{-1}$ $Mpc^{-1}$

d = 4.166 Mpc, ou 13,5 milliards d'années-lumière. On trouve donc que la vitesse définie de cette manière tend vers la vitesse de la lumière lorsqu'on s'approche du Big Bang. En réalité, le calcul esrt plus complexe, puisque H varie avec le temps. Ici, nous n'avons calculé qu'une approximation avec H constant.

**SN Ia**

Les SN Ia servent aussi d'indicateurs de distance.

**Distance comobile**

Au-delà des méthodes précédentes, on ne connait plus d'objets assez lumineux et présentant des propriétés stables pour définir une méthode de même type que les précédentes.

La solution vient de l'expansion de l'Univers, et de la relation entre distance et décalage vers le rouge. Malheureusement, cette relation est fort complexe, et dépend de multiples paramètres que l'on ne maîtrise pas. Pour essayer de s'y retrouver quelque peu, commençons par une analogie qui explique l'expansion de l'Univers.

Prenons une bande de caoutchouc élastique, et traçons-y en noir les graduations d'un mètre en ruban et les chiffres correspondant. Cette idée saugrenue devient intéressante par analogie avec l'espace-temmps. Ajoutons en rouge deux points, disons espacés de 50 cm. Ils représenteront deux galaxies. Si on tire sur l'élastique, elle s'allonge régulièrement, et la distance entre les graduations augmente. Là où il y avait un centimètre, il y en aura deux. Mais cette opération ne change pas les nombres inscrits ! La distance entre les deux points indique toujours 50 cm, même s'ils sont maintenant espacés réellement de 1 m.

C'est exactement ce que font les astronomes. L'expansion de l'Univers change sans cesse les distances réelles entre deux galaxies typiques. Si on imagine que des graduations sont indiquées dans l'espace-temps, elles s'écarteront de même avec l'expansion, mais indiqueront toujours la même chose. Pour cette raison, on dit qu'on utilise un *référentiel comobile*, en ce sens qu'il bouge, par l'expansion, avec les objets qu'il permet de repérer. Dans le référentiel comobile, la distance (*distance comobile* $d_c$) entre deux galaxies reste constante au cours du temps. Mais la *distance physique* $d_\varphi$ varie comme on le comprend. La distance physique $d_\varphi$ est parfois appelée *distance propre*.

Pour faire cela, on a inventé le *facteur d'échelle* a(t). Dans l'exemple ci-dessus, on a imaginé que les distances doublent dans un certain temps t (le temps de tirer sur l'élastique). Le facteur d'échelle a(t) correspondant sera 2. La distance des galaxies (toujours dans notre exemple) est toujours de 50 cm. Donc : $d_\varphi = 1$ m $= a(t)\, d_c = 2 \times 50$ cm

De manière générale, nous aurons :

$$d_\varphi = a(t)\, d_c$$

On peut comprendre l'avantage de cette notion. Le facteur d'échelle, entre deux dates, nous indique de combien l'Univers a grossi dans cet intervalle. Si on a cette information, alors on peut savoir quelle est la distance entre les deux galaxies (connaissant leur distance comobile).

Le facteur d'échelle dépend du temps, et aujourd'hui, il vaut 1, afin que la distance propre (distance physique), soit celle que l'on mesure maintenant. On a donc a(1) = 1. On peut déterminer la dépendance entre z et a(t) :

$z = (\lambda_0 - \lambda_e) / \lambda_e$ et $\lambda_e = a(t)\ \lambda_0$ (la longueur d'onde est une longueur particulière, et évolue comme telle)

D'où l'on tire :

$$1 + z = 1 / a(t)$$

Le facteur d'échelle représentant l'expansion, il est évident qu'il dépend du modèle d'Univers choisi. Si l'Univers était vide de matière, l'expansion ne serait pas freinée, et se poursuivrait sans limite. Si l'Univers étit à forte densité, l'expansion serait fortement ralentie. Le facteur d'échelle devrait évidemment suivre ces comportements.

Nous allons maintenant voir comment on peut mesurer les distances dans l'Univers.

**Distance de luminosité**

Une façon de déterminer les distances, largement utilisée dans l'espace proche, utilise cette propriété : plus un astre de luminosité donnée est loin, plus il apparaît faible. Sa lumière se répand dans l'espace, selon une sphère de rayon $d_\varphi$ (on est à la distance physique $d_\varphi$). L'éclat apparent diminue donc comme $1 / d_\varphi^2$.

En fonction du facteur d'échelle, $d_\varphi = a(t) \times d_0$, où $d_0$ est la distance comobile.

Lorsque la distance est grande, les effets de l'expansion se font sentir. La lumière émise nous arrive décalée vers le rouge. Un photon voit donc sa longueur d'onde augmenter, tout simplement selon le décalage spectral : $\Delta\lambda / \lambda_0 = z$ $(\lambda - \lambda_0) / \lambda_0 = z$

$$\text{d'où } \lambda = \lambda_0 (1 + z).$$

Les longueurs d'onde sont multipliées par le facteur 1 + z. Puisque l'énergie des photons est inversement proportionnelle à la longueur d'onde, l'énergie de chaque photon est divisée par 1 + z. Nous voyons donc des photons qui portent moins d'énergie, comme si la source était plus loin ! Si nous appliquons la méthode habituelle pour déterminer la distance, nous obtiendrons une distance nommée *distance de luminosité*, qui est plus grande que la distance réelle (physique) dans le facteur 1 + z. Donc :

$$d_{lum} = d_\varphi (1 + z)$$

Si un objet est proche, son décalage spectral z est très petit, et peut être négligé devant 1 (z 1). On retrouve alors $d_{lum} = d_\varphi$, ce qui justifie l'usage de cette méthode à petite distance (petit z).

Si on mesure $d_{lum}$ et z, on peut en déduire $d_\varphi$, ce qui est satisfaisant pour l'esprit : on peut imaginer où se trouve l'objet qu'on est en train de regarder, quelque part dans un espace-temps figuré. Mais quelle est la signification de cette distance "réelle", étant donné que nous ne pouvons pas voir l'objet à cette position ?

Dans ce qui précède, nous avons supposé que l'Univers est plat (sa géométrie est euclidienne). S'il n'en était pas le cas, l'influence de la géométrie modifierait encore ce résultat : une géométrie hyperbolique éloignerait encore les objets, la distance-lumioère serait encore plus grande. Par contre, une géométrie sphérique les rapprocherait, annulant au moins partiellement l'effet du décalage spectral. Ceci nous indique que cette notion de distance dépend de la géométrie de l'Univers, que nous ne connaissons pas vraiment. Actuellement, il semble bien que l'Univers soit plat, donc à géométrie euclidienne.

**Distance angulaire**

La taille des galaxies spirales est relativement peu dispersée autour d'une moyenne. Notre Voie Lactée, Andromède, sont assez représentatives de ces objets. Alors, si on mesure l'angle sous lequel on voit une spirale, on peut en déduire sa distance, en supposant qu'elle ait la taille moyenne. Ceci donne une approximation valable.

Là encore, pour les objets proches, on obtient une distance qui est en parfait accord avec les autres mesures (distance de lumière par exemple, ou Céphéides). Mais lorsque z croît, les choses se gâtent encore, et la divergence se manifeste.

Reprenons l'élastique-mètre variable. Etendue, elle représente l'Univers aujourd'hui. Si on la raccourci, on remonte le temps vers le Big Bang. Que fait-on quand on mesure la distance angulaire ? On consdère la dimension **physique** de l'objet observé. Par exemple, on considère une spirale de 100.000 AL de diamètre. Ces 100.00 AL restent constants lorsqu'on remonte le temps, alors que les mesures dans l'Univers raccourcissent. On peut, pour illustrer ce phénomène, découper une spirale en papier, et la poser sur l'élastique. En raccourcissant l'élastique, la spirale paraît de plus en plus grosse par comparaison. Elle grossit donc comme l'Univers diminue. Or, en remontant le temps, l'Univers diminue comme 1 + z. Donc, la dimension des objets semble grossir comme 1 + z, c'est-à-dire que :

$$d_{diam} = d_\varphi / (1 + z)$$

Démonstration de cette loi

Métrique FLRW, au moment $t_e$ où la lumière a été émise : $ds^2 = -c^2\,dt^2 + a^2(t_e)\,[dr^2/(1- kr^2) + r^2\,(d\theta^2 + \sin^2\theta\,d\varphi^2)]$

ds est la taille de la galaxie, $r_0$ sa distance. On considère $d\theta$ l'angle sous lequel on voit la galaxie. $d\varphi = 0$, $dr = 0$ et $dt = 0$. Il reste donc :

$ds^2 = a^2(t_e)\,r_0^2\,d\theta^2$, d'où $ds = a(t_e)\,r_0\,d\theta$, et $d\theta = ds / a(t_e)\,r_0$.

Par l'expansion, $a(t_e) = a_0 / (1 + z)$. Donc : $d\theta = ds\,(1 + z) / (a_0\,r_0)$

Par définition, la distance angulaire est $d_{diam} = ds / d\theta$, donc $d_{diam} = a_0\,r_0 / (1 + z)$

Puisque $a_0\,r_0 = d_\varphi$, on retrouve $d_{diam} = d_\varphi / (1 + z)$

Cette propriété contre-intuitive a un avantage important : les galaxies les plus lointaines nous donnent toujours une image exploitable. Si leur comportement correspondait à notre intuition, ces galaxies ne nous apparaîtraient que comme des points lumineux, sans aucune structure apparente. C'est donc bien ce qui nous permettra de comprendre l'évolution des galaxies depuis leur naissance !

Si on remonte le temps, $z \to \infty$ et donc $d_{diam} \to 0$. Plus un objet (une galaxie) est loin, plus sa distance de diamètre angulaire diminue : il semble d'autant plus près ! Mais attention, sa distance de lumière augmente, car il paraît bien plus faible.

Calculons le rapport entre la distance de lumière et la distance de diamètre angulaire :

$$d_{lum} = d_\varphi\,(1 + z) \quad \to \quad d_\varphi = d_{lum} / (1 + z)$$
$$\text{et } d_{diam} = d_\varphi / (1 + z) \quad \to \quad d_\varphi = d_{diam}\,(1 + z)$$

En égalant les deux valeurs de $d_\varphi$ il vient :
$d_{lum} / (1 + z) = d_{diam}\,(1 + z)$, soit :

$$d_{lum} = d_{diam}\,(1 + z)^2$$

**Validité de ces distances**

Que signifient toutes ces distances ? Pas grand chose, puisqu'elles ne donnent pas les mêmes valeurs. Mais chacune a son propre domaine d'utilisation, selon les mesures qu'on est capable de faire.

Elles dépendent de la géométrie de l'Univers, qui n'est pas complètement assurée. Aussi, les cosmologistes préfèrent utiliser z, qui est une mesure directe, et qui a un sens quel que soit le modèle utilisé. L'emploi de z permet de s'abstraire de ce modèle, et de renvoyer à plus tard le choix, si on est capable de le faire.

Evidemment, ils se forgent dans la tête une représentation qui leur permet de se comprendre lorsqu'ils parlent de z, et c'est ce que nous devons faire aussi. L'espace-temps est bien un tout, et séparer l'espace du temps n'a pas de sens. Mais **deux objets au même z sont observés dans une même phase de leur histoire, et c'est ça qui compte et permet de les comparer**.

Le décalage spectral z est un *indicateur de distance*, s'il n'est pas une distance au sens habituel du terme.

Cependant, pour obtenir cette représentation mentale, il faut d'abord s'appuyer sur une notion tangible. Aussi, il faut avoir une idée (non précise), des distances correspondant à z. Non pour savoir où se trouve un objet en milliards de parsecs, mais pour comprendre comment évolue z, car son comportement est fortement non linéaire. z = 1 est déjà une très grande distance, et un retour énorme vers le passé. Ensuite, les valeurs de z augmentent bien plus vite que les distances (dans l'espace et dans le temps). 380.000 ans après le Big Bang correspond à z = 1.100 à la recombinaison. 380.000 ans plus tôt, c'est le Big Bang, z est infini ! Voici un tableau qui donne une idée de ces ordres de grandeur :

---=OO=---



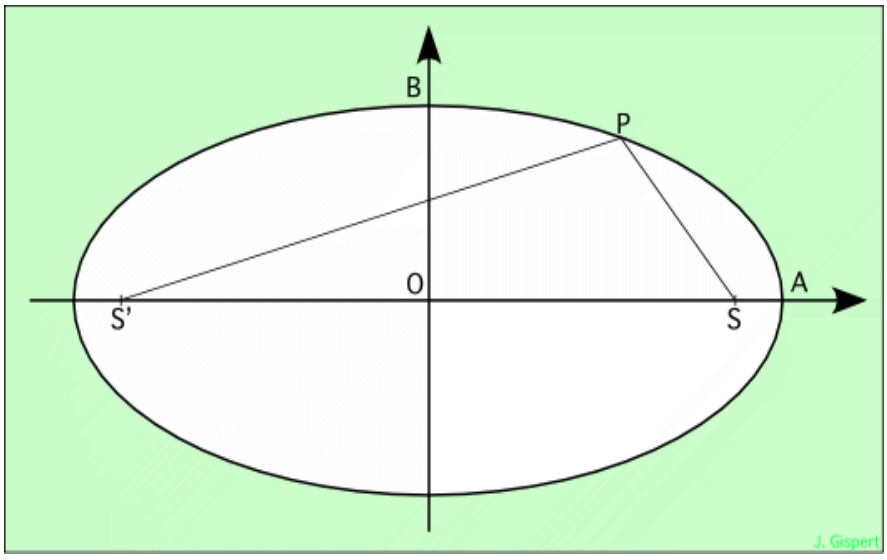

Ce chapitre n'est pas un cours de mécanique céleste, sujet bien trop complexe pour le cadre de ce cours. Au contraire, il est destiné à donner les connaissances essentielles, accessibles avec un niveau de maths-physique de terminale.Vous y trouverez une démonstration géométrique des propriétés des orbites elliptiques, et quelques formules importantes pour comprendre le comportement des planètes.

La Mécanique Céleste est l'application de la Gravitation Universelle au mouvement des corps célestes.

**Rappel des propriétés de l'ellipse**

**Définition** : *l'ellipse est l'ensemble des points du plan dont la somme des distances à deux points fixes appellés foyers, et notés S et S', est constante*.

D'autres définitions de l'ellipse existent, mais celle-ci est la plus simple.




Pour tout point P de l'ellipse, on a : S'P + SP = cste

Notons : OA = a le demi grand axe, OB = b le demi petit axe, OS = OS' = c la demi distance focale

**Première conséquence** : A étant un point de l'ellipse, on a donc en particulier : S'A + SA = cste

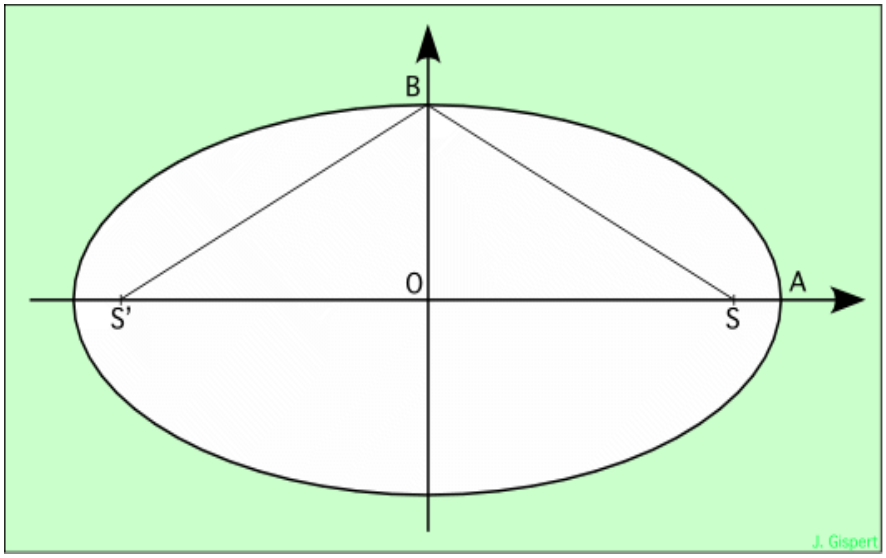
or S'A = S'O + OA = c + a et SA = OA - OS = a - c

donc S'A + SA = c + a + a - c = 2a

Par conséquent la constante est 2a, et pour tout point P de l'ellipse :

$$S'P + SP = 2a$$

**Deuxième conséquence** : appliquons la somme des distances pour le point B. Il vient S'B + SB = 2a. Mais l'axe vertical est un axe de symétrie pour l'ellipse. Donc, S'B = SB. Alors, S'B + SB = SB + SB = 2 SB = 2a ; SB = a.




Nous avons un triangle rectangle : SOB. Appliquons le théorème de Pythagore :

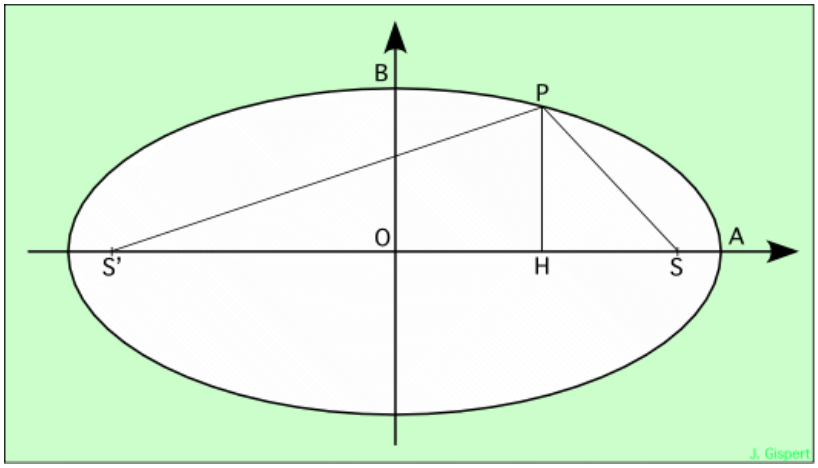
$SB^2 = SO^2 + OB^2 = c^2 + b^2 = a^2$

En extrayant la racine, il vient :

$$c = \text{sqrt}(a^2 - b^2)$$

On sait maintenant où se trouvent les foyers.

**Equation de l'ellipse**




La définition de l'ellipse permet de trouver directement son équation cartésienne. Il suffit d'évaluer les deux distances. Pour cela, remarquons que nous avons deux triangles rectangles. Chacun permet d'évaluer une distance :

$$S'P^2 = S'H^2 + HP^2 = (c + x)^2 + y^2 \qquad SP^2 = SH^2 + HP^2 = (c - x)^2 + y^2$$

Prenant la racine de chacune de ces expressions, nous avons les distances recherchées :

$$S'P = \text{sqrt}((c + x)^2 + y^2) \qquad SP = \text{sqrt}((c - x)^2 + y^2)$$

Il ne reste qu'à substituer ces expressions dans la définition de l'ellipse :

$\text{sqrt}((c + x)^2 + y^2) + \text{sqrt}((c - x)^2 + y^2) = 2a$

Ceci constitue une équation tout à fait exacte de l'ellipse, mais assez complexe. Il est élémentaire, mais pas très facile, de la réduire pour obtenir la forme habituelle :

$$x^2 / a^2 + y^2 / b^2 - 1 = 0$$

Remarque : si b = a, l'équation devient $x^2 / a^2 + y^2 / a^2 - 1 = 0$

Ou encore : $x^2 + y^2 = a^2$.

C'est l'équation du cercle de rayon a. Le cercle est donc un cas particulier d'ellipse. Et par suite, l'ellipse apparaît comme un cercle plus ou moins aplati.

**Excentricité**

On peut envisager de mesurer l'aplatissement de l'ellipse par rapport au cercle. En traçant diverses ellipses de même demi grand axe, mais plus ou moins aplaties, on remarque que les deux foyers se rapprochent du centre lorsque l'ellipse tend vers le cercle. On peut alors comparer la distance focale c au demi grand axe a pour mesurer l'aplatissement. On défini l'*excentricité* e comme le rapport c / a :

$$e = c / a$$

Pour le cercle, puisque $c^2 = a^2 - b^2 = a^2 - a^2 = 0$, l'excentricité $e = c / a = 0$. Un cercle est donc une ellipse d'excentricité nulle, ce qui correspond bien avec la notion intuitive d'aplatissement.

Il est fréquent d'insérer une sonde en orbite autour d'une planète sur une orbite fortement elliptique et, par des manœuvres appropriées, de la *circulariser*. La remarque ci-dessus le justifie.

**Transformation**

La notion d'aplatissement va bien plus loin. Si on fabriquait un cercle en métal parfaitement élastique, et qu'on appuie sur le haut du cercle posé sur le sol, la poussée le déformerait en approchant tous ses points du sol selon une direction verticale. Ce qui se traduit par :

*L'ellipse se déduit de son cercle principal par une similitude de rapport b / a*

Considérons une ellipse, et son cercle exinscrit (de rayon a donc). L'équation du cercle est $x^2 + y^2 = a^2$.

Appliquons à cette équation une similitude de rapport k, $k < 1$, perpendiculaire au grand axe. Ceci revient à ne pas changer la coordonnée horizontale x, et à multiplier la coordonnée verticale par k :

$$x \rightarrow x \qquad y \rightarrow k\,y$$

L'équation du cercle devient : $x^2 + k^2 y^2 = a^2$

Divisons tout par $a^2$ : $x^2 / a^2 + k^2 y^2 / a^2 = 1$

Soit b, défini par $b^2 = a^2 / k^2$. L'équation prend la forme : $x^2 / a^2 + y^2 / b^2 = 1$

On reconnait l'équation d'une ellipse de demi-axes a et b.

L'excentricité de cette ellipse est $e = c / a$. Donc $e^2 = c^2 / a^2$. Nous avons vu que $c^2 = a^2 - b^2$. Par conséquent : $e^2 = (a^2 - b^2) / a^2$.

Par la définition de b : $e^2 = (a^2 - a^2 / k^2) / a^2$

En simplifiant le membre de droite par $a^2$ : $e^2 = 1 - 1 / k^2$

L'excentricité de l'ellipse en fonction du rapport de similitude est : $e = \mathrm{sqrt}(1 - 1 / k^2)$.

On peut inverser cette formule pour trouver le rapport de similitude en fonction de l'excentricité : $k = \mathrm{sqrt}(1 / (1 - e^2))$.

**Surface**

La surface de l'ellipse se calcule par une intégrale. Elle vaut :

$$s = \pi\, a\, b$$

On peut la rapprocher de celle du cercle, puisqu'un cercle est une ellipse d'excentricité nulle, a et b jouant chacun le même rôle qu'un rayon r. Si on rapproche jusqu'à confondre les deux foyers, ils forment le centre d'un cercle. Dans la même opération, b tend vers a, et a devient le rayon de cercle. Donc, $\pi\, a\, b$ tend vers $\pi\, r^2$.

**Mouvement elliptique**

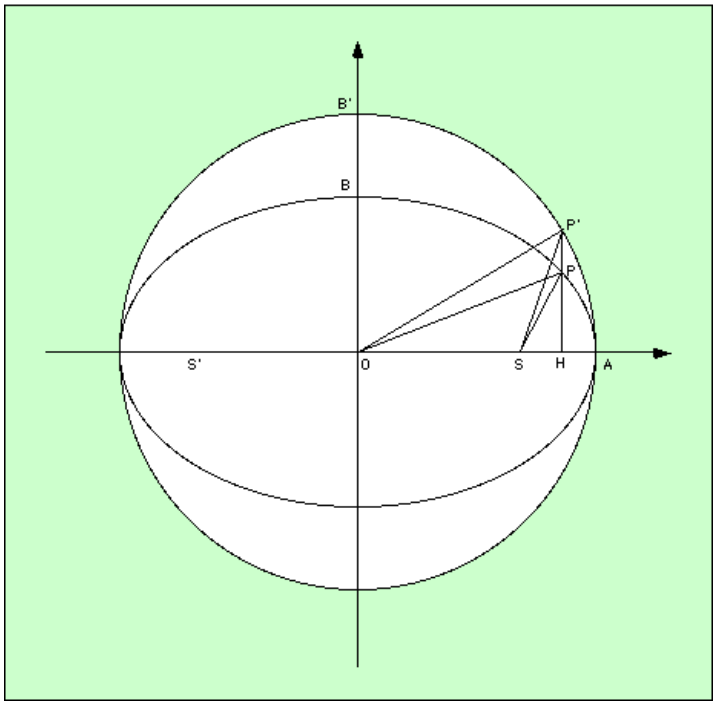
On trace un schéma montrant l'ellipse décrite par la planète, avec les axes de coordonnées placés en son centre O. Les deux foyers de l'ellipse sont notés S et S', S est du côté positif de l'axe x. Le Soleil est placé en S.

Ce qui suit est illustré pour le Soleil et une planète, mais convient parfaitement pour tout objet de faible masse tournant autour d'un objet beaucoup plus massif (on peut négliger la masse de celui qui orbite). De manière générale, le sommet A de l'orbite est nommé *périastre*, le sommet opposé sur le grand axe A' est nommé *aposatre*.

A est l'un des sommets du demi grand-axe, le périhélie de l'orbite (à remplacer par périgée, ou périastre selon la nature de l'astre central). Le point P sur l'ellipse est la planète. La longueur OA du demi grand-axe est notée a.

On construit le cercle exinscrit à l'ellipse (on l'appelle *cercle principal*). Ce cercle de centre O est tangent aux sommets du grand axe, donc son rayon est égal au demi grand-axe de l'orbite.

On construit P' la contre-projection de la planète P sur le cercle circonscrit à l'orbite. OP' est donc un rayon du cercle exinscrit, et par suite OP' = OA = a. Le *rayon vecteur* est la ligne SP qui joint la planète à l'objet qui la tient en orbite, c'est-à-dire au foyer positif de l'orbite. H est la projection de la planète sur le demi grand-axe. H, P et P' sont donc alignés.




L'*anomalie vraie* est l'angle que fait le *rayon vecteur* SP avec la direction du périhélie SA, donc l'angle v = (SA, SP).

L'*anomalie excentrique* est l'angle que fait le demi grand axe avec la ligne joignant le centre de l'ellipse à la contre-projection de la planète sur le cercle circonscrit : c'est l'angle u = (OA, OP').

La lettre $\mathcal{S}$ représente la surface d'une figure ; par exemple $\mathcal{S}_{(OSP')}$ représente la surface du triangle OSP'.

L'angle u étant l'angle entre les axes OA et OP' :

$$\mathcal{S}_{(OSP')} = \frac{OS \cdot HP'}{2} = \frac{c \cdot HP'}{2}$$

$$\mathcal{S}_{(OAP')} = \frac{a^2 u}{2}$$

$$\mathcal{S}_{(SAP')} = \mathcal{S}_{(OAP')} - \mathcal{S}_{(OSP')}$$

$$\mathcal{S}_{(SAP')} = \frac{a^2 u}{2} - \frac{c \cdot HP'}{2}$$

$$HP' = OP' \sin u = a \sin u$$

$$\mathcal{S}_{(SAP')} = \frac{a^2 u}{2} - \frac{c\, a \sin u}{2}$$

$$\mathcal{S}_{(SAP)} = \frac{b}{a}\, \mathcal{S}_{(SAP')} = \frac{b\, a\, u}{2} - \frac{b\, c \sin u}{2}$$

$$\mathcal{S}_{(SAP)} = \frac{b}{2}(a u - c \sin u) = \frac{b}{2}(a u - a e \sin u) = \frac{a\, b}{2}(u - e \sin u) = k t$$

Soit S la surface de l'ellipse :

$$s = \pi\, a\, b \quad \Rightarrow \quad a\, b = \frac{s}{\pi}$$

$$\frac{a\, b}{2}(u - e \sin u) = k t = \frac{s}{2\pi}(u - e \sin u)$$

$$u - e \sin u = \frac{2 \pi k}{s} t$$

$$\text{Soit } T = \frac{s}{k}$$

Il vient enfin :

$$u - e \sin u = \frac{2\pi}{T} t$$

C'est l'**équation de Kepler**.

La constante M = 2 π / T est nommée *moyen mouvement*. C'est la vitesse angulaire qu'aurait un mobile parcourant le cercle circonscrit à l'ellipse à vitesse constante. L'équation de Kepler se met sous la forme :

$$\mathbf{u - e \sin u = M t}$$

Bien sûr, M dépend de la planète considérée, mais il est constant dans le temps. La quantité M × t est l'*anomalie moyenne*.

Pour déterminer la position d'une planète sur son orbite à un instant t, il faut tout d'abord résoudre l'équation de Kepler, qui donne u. La position de la planète est vraiment définie par son anomalie vraie, angle v fait par les axes OA et OP. Il existe une relation simple entre u et v.

**Résolution de l'équation de Kepler**

Nommons m l'anomalie moyenne. Ce qui donne m = M t

u - e sin u = m

On utilise une méthode d'approximations successives. Si u était petit, on aurait sin u ~ u et donc on utilise cette approximation :

u - e u = m  u (1 - e) = m et

$$u_0 = m / (1 - e)$$

On utilise cette valeur pour calculer une meilleure approximation, en remplaçant sin u par sin $u_0$

$u_1 = e \sin u_0 + m$

Et plus généralement, on calcule la suite

$$u_n = e \sin u_{n-1} + m$$

jusqu'à ce que $|u_n - u_{n-1}| < \varepsilon$

La dernière valeur calculée de u est la solution de l'équation de Kepler à ε près.

C'est une méthode de point fixe, car on a trouvé une valeur telle que u = f(u)  avec f(u) = e sin u + m

Cette méthode converge très vite, il suffit de trois itérations pour obtenir une précision de 3 chiffres après la virgule (millième).

**Passage de l'anomalie excentrique à l'anomalie vraie**

Une fois l'anomalie excentrique calculée, il faut revenir à l'anomalie vraie, qui définit la position de la planète sur son orbite dans des coordonnées centrées sur l'objet attracteur, et non sur le centre de l'ellipse. La formule de passage s'obtient par des considérations trigonométriques simples :

$$tg \frac{v}{2} = \sqrt{\frac{1+e}{1-e}}\ tg \frac{u}{2}$$

Pour achever le calcul, on doit donc calculer k = le terme de droite. Ensuite, on en prend l'arc tangente (fonction inverse sur les calculettes), puis on multiplie par 2.

Les formules ci-dessous permettront de calculer les valeurs que l'on désire connaître, comme le rayon vecteur ou la position cartésienne de la planète

**Formules utiles**

**Rayon vecteur** : r = SP = a (1 - e cos u)

**Coordonnées** : si le centre des coordonnées est au foyer de l'ellipse, on a :

SH = x = a (cos u - e)

HP = y = a sqrt(1 - $e^2$) sin u

**Distance périhélique** : c'est la distance q entre le foyer S et le périhélie (périastre). Un coup d'œil sur la figure montre que q = a - c. Puisque e = c / a, q = a - a e = a (1 - e).

**Distance aphélique** : c'est la distance Q entre le foyer S et l'aphélie (périastre). La figure montre que Q = c + a. Puisque e = c / a, Q = a e + a = a (1 + e).

$$q = a\,(1 - e)$$
$$Q = a\,(1 + e)$$

La variation de distance au Soleil, entre le périhélie et l'aphélie, est donc Q - q = a (1 + e) - a (1 - e) = 2 a e. La variation relative est donc (Q - q) / a = 2 a e / a = 2 e. Pour une planète d'excentricité e = 0,02 (la Terre), la variation relative est de 0,04, soit 4 %. On voit clairement qu'une si petite variation de distance au Soleil ne peut pas expliquer les saisons…

**Vitesse orbitale**

Les variations de vitesse entre le périastre et l'apoastre découlent de la conservation de l'énergie. Nous ne donnerons que le résultat. La vitesse de la planète, lorsqu'elle se trouve à la distance r du Soleil, vaut :

$$v^2 = G\,(M + m)\,(2 / r - 1 / a)$$

Si on néglige la masse de la planète, on obtient la formule approchée : $v^2 = G\,M\,(2 / r - 1 / a)$

On peut en déduire immédiatement les vitesses périhélique et aphélique. Il suffit de remplacer r par les valeurs q et Q correspondantes.

Périhélie : $v_p^2 = G\,M\,(2 / q - 1 / a) = G\,M\,(2 /( a\,(1 - e)) - 1 / a) = (G\,M / a)\,(2 /(1 - e) - 1) = (G\,M / a) \times (1 + e) /(1 - e)$

Aphélie : $v_a^2 = G\,M\,(2 / Q - 1 / a) = G\,M\,(2 /( a\,(1 + e)) - 1 / a) = (G\,M / a)\,(2 /(1 + e) - 1) = (G\,M / a) \times (1 - e) /(1 + e)$

$$v_p^2 = (G\,M / a) \times (1 + e) /(1 - e)$$
$$v_a^2 = (G\,M / a) \times (1 - e) /(1 + e)$$

**Période orbitale**

C'est la durée de l'année, pour une planète. Temps mis pour effectuer une orbite complète. Nous la donnons sans démonstration :

$T = 2\,\pi\,\mathrm{sqrt}(a^3 / G\,M)$

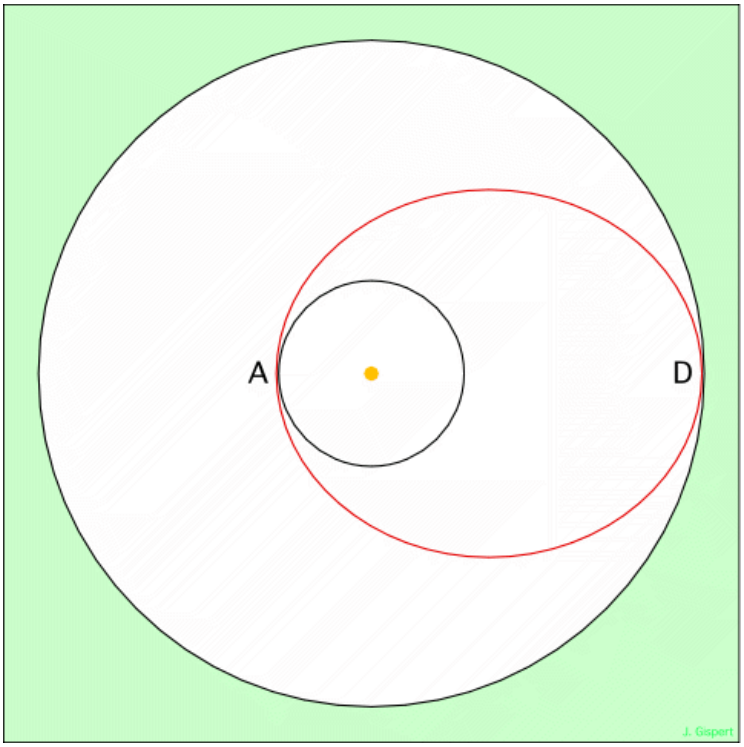
où G est toujours la constante de la gravitation universelle, et a le demi grand axe de l'orbite. Cette formule est la même approximation que précédemment, elle est valable lorsque la masse de la planète est négligeable devant celle du Soleil.

Explications : élevons-la au carré. On obtient $T^2 = 4\,\pi^2\,a^3 / G^2\,M^2$.

Ce n'est pas sans nous rappeller la loi harmonique de Kepler ! C'est bien elle en effet qui nous donne la période, connaissant le demi grand axe et la masse du Soleil. Cette dernière est au dénominateur, donc plus elle est grande, plus courte est la période. C'est bien normal, pour contrabalancer une attraction plus forte, il faut une plus grande vitesse…

## *Orbite de transfert de Hohmann*

Pour envoyer une sonde depuis la Terre vers une planète, de nombreuses trajectoires sont possibles, qui diffèrent par le temps de parcours, et la quantité de carburant nécessaire. La trajectoire la plus économique est la trajectoire de Hohmann, qui est tangente aux orbites de départ et d'arrivée. C'est celle qui minimise la différence de vitesse entre la cible (planète visée) et la sonde à l'arrivée. Elle minimise de façon symétrique la différence de vitesse au départ.




Pour simplifier un peu le problème, on considère seulement des orbites circulaires pour les deux planètes. L'aphélie de l'orbite cherchée est au niveau de l'orbite de départ, disons à la distance R du Soleil. A l'arrivée, le périhélie est au niveau de la planète cible, soit r. On a donc, q et Q dénotant les distances périhélique et aphélique de l'orbite de Hohmann : Q = R, q = r. Donc Q = a (1 + e) = R et q = a (1 - e) = r.

On tire la valeur de a des deux équations : a = R / (1 + e) ; a = r / (1 - e)

En égalant les deux valeurs de a : R / (1 + e) = r / (1 - e), d'où R (1 - e) = r (1 + e)

Effectuant : R - R e = r + r e

Regroupant les termes en e : R - r = R e + r e = e (R + r)

D'où : e = (R - r) / (R + r)

Il est plus facile encore de calculer le demi grand axe de l'orbite de Hohmann. En regardant la figure, on voit que le grand axe est tout simplement la distance entre A et D. AD = AS + SD = r + R. Le demi grand axe est la moitié de cette distance. L'ellipse de Hohmann de ce transfert est donc définie par :

$$e = (R - r) / (R + r)$$

$$a = (R + r) / 2$$

**Application au lancement de Messenger**

Le départ est la Terre, l'arrivée Mercure. Les calculs ci-dessus concernent une sonde déjà placée sur l'orbite de la Terre. Ils ne tiennent pas compte du départ du sol de la Terre pour atteindre cette orbite (11,2 km $s^{-1}$). De même, la mise en orbite autour de la cible n'est pas considérée. Calculons la vitesse à donner à la sonde pour que, au départ de l'orbite terrestre, elle aille tangenter l'orbite de Mercure. L'orbite est donc l'orbite de Hohmann, où R = 150 $10^6$ km, et r = 58 $10^6$ km.

Le demi grand axe de l'orbite est a = (R + r) / 2 = (150 + 58) / 2 = **104 $10^6$ km**. L'excentricité est e = (R - r) / (R + r) = (150 - 58) / (150 + 58) = 92 / 208 = **0,442**.

Pour savoir s'il est possible de lancer une sonde, il faut déterminer le coût en carburant, donc la vitesse à impulser à la sonde. Calculons le terme commun aux deux vitesses : G M / a = 6,67 $10^{-11}$ $m^3$ $kg^{-1}$ $s^{-2}$ × 2 $10^{30}$ kg / 104 $10^9$ m = 0,128 $10^{10}$ $m^2$ $s^{-2}$

$v_a^2$ = (G M / a) × (1 - e) /(1 + e) = 0,128 $10^{10}$ $m^2$ $s^{-2}$ (1 - 0,442) / (1 + 0,442) = 0,0495 $10^{10}$ $m^2$ $s^{-2}$

Prenant la racine carrée $v_a$ = 0,223 $10^5$ m $s^{-1}$ = 0,223 $10^2$ km $s^{-1}$ = 22,3 km $s^{-1}$.

La sonde est animée de la vitesse orbitale de la Terre, soit 30 km $s^{-1}$, puisqu'elle est sur son orbite. Il faut donc la freiner de 30 - 22,3 = **7,7 km $s^{-1}$** pour l'expédier en direction de Mercure.

A l'arrivée, elle possède la vitesse périhélique, soit : $v_p^2$ = (G M / a) × (1 + e) /(1 - e) = 0,128 $10^{10}$ $m^2$ $s^{-2}$ (1 + 0,442) /(1 - 0,442) = 0,331 $10^{10}$ $m^2$ $s^{-2}$

Prenant la racine carrée $v_a$ = 0,575 $10^5$ m $s^{-1}$ = 0,575 $10^2$ km $s^{-1}$ = 57,5 km $s^{-1}$.

La sonde arrive à 57,5 km $s^{-1}$, alors que la vitesse orbitale de la planète n'est que de 47,9 km $s^{-1}$. Là encore, la sonde doit freiner pour éviter de retourner vers la Terre. Le freinage est de l'ordre de 57,5 - 47,9 = **9,5 km $s^{-1}$**. En totalisant les deux manœuvres, on arrive à un coût de 7,7 + 9,5 = **17,2 km $s^{-1}$** ! Il faut 1 fois et demi autant de carburant que pour quitter la Terre. Ajoutons à cela qu'il n'y a pas de station-service dans l'espace, et que ce carburant doit être emporté depuis la Terre. On comprend vite qu'il prend toute la place des instruments scientifiques…

**Durée du vol**

Ce point est important, étant donné que nous sommes toujours pressés ! Nous avons donné la période orbitale plus haut. Evidemment, pour aller de la Terre à Mercure (par exemple), la durée du voyage est la moitié de la période. Donc :

T = 2 π sqrt($a^3$ / G M) = 2 π sqrt((104 $10^9$)$^3$ $m^3$ / 6,67 $10^{-11}$ $kg^{-1}$ $m^3$ $s^{-2}$ 2 $10^{30}$ kg)

T = 2 π sqrt(1 124 864 $10^{27}$ $m^3$ / 6,67 $10^{-11}$ $kg^{-1}$ $m^3$ $s^{-2}$ 2 $10^{30}$ kg) = 2 π sqrt(84 322,64 $10^8$ $s^{-2}$) = 2 π × 290,4 $10^4$ s = 1 825 $10^4$ s = 304 166 mn = 5 069 h = 211 jours. Remarquez que c'est bien une durée intermédiaire entre les 365 jours de la Terre, et les 88 jours de Mercure.

La durée du vol est la moitié, soit 106 jours… 3 mois et demi. On peut aller rapidement sur Mercure, si on a les moyens d'y mettre le prix ! Comparez cette durée aux 7 ans et demi du voyage réel !…

**Discussion des autres trajectoires**

Si, au départ de la Terre, on communique à la sonde une vitesse moindre (freinage plus efficace, donc plus coûteux), il est facile de constater que la sonde plongera plus vite vers le centre du système solaire, et atteindra plus rapidement la cible. A l'arrivée, elle aura une vitesse plus grande que précédemment, et donc le freinage d'arrivée devra aussi être plus fort. Départ et arrivée sont donc plus coûteux… La trajectoire de Hohmann est bien la plus économique… pour un voyage direct !

Si nous envisageons au contraire, une vitesse plus grande que celle de Hohmann au départ, la sonde descendra moins vers le Soleil, et n'atteindra pas du tout la planète. Le but est raté. La trajectoire de Hohmann reste bien la meilleure dans ce sens-là. Mais imaginons qu'au lieu de faire deux manœuvres, une au départ et une à l'arrivée, on accepte d'en faire davantage, en fait de ne pas aller directement vers la cible. Comme si on pouvait se ravitailler en cours de route… L'idée semble saugrenue, mais elle ne l'est pas. Si on ne trouve pas de carburant à mettre dans les moteurs en cours de voyage, on peut tout de même trouver de l'énergie… gravitationnelle !

Nous pouvons refaire le calcul en remplaçant la cible Mercure par Vénus. Plus proche de la Terre, celle-ci nécessite bien sûr moins de dépenses pour y aller (les différences de vitesses sont moindres). Maintenant, si notre sonde arrive à proximité de Vénus, elle est prise dans le champ gravitationnel de cette planète. A condition d'arriver sous le bon angle, elle peut être déviée de telle sorte qu'elle aille vers Mercure. Si on calcule bien pour que la nouvelle orbite soit une trajectoire de Hohmann entre Vénus et Mercure, elle arrive à proximité de cette dernière avec une vitesse moindre que depuis la Terre, puisque Vénus en est moins éloignée. Le freinage à l'arrivée est moins violent, et là aussi, on économise du carburant.

Pour tout dire, les choses sont encore délicates, et pour arriver à une consommation acceptable, il faut encore un peu d'imagination. Par exemple, ne pas ambitionner de se mettre en orbite immédiatement. Pourquoi, en effet, ne pas utiliser également le champ gravitationnel de Mercure elle-même pour abaisser l'aphélie de la nouvelle orbite, afin que la sonde ne retourne pas vers Vénus, mais reste à proximité de l'orbite de Mercure, qu'elle pourra retrouver un peu plus tard (un tour de Soleil plus tard à peu près), avec une vitesse bien moindre, et donc un nouveau gain sur le carburant de freinage.

Cette technique se nomme *assistance gravitationnelle*. Elle est maintenant bien utilisée. Elle a le gros désavantage d'allonger considérablement la durée du voyage, mais elle est tellement plus économique… On peut remplacer le carburant par des instruments scientifiques, et lorsque la sonde est à l'œuvre, elle glane de bien plus amples renseignements avec ses instruments puissants, et lourds.

Le voyage de Messenger est décrit dans le chapitre consacré à Mercure.

## *Accès aux diverses planètes*

Les formules établies plus haut permettent de calculer les paramètres des trajectoires de Hohmann pour atteindre les diverses planètes. Les résultats sont instructifs pour évaluer nos chances d'explorer les planètes.

**Orbites de Hohmann de la Terre vers chacune des planètes**

| | Mercure | Vénus | Mars | Jupiter | Saturne | Uranus | Neptune | Pluton |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| a planète visée (UA) | 0,3871 | 0,7233 | 1,5237 | 5,2034 | 9,5371 | 19,1913 | 30,0690 | 39,4817 |
| vitesse orbitale | 47,87 | 35,02 | 24,9 | 13,07 | 13,07 | 13,07 | 13,07 | 13,07 |
| a Hohmann (UA) | 0,695 | 0,862 | 1,263 | 3,102 | 5,271 | 10,097 | 15,535 | 20,241 |
| e Hohmann | 0,4423 | 0,1628 | 0,2063 | 0,6767 | 0,8098 | 0,9007 | 0,9355 | 0,9505 |
| Vitesse aphélique (km/s) | 22,2 | 27,2 | 21,5 | 7,4 | 4,2 | 2,1 | 1,4 | 1,1 |
| Vitesse périhélique (km/s) | 57,4 | 37,8 | 32,7 | 38,5 | 40,0 | 41,0 | 41,4 | 41,5 |
| impulsion départ (km/s) | 7,79 | 2,79 | 2,66 | 8,51 | 10,01 | 11,00 | 11,37 | 11,53 |
| | | | | | | | | |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| impulsion arrivée (km/s) | 9,6 | 2,77 | 3,41 | 5,65 | 8,86 | 10,93 | 11,69 | 12,02 |
| impulsion totale (km/s) | 17,4 | 5,6 | 6,1 | 14,2 | 18,9 | 21,9 | 23,1 | 23,5 |
| T (années) | 0,580 | 0,801 | 1,420 | 5,464 | 12,103 | 32,091 | 61,242 | 91,081 |
| durée vol (années) | 0,290 | 0,400 | 0,710 | 2,732 | 6,052 | 16,045 | 30,621 | 45,541 |
| durée vol | 3 mois 1/2 | presque 5 mois | 8 mois 1/2 | 2 ans 9 mois | 6 ans | 16 ans | 30 ans | 45 ans |

La notation *a planète visée* indique le demi grand axe de la planète cible de la sonde. *a Hohmann* est le demi grand axe de l'orbite de la sonde. *e Hohmann* est l'excentricité de l'orbite de Hohmann. Les vitesses aphélique et périhélique sont celle de la sonde en ces points de l'obite de Hohmann. Si la planète visée est intérieure (Mercure ou Vénus), l'aphélie est au niveau de la Terre, le périhélie au niveau de la cible. Si la planète visée est supérieure, c'est le contraire, le départ est le périhélie et l'arrivée l'aphélie. *T* est la période de l'orbite de Hohmann.

Ce tableau est assez instructif. Remarquons d'abord que le voyage vers Vénus (presque 5 mois) est bien plus long que celui à destination de Mercure ! Ceci peut paraître bien paradoxal, mais s'explique parfaitement : la route vers Mercure tombe plus directement en direction du Soleil, et donc à plus grande vitesse (comparez les vitesses périhéliques des deux trajectoires : 20 km/s de plus à l'arrivée sur Mercure). De plus, le trajet est plus tendu, plus droit, et bien qu'il soit plus long, il l'est moins que ce que la différence de distance des deux planètes le laisserait supposer. Au bout du compte, la durée est plus courte. Un autre argument consiste à imaginer une planète cible qui serait très proche de l'orbite de la Terre. La trajectoire de Hohmann pour atteindre cette planète serait elle aussi très proche de l'orbite de la Terre, donc pour faire un demi-tour autour du Soleil, il lui faudrait presque six mois !

Mais le prix à payer pour atteindre Mercure est bien plus élevé que pour Vénus : l'impulsion totale à donner à la sonde (donc sa consommation de carburant) est de 17,5 km/s contre 5,6. Une sonde de même poids emporte donc beaucoup moins de carburant pour aller vers Vénus, et ce carburant peut être remplacé par des instruments scientifiques. Ceci explique sans doute que Vénus ait été très courtisée, contrairement à Mercure…

Si vous considérez Mars, vous voyez que le voyage dure 8 mois et demi. C'est effectivement le temps que mettent les sondes pour accomplir le trajet. On pourrait aller vers Mars plus rapidement, en accélérant davantage au départ, et en freinant davantage aussi à l'arrivée. Ce serait peut-être envisageable pour un équipage humain, afin de l'exposer moins longtemps aux conditions spatiales. Mais pour assurer sa survie, il faut un surcroît très important de matériel, qui alourdit le vaisseau… D'où l'idée de transporter par la trajectoire de Hohmann le matériel nécessaire à la vie sur Mars, et celui de retour, tandis que l'équipage est amené par un vaisseau léger sur une trajectoire plus tendue, plus rapide. On atteint le but au prix d'une complication très importante de la logistique.

Venons en aux planètes plus lointaines maintenant. Pour atteindre Jupiter, le voyage dure presque 3 ans et coûte 14,2 km/s, ceci sur la trajectoire directe la plus économique. C'est encore acceptable. Mais pour Saturne, 6 ans et 18,9 km/s deviennent vraiment difficiles à supporter. Aussi, il ne faut pas s'étonner si les sondes à destination de Saturne font un petit tour du côté de Jupiter, pour profiter de son assistance.

Pour atteindre Pluton, il faut patienter pendant 45 ans avant l'arrivée de la sonde. Quels sont les jeunes chercheurs qui travailleront sur une sonde, dont les premiers résultats seront disponibles lorsqu'ils seront à la retraite ? C'est difficilement envisageable. D'autant plus que rien ne garantit la survie de la sonde pendant une telle durée dans l'espace. L'assistance gravitationnelle s'impose donc. Dans ce cas, elle permet d'utiliser, grâce à l'énergie prélevée aux planètes, une trajectoire plus tendue, et finalement plus rapide !

La sonde *Dawn*, à destination de Vesta (dans la Ceinture Principale des astéroïdes) a utilisé l'assistance gravitationnelle de Mars. Elle s'est mise en orbite autour de Vesta.

*New Horizons*, en route vers Pluton, a profité de l'aide de Jupiter. Dans ce dernier cas, il ne s'agit que d'un simple survol, et l'énergie de freinage à l'arrivée est évitée. Sans assitance gravitationnelle, ce serait seulement une impulsion de 11,53 km/s qu'il faudrait communiquer à la sonde au départ. L'assitance de Jupiter permet de réduire encore ce coût.

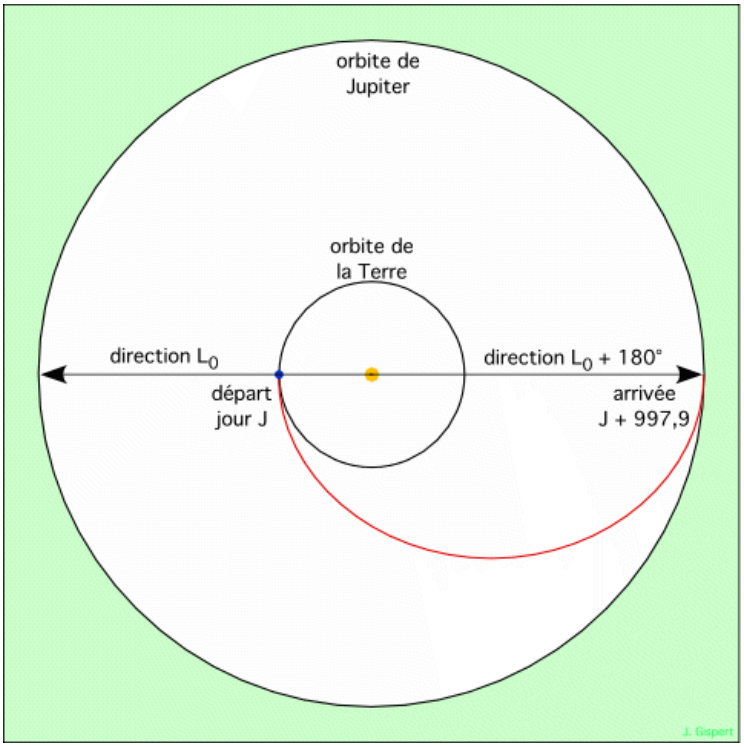
**Fenêtre de lancement**

Considérons le lancement d'une sonde vers Jupiter. A quelle date doit-on la lancer pour qu'elle soit au rendez-vous avec la planète ?

On suppose que les orbites des planètes sont des cercles, ce qui est acceptable pour une approximation, et simplifie le calcul des positions.

**Données du problème** :

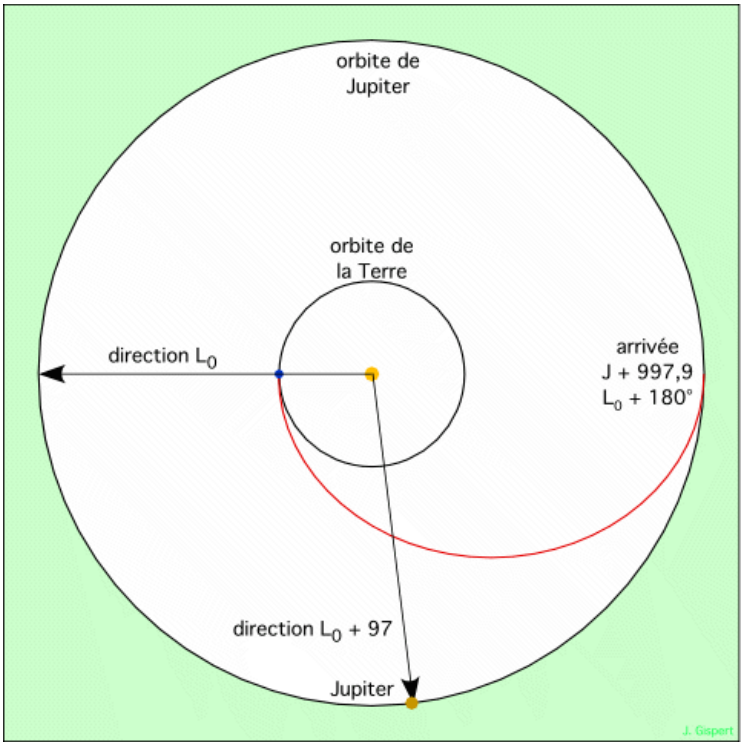
- Dans le tableau ci-dessus, nous voyons que la durée du vol vers Jupiter (notée d) est de 2,732 ans. Transformons cette valeur en jours : d = 2,732 × 365,25 = **997,9 jours**.
- Jupiter fait un tour complet autour du Soleil (360°) en 11 ans 312,85 jours (voir la fiche) soit 11 × 365,25 + 312,85 jours = **4.330,6 jours**. Par conséquent, Jupiter se déplace sur son orbite à la vitesse angulaire $\omega_J$ = 360° / 4.330,6 jours = 0,0831 °/jour.
- Pareillement, la Terre met 365,25 jours pour accomplir un tour complet autour du Soleil. Donc elle parcourt $\omega_T$ = 360° / 365,25 jours = 0,986 °/jour.




Au jour J du lancement, la Terre et Jupiter se trouvent quelque part sur leur orbite. La position de la Terre est repérée par sa longitude $L_0$. C'est aussi la position de la sonde au lancement. Lorsque la sonde arrive au rendez-vous, 997,9 jours plus tard, elle se trouve exactement de l'autre côté du Soleil, puisqu'elle a parcouru la moitié de l'orbite de Hohmann. Donc, le jour J + 997,9 la sonde se trouve à la longitude $L_0$ + 180°.

Pour que le rendez-vous se réalise, il faut que Jupiter soit là également. Donc, Jupiter doit se trouver à la longitude $L_0$ + 180° le jour J + 997,9.

Jupiter se déplaçant à raison de $\omega_J$ = 0,0831 °/jour pendant 997,9 jours il parcourt 0,0831 °/jour × 997,9 jours = 82,9°. Le jour du lancement, Jupiter est donc à 82,9° du lieu de rendez-vous. Sa longitude est donc $L_0$ + 180° - 82,9° = $L_0$ + 97,1°. **Jupiter est en avance de 97,1° par rapport à la Terre**. C'est la condition que doivent satisfaire les orbites pour que le rendez-vous soit réalisé. Le jour du lancement, les directions de la Terre et de Jupiter sont pratiquement perpendiculaires vues du Soleil :




Ce schéma montre les positions de la Terre et de Jupiter le jour du lancement. Planètes et sonde tournent dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.

Il ne reste qu'à déterminer la date de lancement. Pour cela, il faut savoir où se trouvent les planètes à un instant donné. On peut choisir par exemple l'instant de l'opposition de Jupiter, qu'on trouve dans les éphémérides. A ce moment-là, la Terre, Jupiter et le Soleil sont alignés. Par conséquent, la longitude de Jupiter est égale à celle de la Terre (c'est d'ailleurs la définition même de l'opposition). Notons $l_{op}$ cette longitude.

A une date t comptée à partir de l'opposition, la Terre se trouve à la longitude $l_T = l_{op} + \omega_T \times t = l_{op}$ + 0,986 °/jour × t, et Jupiter se trouve à la

longitude $l_J = l_{op} + \omega_J \times t = l_{op} + 0{,}0831$ °/jour × t.

Pour que le rendez-vous se réalise, il faut que Jupiter soit en avance de 97,1° sur la Terre, donc que $l_{op} + 0{,}0831$ °/jour × t = $l_{op} + 0{,}986$ °/jour × t + 97,1°. $l_{op}$ se simplifie, et il reste 0,0831 °/jour × t = 0,986 °/jour × t + 97,1°. On en tire (0,0831 °/jour - 0,986 °/jour) × t = 97,1° et enfin t = 97,1° / (0,0831 °/jour - 0,986 °/jour) = -107,5 jours. Le signe - indique que cette position est 107,5 jours **avant** l'opposition. Ce résultat est évident, puisque Jupiter va moins vite que la Terre, c'est elle qui l'a rattrapé !

L'approximation faite en considérant les orbites circulaires donne un résultat approché. Il est assez facile de l'affiner pour obtenir une date de lancement exacte, que nous allons considérer par la suite.

Si on s'en tient à cette valeur, on devrait lancer la sonde précisément ce jour-là. De multiples problèmes peuvent survenir, par exemple un orage sur le pas de tir. Et le lancement peut être retardé de quelques jours. Si c'est le cas, on ne pourra pas utiliser exactement la trajectoire de Hohmann, et le coût sera plus élevé. La fenêtre de tir est donc la période, autour de cette date, pendant laquelle les réserves de carburant permettent le tir sur une trajectoire un peu plus coûteuse.

**Exemple**

En 1977, l'opposition de Jupiter a eu lieu le 23 décembre, le 357$^e$ jour de l'année. Une fenêtre de tir était donc centrée sur le 357 - 107$^e$ jour de l'année, soit le 250 $^e$ jour de l'année, c'est-à-dire le 7 septembre. Or les deux sondes Voyager ont été lancées les 20 août (Voyager 2) et 5 septembre (Voyager 1), c'est-à-dire 17 jours et 2 jours avant la date calculée respectivement. Cette différence est assez faible pour être compensée par une dépense de carburant un peu plus importante. Mais si ce lancement est celui qui illustre le mieux notre propos, il est toutefois entaché d'un biais, car le but n'était pas de viser Jupiter seul, mais de poursuivre vers Saturne ensuite. Et donc, la position de Saturne jouait un peu dans le choix de la date, en modifiant légèrement l'angle d'arrivée des sondes au niveau de Jupiter.

Le lancement de la sonde Galileo, qui partait elle aussi pour Jupiter, ne peut être considéré, puisqu'elle a largement utilisé l'assistance gravitationnelle (deux fois sur la Terre, puis une fois sur Vénus).

**Calcul général**

En généralisant l'exemple ci-dessus, on obtient facilement les équations du problème pour toute planète supérieure. Les données sont :

- J le jour du lancement ;
- d la durée du vol ;
- $\omega_T$ la vitesse angulaire de la Terre ;
- $\omega_P$ la vitesse angulaire de la planète visée ;
- $l_0$ la longitude de la Terre le jour J.

La date d'arrivée de la sonde est $d_a = J + d$. Ce jour-là, la longitude de la planète est $l_0 + 180°$. Le jour J, elle était donc $l_0 + 180° - \omega_P$ d.

La différence de longitude le jour J entre la planète et la Terre est $\Delta_{PT} = (l_0 + 180° - \omega_P d) - l_0 = 180° - \omega_P d$.

Les éphémérides donnent la longitude des planètes. Il faut déterminer quel jour cette relation est satisfaite. Mais on peut le trouver bien plus rapidement par rapport à l'opposition, comme plus haut.

Soit $l_{op}$ la longitude de l'opposition (longitude commune à la Terre et la planète). Considérons un jour j inconnu. Ce jour-là, la longitude de la Terre est $l_{op} + \omega_T$ j, et celle de la planète est $l_{op} + \omega_P$ j.

La différence de longitude est $\Delta,_{PT} = l_{op} + \omega_P$ j - $l_{op} - \omega_T$ j = $\omega_P$ j - $\omega_T$ j = ($\omega_P - \omega_T$) j. Cette différence doit satisfaire la condition ci-dessus : ($\omega_P - \omega_T$) j = 180° - $\omega_P$ d. De là on tire immédiatement :

$$j = (180° - \omega_P d) / (\omega_P - \omega_T)$$

La valeur obtenue est le nombre de jours entre la date de lancement et celle de l'opposition. La date de l'opposition étant indiquée dans les éphémérides, le problème est résolu.

Nous avons précisé que la solution convenait pour une planète supérieure (l'exemple pris étant Jupiter). Mais où est la limitation pour l'appliquer à une planète inférieure ? Uniquement dans l'utilisation de l'opposition, qui n'existe pas pour une planète inférieure. Mais l'opposition étant caractérisée par l'alignement des deux planètes avec le Soleil (longitudes égales), ceci à lieu également pour une planète inférieure, le seul changement étant le point d'observation. La Terre n'est plus à l'intérieur, mais à l'extérieur. Ce point particulier se nomme conjonction inférieure. Il suffit donc de considérer que l'opposition pour une planète supérieure est remplacée par la conjonction inférieure pour une planète inférieure.

**Sphère d'influence**

On appelle *sphère d'influence* la sphère, centrée sur une planète, à l'intérieur de laquelle une sonde (de masse négligeable) ressent plus fortement l'attraction de la planète que celle du Soleil. A l'intérieur de cette sphère, une sonde est donc sur une orbite centrée sur la planète. Les satellites (naturels ou artificiels) sont à l'intérieur. Si une sonde arrive à proximité d'une planète, avec une vitesse supérieure à la vitesse d'évasion de la planète, elle sera soumise à l'influence de la planète, mais lui échappera malgré tout. Sa trajectoire autour du Soleil en sera modifiée. C'est le principe de l'assistance gravitationnelle.

Il est très facile de définir cette sphère. La force attractive que la sonde ressent du Soleil est $F_s = G M_s m / d_s^2$, où $d_s$ est la distance de la sonde

au Soleil (G constante de la Gravitation Universelle, $M_s$ masse du Soleil, m masse de la sonde). Celle qu'elle ressent de la planète est $F_p = G M_p m / d_p^2$, où $d_p$ est la distance à la planète, et $M_p$ la masse de la planète. La planète domine à l'intérieur de la sphère où $F_p \geq F_s$, c'est-à-dire où $G M_p m / d_p^2 \geq G M_s m / d_s^2$.

La limite (égalité) défini la surface de la sphère d'influence. Elle est telle que $M_p / d_p^2 = M_s / d_s^2$.

On en tire : $d_p^2 = (M_p / M_s) d_s^2$, et $d_p = d_s \, \mathrm{sqrt}(M_p / M_s)$.

Attention, ce calcul ne tient pas compte de la force centrifuge produite par le mouvement de la sonde autour du Soleil et de la planète. Cette force revient à diminuer l'attraction ressentie. Le résultat correct est $d_p = d_s \, \mathrm{sqrt}(M_p / M_s)^{2/5}$.

**Assistance gravitationnelle simple**

Reprenons le voyage vers Mercure. Nous avons vu que le vol direct était très coûteux, et nous envisageons maintenant une assistance gravitationnelle de Vénus. Pour cela, on décompose le voyage entre une trajectoire de Hohmann Terre-Vénus d'abord, puis Vénus-Mercure. On donne à la sonde une impulsion pour aller vers Vénus, là on utilise l'assistance gravitationnelle de Vénus pour expédier la sonde vers Mercure, et enfin on donne l'impulsion de freinage au niveau de Mercure. Les deux arcs de Hohmann se raccordent parfaitement, puisque l'arrivée comme le départ de Vénus se font tangentiellement. Les vitesses d'arrivée et de départ au niveau de Vénus sont donc parallèles. Par conséquent, on peut ne tenir compte que de leur module dans le calcul des impulsions.

Le premier segment de ce voyage a été calculé plus haut. Pour la seconde partie, on refait les mêmes calculs, mais en remplaçant les données de la Terre par celle de Vénus. Le demi grand axe est a = (108 + 58) / 2 = 83 millions de km. L'excentricité est e = (R - r) / (R + r) = (108 - 58) / (108 + 58) = 50 / 166 = 0,301. Les vitesses aphélique et périhélique se calculent de la même manière que précédement. Le terme GM / a utilise le demi grand axe de l'orbite de Hohmann. On obtient $v_a$ = 29,3 km/s et $v_p$ = 54,6 km/s.

La sonde arrive vers Vénus à 37,8 km/s (vitesse périhélique de la trajectoire de Hohmann Terre-Vénus, prise dans le tableau). Elle doit en repartir à 29,3 km/s dans la même direction tangentielle. L'impulsion à donner à la sonde est donc un freinage de 37,8 - 29,3 = 8,5 km/s. Elle est prise à la planète par assistance gravitationnelle. Il faut donc calculer précisément l'approche de la sonde (faire de petites corrections de trajectoire) pour que son interaction lui donne exactement cette impulsion. Nous ne calculerons pas ici les détails de cette approche.

La sonde est maintenant en route pour Mercure, où elle arrivera tangentiellement à la vitesse périhélique de sa trajectoire. Cette vitesse est de 54,6 km/s. Mercure se déplaçant à 47,9 km/s, l'impulsion à donner est un freinage de 54,6 km/s - 47,9 km/s = 6,7 km/s.

Le coût total du voyage est maintenant de 2,79 km/s (départ de la Terre, voir tableau) + 6,7 km/s (arrivée sur l'orbite de Mercure) = 2,79 + 6,7 = 9,3 km/s. Par rapport aux 17,4 km/s du voyage direct, ce sont 17,4 - 9,3 = 8,1 km/s. Le gain est appréciable ! Mais il se paye par une durée accrue. De la Terre à Vénus, il faut 146,3 jours (voir tableau), et de Vénus à Mercure 75,7 jours. Donc un total de 146,3 + 75,7 = 222 jours au lieu de 106 jours. Le voyage est deux fois plus long…

Ceci est une explication qualitative du problème. Aucun calcul n'a été fait au niveau de Vénus, car cette approche complique la situation. En effet, soumise à l'attraction de Vénus, la sonde voit sa trajectoire s'incurver. Elle ne reste donc pas tangentielle comme elle était arrivée. Aussi, faut-il tenir compte de la variation d'angle à la fois pour déterminer le segment Terre-Vénus, que pour le segment Vénus-Mercure. Les deux trajectoires ; ne sont donc plus des trajectoires de Hohmann pures.

## *Utilisation d'un tableur*

Si vous voulez faire des calculs, vous pouvez très simplement utiliser un tableur.

**Résolution de l'équation de Kepler**

Présentez les calculs comme suit :

A gauche, les formules à taper ; à droite, le résultat visible dans le tableur

| | A | B |
|---|---|---|
| 1 | e | 0,1 |
| 2 | M | 0,04 |
| 3 | t | 30 |
| 4 | m | =B2*B3 |
| 5 | u0 | =B4/(1-B1) |
| 6 | u1 | =B$1*sin(B5)+B$4 |
| 7 | u2 | =B$1*sin(B6)+B$4 |
| 8 | u3 | =B$1*sin(B7)+B$4 |
| 9 | | |
| 10 | u3 - e sin u3 | =B8-B$1*sin(B8) |

| | A | B |
|---|---|---|
| 1 | e | 0,1 |
| 2 | M | 0,04 |
| 3 | t | 30 |
| 4 | m | 1,2 |
| 5 | u0 | 1,333333333 |
| 6 | u1 | 1,29719379 |
| 7 | u2 | 1,296280373 |
| 8 | u3 | 1,296255653 |
| 9 | | |
| 10 | u3 - e sin u3 | 1,20000067 |

Les données e, M et t ont été placées dans les cellules B1, B2 et B3 respectivement. A la ligne 4 vous trouvez le calcul de l'anomalie moyenne m = M t. A la ligne 5, c'est la valeur initiale u0 de l'itération. Les trois lignes suivante effectuent l'itération.

Enfin, après une ligne vide pour séparer le calcul, vous trouvez en ligne 10 la vérification : on calcule u - e sin u en utilisant le résultat u3 obtenu dans la cellule B8, et vous pouvez le comparer avec la valeur de m. Vous constaterez que les deux valeurs 1,2 et 1,20000067 sont égales, à 7 $10^{-7}$ près en seulement trois itérations.

Si vous voulez calculer l'anomalie vraie, ajoutez deux lignes :

| | | |
|---|---|---|
| 11 | k | =racine(1+B1)/(1-B1))*tan(B8) |
| 12 | v | =2*atan(B11) |

| | | |
|---|---|---|
| 11 | k | 3,92519316116114 |
| 12 | v | 2,64267689886839 |

Vous pourrez utiliser cette méthode (un tableur) pour faire de nombreux calculs, comme par exemple éditer un calendrier.

**Problème des N corps**

Dans la réalité, on n'observe jamais deux corps isolés. Il y a toujours d'autres objets massifs qui participent aux forces d'attraction, et qui compliquent un petit peu la situation : ce cas d'école ne se réalise pas. En fait, le problème se traduit, mathématiquement, par un système d'équations différentielles (équations qui gouvernent la façon dont les diverses variables évoluent d'un point à un point voisin). Ce système est du douzième ordre, ce qui signifie qu'il faudrait 12 étapes successives pour en atteindre la solution. On passe facilement (!?) au huitième ordre. On démontre qu'il est possible de monter jusqu'au sixième… et pas plus loin ! Il est impossible de trouver des formules qui donnent les positions et vitesses des objets en cause. On dit que le problème n'a pas de *solution analytique*. Et ceci dès qu'il y a trois corps.

Seul le problème képlérien admet une solution analytique : les formules données plus haut. Et puisque ce problème n'est pas réaliste, que faire ?

**Perturbations**

Ce que nous avons dit n'est pas pour autant à jeter sans autre forme de procès ; le problème képlérien peut donner une approximation, si on peut s'en contenter. Mais il sert aussi à comprendre les problèmes, avant d'en apporter une solution numérique.

Nous avons envisagé le problème des N corps général. Ne pourrait-on pas le simplifier ? Intuitivement, que se passerait-il si on cherchait le mouvement d'une poussière placée quelque part dans un univers ne contenant par ailleurs que le Soleil et la Terre ? Ce n'est pas cette poussière qui risquerait de beaucoup perturber le Soleil, ni même la Terre. En fait, sa masse est totalement négligeable. On peut imaginer que Soleil et Terre se conduiraient comme si la poussière n'était pas là, et par conséquent, comme s'il n'y avait que deux corps. Ce serait un mouvement képlérien pur. Nous connaissons donc le mouvement des deux corps principaux, il n'y a plus qu'a déterminer celui de la poussière soumise aux deux. Et on montre que le problème, dans ce cas simplifié, a effectivement une solution.

Un autre cas peut être intéressant. Imaginez un couple d'étoiles proches l'une de l'autre, et une troisième étoile qui orbite loin des deux premières. Vu de cette dernière, on comprend que les deux étoiles ne sont guère distinguables, et que le champ de gravité qu'elles produisent de si loin est à peu près le même que si elles étaient mêlées. On est encore ramené à deux corps.

Dans le système solaire, on peut remarquer que les choses ne sont pas quelconques :

- les forces non gravitationnelles sont négligeables (les planètes se déplacent dans le vide sans friction, la pression de radiation est négligeable, le champ magnétique n'a pas d'action…) ;
- tous les corps (sauf les petits astéroïdes) sont sphériques, et peuvent être assimilés à des points matériels ;
- pour chaque corps, il existe un corps largement prépondérant, auprès duquel les autres sont négligeables en première approximation, soit parce qu'il est très massif, soit parce qu'il est très proche.

Il y a une explication à cela : si ces conditions ne sont pas vérifiées, le système est instable, donc il ne peut durer très longtemps. Alors, ce qu'il reste après un temps long, est ce qui est stable, c'est-à-dire qui respecte les propriétés ci-dessus.

**Système solaire**

Considérons d'abord le mouvement de la Terre autour du Soleil. Le Soleil est de loin le corps principal. En effet :

La masse de Jupiter est à peu près le millième de la masse du Soleil. Et en plus, même au plus près, Jupiter est quelques 5 fois plus loin que le Soleil. L'accélération ressentie par la Terre d'un de ces objets est :$\gamma = G\,M / d^2$

où G est la constante de la gravitation universelle, M la masse de l'objet, et d sa distance à la Terre.

Si on fait le rapport R de l'accélération due à Jupiter sur celle due au Soleil, on obtient :

$$R = G\,M_J / d_J^2 \times d^2 / G\,M$$

En simplifiant : $R = M_J / M \times (d / d_J)^2$

$M_J / M = 10^{-3}$ ; $d / d_J = 150 / 630 = 0{,}24$ (630 est la distance minimum Terre-Jupiter)

En remplaçant on trouve : $R = 0{,}24^2\ 10^{-3} = 0{,}057\ 10^{-3} = 5{,}7\ 10^{-5}$ soit **moins d'un dix-millième**.

On voit donc que, pour ce problème, la contribution de Jupiter est petite, **sans être négligeable à long terme**. On peut donc envisager de traiter le problème comme si Jupiter n'existait pas, pendant un temps bref. Mais ensuite, il faut changer légèrement l'orbite pour tenir compte de l'action de la planète géante.

Pour résoudre le mouvement d'une planète autour du Soleil, en tenant compte de l'action faible de Jupiter (et des autres planètes), on peut considérer que pendant un temps bref, la seule force à considérer est celle du Soleil. C'est la force prépondérante. Ceci permet évidemment de déterminer où sera la planète au bout de ce temps. Là, on ajoute à l'attraction du Soleil celle de l'astre perturbateur, ce qui modifie très légèrement position et vitesse de la planète. Les méthodes basées sur ce principe sont nommées *méthode des perturbations*. Elles se déclinent en deux variantes :

- **perturbations spéciales** c'est l'utilisation directe de la loi de Newton. On détermine la force totale exercée sur la planète à la fois par le Soleil et par l'astre perturbateur. Partant d'un point connu de l'orbite, on détermine le point suivant, atteint dans un temps assez bref pour considérer que la planète se déplace en ligne droite pendant ce temps. Et là, on recalcule la force subie et on recommence… C'est une méthode d'intégration numérique ;
- **perturbations générales** on peut aussi considérer que, puisque la force exercée par le Soleil est prépondérante, la planète se déplace, pendant un temps bref, sur une orbite képlérienne. A l'aide de cette orbite, on détermine où sera la planète et quelle sera sa vitesse un bref instant plus tard. Là, tenant compte de la force perturbatrice, on modifie légèrement la vitesse de la planète, ce qui change un peu l'orbite. On utilise cette nouvelle orbite pour calculer où sera la planète à l'instant suivant.

Précisément, les perturbations spéciales sont de gros calculs, dont les ordinateurs modernes sont parfaitement capables. Les perturbations générales sont plus mathématiques. Elles consistent à remplacer l'orbite képlérienne rigide, dont les éléments (demi grand axe, excentricité) sont des constantes, par une orbite souple dont ces mêmes éléments varient au cours du temps. On appelle cette orbite *orbite osculatrice*, et ses éléments sont les *éléments osculateurs*.

**Exemple d'intégration numérique**

L'exemple ci-dessous est naïf, au sens où nous allons faire un calcul direct, tiré de la loi de Newton. A chaque pas, des erreurs de calcul sont faites, qui se propagent et s'amplifient. On ne peut donc pas poursuivre bien loin le calcul. Mais il est facile à comprendre, et on peut imaginer faire les calculs avec des méthodes plus difficiles à saisir (méthode de Runge-Kutta par exemple), mais plus efficace. Il ne sert donc qu'à comprendre l'idée de base, et non à obtenir un résultat.

La loi de la gravitation universelle s'écrit sous forme vectorielle pour mettre en évidence les composantes :

$$\vec{\gamma} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = -\frac{GM}{r^3}\vec{r}$$

Cette formule se traduit par deux formules (on est dans un plan), une pour chaque composante :

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{GM}{r^3}x \qquad et \qquad \frac{d^2y}{dt^2} = -\frac{GM}{r^3}y$$

La distance r entre la planète et le Soleil s'obtient, d'après les coordonnées cartésiennes, par application du théorème de Pythagore :

$$r = \sqrt{x^2+y^2} \qquad r^3 = (x^2+y^2)^{\frac{3}{2}}$$

Reportant cette valeur dans l'expression des composantes de l'accélération, on obtient :

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{GM}{(x^2+y^2)^{\frac{3}{2}}}x \qquad et \qquad \frac{d^2y}{dt^2} = -\frac{GM}{(x^2+y^2)^{\frac{3}{2}}}y$$

L'accélération est la dérivée de la vitesse par rapport au temps :

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{dv_x}{dt} \qquad et \qquad \frac{d^2y}{dt^2} = \frac{dv_y}{dt}$$

Donc :

$$\frac{dv_x}{dt} = -\frac{GM}{(x^2+y^2)^{\frac{3}{2}}}x \qquad et \qquad \frac{dv_y}{dt} = -\frac{GM}{(x^2+y^2)^{\frac{3}{2}}}y$$

Multipliant les deux termes par dt, on obtient :

$$dv_x = -\frac{GM}{(x^2+y^2)^{\frac{3}{2}}}x\,dt \qquad et \qquad dv_y = -\frac{GM}{(x^2+y^2)^{\frac{3}{2}}}y\,dt$$

Le calcul est terminé. Les deux composantes ont la même forme ; on définit k par :

$$k = -\frac{GM}{(x^2+y^2)^{\frac{3}{2}}}$$

Avec cette définition, nous avons maintenant :

$$dv_x = k\,x\,dt \qquad et \qquad dv_y = k\,y\,dt$$

Le calcul se fait donc en commençant par évaluer k selon la formule de définition ci-dessus. Bien évidemment, x et y dans cette expression changent à chaque étape ! Une fois k connue, on détermine $dv_x$ et $dv_y$, quantités qui représentent les petites variations des composantes de la

vitesse dans l'intervalle de temps dt. La nouvelle vitesse est l'ancienne, augmentée de cette valeur, et ceci se fait donc composante par composante : la nouvelle $v_x$ est la somme de l'ancienne, et de $dv_x$. Idem pour y.

Une fois la vitesse connue, le déplacement pendant le temps dt est le produit de cette vitesse par dt. Et la nouvelle position s'obtient en ajoutant ce déplacement à l'ancienne.

Nous avons maintenant tous les éléments pour faire le calcul pas à pas, dans l'ordre donné ci-dessus.

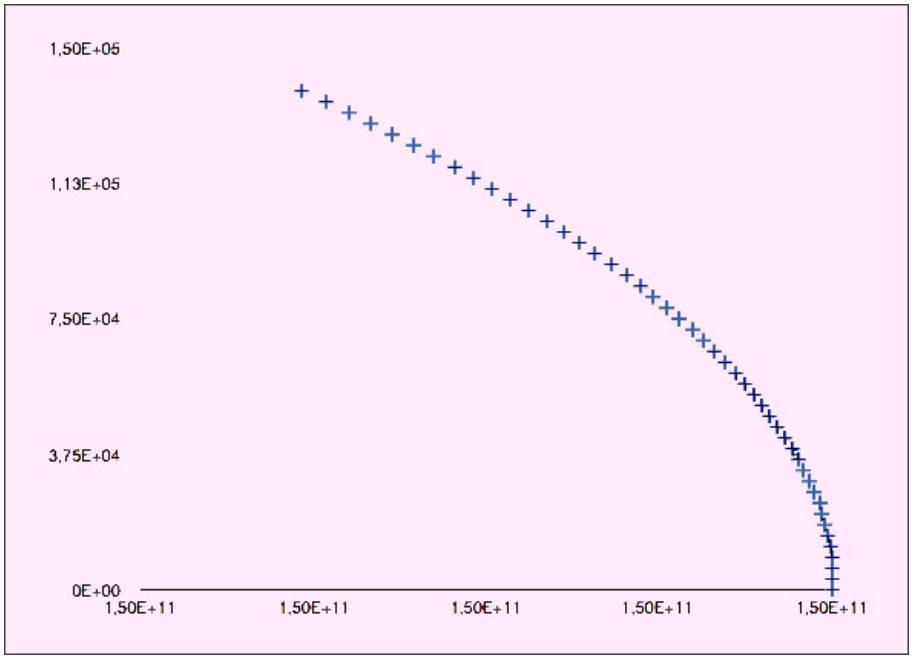
Dans la première ligne, on indique ce qui est en-dessous : G est la constante de la gravitation universelle, et sa valeur est placée en A2 ; M est la masse du Soleil, en kilogrammes ; dt est l'intervalle de temps qui définit un pas du calcul.

A la ligne 2, on trouve les valeurs référencées au-dessus. La ligne 3 reste vide pour séparer visuellement.

A la ligne 4, on indique les titres des colonnes : x pour la première, signifiant que les valeurs successives de x seront placées au-dessous, en colonne. On note les deux coordonnées x et y, puis les deux composantes de la vitesse $v_x$ et $v_y$, et enfin un coefficient k qui exprime la loi de la gravitation :
$k = - G M / r^2$ ; mais $r = \mathrm{sqrt}(x^2 + y^2)$ ; donc

| | A | B | C | D | E |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | G | M | dt | | |
| 2 | 6,67E-11 | 2E30 | 0,1 | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | x | y | $v_x$ | $v_y$ | k |
| 5 | 1,5E11 | 0 | 0 | 30000 | =-A$2*B$2*C$2/(A5*A5+B5*B5)^1,5 |
| 6 | =A5+C5*C$2 | =B5+D5*C$2 | =C5+E5*A5*C$2 | =D5+E5*B5*C$2 | =-A$2*B$2*C$2/(A6*A6+B6*B6)^1,5 |

Il reste à recopier la dernière ligne vers le bas, autant de fois que vous voudrez d'itérations.




Graphique produit d'après ce tableau, par le tableur *Numbers* (Apple)

La méthode utilisée est bien trop grossière pour donner de bons résultats sur une grande durée. Si vous voulez faire mieux, il faudra utiliser des méthodes d'intégration numérique, comme par exemple les méthodes de Runge-Kutta. Le but de cet exercice était de montrer le principe de l'intégration numérique.

---=OO=---




# Observation visuelle

Nous ne considérerons ici que les instruments qui apportent un grossissement de l'image, excluant tous les instruments d'observation à l'œil nu utilisés de l'Antiquité jusqu'à Tycho Brahé.

Les instruments d'optique jouent deux rôles différents :

- **ils collectent la lumière ;**
- **ils améliorent la finesse des images.**

Notre œil collecte la lumière par une pupille dont le diamètre, dans l'obscurité, est de l'ordre de 6 mm. Il nous permet de voir les astres brillants. Si on utilise un instrument de diamètre 60 mm (une paire de jumelles), de diamètre 10 fois supérieur, il présente une surface $10^2 = 100$ fois plus grande. Donc, il collecte 100 fois plus de lumière, en provenance du même astre. Ceci fait gagner 5 magnitudes ! Dans un ciel noir et non pollué, on passe de la magnitude limite 6 à l'œil nu, à la magnitude 11. L'aspect du ciel en est totalement changé.

L'amélioration de la finesse des images permet de distinguer deux étoiles proches, qui sinon sont confondues. C'est la nature ondulatoire de la lumière qui est responsable de ce problème : l'image d'une étoile ponctuelle n'est pas un point, mais une tache de diffraction. Celle-ci est d'autant plus petite que le diamètre de l'instrument est plus grand. Deux étoiles proches dont les taches de diffractions se superposent si elles sont grosses (dans un instrument de petit diamètre), seront clairement séparées si les taches sont petites (dans un instrument de grand diamètre).

Ainsi, utiliser un instrument de diamètre 10 fois supérieur produit :

- une image 100 fois plus lumineuse,
- et des détails 10 fois plus fins

C'est ce qui justifie la course aux grands instruments.

**Deux types d'instruments**

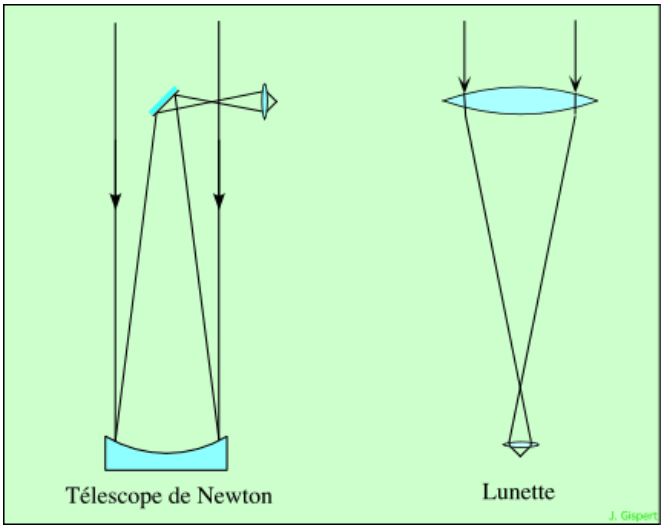
«Il y a une différence importante entre la lunette et le télescope ; il est bon de la rappeler ici. La lunette se compose d'un tube qui porte à son extrémité supérieure une lentille convexe appelée objectif, et à son extrémité inférieure une seconde lentille nommée oculaire, à laquelle s'applique l'œil de l'observateur. Les rayons émanant de l'objet lumineux traversent la première lentille et vont, par réfraction, former une image renversée à son foyer. Cette image, on l'observe avec l'oculaire, qui la grossit exactement comme ferait une loupe. Le tube de la lunette est donc fermé à chaque extrémité par l'objectif et l'oculaire.

Au contraire, le tube du télescope est ouvert à son extrémité supérieure. Les rayons partis de l'objet observé y pénètrent librement et vont frapper un miroir métallique concave, c'est-à dire convergent. De là ces rayons réfléchis rencontrent un petit miroir qui les renvoie à l'oculaire, disposé de façon à grossir l'image produite.»

*De la Terre à la Lune*, chapitre XXIV
Jules Verne

Ce passage d'un roman de Jules Verne est toujours d'actualité, à l'exception de la matière du miroir, qui est maintenant en verre (ou en une substance de même nature que le verre). Il faut signaler que Jules Verne cite Léon Foucault dans le même chapitre.

| | |
|---|---|
| **Lunettes** | Elles sont constituées d'un objectif à lentilles, comme un objectif photographique, et d'un oculaire (les jumelles sont faites sur le même principe : leur nom est l'abréviation de *lunettes jumelles*). La lumière des étoiles traverse l'objectif, puis l'oculaire. On les nomme aussi *instruments réfracteurs*, parce qu'ils construisent l'image par **réfraction** à la traversée du verre. |
| **Télescopes** | L'objectif est un miroir de forme sphérique ou parabolique, qui renvoie la lumière qui arrive des étoiles, vers l'oculaire, qu'elle traverse. Il existe divers types de télescopes, qui diffèrent par des détails. L'oculaire devrait être placé à l'intérieur du tube, où la tête de l'observateur, dans un petit télescope, gênerait l'observation. C'est pourquoi on place un second miroir, plan, qui renvoie le faisceau vers le côté du tube pour l'observation : c'est la formule de Newton. On nomme aussi les télescopes *instruments réflecteurs*. |




Remarquez sur ce schéma :

- que la lumière ne traverse pas le verre du miroir dans le télescope, alors qu'elle traverse l'objectif de la lunette ;
- que les rayons lumineux se croisent avant de parvenir à l'oculaire.

En regardant un instrument astronomique, on voit du premier coup d'œil si c'est un télescope ou une lunette : l'oculaire d'une lunette est situé au bout du tube, alors que celui du télescope est en haut sur le côté. Toutefois, il existe maintenant des télescopes (dits de *Cassegrain*) où l'oculaire est situé en bout, comme dans une lunette ; mais leur tube se distingue car il est beaucoup plus court.

La lunette est légèrement plus ancienne que le télescope ; elle a été inventée en Hollande vers 1609 (on ne connait pas avec certitude la date, ni l'inventeur, mais on l'attribue souvent à Hans Lippershey en 1608). Très vite, elle a été connue dans le reste de l'Europe, et Galilée en a construit une à Florence (1609). Avec cet instrument, dont la qualité n'atteignait pas celle d'un jouet actuel, il a bouleversé la vision classique du monde :

La conception du monde, héritée des Grecs, et admise sans discussions au cours de tout le Moyen-Age, était basée sur deux dogmes :

- la position centrale de la Terre, autour de laquelle tout devait tourner selon des mouvements circulaires uniformes (mouvements parfaits).
- la séparation de l'Univers en deux parties :
  - le monde sub-lunaire dans lequel nous vivons, où tout est provisoire, tout évolue dans le temps, et qui est impur ;
  - le monde supra-lunaire, où tout est pur et parfait, et où donc les mouvements ne peuvent être que circulaires et uniformes.

Ce sont ces deux dogmes qui ont entraîné Ptolémée à construire un système du monde si compliqué…

Dès que Galilée a tourné sa lunette vers le ciel, il a fait deux découvertes fondamentales, qui ont suffi à balayer ces conceptions :

- les objets supra-lunaires observés ne sont pas purs :
  - la Lune elle-même est couverte de cratères ;
  - le Soleil montre des taches sombres.
- Les surfaces de ces astres ne sont donc pas lisses et parfaites.
- Jupiter est entourée de 4 satellites (il y en a beaucoup plus, mais Galilée ne pouvait en voir davantage ; on les appelle depuis *satellites galiléens*) ; ces corps tournent manifestement autour d'un corps qui n'est pas la Terre…
  Saturne possède des anneaux.

Galilée a eu les ennuis que l'on sait pour avoir osé dire ce qu'il voyait.

La première lunette de Galilée était constituée d'un objectif constitué d'une lentille simple plan-convexe (face convexe à l'extérieur), de 5,6 cm de diamètre et de 1,7 m de focale.

L'oculaire était une lentille simple également, mais plan concave, la concavité tournée à l'intérieur. Le grossissement de cet instrument n'était que de 3 fois. Mais son pouvoir séparateur (finesse des images) devait être de l'ordre de 10 fois meilleur que celui de l'œil nu (sans trop tenir compte des aberrations présentées).

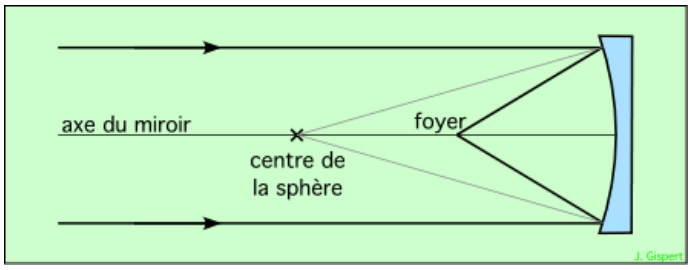
Avant d'examiner les lunettes et télescopes, il convient de définir les différentes propriétés qui les caractérisent.

## *Optique géométrique*

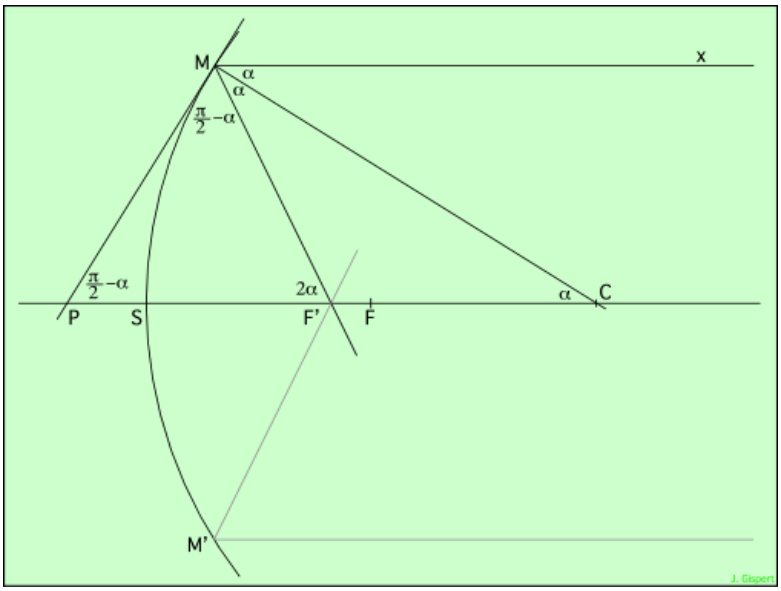
Le but de ce paragraphe n'est pas de reprendre la théorie géométrique de la lumière, mais seulement de considérer les paramètres importants en astronomie.

**Foyer et stigmatisme**

Il est facile de tailler un miroir de télescope sphérique (assez facile). Si on considère une étoile (dont les rayons arrivent tous parallèles), située sur l'axe du miroir, il est aisé de voir qu'ils vont converger à une distance du miroir moitié de son rayon. Au point où un rayon lumineux frappe le miroir, la perpendiculaire au miroir passe par le centre. Donc, le rayon réfléchi est symétrique du rayon incident par rapport à cette perpendiculaire. Il coupe l'axe en un point situé *approximativement* à mi-distance du centre :




Mais cette forme ne donne pas toutes satisfactions. Les rayons marginaux, qui se réfléchissent sur le bord, se coupent un peu plus près du miroir que les rayons centraux. Il n'existe pas un foyer unique où tous les rayons se retrouveraient. Ce défaut est *l'aberration de sphéricité*.




Le rayon xM, parallèle à l'axe du miroir, se réfléchit selon MF'. En effet, le rayon du cercle passant par M est MC. Il est perpendiculaire à la tangente au miroir en ce point (tangente MP). La loi de la réflexion dit que le rayon incident et le rayon réfléchi sont symétriques par rapport à la normale au miroir. Donc le rayon réfléchi est MF', et les deux angles en M sont égaux (α).

D'autre part, le rayon incident et l'axe du miroir sont parallèles. Donc les angles que fait MC avec eux sont égaux : l'angle en C vaut aussi α. Par suite, le triangle MF'C est isocèle, et donc MF' = F'C.

Le triangle CMP est rectangle en M. Son angle aigu en C vaut α, donc le troisième angle vaut π/2 - α (la somme des angles d'un triangle vaut 180° = π).

L'angle PMF' = PMC - F'MC = π / 2 - α.

Donc, le triangle PF'M est isocèle, puisqu'il a deux angles égaux. Par conséquent, les deux côtés adjacents à ces angles sont aussi égaux : PF' = MF'.

Rapprochons de l'égalité trouvée plus haut (MF' = F'C), on obtient : PF' = F'C

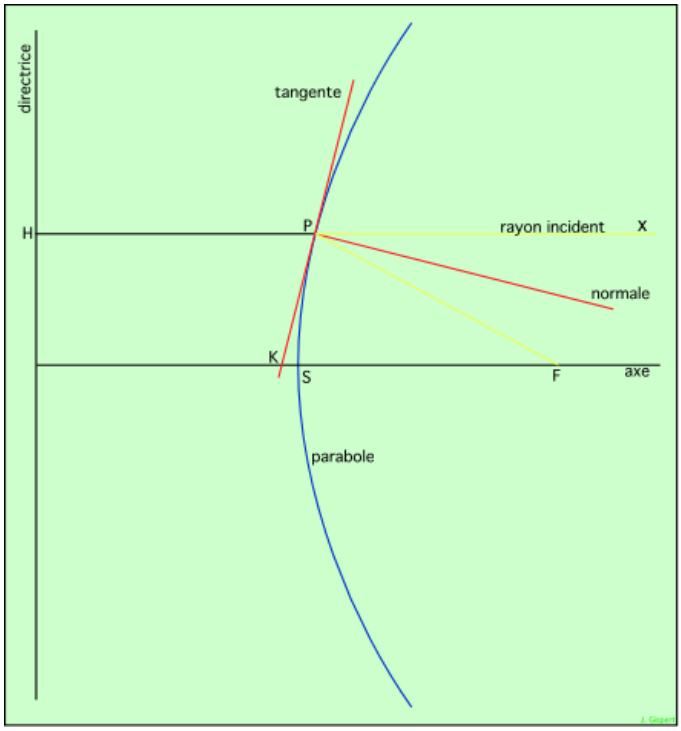
Donc le point F' est le milieu de PC. Prenez le rayon (en grisé sur le schéma) qui touche le miroir au symétrique

M'. Les deux rayons se croiseront en F', qui est donc leur foyer.

On peut faire le même raisonnement pour un rayon incident quelconque, en particulier pour le rayon passant par l'axe. Pour celui-ci, les points M et P sont confondus au point S. Le foyer de ces rayons est au milieu de SC (point F). Si M et M' sont les bords du miroir, la distance F'F mesure l'aberration de sphéricité.

Si vous traciez de nombreux rayons parallèles à l'axe, à des distances diverses, vous verriez apparaître une courbe, enveloppe des rayons réfléchis. Cette courbe est la *caustique*. Puisque le miroir est dans l'espace et non dans le plan, il s'agit de la *surface caustique*.

Pour corriger ce défaut, il faut reculer légèrement les bords du miroir par rapport à son centre, c'est-à-dire lui donner une forme parabolique. C'est un peu plus difficile à tailler, mais bien plus satisfaisant : on obtient le stigmatisme parfait pour tous les *rayons parallèles à l'axe*.




Il est un peu plus délicat de montrer que la parabole résoud le problème, car on doit s'appuyer sur un théorème.

Un rayon xP (jaune) parallèle à l'axe est perpendiculaire à la directrice de la parabole. Or dans une parabole, la tangente (rouge) en P est la bissectrice de l'angle HPF.

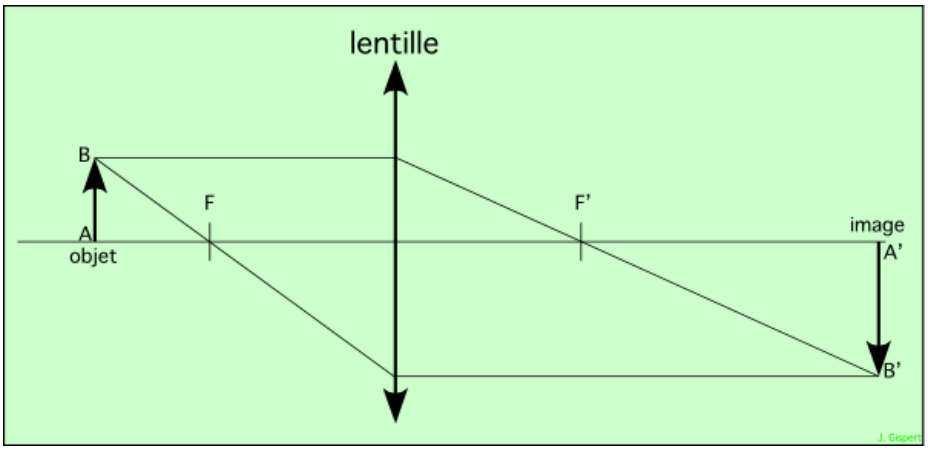
D'autre part, les angles HPF et FPx sont supplémentaires. Donc leurs bissectrices sont perpendiculaires. Par conséquent, la bissectrice de l'angle FPx est la perpendiculaire à la tangente, c'est à dire la normale.

Par conséquent, le rayon xP se réfléchit en PF. Ceci est indépendant du point P choisi, donc tous les rayons parallèles à l'axe convergent rigoureusement au foyer F.

Mais pour les rayons inclinés par rapport à l'axe, le stigmatisme n'est pas rigoureux, mais seulement approché. Bien sûr, l'astigmatisme augmente avec l'inclinaison, et ceci limite le champ utilisable. On peut réduire l'astigmatisme en diminuant la courbure du miroir, c'est-à-dire en augmentant son rapport F/D. Ce qui permet d'augmenter le champ, au prix d'un encombrement accru. La définition d'un télescope est donc en particulier un compromis entre un grand champ et un tube court.

**Grandissement**

Nous allons considérer un objet à distance finie de l'objectf. Pour expliquer le grandissement, nous allons considérer un objectif de lunette à lentille simple mince.




La lentille mince est symbolisée par la double flèche verticale, qui indique qu'elle est convergente (pointes tournées vers l'extérieur). F est le foyer objet, F' est le foyer image. Considérons un objet linéaire AB, représenté par la flèche de gauche, et son image A'B'. L'objet étant placé, il est facile de construire son image.

Considérons le point B de l'objet. Il émet des rayons dans toutes les directions, et nous allons en considérer deux. Le premier sera parallèle à l'axe de la lentille. Par définition, il doit passer par le foyer image F'. L'image de B sera sur ce rayon.

Le second rayon considéré passera par le foyer objet. Symétrique du précédent, il ressortira de la lentille parallèle à son axe.

Les deux rayons se coupent en B', c'est l'image du point B.

On pourrait montrer que l'image de A est dans le même plan, et se trouve sur l'axe (comme A). Donc, l'image de l'objet est le segment A'B'. On remarque que l'image est inversée par rapport à l'objet.

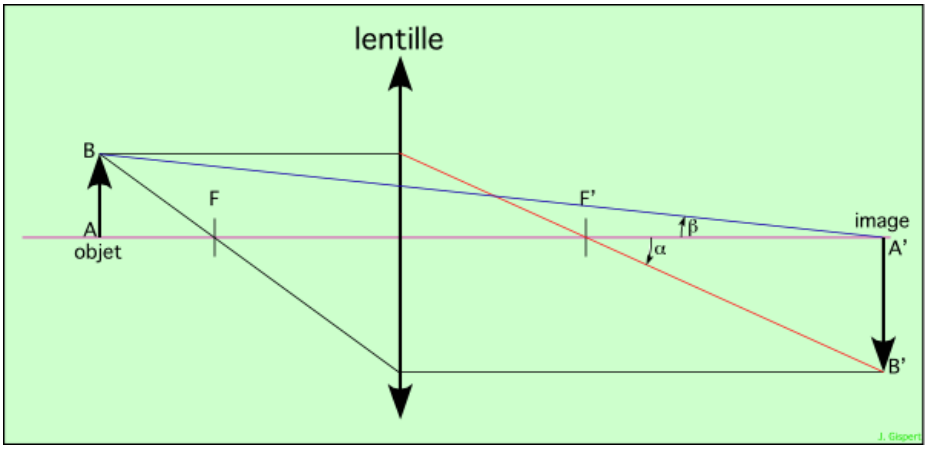
On constate que AB et A'B' n'ont pas la même longueur. Par définition, le *grandissement* de la lentille est la rapport de la taille de l'image à la taille de l'objet :

$$\Gamma = A'B' / AB$$

C'est la notion courante, selon laquelle l'image donnée par une loupe est plus grande que l'objet regardé. Mais cette notion ne suffit pas. Si on éloigne l'objet, son image se rapproche du plan focal en F'. Mais si l'objet est rejetté à l'infini (cas des étoiles), la notion de grandissement n'a plus de sens, puisqu'il est impossible de mesurer l'objet. Seul, l'angle sous lequel on le voit garde un sens.

L'œil étant placé dans le plan image A'B', l'image est vue sous un angle α.

Si on supprime la lentille, on voit l'objet directement sous un angle β. Par définition, le grossissement est le rapport de l'angle sous lequel on voit l'image dans l'instrument, à celui sous lequel in voit l'objet à l'œil nu.



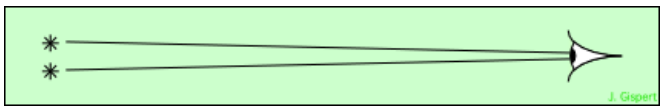

Sur le schéma, on constate bien que l'angle α est plus grand que l'angle β.

**Grossissement**

Le grossissement ne doit pas être confondu avec le grandissement ; il est seul défini pour un objet situé à l'infini.

Mais le grossissement est un piège. C'est la caractéristique la plus connue du public en optique, mais aussi la plus ambigüe !

Lorsque deux étoiles vues à l'œil nu sont trop proches l'une de l'autre, on ne les distingue pas (si l'angle sous on les voit est inférieur à 1' ; voir chapitre 1) :




C'est parce que leurs images se forment sur la même cellule de la rétine. Pour arriver à les distinguer, il faut que l'angle qui les sépare soit plus grand. Un instrument d'optique peut augmenter l'angle sous lequel on les voit, et c'est pour cela qu'il donne l'impression de grossir l'image :




Le grossissement d'une lunette ou d'un télescope est obtenu par la **combinaison** de l'objectif, qui donne l'image, et de l'oculaire qui permet de l'observer. La valeur du grossissement s'obtient en divisant la focale F de l'objectif par celle f de l'oculaire :

$$\mathbf{G = F / f}$$

Pour un instrument donné, la focale F de l'objectif est fixée. Plus la focale de l'oculaire est courte, plus l'instrument grossit. On dispose en général d'un choix d'oculaires, permettant de modifier le grossissement en fonction de l'observation en cours. L'oculaire n'est donc qu'un accessoire de l'instrument (même si ses qualités optiques sont non négligeables).

Voici un tableau indiquant le grossissement obtenu selon l'instrument (objectif), et l'oculaire utilisé :

| **F \ f** | 40 | 30 | 20 | 10 | 5 | 4 |
|---|---|---|---|---|---|---|

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 500 | 12 | 16 | 25 | 50 | 100 | 125 |
| 700 | 17 | 23 | 35 | 70 | 140 | 175 |
| 900 | 22 | 30 | 45 | 90 | 180 | 225 |
| 1000 | 25 | 33 | 50 | 100 | 200 | 250 |
| 1500 | 37 | 50 | 75 | 150 | 300 | 375 |
| 2000 | 50 | 66 | 100 | 200 | 400 | 500 |

Le grossissement n'est donc pas une caractéristique de l'instrument. Pire, on peut avoir un fort grossissement avec un miroir ou un objectif exécrable ! Annoncer un grossissement important n'est parfois qu'un argument commercial, pour vendeur peu scrupuleux… ou ignorant. Si vous voulez acheter un instrument d'amateur, considérez les qualités de l'objectif pour une lunette, ou du miroir pour un télescope. Le grossissement est secondaire, et vous verrez plus loin qu'il ne faut pas le pousser trop !

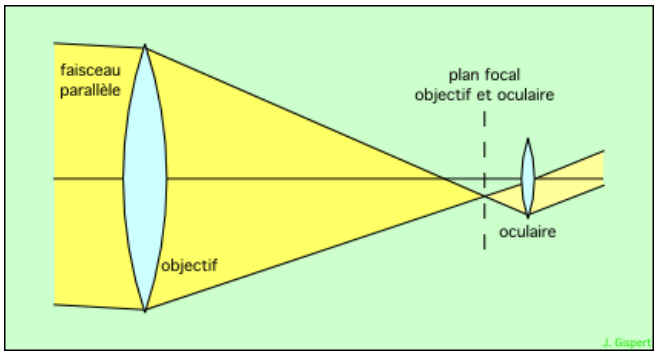
**Pupille de sortie**

L'instrument, lunette ou télescope, laisse émerger un faisceau lumineux de l'oculaire. La lumière qui en sort est celle qui y est entrée, ceci semble évident ! Mais il faut préciser que cette lumière est passée par l'objectif, et qu'en fait, l'oculaire donne une image de l'objectif.

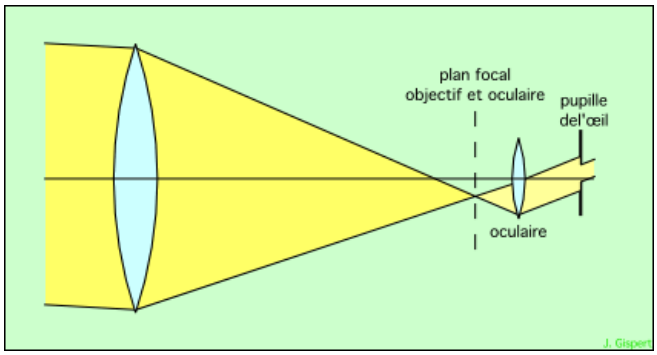
Tout d'abord, considérons que l'observateur recherche son confort visuel, et pour cela préfère voir une image à l'infini, ce qui lui évite d'accomoder. Les muscles de l'œil se reposent donc. Pour obtenir une image à l'infini d'un objet à l'infini (étoile), il faut que le foyer de l'oculaire coïncide avec celui de l'objectif. Ceci a deux conséquences :

- l'image est inversée ;
- un faisceau entrant parallèle (une étoile) ressortira parallèle.

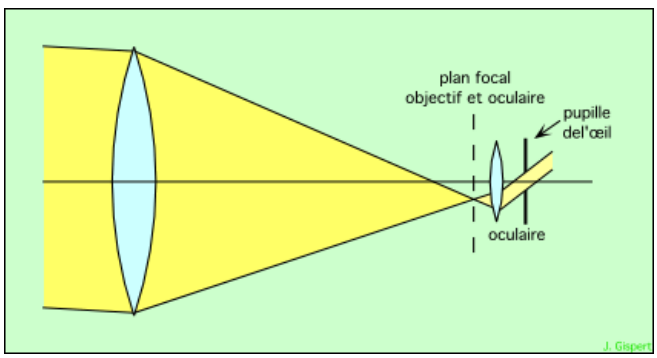
Ces deux propriétés se voient sur le schéma suivant :




On voit sur ce dessin que le faisceau émergeant de l'instrument est un cylindre qui s'appuie sur le contour de l'objectif. Un problème se pose : si le diamètre de ce cylindre est supérieur à la pupille de l'œil, une partie de la lumière sera perdue:




On ne voit pas toute la surface de l'objectif, donc pas la totalité de l'image produite. Si on augmente le grossissement, le faisceau émergeant sera plus incliné sur l'axe de l'instrument, et de ce fait sera plus étroit. Il pourra, pour une valeur minimum du grossissement, entrer en totalité dans l'œil :



L'oculaire est de plus courte focale ; il intercepte le faisceau provenant de l'objectif plus près, à un endroit où il est plus étroit. Le faisceau de sortie est plus fin, et il passe par la pupille de l'œil. Le grossissement **minimum** qui permet cela est donné par une formule toute simple :

$$\mathbf{g_e = D / 6}$$

où D est le diamètre de l'objectif exprimé en millimètres. On le nomme *grossissement équipupillaire*. Voici quelques valeurs obtenues par cette formule selon le diamètre de l'instrument :

| diamètre | grossissement équipupillaire |
|---|---|
| 50 mm | 8 |
| 100 mm | 17 |
| 150 mm | 25 |
| 200 mm | 34 |
| 250 mm | 42 |
| 300 mm | 50 |

Ce grossissement, étant faible, est facile à atteindre et à dépasser.

**Pouvoir séparateur théorique**

Ce que nous venons d'expliquer concerne l'optique géométrique. Elle consiste à considérer un rayon lumineux comme une droite, et l'image d'une étoile comme un point. La réalité physique est un peu différente. L'optique géométrique est une approximation, qui permet de faire du très bon travail dans de nombreux cas, mais qui présente ses limites. La lumière est une onde, et en possède les propriétés. Aussi, l'image d'une étoile n'est pas un point sans dimensions.

Le rayon de la tache de diffraction d'une étoile, observée par un instrument de diamètre D et à la longueur d'onde λ, vautrésultats:

$$r = 1{,}22\ \lambda / D$$

λ et D étant exprimés dans la même unité.<:p>

**Exemple** résultats : $\lambda = 0{,}55\ \mu m = 0{,}55\ 10^{-6}$ m, D = 25 cm = 0,25 m ; d'où $r = 1{,}22 \times 0{,}55\ 10^{-6} / 0{,}25 = 2{,}684\ 10^{-6}$ rd = 0,55 "

Lorsque deux étoiles sont proches, leurs taches de diffraction se mélangent, et il est difficile sinon impossible de les distinguer. On sépare deux étoiles lorsque leur distance est au moins égale à 0,85 fois le rayon de la tache de diffraction. Cette valeur provient d'une étude de la répartition de la lumière pour deux étoiles de même éclat, ni trop faibles, ni trop brillantes. Si l'on veut tester les propriétés d'un instrument, il faut donc se placer dans ces conditions-là. Bien sûr, les conditions atmosphériques doivent être très bonnes…

On définit le *pouvoir séparateur théorique* d'un instrument grâce aux indications ci-dessus :

$$p = 0{,}85 \times r = 0{,}85 \times 1{,}22\ \lambda / D = 1{,}037\ \lambda / D$$

Cette formule est générale (λ et D dans la même unité).

Pour les télescopes optiques, la longueur d'onde observée est de l'ordre de 0,55 µm. En remplaçant λ par cette valeur, on obtient :

$p = 1{,}037 \times 0{,}55\ 10^{-6} / D = 0{,}570\ 10^{-6} / D$

La longueur d'onde ayant été appliquée en mètres, le diamètre devra être donné aussi en mètres.

p est la tangente de l'angle sous lequel on voit les deux étoiles. Cet angle étant toujours très petit, on peut confondre la tangente avec l'angle exprimé en radians. La formule donne donc l'angle en radians. Pour l'obtenir en secondes d'arc, il faut multiplier par 180 × 60 × 60 = 648.000 et diviser par π :

$p = (0{,}570\ 10^{-6} / D) \times 648.000 / \pi = 0{,}570\ 10^{-6} \times 648.000 / (D \times \pi) = 0{,}369 / (D \times \pi) = 0{,}1176$ " / D, D étant exprimé en mètres. Multiplions les deux membres par 100 pour exprimer D en centimètres :

$$\mathbf{p = 12"/D}$$

où D est le diamètre de l'objectif en centimètres.

Par exemple, un télescope de 10 cm d'ouverture a un pouvoir séparateur de 1,2" ; un télescope d'un mètre atteint 0,12", les 8,2 m du VLT atteignent 12/820 = 0,015".

Mais attention, le pouvoir séparateur théorique n'est pas atteint, pour les diamètres au-dessus de 30 cm, à cause de la turbulence de l'atmosphère

(seeing). On peut l'atteindre effectivement soit au-dessus de l'atmosphère, grâce à un télescope spatial, soit grâce à l'optique adaptative.

La formule ci-dessus n'est valable que pour le visible, puisque nous avons remplacé λ par 0,55 µm. Reprenons la formule générale pour calculer le pouvoir séparateur d'un radiotélescope de 100 mètres de diamètre à la longueur d'onde de 21 cm de l'hydrogène neutre (exprimant λ et D en mètres) :

$$p = 1{,}037\ \lambda / D = 1{,}037 \times 0{,}21 / 100 = 0{,}002178 \text{ radians}$$

Traduisons en **minutes** d'arc :

$$p = 0{,}002177 \text{ radians} \times 180 \times 60 / \pi = 0{,}002177 \times 10.800 / \pi = 7{,}48'$$

Le pouvoir séparateur est donc de 7,5 **minutes** d'arc seulement à 21 cm, pour un miroir de 100 mètres de diamètre, ce qui est 10 fois plus grand que tout ce qu'on a fait en optique ! Et pour un résultat bien moins bon…

Par comparaison, un télescope optique de 100 m de diamètre observant à 0,55 µm, aurait un pouvoir séparateur de :

$p = 1{,}037 \times 0{,}55\ 10^{-6} / 100 = 0{,}0057\ 10^{-6}$ radians

$p = 0{,}0057\ 10^{-6}$ radians $\times 180 \times 60 \times 60 / \pi$

$$p = 0{,}0057\ 10^{-6} \text{ radians} \times 648.000 / \pi = 1.176\ 10^{-6}\ '' = 0{,}001176\ ''$$

C'est-à-dire un millième de seconde d'arc ! 380.000 fois mieux que le radiotélescope… C'est un abîme qui sépare la radioastronomie de l'optique sur ce plan. Et ce fut un moteur extraordinaire qui a poussé les radioastronomes à se surpasser, ce à quoi ils sont parvenus de la plus belle manière avec l'interférométrie.

Cette technique leur a donné la possibilité de **simuler** des radiotélescopes dont le diamètre atteint le diamètre de la Terre. Prenons D = 10.000 km, toujours à 21 cm de longueur d'onde (10.000 km = 10.000.000 m et 21 cm = 0,21 m) :

$p = 1{,}037 \times 0{,}21 / 10.000.000 = 0{,}00000002177$ radians

$$p = 0{,}00000002177 \times 648.000 / \pi = 0{,}00449\ ''$$

Soit mieux que 5 millièmes de seconde. Actuellement, la radioastronomie, grâce à l'interférométrie, surpasse l'astronomie optique pour le pouvoir séparateur. Mais…

**Le VLT**

On sait maintenant construire des interféromètres optiques, après les travaux précurseurs d'Antoine Labeyrie, sur le plateau de Calern. Le VLT est un ensemble de 4 instruments de 8,20 m de diamètre chacun. Les télescopes sont nommés en langue Mapuche (les indigènes du sud du Chili, à 500 km au sud de Santiago) :

| | | | |
|---|---|---|---|
| UT1 | **Antu** | Le Soleil | 1998 |
| UT2 | **Kuyen** | La Lune | 1999 |
| UT3 | **Melipal** | La Croix du Sud | 2000 |
| UT4 | **Yepun** | Vénus | 2001 |

Chacun des 4 VLT (8,2 m de diamètre, à 0,55 µm de longueur d'onde) atteint :

$$p = 0{,}015\ ''$$

soit presque un centième de seconde d'arc.

L'ensemble VLTI, avec une base de l'ordre de 200 m, atteindra 5 millisecondes. L'astronomie optique va rejoindre la radioastronomie.

Le VLTI ne donne pas de photos comme un télescope unique. Il donne, par couples de télescopes, des franges d'interférence que l'on peut traiter mathématiquement (déconvolution) pour construire une image semblable à la source. A chaque ligne de base (ligne joignant deux télescopes) correspond un type de franges, qui représentent les variations de luminosité de la source, plus ou moins rapides. Donc, chaque ligne de base donne un renseignement sur la source, et plusieurs sont nécessaires pour définir correctement l'image.

Le VLTI est utilisé pour analyser la surface des étoiles, et construire leur image. Le procédé eswt complexe, et nécessite de passer par un modèle mathématique de cette surface. Les premiers résultats étaient plus ou moins bons, mais ils s'affinent avec le temps, par une définition de meilleurs modèles.

Bien évidemment, l'arrivée prochaine (??) d'interféromètres spatiaux, radio ou optique, relancera la compétition !

Le VLTI est révolutionnaire par d'autres aspects… Il intègre l'optique adaptative et l'optique active, et il est utilisé en interféromètre depuis 2005.

| |
|---|
| Les travaux sur le VLT produisent un article scientifique par jour ! |

Mais déjà, se pointe le nouveau concept d'hypertélescope. Il est développé par Antoine Labeyrie, et sera probablement une solution très intéressante pour augmenter considérablement le pouvoir séparateur, à coût égal. Un démonstrateur est utilisé actuellement à l'Observatoire de Haute Provence (St Michel l'Observatoire).

**Grossissement résolvant**

Le *grossissement résolvant* est le plus petit grossissement qui permet de distinguer deux étoiles. C'est donc celui qui donne, de deux étoiles séparées par l'objectif, des images écartées d'un angle d'une minute d'arc à la sortie de l'oculaire. Il se calcule par :

$$g_r = D / 2$$

où D est exprimé en **millimètres**. On peut montrer que le grossissement résolvant est le triple du grossissement équipupillaire.

$$g_r = 3\, g_e$$

On peut en déduire le tableau suivant, qui donne le grossissement résolvant :

| diamètre | grossissement résolvant |
|---|---|
| 50 mm | 25 |
| 100 mm | 50 |
| 150 mm | 75 |
| 200 mm | 100 |
| 250 mm | 125 |
| 300 mm | 150 |

Si vous utilisez un instrument, vous verrez tous les détails qu'il est capable de donner à condition d'avoir un grossissement supérieur à cette valeur. Toutefois, ce calcul est basé sur les meilleures conditions possibles ; on ne doit pas le prendre au pied de la lettre (ni du chiffre…), et les conseils sont d'utiliser un grossissement du double, ce qui, au vu du tableau, est extrêmement simple : le grossissement à choisir est égal au diamètre de l'objectif exprimé en millimètres.

On peut utiliser un grossissement supérieur, mais il ne faut pas trop le pousser, car l'image perdrait sa brillance et son contraste. En effet, plus on grossit, plus la tache de diffraction s'étale sur une grande surface. La même quantité d'énergie étant plus étalée, la tache de diffraction devient de plus en plus pâle. On considère qu'il ne faut pas dépasser 4 fois le grossissement résolvant.

Que signifie *grossir 100 fois* un champ d'étoiles ?

D'après ce que nous venons de voir, grossir une étoile ne change pas la taille de la tache de diffraction. Lorsqu'on observe un champ d'étoiles avec un grossissement de 100 par exemple, on multiplie par 100 l'angle sous lequel on le voit. Les images des étoiles ne seront pas plus grosses, mais 100 fois plus écartées les unes des autres. Aussi, on les distinguera bien mieux.

**Clarté d'un instrument**

La notion de clarté est très simple : il s'agit tout simplement de caractériser la quantité de lumière reçue avec l'instrument. Plutôt que de la déterminer à l'aide d'une quantité physique abstraite, on la caractérise par rapport à l'œil. Ainsi, la pupille bien dilatée présente un diamètre de l'ordre de 6 mm, qui sera pris comme référence. Alors, un instrument de diamètre D présentera une surface collectrice $S = \pi D^2 / 4$. La *clarté* est le rapport de la surface de l'objectif, à la surface de la pupille :

$$C = S / s = D^2 / d^2$$

où d est le diamètre de la pupille.

Cette valeur est théorique ; il faut considérer les pertes de lumière dans l'instrument par traversée de verre ou réflexion sur un miroir. Dans une lunette, la lumière traverse l'objectif, et une partie se réfléchit sur la face avant. Ajoutant à cela la perte dans l'oculaire, la clarté réelle d'une lunette est diminuée d'un facteur approximatif de 0,6. Pour un télescope, il y a une perte dans la réflexion, et la perte de l'oculaire. Le résultat est un peu meilleur que celui d'une lunette.

Puisque les pertes reviennent à multiplier la clarté théorique par un coefficient inférieur à 1, on nomme ce dernier *facteur de transmission*.

Lorsqu'on considère un astre étendu (la Lune, une comète, une planète), le raisonnement précédent ne peut s'appliquer. La théorie est plus complexe, du fait des paramètres à considérer. Le résultat s'exprime par :

$$\Gamma = (g_e / g)^2$$

où g est le grossissement appliqué, et $g_e$ le grossissement équipupillaire. Le grossissement équipupillaire ne dépendant que du diamètre de l'objectif, est constant pour un instrument donné. Par contre, le grossissement appliqué dépend de l'oculaire utilisé. Ce grossissement étant toujours supérieur au grossissement équipupillaire, $\Gamma$ est inférieur à 1, et d'autant plus petit que le grossissement est plus fort.

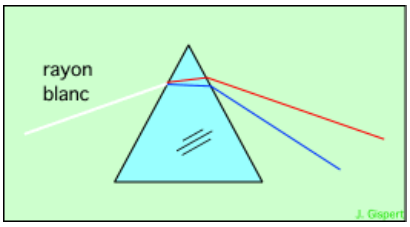
## *Les lunettes*

Tous les instruments du XVII$^{e}$ siècle étaient de mauvaise qualité, à cause des défauts du verre, du polissage défectueux, et des aberrations que l'on ne savait pas corriger. L'aberration chromatique en particulier, a été le problème le plus important pour les premières lunettes.

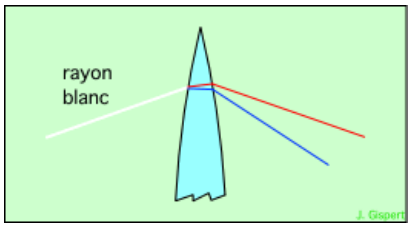
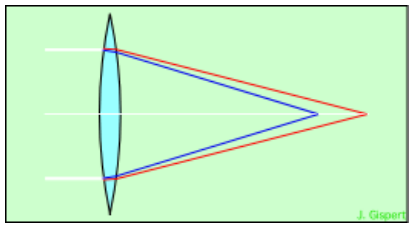
On ne savait pas fabriquer de grands disques de verre de qualité suffisante pour construire des lunettes. C'est un verrier suisse, Guinand, qui a le premier réussi à couler des blocs de taille suffisante. Son procédé a été rapidement adopté dans de nombreux pays européens.

Dans un prisme, la lumière blanche traverse le verre. A la surface du verre, la lumière passe d'un milieu (l'air) à un autre milieu (le verre) dont les propriétés optiques sont différentes. L'indice de réfraction qui les caractérise est différent, ce qui signifie que la lumière ne s'y propage pas à la même vitesse. C'est cette réfraction qui va permettre de construire l'image.

Mais ce qui est important ici, c'est que l'indice de réfraction du verre n'est pas le même pour les différentes couleurs. Ce qui fait que la vitesse de la lumière dépend de sa couleur, et la déviation en dépend aussi.

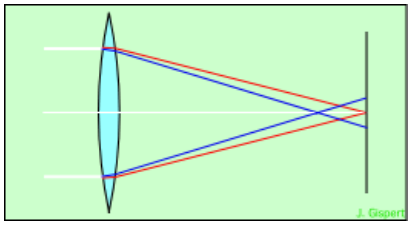
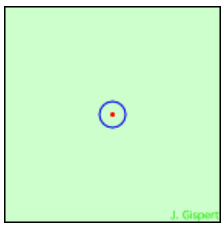



Une lentille simple se comporte localement comme un prisme. En regardant une partie de près, on voit que les rayons sont dispersés selon leur longueur d'onde. Il s'ensuit que l'image donnée par cette lentille ne sera pas bonne :

| les rayons bleus et rouges sont déviés différemment, le bleu plus que le rouge | les foyers bleu et rouge ne sont pas au même endroit |
|---|---|
|  |  |



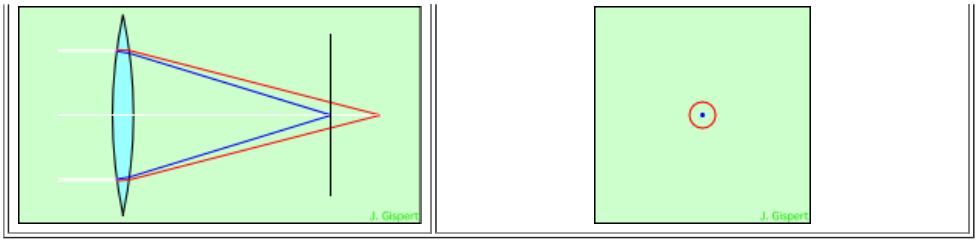
Si nous plaçons un écran pour intercepter les rayons, nous obtiendrons des images diverses selon la position de l'écran :

| l'écran est placé au **foyer rouge** | on voit une image rouge nette, entourée d'un anneau bleu |
|---|---|
|  |  |



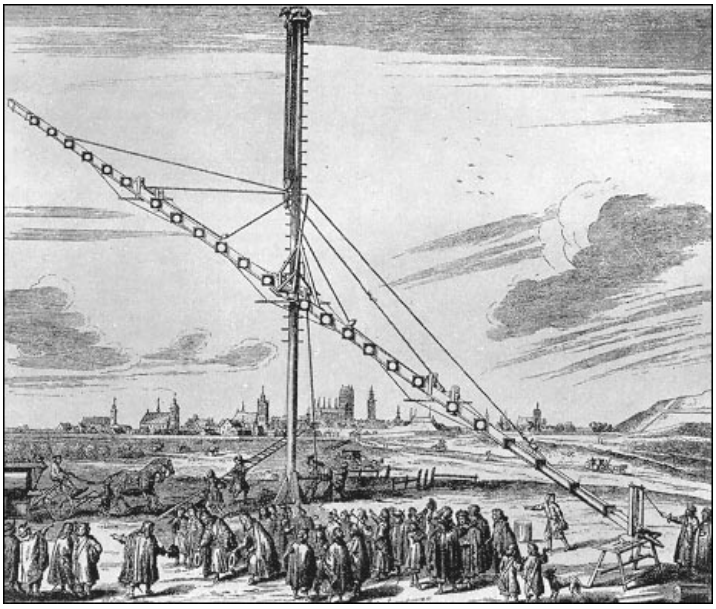
Si nous avançons l'écran nous obtiendrons une autre image :

| l'écran est placé au **foyer bleu** | l'image nette est bleue, entourée d'un anneau rouge |
|---|---|
| | |




Il est impossible de faire une mise au point correcte à la fois sur toutes les longueurs d'onde. L'image dans l'oculaire (qui remplace l'écran) apparaît irisée. Outre le désagrément visuel, ce défaut interdit de distinguer des étoiles proches. Le pouvoir séparateur de l'instrument est diminué.

**"De grandes lunettes à faire peur aux gens"**

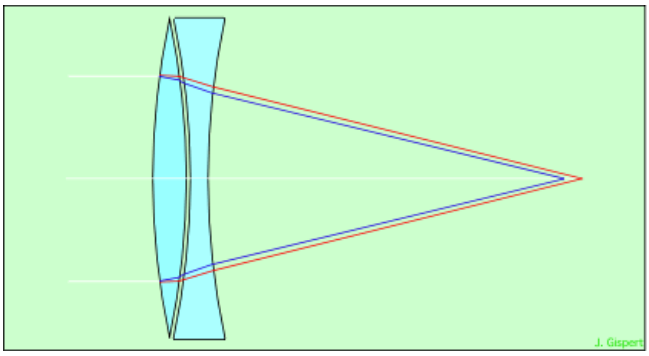


lunette d'Hévélius, érigée à Dantzig en 1670

Pour diminuer l'importance de l'aberration chromatique, on a construit des lunettes de plusieurs dizaines de mètres de longueur ! En effet, si on allonge la longueur focale, on diminue la courbure de la lentille, et l'effet de prisme est atténué. Mais ce n'est qu'un palliatif, il subsiste toujours une aberration. Ci-dessus une lunette construite par Hévélius.

**Doublets achromatiques**

Au milieu du XVIII$^{e}$ siècle, l'opticien anglais J. Dollond invente deux verres de compositions nouvelles, le *flint* et le *crown*. Le flint est un verre lourd, très dispersif (il sépare fortement les rayons de couleurs différentes) ; le crown est au contraire un verre léger peu dispersif. En associant une lentille convergente de flint, et une lentille divergente de crown, il a réussi à obtenir une combinaison qui restait convergente, mais dont l'aberration chromatique était considérablement réduite :




On appelle une telle association *doublet achromatique*. Grâce à cette invention, la longueur des lunettes a pu diminuer, mais elle est tout de même restée importante, car l'aberration chromatique n'est pas totalement supprimée. La plus grande lunette construite a été celle de l'Observatoire de Yerkes (USA), dont l'objectif atteint 1 mètre de diamètre (40 pouces), et la longueur 19 mètres :



Pour des raisons mécaniques et optiques, il n'est pas possible de faire beaucoup mieux.

Les lunettes présentent deux principaux défauts : l'aberration chromatique, nous l'avons vue, et l'absorption de la lumière. En traversant le verre, la lumière provenant des astres est en partie absorbée ; pour un petit diamètre, ce n'est pas gênant, car les lentilles restent minces. Mais dans un grand instrument, la perte serait trop importante, et les objets faibles (galaxies lointaines, nébuleuses…) ne seraient pas visibles.

## *Les télescopes*

Peu de temps après l'invention de la lunette, Newton, Gregory et Cassegrain ont inventé le télescope. Ils ont créé trois formules optiques différentes, à peu près en même temps. C'est à Newton qu'on attribue généralement l'invention (publiée en 1670 à la Royal Society, on ne prête qu'aux riches), mais Grégory et Cassegrain pourraient très bien l'avoir précédé (James Gregory, mathématicien écossais, a proposé sa formule en 1663). Le principe est simple : il consiste à remplacer les lentilles par des miroirs. L'avantage des miroirs est double : la lumière ne traverse plus de verre ; ils sont donc totalement exempts à la fois d'aberration chromatique, et d'absorption (il y tout de même une très légère perte de lumière, car le pouvoir réfléchissant de la surface n'est pas total). Sur un plan pratique, le télescope a encore un avantage de plus : la facilité de taille des miroirs. Considérez le doublet achromatique constituant l'objectif d'une lunette ; il est formé de deux lentilles collées, donc il comprend 4 surfaces sphériques à tailler. Le miroir d'un télescope n'en comprend qu'une seule. Cet argument est important. Toutefois, on montre qu'une surface sphérique ne convient pas pour le miroir. Pour que tous les rayons convergent en un même point, la surface doit être parabolique, mais très proche d'une sphère. La modification est relativement facile à faire, mais la difficulté tient pour beaucoup dans la détermination de ce qu'il faut faire.

Il a donc été possible de construire des miroirs de télescope de plus grand diamètre que les objectifs de lunettes. Depuis le début du XX$^{e}$ siècle, les télescopes ont supplanté définitivement les lunettes (en particulier pour la photo).

En quelle matière étaient faits les miroirs ? Il fallait une matière qu'on puisse tailler, pour donner la forme, et qui réfléchisse bien la lumière. Ce sont les métaux les mieux adaptés, en rapport avec leurs propriétés électriques (puisque la lumière est une onde électromagnétique).

Depuis l'antiquité, les dames ont utilisé des miroirs pour se coiffer, se maquiller… Ces miroirs que l'on peut voir dans certains musées étaient réalisés en bronze, qui se polit facilement, mais n'étaient pas d'une grande qualité. En effet, le bronze présente quatre inconvénients importants :

**pouvoir réfléchissant limité**

Il ne renvoie qu'une partie de la lumière qui le frappe, et donc sur ce plan est moins avantageux qu'une lunette. Il ne permet pas de voir des objets de faible luminosité. A la longueur d'onde de 0,55 µm, correspondant à la plus grande sensibilité de l'œil, le bronze réfléchit 62 % seulement de la lumière reçue. 40 % sont perdus…

**polissage imparfait**

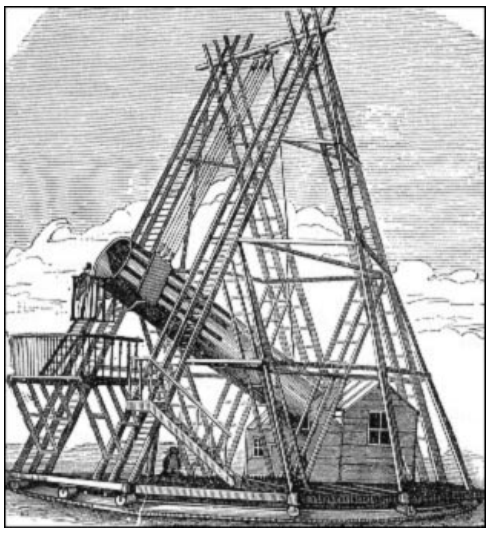
On veut observer la lumière qui nous parvient des étoiles, c'est à dire une onde électromagnétique dont la longueur d'onde est comprise entre 0,4 et 0,8 µm (millièmes de millimètres). Pour qu'un miroir soit de bonne qualité, il faut que les défauts qui subsistent à sa surface ne dépassent 0,04 à 0,08 millième de millimètre (un dixième de la longueur d'onde)… Or le bronze est un alliage assez mou. Lorsqu'on tente de le polir, il se comporte un peu comme la peau d'un chien qui se gratte : il forme des plis devant l'outil ! Pour le durcir, on augmente la proportion d'étain, mais le métal devient cassant et très difficile à travailler. Il présente une teinte plus blanche que dorée.

**oxydation**

Avec le temps, il s'oxyde, et se ternit. Lorsqu'il ne renvoie plus assez de lumière, il faut enlever la couche d'oxyde en surface. Impossible de procéder avec un chiffon : étant donné la taille microscopique des plus petits défauts admissibles, celui-ci ferait des ravages sur notre miroir. Pour le nettoyer, il faut, en fait, refaire tout le polissage, ce qui prend énormément de temps et de plus altère la qualité des images.

**dilatation**

Les métaux ont un coefficient de dilatation élevé. En début de nuit, la température est nettement plus élevée qu'en fin, et le miroir se contracte au cours des observations. Il s'ensuit une modification des caractéristiques optiques.



Néanmoins et faute de mieux, ce sont des miroirs en bronze qu'utilisèrent Newton, Gregory et Cassegrain pour réaliser leurs télescopes.

Par la suite, ces défauts n'ont pas empêché les astronomes de construire des télescopes de plus grand diamètre. Aussi, l'absence d'aberration chromatique permet de les construire beaucoup plus courts que les lunettes. De nombreuses découvertes ont été faites avec ces instruments, en particulier celle de la planète Uranus par William Herschel en 1781.

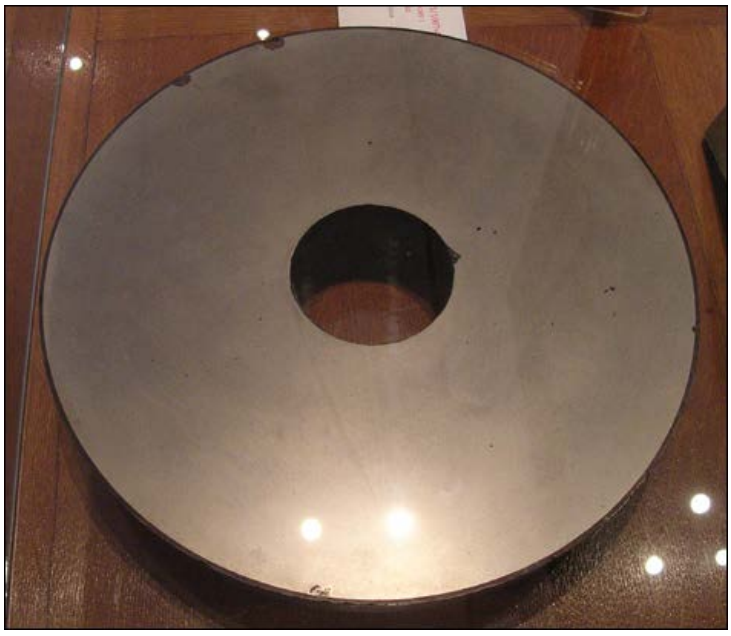
Le plus grand télescope qu'il construisit était à miroir métallique de 1,22 m de diamètre et 12,20 m de focale. Il l'a achevé en 1789.

Celui-ci a marqué l'apogée des instruments de ce type. Il faut remarquer à son sujet qu'il n'y avait pas de miroir secondaire : le miroir principal était légèrement incliné sur son support, et l'observateur plaçait l'oculaire sur le bord du tube, à sa sortie (on le distingue sur le dessin). L'absence de secondaire évitait une perte de lumière supplémentaire, mais l'inclinaison produisait des aberrations.

Un miroir a deux fonctions :

- donner une forme parfaite pour la qualité des images ;
- réfléchir la lumière.

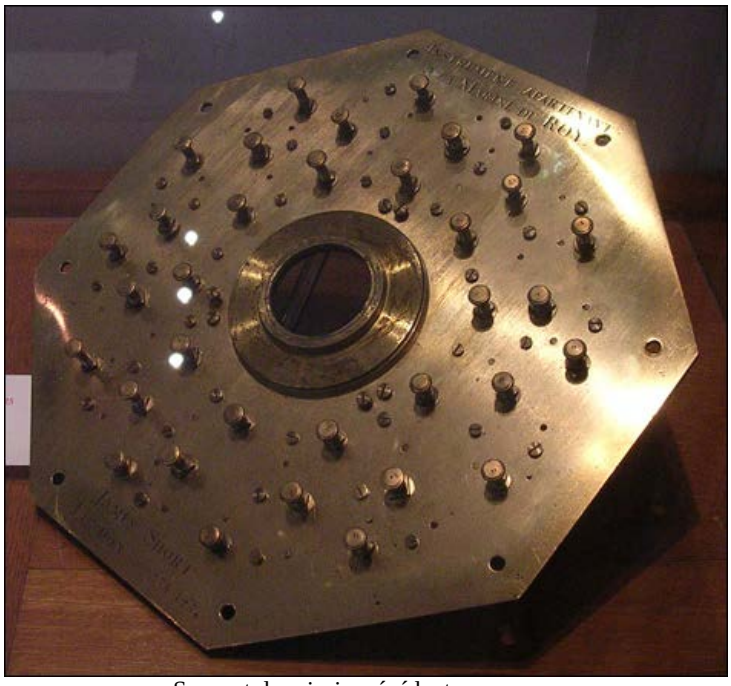
Dans un miroir de bronze, le métal réalise à lui seul ces deux fonctions. *Il les réalise mal toutes les deux*.



Miroir primaire du télescope de type Gregory n° 3/1007
réalisé par James Short Londres 1755
Observatoire de Marseille photo J. Gispert

Cette photo montre un miroir de bronze réalisé pour un télescope qui se trouve au Musée des Instruments Anciens de l'Observatoire de Marseille. On remarque la faible réflectance du métal, les défauts de surface (piqûres), et la couleur,

inhabituelle pour cet alliage, qui s'explique par la forte teneur en étain (bien que l'alliage soit constitué des métaux habituels : cuivre et étain).



Support du miroir précédent photo J. Gispert

Le support du miroir est garni de vis, permettant de répartir les pressions sur toute la surface du bronze. Bien que statique, et de réglage empirique, cette organisation préfigure les supports modernes d'optique active. Mais pour la réaliser, il fallait inventer l'ordinateur…

**Les miroirs en verre**

Un progrès capital a été fait par **Léon Foucault** en 1856. Il a montré que l'on pouvait remplacer le bronze par du verre. Ce matériau est plus dur et plus cassant, et se laisse polir aussi finement qu'on le souhaite (les petits défauts sont cassés par l'outil, les aspérités subsistant étant plus petites). La qualité du polissage est de ce fait bien supérieure et l'on peut fixer une limite encore plus exigeante, quant à la taille maximale admissible des défauts.

Léon Foucault est né à Paris en 1819. Ingénieur, il a touché à de nombreux domaines importants pour l'astronomie. Son œuvre est immense : il développe la photographie et l'utilise pour l'astronomie (premier daguerréotype du Soleil), crée le pendule (qui prouve la rotation de la Terre), invente le gyroscope, mesure la vitesse de la lumière, découvre les courants de Foucault (utilisés aujourd'hui pour freiner les gros véhicules), et travaille sur la construction des télescopes…

Il a remplacé le bronze des miroirs de télescope par le verre (sur une idée de Huygens). Il a créé un appareil de mesure (foucaultmètre) pour vérifier visuellement la forme des miroirs de télescope et permettre leur retouche.

Mais il a aussi utilisé un coussin d'air placé sous le miroir pour égaliser les pressions (poids) sur toute la surface du verre. Ce coussin, relié à un tuyau mis à disposition de l'observateur, permettait à celui-ci de le gonfler plus ou moins pour obtenir la meilleure image possible. Là encore, ce procédé contient l'idée de l'optique active aujourd'hui possible grâce à l'ordinateur. Il n'est pas sûr que ce procédé ait été appliqué au télescope de Marseille.

L'inconvénient du verre est son pouvoir réfléchissant très faible. Foucault a su pallier élégamment cet inconvénient en plongeant le miroir poli dans une cuve contenant une solution liquide de nitrate d'argent ammoniacal. Il ajoute de l'essence de clous de girofles ( ! ) ; cette dernière contient un dérivé phénolique qui joue le rôle de réducteur. L'argent métallique se dépose à la surface du verre, en une couche très fine et très régulière, qui épouse parfaitement la forme du miroir, rendant ainsi le pouvoir réfléchissant excellent, de 92 % à 0,55 µm. C'est le meilleur pouvoir réfléchissant possible.

Dans ces miroirs, les deux fonctions (forme et réflexion) sont dissociées :

- le verre donne la forme, que l'argent épouse parfaitement ;
- l'argent donne la réflexion.

La taille des miroirs de télescope est une opération délicate, mais cependant à la portée d'un amateur méticuleux, et parfaitement maîtrisée par les professionels.

Mais… au contact de l'air, l'argent est attaqué par des composés sulfurés présents en faibles quantités. Il forme un sulfure noir qui, rapidement, obscurcit le miroir, et le rend inutilisable. Cependant, ce problème n'est pas aussi grave qu'avec le bronze : il suffit de tremper le miroir dans une solution chimique qui dissout l'argent, pour retrouver la surface polie intacte. On peut alors le réargenter pour le retrouver neuf. Cette

opération peut se faire en une journée. Cette technique a été utilisée pendant à peu près un siècle.

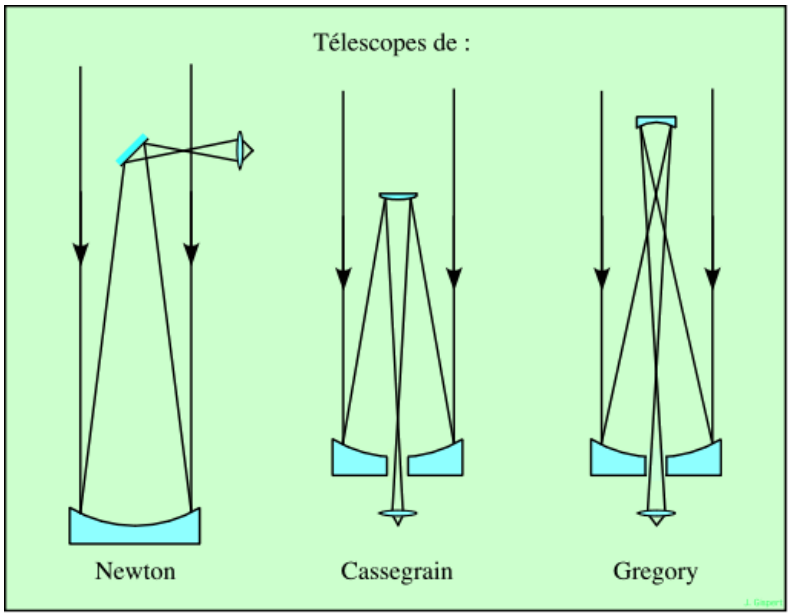
**Les types de télescopes**

Nous avons déjà exposé la combinaison de **Newton** : un miroir primaire parabolique, et un secondaire plan.

La combinaison de **Cassegrain** comprend un primaire concave, et un secondaire convexe. On peut montrer que pour tout primaire concave, on peut trouver une forme du secondaire qui assure le stigmatisme. Mais on utilise pratiquement un primaire parabolique, car dans un tel télescope on peut retirer le secondaire, et utiliser le foyer primaire (pellicule photographique directement au foyer primaire). Une telle utilisation n'est possible qu'avec un paraboloïde.

Dans le montage de Cassegrain, le secondaire est hyperbolique. La focale résultante est celle du primaire, multipliée par un facteur correspondant au grossissement de l'image par le secondaire (qui allonge la focale). Ce facteur est toujours supérieur à 2, et souvent assez grand. Plus la focale est longue, plus petit est le champ. Cette combinaison est donc bien appropriée pour observer une petite région du ciel sous un fort grossissement. Ceci justifie l'usage de ce même primaire en solo, au foyer primaire, pour avoir un champ plus important.

La combinaison de **Gregory** est assez semblable à celle de Cassegrain, mais le secondaire est elliptique.




A caractéristiques égales (focale, diamètre), un télescope de Gregory est plus long qu'un télescope de Cassegrain. Leurs qualités étant équivalentes, le modèle de Gregory n'est pas utilisé.

Ces trois types d'instruments ont un primaire parabolique. Le miroir principal possède donc un axe de révolution et un seul (par contre, *une sphère possède une infinité d'axes de révolution*, ce sera utilisé plus bas). En conséquence, les images sont parfaites pour l'étoile alignée avec l'axe, et présentent des défauts hors de l'axe. Ces défauts sont de plus en plus importants en s'éloignant de l'axe, et ceci limite le champ de l'appareil.

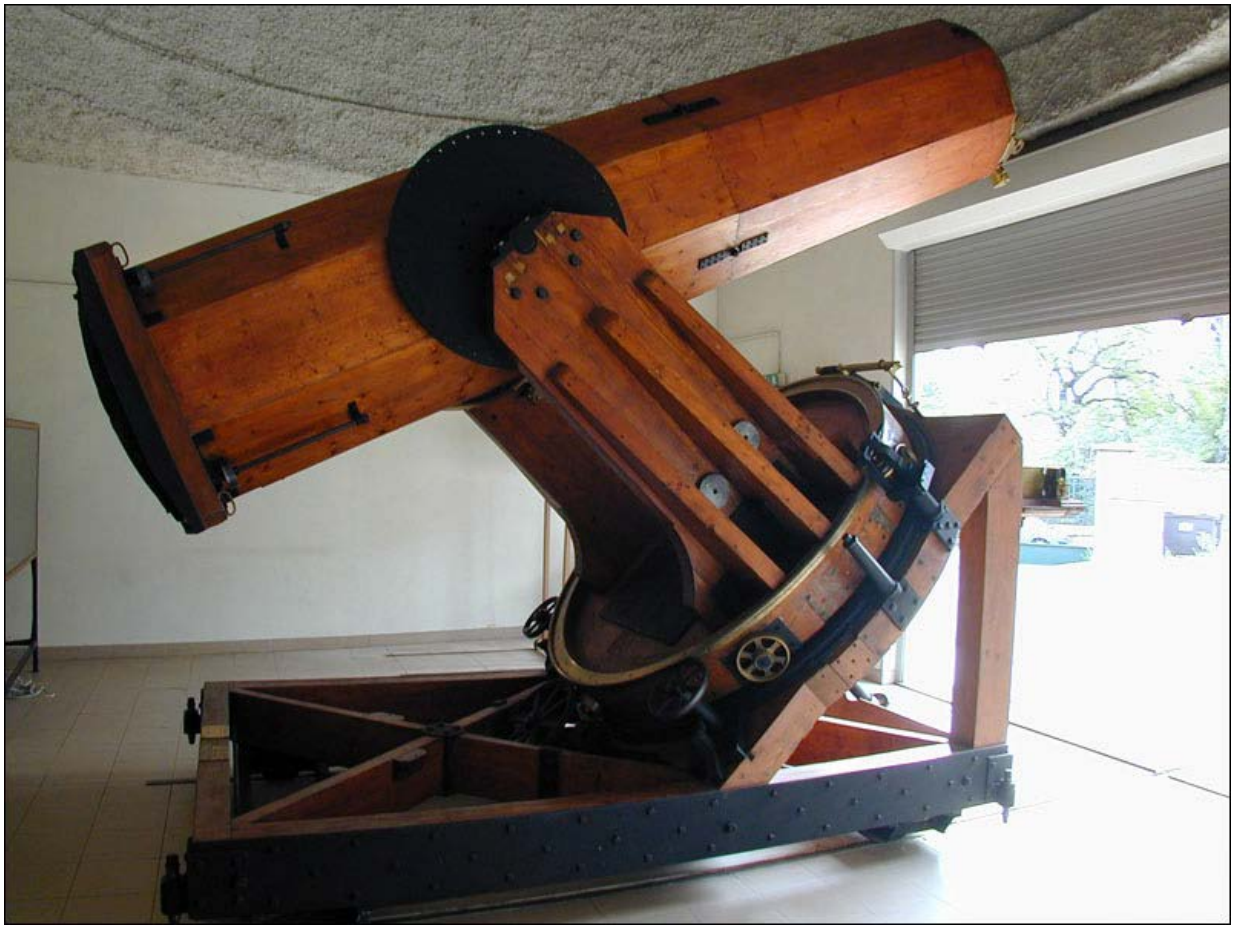
| *type* | *primaire* | *secondaire* |
|---|---|---|
| **Newton** | parabolique | plan |
| **Cassegrain** | parabolique | hyperbolique |
| **Gregory** | parabolique | elliptique |

**Le télescope de Foucault de l'Observatoire de Marseille**

Ce télescope est exceptionnel à deux titres :

- C'est le **premier** télescope à miroir de verre au monde ; il est resté le **meilleur télescope du monde** pendant près de trente ans ;
- Edouard Stephan l'a utilisé pour la première mesure **interférométrique** (diamètre d'une étoile). Cette technique est utilisée aujourd'hui sur tous les grands instruments.

Il est donc doublement l'ancêtre des meilleurs instruments actuels.



Télescope de Foucault installé en 1864 à l'Observatoire de Marseille photo Sauveur Lisciandra

Il est classé monument historique. Le diamètre du miroir est de 80 cm. Sa focale est de 4,50 m. La monture est due à Eychens. Le moteur original a disparu, il devait être mécanique. Il a été remplacé, dans les années 1930, par un moteur électrique. Pour assurer une vitesse constante, l'alimentation électrique était asservie à une horloge sidérale à balancier (horloge faisant un tour complet en 23 h, 56 mn et 4 secondes).

Une fois poli avec soin, le miroir doit conserver sa forme avec une grande précision. Il doit donc être très rigide, et pour cela on lui donne une grande épaisseur, quitte à en augmenter le poids. Sur la photo ci-dessous, on voit le miroir de Foucault dans la coupole d'exposition ; remarquez l'épaisseur, plus grande au centre :




Miroir du télescope de Foucault, dans la coupole d'exposition du télescope photo J. Gispert

Le procédé de métallisation utilisé par Foucault consistait à déposer par voie chimique une très fine couche d'argent. Par la suite, le miroir a été aluminié par M. J. Pissavin à l'Observatoire de Haute Provence (tel qu'on le voit sur la photo).

**Les débuts de l'interférométrie**

Les interférences, mises en évidence par Young, produisent des bandes sombres ou claires sur un écran. Lorsque la lumière provenant d'une source, et prenant deux chemins optiques différents, se combine sur un écran, l'interférence produite est constructive ou destructive, selon la phase (différence de marche). Ce phénomène a été mis à profit par Edouard Stéphan sur le télescope de Foucault de Marseille.

Il a obturé l'entrée du télescope à l'aide d'un cache dans lequel il avait ménagé deux trous. La lumière d'une étoile, Bételgeuse, passait par les deux trous et cheminait dans le télescope, pour se recombiner au niveau de l'oculaire, en produisant des interférences. On montre que la largeur des franges est fonction du diamètre de l'étoile, et de l'écartement des trous. Il existe un écartement minimum, au-delà duquel les franges disparaissent. Stéphan ne pouvait pas augmenter la distance entre les trous au-delà du diamètre du miroir. Il s'est donc contenté, avec cet écartement fixe, de viser différentes étoiles avec l'espoir que les franges se montreraient pour certaines (les plus petites), et non pour d'autres (plus grosses).

Stéphan n'a pas obtenu la disparition des franges… L'expérience ne lui permit donc pas de **mesurer** le diamètre des étoiles (Bételgeuse en particulier), mais il a montré que ce diamètre était inférieur à 0,158 " d'arc, ce qui représente une mesure 10 fois plus fine que tout ce qu'on pouvait faire à l'époque. Ce qui constituait donc en soi un grand progrès.

Mais le plus important de cette tentative est dans sa nature : c'était la première fois que la méthode interférométrique était appliquée. Or elle est universellement utilisée aujourd'hui ! Tout d'abord dans les radio-télescopes (la grande longueur d'onde facilite les mises au point), et maintenant dans tous les télescopes optiques modernes, à commencer par le VLT. C'est le moyen d'obtenir un pouvoir séparateur qui serait innaccessible avec un télescope unique de grand diamètre. Ceci sera expliqué plus loin.

Cette expérience a été refaite au Mont Wilson 25 ans plus tard, avec un télescope plus puissant, et a donné le résultat attendu.

> Le télescope de Foucault de Marseille est donc l'ancêtre de tous les télescopes modernes, à deux titres : **le miroir de verre, et l'interférométrie**.

## *Les progrès ultérieurs*

**Amélioration des verres**

Les premiers miroirs étaient en verre ordinaire, et depuis de grands progrès ont été accomplis dans la composition des verres. L'une des améliorations importantes a été de trouver des mélanges à très faible coefficient de dilatation (*zérodur*, *silice fondue*…). En effet, si le miroir se dilate, sa surface se déforme, et ses propriétés optiques en pâtissent.

**Changement de métal**

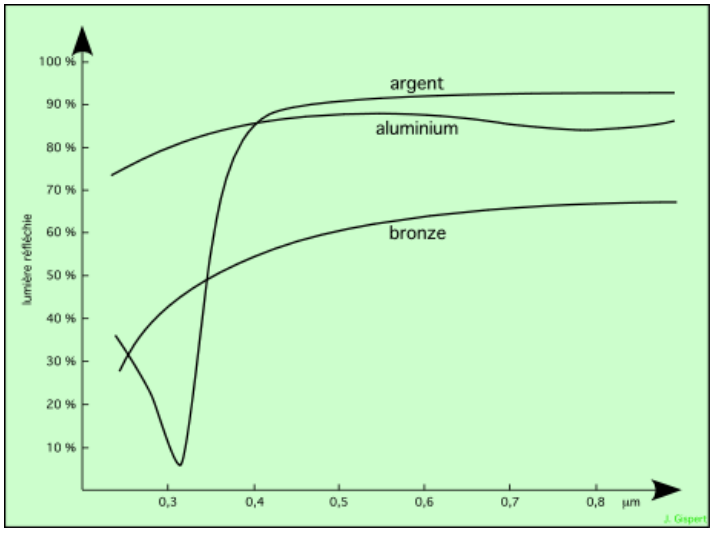
Au XX$^{e}$ siècle, les progrès techniques ont permis de remplacer l'argent, déposé par voie chimique, par de l'aluminium déposé par évaporation sous vide : technique due à Strong, en 1931.

L'avantage de l'aluminium par rapport à l'argent tient dans son oxyde, l'alumine, transparent et imperméable. La fine couche d'alumine qui recouvre l'aluminium, n'altère pas les propriétés optiques du miroir et de plus protège l'aluminium, à tel point que, une fois l'aluminium déposé, on produit une oxydation superficielle protectrice. Un miroir d'amateur ainsi traité ne nécessite pas de retouches pendant de longues années. Les miroirs professionnels, pour lesquels les tolérances sont bien plus faibles, est réaluminé régulièrement. Cette opération se fait dans la coupole même, au sous-sol.

Le pouvoir réfléchissant de l'aluminium est légèrement moins bon que celui de l'argent (89 % au lieu de 92 %), mais cet inconvénient est largement contrebalancé par la constance dans le temps des qualités du miroir, qui permet de comparer des clichés pris à des dates éloignées.

L'aluminium a un autre avantage sur l'argent : il réfléchit l'ultraviolet, alors que l'argent lui est transparent. Avec les récepteurs modernes, l'UV a pris beaucoup d'importance, car il est émis en abondance par les étoiles chaudes. Cette caractéristique de l'aluminium est donc décisive. A 0,25 µm, l'argent ne réfléchit que 33 %, l'aluminium 75 %.

La comparaison est facile à comprendre sur le graphique ci-dessous :




On y voit très bien que l'aluminium, s'il est un peu moins bon que l'argent dans le visible, est bien moins mauvais dans l'ultraviolet, où ses performances ne chutent que très peu (à gauche). La pente des courbes, qui descendent vers la gauche, donc vers le bleu, montre que le coefficient de réflexion baisse dans l'UV. L'aluminium permet d'observer dans le proche UV, l'argent ne le permettrait absolument pas. Pour le bronze, la chute est moins brutale, mais commence à grande longueur d'onde, dans le rouge. Le bleu étant faiblement renvoyé, donne sa couleur au métal !

Avec cette technique de fabrication, on a pu aller très au-delà du télescope de Herschell. Les télescopes du Mont Wilson ont marqué un progrès considérable, en permettant de clore le Grand Débat : télescope de 1,52 m en 1909, puis de 2,54 m en 1917. Le diamètre a augmenté jusqu'aux 5 m du télescope *Hale* (Mont Palomar, USA), puis aux 6 m du télescope soviétique *Bolchoï*. Ce dernier marque la limite des miroirs traditionnels (épais).

Aujourd'hui, avec les télescopes spatiaux, toutes les ondes électromagnétiques sont observables (non absorbées au-dessus de l'atmosphère). Pour l'IR, il faut disposer d'un miroir efficace dans ce domaine, et les trois métaux considérés ci-dessus ne conviennent pas. Par contre, l'or est excellent dans l'UV, et c'est donc lui qui est choisi pour les télescopes réservés à cette étude. Le télescope Herschel, réalisé par l'ESA pour l'observation dans l'infrarouge lointain, sera équipé d'un miroir de technologie entièrement nouvelle : impossible d'envoyer un miroir de verre de 3,5 m de diamètre dans l'espace, il se briserait dans les vibrations du lancement. De plus, le poids d'un miroir de verre serait incompatible avec les possibilités de lancement. Alors, les concepteurs se sont orientés vers un miroir en carbure de silicium. Ce matériaux est extrêment dur, se prête bien au polissage, et peut résister aux vibrations. Le seul ennui, c'est qu'on est incapable de fabriquer un bloc de carbure de silicium de 3,50 m de diamètre… On a donc dû développer une nouvelle technique consistant à fabriquer des pétales, assemblés par soudure. Le miroir ne fait que 3 mm d'épaisseur.

**Les montures**

La *monture* est la partie mécanique de la lunette ou du télescope, celle qui supporte l'instrument. Elle comprend un support (pied fixe) et une partie mobile permettant de diriger l'instrument vers l'objet à observer.

Depuis le début du XX$^{e}$ siècle, on était capable de faire des photos du ciel, et cette technique a apporté des progrès immenses en astronomie. Mais la photo impose des contraintes. Pour capter l'image d'objets de faible luminosité, il faut faire une pose de longue durée (on a atteint des poses d'une dizaine d'heures). Malheureusement (?), la Terre tourne (elle nous entraîne en direction de l'est) et son mouvement fait tourner, en apparence, les étoiles dans le ciel en sens inverse (donc vers l'ouest). Si on laisse un télescope fixe, les étoiles défilent à grande vitesse dans son champ (vitesse multipliée par le grossissement). Il faut donc concevoir un support (la monture) qui permette de modifier sans cesse son orientation.

La solution la plus naturelle, pour orienter un instrument, consiste à utiliser un axe vertical et un axe horizontal. C'est la *monture azimutale*. Elle est nommée ainsi car on repère la position d'un astre par l'angle qu'il fait, dans le plan horizontal, avec le méridien. Cet angle se nomme *azimut*. L'autre angle est la *hauteur*, ou distance angulaire entre l'étoile et l'horizon. Pour suivre une étoile, il faut agir sur les deux axes, et ce n'est pas facile… Pour l'observation visuelle avec un grossissement relativement faible, on s'en accomode ; mais pour la photographie, qui nécessite un mouvement très régulier, c'est strictement impossible, et un autre problème se pose, comme nous allons le voir.

- Un astre se lève à l'est, monte dans le ciel en tournant vers l'ouest jusqu'au méridien, où il culmine, puis continue sa marche vers l'ouest, mais en redescendant vers l'horizon pour aller s'y coucher. Pendant la première partie de la nuit, il monte, et pendant la seconde, il redescend. Son mouvement autour de l'axe horizontal n'est donc pas uniforme.
- La vitesse de l'axe vertical n'est pas constante non plus ; en projection sur l'horizon, l'astre se déplace plus vite dans le méridien qu'aux couchers et levers, et donc l'instrument doit suivre plus ou moins vite ;
- Enfin, observons au lever une galaxie elliptique, inclinée à 45° par rapport à l'horizon, Un appareil photo fixé sur le télescope à axe vertical (monture azimutale) enregistrera cette image inclinée de gauche à droite sur le cliché.
  Lorsque la galaxie coupe le méridien, elle se présente à l'horizontale, et donc elle sera photographiée parallèle au bord inférieur de la photo. Enfin, au coucher, elle se présentera inclinée à 45° à nouveau, mais dans l'autre sens.
  Si on fait un cliché à longue pose, (plusieurs minutes ou des heures), l'image de la galaxie tournera sur le cliché qui sera complètement flou. Pour remédier à cela, il faut faire tourner l'appareil photo autour du tube du télescope.

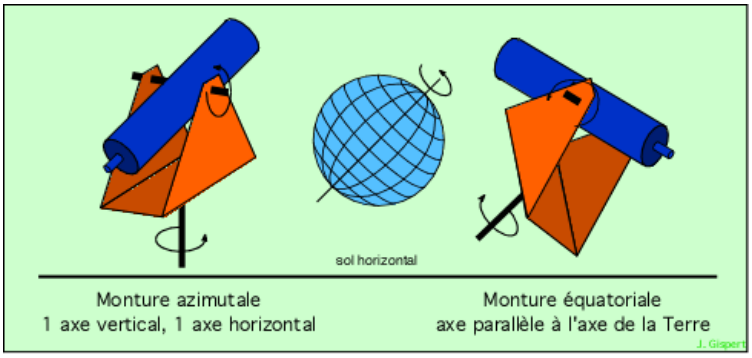
> Si vous voulez une représentation plus tangible afin de bien comprendre ce phénomène, prenez un arceau en demi-cercle, fait de jonc par exemple. Tenez chaque extrémité d'une main, de façon à placer la tête au centre du demi-cercle. Inclinez l'arceau, par rapport à l'horizontale, d'un angle complémentaire de la

latitude (90° - latitude). Placez, sur l'arceau, l'image d'une galaxie, et faites-lui parcourir toute sa longueur. Vous constaterez l'inclinaison variable de cette image par rapport au sol.

Si on veut faire une photo à longue pose de cette galaxie, il va falloir faire tourner l'appareil photo autour de l'axe du télescope pour compenser ce mouvement (nommé *rotation du champ*), sinon les images successives se brouilleront. Cette rotation du champ est une difficulté supplémentaire pour l'utilisation de montures azimutales. Les trois mouvements à contrôler sur une monture azimutale ne sont pas réalisables mécaniquement. Cette solution est donc inappropriée.

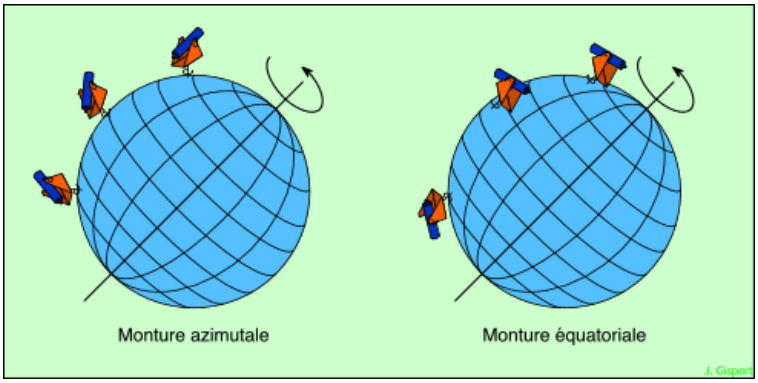
Les astronomes ont trouvé une parade : le mouvement de l'étoile étant dû à la rotation de la Terre sur son axe en 24 h (exactement 23 h 56 mn 4 s, il s'agit de la rotation sidérale), il suffit de **faire tourner le télescope sur un axe parallèle, dans le même temps, et en sens inverse**. C'est ce que fait une *monture équatoriale*. Pour pouvoir faire des photos d'un objet précis, avec un long temps de pose, il suffit d'entraîner le télescope d'un mouvement circulaire uniforme : un mécanisme d'horlogerie (tel qu'on savait en construire dès le XVII$^{e}$ siècle) fait parfaitement l'affaire. Sa simplicité d'entraînement a fait le succès de la monture équatoriale.

Le schéma suivant montre deux lunettes, utilisant des montures azimutale et équatoriale, dans la position qu'elles occupent par rapport au sol (le pied de la monture n'est pas représenté). A gauche, l'axe de la monture est vertical ; à droite, il est incliné suffisament pour être parallèle à l'axe de rotation de la Terre :




Les deux types de montures

Le sol est représenté, ainsi qu'une sphère terrestre montrant l'inclinaison de l'axe de rotation par rapport au sol. L'axe de l'instrument, dans la monture équatoriale, est parallèle à l'axe de rotation de la Terre.




Position des lunettes en fonction de la latitude

Remarquez que les lunettes azimutales ont toutes leur axe dirigé vers le centre de la Terre, c'est-à dire selon la verticale du lieu où elles se trouvent. Par contre, celles qui sont en monture équatoriale ont leur axe parallèle à l'axe de rotation de la Terre. Enfin, aux pôles, une monture azimutale serait également équatoriale ! Il est d'ailleurs question d'installer des instruments au pôle sud, bien que les conditions de vie y soient particulièrement rudes.

Sur le plan mécanique, la monture azimutale est bien plus stable. En effet, le poids du télescope repose sur l'axe vertical (verticale du lieu d'observation), par l'intermédiaire de la fourche, verticale elle aussi. Par contre, dans la monture équatoriale, les bras de la fourche tiennent le télescope en porte-à-faux, et le poids a tendance à les faire plier. Cette position est mécaniquement très mauvaise. De plus, selon l'orientation du télescope, les contraintes mécaniques changent, et entraînent des déformations. On conçoit très facilement que le poids du télescope ne peut être trop élevé.

La monture équatoriale a été déclinée en diverses variantes, qui assurent plus ou moins bien la stabilité. Celle qui est présentée au-dessus est la *monture à fourche*.

Petit télescope photographique de Maksutov (diamètre 10 cm, focale 1 m) en monture équatoriale à fourche.

Le bâti est fixé sur un robuste pied de géodésie. L'entraînement est fait par secteur lisse et moteur synchrone (visibles en bas à gauche).

Remarquez l'inclinaison de l'axe polaire, et le porte-à-faux de la fourche. Le poids de l'ensemble fourche-télescope est porté par les paliers de l'axe polaire, noyés dans la poutre dépassant du bâti.

La petite prise électrique visible sur le bâti assure l'alimentation du moteur en courant alternatif 220 V. Un boîtier générateur de courant (non représenté) permet l'utilisation en extérieur. Ce boîtier a été réalisé sur les plans de Serge Bertorello.

Cette monture est fortement inspirée de celles construites par Sauveur Lisciandra et Serge Bertorello, au sein de l'Association Marseillaise d'AStronomie (AMAS).

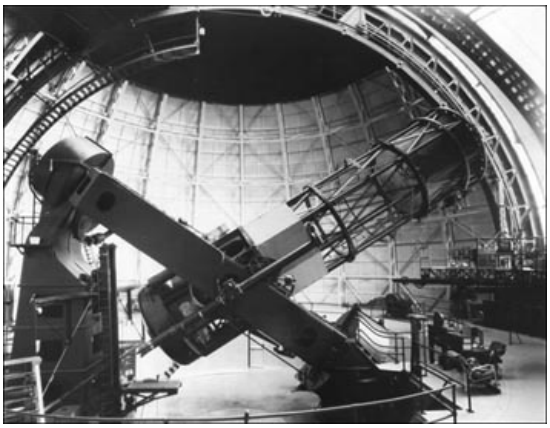
Monture réalisée par J. Gispert.



photo J. Gispert

Le premier télescope du Mont Wilson, de 1,5 m (60 pouces), est en monture à fourche. Mais le miroir seul pèse 850 kg. La pression sur le palier nord serait trop forte. Le palier a donc été équipé d'un flotteur cylindrique centré sur l'axe. Ce flotteur baigne dans une cuve de mercure.

Si on symétrise la fourche, on obtient la *monture à berceau* :



Télescope *Hooker* de 2,5 m, observatoire du Mont Wilson

Le berceau est une double fourche, qui englobe le tube du télescope. L'axe polaire de l'instrument est composé de deux parties rigoureusement alignées. La première est tenue par le pilier sud (en bas et à droite sur la photo), la seconde par le pilier nord (en haut et à gauche).

L'axe polaire ayant ainsi deux appuis, est beaucoup plus stable. Mais en contre-partie, on perd la possibilité d'observer dans la région polaire, qui est obstruée par le pilier nord (sur le télescope Hale du Mont Palomar, une variante permet d'observer la région polaire).

Enfin, la *monture allemande* (créée par Fraunhofer) tient le tube par un seul côté, et l'équilibre par un contre-poids. Le porte-à-faux est sur les deux axes…

Lunette Merz-Eychens de l'Observatoire de Marseille.

Objectif de 260 mm, taillé par Merz (Munich), longueur focale de 3,10 m. L'objectif est un doublet achromatique.

Installée en 1872, cette lunette est en monture allemande, construite par William Eichens. Elle est montrée ici en position de repos. Remarquez le pilier, sur lequel est placé l'axe polaire. A l'extrémité nord de l'axe polaire (à droite), se trouve le support de l'axe de déclinaison (bien visible), qui lui-même porte la lunette. On voit le contre-poids en bout d'axe de déclinaison, et on constate le porte-à-faux sur les deux axes.

On distingue le secteur denté de l'entraînement entre le haut du pilier et le support de déclinaison. Il est en contact avec une vis tangente, mue par un petit moteur électrique.

L'inconvénient de cette monture est l'opération de

retournement. Si on observe une étoile à son lever, on positionne le tube de la lunette à l'ouest du pilier. Après son passage au méridien, le tube vient buter contre le pilier. Pour poursuivre l'observation, il faut faire passer le tube de l'autre côté du pilier, ce qui constitue le retournement, pendant lequel on ne peut observer.



photo J. Gispert

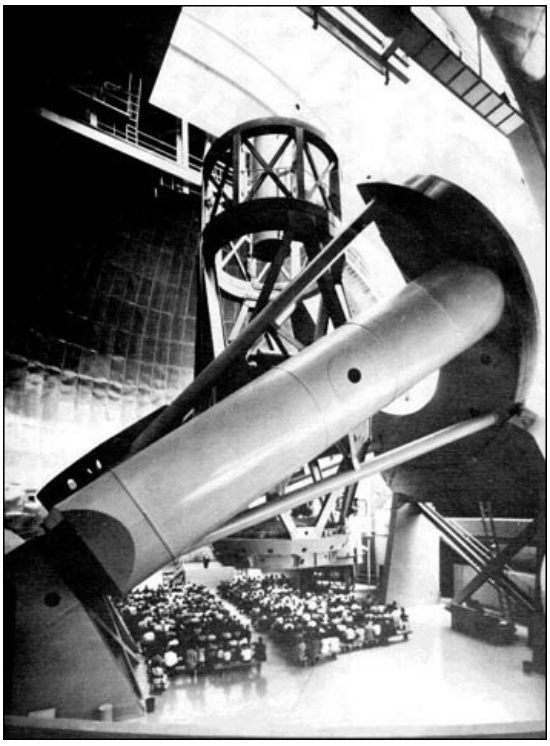
Les télescopes d'amateur du commerce sont, soit en monture allemande, soit en monture à fourche. Mais il y a du nouveau… que nous verrons plus loin.

**Le télescope Hale**

Le télescope *Hale* est le dernier (le plus grand) construit sur le même modèle que le premier télescope de Foucault, de 84 ans son aîné :

- son miroir est en verre rigide (épais),
- il est en monture équatoriale (à berceau),
- l'entraînement est mécanique.

Il a été inauguré en 1948, et possède un pouvoir séparateur théorique de 0,024 secondes d'arc (qui n'est bien sûr pas atteint à cause de la turbulence atmosphérique). Son miroir fini pèse 14,5 tonnes (20 tonnes de pyrex brut, avant la taille) ; le tube pèse 530 tonnes. Il a fallu 8 mois de refroidissement pour éviter la formation de bulles et de pailles dans le disque de verre.



Le poids du miroir est inacceptable pour la monture, au-dessus de 5 m. C'est la raison pour laquelle le télescope du Mont Palomar est resté le plus grand du monde pendant 26 ans : il serait très difficile de réaliser un instrument plus important, en utilisant les mêmes principes. Pour réduire le poids du miroir, celui-ci a été creusé derrière, par des alvéoles en nid d'abeille (diminuant la masse en conservant la rigidité).

Remarquez la monture en *fer à cheval*, qui est une modification de la monture à berceau. Cet évidement du berceau côté nord (à droite) permet l'observation du pôle. Mais pour l'obtenir, il a fallu supprimer le demi-axe polaire nord, et le remplacer par un roulement.

La photo a été prise pendant la conférence donnée sous le télescope pour son inauguration : l'assistance, une centaine de personnes, y trouve place sans difficulté, et donne l'échelle…

Dernière particularité : le tube évidé (pour réduire le poids) permet de voir la cage située en haut. Un astronome peut s'y tenir pour effectuer des observations directement au foyer primaire !

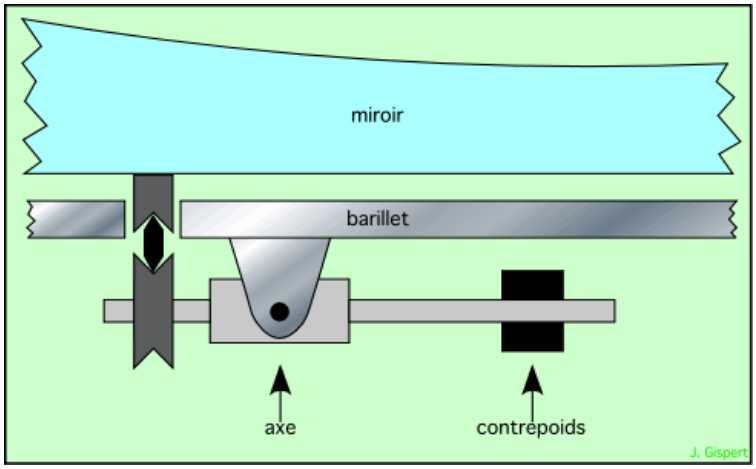
**Le barillet**

Pour un petit miroir, jusqu'à 30 cm pour fixer les idées, la solution est simple. Il suffit de le placer sur une surface suffisamment rigide, facile à obtenir dans ce petit diamètre.

Pour des instruments plus importants, le support lui-même ne sera pas assez rigide pour garantir la forme parfaite. Le télescope devant s'orienter pour viser l'astre à étudier, le miroir ne reposera que rarement à plat sur le barillet. On peut dire qu'il sera dans une position allant d'horizontale à verticale. Et quelle que soit cette position, il faudra que les forces appliquées à l'envers du miroir soient égales sur toute sa surface.

La première solution qui a été utilisée est un coussin d'air ! Bien entendu, l'auteur est Léon Foucault, qui l'a appliquée à un miroir de 40 cm, et peut-être à celui de 80 cm de l'Observatoire de Marseille, mais on n'a pas de certitude à ce sujet. L'observateur dispose d'un petit tuyau communiquant avec le coussin, dans lequel il soufflait plus ou moins fort pour équilibrer les pressions. Pour être astronome, il fallait avoir du coffre !

Pour des miroirs plus lourds, cette méthode n'est pas applicable, sans un compresseur. Elle a été abandonnée au profit d'une solution mécanique. Au lieu d'appuyer le miroir sur toute sa surface, on le pose sur des *leviers astatiques*, comme le montre la figure ci-dessous :




Bien entendu, le miroir est rigide par lui-même, les pressions de deux leviers adjacents se transmettant par les propriétés mécaniques du verre. Le contrepoids est réglable ; il définit la pression sur le miroir, qui est maximale lorsque le miroir est horizontal, et nulle s'il est vertical. Il est clair que la position et le nombre de ces leviers sont déterminants pour assurer le bon équilibre du miroir, et doivent être calculés très précisément.

Le miroir du télescope de 193 cm de l'Observatoire de Haute Provence repose sur trente leviers astatiques, qui lui assurent une stabilité parfaite.



Observatoire de Haute Provence photo J. Gispert

Photo prise depuis la coupole du grand télescope de 1,93 mètre, montrant au loin, sur la droite, la coupole du télescope de 1,52 mètre, et devant, le Grand Prisme Objectif.

Voilà le point où on en était à la construction du dernier grand télescope classique, le télescope Bolchoï soviétique. Nous verrons plus loin l'évolution, ou plus précisément, la révolution qui a permis de passer au-delà.

**Le verre**

Le verre destiné aux lentilles et miroirs a toute une histoire. Sa fabrication est très complexe, car les propriétés doivent être exactement les mêmes en tout point de la masse. Ceci a été très difficile à réaliser.

L'une des difficultés tient à l'existence de deux formes de verre, nommées α et β, qui ne se forment pas à la même température. La variété β est stable à chaud, la variété α à froid. Lorsqu'un gros bloc de verre refroidit, il se forme un noyau de verre β entouré d'une carapace de verre α. Ceci est inutilisable. Pour éviter ce problème, il faut chauffer le bloc à une température de l'ordre de 600°, et le refroidir lentement. Cette opération s'appelle le *recuit*. Elle est nécessaire pour obtenir un disque de qualtié.

La composition du verre est aussi très importante, non seulement pour les qualités optiques, mais aussi pour le coefficient de dilatation, qui doit être le plus bas possible. Sur ce plan, les verres riches en silice (pyrex) sont de bons candidats.

Le miroir du 5 m du Mont Palomar est en pyrex. Son épaisseur totale est de 70 cm ! Mais pour l'alléger, il est creusé de 114 alvéoles qui ne diminuent pas sa résistance mécanique. La coulée a été un exploit, à une époque où on n'avait jamais manipulé de telles quantités de verre. Le moule a été chauffé à 1.350° avant la coulée. Le premier disque n'a pas été réussi, il a fallu tout recommencer. Le recuit a duré 11 mois, en abaissant la température chaque jour de 0,8° seulement. Les tensions résiduelles dans le verre sont extraordinairement faibles.

Un verre particulier est nommé *zerodur* (nom de marque). Son coefficient de dilatation est voisin de zéro (d'où son nom). Il permet une grande qualité de polissage, et ces qualités en ont fait pendant longtemps le verre de choix pour les miroirs. Par contre, il présente des inclusions, qui le rendent totalement impropre à la fabrication de lentilles.

**Foyers d'un télescope**

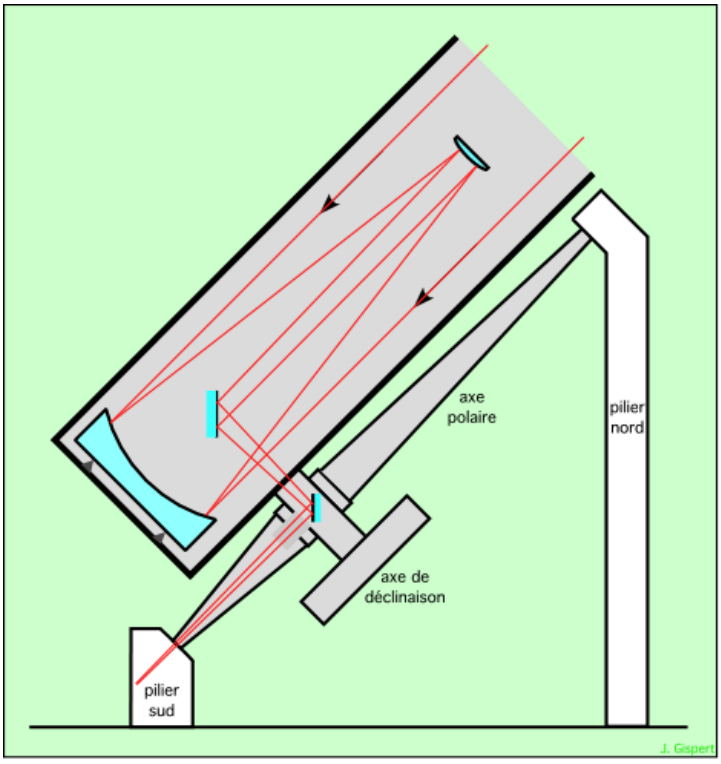
On appelle *foyer* l'endroit où les rayons convergent. Un miroir seul possède donc un foyer dit *foyer primaire*, celui où l'image se forme en l'absence de tout autre dispositif optique. Si on place une pellicule photographique au foyer primaire, elle recueille simplement l'image donnée par le miroir. C'est la première façon de faire une photo astronomique, en remplaçant l'oculaire du télescope par l'appareil photo sans objectif.

Mais dans certains cas, cette méthode n'est pas adaptée. Tout d'abord, le foyer primaire est devant le miroir ; tout objet placé au foyer primaire obstrue le télescope, et empêche la lumière d'y entrer en totalité (on parle *d'obstruction*). Pour l'observation visuelle, une solution consiste à placer un miroir plan incliné à 45° sur l'axe du miroir, de façon à renvoyer le faisceau sur le côté, là où la tête de l'observateur ne gêne pas. C'est le *foyer Newton*. Il limite l'obstruction.

La focale du miroir détermine la dimension de l'image au foyer primaire. Ainsi, le même télescope sera très adapté à la photo des grandes nébuleuses (grand champ), mais mal adapté à la photographie planétaire : l'image de la planète est toute petite… Pour grossir l'image, il faudrait allonger la focale. Il existe un moyen de le faire, c'est de placer sur le faisceau émergeant du miroir un dispositif optique divergent, qui va écarter le faisceau lumineux. Ceci peut se faire à l'aide de lentilles, en réintroduisant un chromatisme dans l'instrument, ou bien avec des miroirs, qui n'ont pas cet inconvénient. Dans le premier cas, la lentille se nomme *lentille de Barlow* ; elle est divergente et s'adapte bien à la photographie planétaire. C'est une méthode utilisée par beaucoup d'amateurs.

Les instruments professionels sont souvent conçus pour allonger la focale à l'aide d'un miroir. Dans ces conditions, le miroir principal est percé en son centre, de façon à laisser passer la lumière. Le faisceau qui arrive des étoiles est renvoyé vers la sortie du tube. Là où l'on place le miroir plan à 45° dans un Newton, on met un miroir secondaire hyperbolique (divergent), dont l'axe est aligné avec celui du miroir principal. Le faisceau est donc renvoyé vers le miroir principal, et allongé, de telle sorte qu'il va passer par le trou pour aller converger derrière le miroir principal. Si le miroir secondaire est convexe, il s'agit du *foyer Cassegrain*, s'il est concave, c'est le *foyer Gregory* (peu usité).

Foyer Newton et foyer Cassegrain sont fixes par rapport au tube du télescope, et donc entraînés avec lui. Sur un grand instrument, on peut accrocher divers capteurs même assez lourds : appareil photo, petit spectrographe… Mais le poids admissible reste limité, et un spectrographe très dispersif (qui disperse fortement la lumière, et sépare nettement les différentes raies), ne peut être utilisé. Ces instruments pèsent des centaines de kilogrammes (en particulier, ils doivent être thermostatés). Il fallait donc trouver une solution pour renvoyer le faisceau produit par le télescope vers une direction fixe dans l'observatoire, où l'on pourrait placer les capteurs quel que soit leur poids et leur encombrement. La solution est le *foyer Coudé* sur les montures équatoriales. Un miroir tertiaire plan est placé dans le tube, au niveau de l'axe de déclinaison creux. Le faiseau y est renvoyé. Un quatrième miroir renvoie l'image parallèlement à l'axe du monde. A ce prix, on obtient un faisceau émergeant fixe.




foyer coudé

La lumière est renvoyée par le miroir tertiaire à travers l'axe de déclinaison, autour duquel tourne le tube. Là, un miroir quaternaire renvoie le faisceau dans l'axe polaire. Ainsi, le foyer final se trouve quelque part dans le pilier sud (à gauche en blanc) du télescope. On peut y placer des instruments bien plus lourds qu'au foyer Cassegrain. Parfois, on renvoie le faisceau sous la coupole. La situation fixe du spectrographe évite des flexions internes, qui pourraient produire une dérive des mesures.

Pour les montures altazimutales modernes, le problème se pose en d'autres termes. On place un miroir plan dans le tube (miroir ternaire), de telle manière à renvoyer le faisceau dans l'axe horizontal creux (qui remplace l'axe de déclinaison). Le faisceau est alors accessible sur le bâti de l'instrument, qui tourne avec le télescope, mais est suffisament robuste pour accueillir des instruments lourds. L'instrument est entraîné en azimut. Il s'agit du *foyer Nasmith*.

**Résumé :**

| monture | foyer | observations |
|---|---|---|
| équatoriale | Newton | Le foyer est solidaire du tube, proche de son ouverture, sur le côté. |
| | Cassegrain et Gregory | Ces deux foyers sont solidaires du tube, sous le miroir. |
| | Coudé | Le foyer Coudé correspond à une monture équatoriale, il renvoie le faisceau dans une direction fixe |
| altazimutale | Nasmyth | Le foyer est solidaire du bâti azimutal. |

**Poids du miroir**

Le poids du miroir se justifie par la nécessité d'avoir une surface optique parfaite, au $100.000^{e}$ de millimètre près… Pour maintenir une telle précision en cours d'utilisation (dans toutes les positions possibles), il faut que le miroir soit très rigide, donc très épais. Mais l'épaisseur augmente plus vite que le diamètre.

En effet, les déformations d s'expriment par :

$$d = c\ R^4 / e^2$$

où c est une constante. Soit un miroir de rayon R et d'épaisseur e. Si on veut obtenir la même déformation pour un miroir de rayon double 2R, il faut lui donner une épaisseur e' telle que :

$c\ R^4 / e^2 = c\ (2R)^4 / e'^2 = 16\ c\ R^4 / e'^2$

d'où : $c\ R^4 / e^2 = 16\ c\ R^4 / e'^2 \quad e'^2 = 16\ e^2 \quad e' = 4\ e$

Remplacez le double (2) par un facteur général k ; vous obtiendrez :

$$e' = k^2 e$$

Si le diamètre du miroir est multiplié par k, son épaisseur doit être multipliée par $k^2$. Pour passer de 5 m (Mont Palomar), à 10 m, il faudrait multiplier l'épaisseur par 4. Le volume du miroir serait donc multiplié par $2 \times 2 \times 4 = 16$ fois ! Donc son poids également… ce qui donnerait 230 tonnes pour le seul miroir. Le temps de refroidissement d'un tel bloc de verre, non linéaire, s'évaluerait en années ou dizaines d'années… Le support d'un tel miroir n'est pas envisageable. On voit bien la limite.

## *Où l'informatique entre en scène…*

**Première révolution informatique : la monture**

En 1975, les soviétiques ont construit le télescope *Bolchoï* à Zelentchouk, de 6 mètres de diamètre. Le miroir pèse 42 tonnes. Pour résoudre les problèmes mécaniques, ils ont utilisé une **monture azimutale**. Se pose alors le problème des 3 mouvements à contrôler (le troisième pour compenser la rotation du champ) : mais depuis l'installation du Palomar, l'informatique avait été inventée, et l'ordinateur a été utilisé pour les piloter. Il est parfaitement capable de calculer à tout instant la vitesse à donner à chaque moteur. C'est la première révolution informatique pour l'astronomie instrumentale.

Signalons que le temps de refroidissement du disque de verre, après avoir été coulé, a été de l'ordre de deux ans, pour éviter les défauts. On conçoit que ce temps est une **nouvelle limitation** difficilement contournable pour aller plus loin.

Le pouvoir séparateur théorique atteint 0,02 seconde d'arc. Un regret pour ce bel instrument, il est situé dans le Caucase (sur l'ancien territoire soviétique), dans un lieu qui n'offre pas de qualités atmosphériques suffisantes pour mettre en valeur ses capacités (le seeing -voir un peu plus bas- descend rarement en-dessous de la seconde d'arc).

**Deuxième révolution informatique : l'optique active**

Pourquoi les ingénieurs soviétiques ont-ils limité leur télescope à 6 mètres ? Parce qu'ils avaient atteint une nouvelle limite, liée à la construction du miroir lui-même (ils ont dû d'ailleurs polir un second miroir, le premier n'ayant pas donné satisfaction). Nous avons vu plus haut que pour conserver la forme parfaite du miroir malgré les mouvements, il fallait qu'il soit d'une très grande rigidité. Plus on augmente son diamètre, plus on doit augmenter son épaisseur (voir plus haut). Puisque diamètre et épaisseur augmentent, le volume augmente encore plus rapidement, et le poids avec. Avec ces principes, un miroir de 10 m de diamètre devrait peser dans les 230 tonnes, ce qui est impossible à déplacer.

Mais il y en a une autre : il faut, pour constituer le disque de verre dans lequel on taillera le futur miroir, une quantité de verre énorme, qui sera coulée dans un moule à une température de l'ordre de 1.000°. Première difficulté : il se forme de petites bulles d'air dans le liquide, qui seront emprisonnées dans le verre durci. Au moment de la taille, on risque d'avoir des trous dans le miroir ! Pour éviter cela, il faut que le refroidissement soit assez lent pour permettre aux bulles de monter à la surface.

Il y a encore pire : en supposant le refroidissement assez lent pour éviter les bulles, il sera encore beaucoup trop rapide. Etant donnée la grande épaisseur du disque, sa surface, en contact avec l'air ambient, va refroidir et durcir, alors que le cœur est encore liquide. On aura alors une croûte dure, contenant un noyau liquide qui, en se refroidissant, va se contracter et diminuer de volume. Les tensions mécaniques que cela entraîne risquent de briser le disque, au mieux ; au pire, le disque résistera et se brisera pendant la taille…

Pour éviter ces tensions, il faut que toute la masse du verre se durcisse en même temps, donc que la température soit la même partout. Pour atteindre cet objectif, il faut que le refroidissement soit de moins d'un degré par jour.

Bien évidemment, plus la masse du miroir est grande, plus le refroidissement doit être lent. Avec ce principe de construction des miroirs, il faudrait une dizaine d'années pour refroidir un miroir de 8 mètres.

La deuxième révolution informatique a été réalisée en 1989 par *l'ESO* (European Southern Observatory), avec le *N.T.T.* (*New Technology Telescope*), équipé d'un miroir de 3,6 mètres seulement. Il s'agit d'un télescope expérimental, destiné à valider une nouvelle méthode. Nous avons vu que le poids du miroir croît très vite avec le diamètre (15 tonnes pour le 5 m évidé, 42 tonnes pour le 6 m). Dans la perspective de construction de très grands miroirs, il faut trouver un moyen pour les alléger, pour en diminuer l'épaisseur, sans altérer la forme. Le miroir du N.T.T. ne fait que 24 cm d'épaisseur, c'est donc un miroir mince et relativement souple. La révolution se place dans le support de ce miroir, qui est constitué de 75 vérins commandés en temps réel par un ordinateur. Toute altération très légère de la forme du miroir, mesurée par une méthode optique précise, est immédiatement corrigée par une action sur les vérins, qui modifient la pression exercée sur le verre.

Cette technique, nommée *optique active*, est maintenant utilisée sur tous les grands télescopes, le coût de l'ordinateur de contrôle étant négligeable devant les économies faites par ailleurs.. En particulier, citons le *V.L.T.* (Very Large Telescope, européen). C'est un ensemble de 4 télescopes de 8,20 m de diamètre chacun, remarquable à plus d'un titre, et que nous détaillerons plus loin. Placés dans l'un des deux meilleurs sites du monde, ces instruments donnent des images d'une qualité exceptionnelle.

Le réglage des vérins n'est pas fait une fois pour toute ; lorsqu'on déplace le télescope, les forces changent ; s'il y a un peu de vent, les forces changent… Chaque vérin doit être réglé plusieurs fois par seconde ! Le problème est alors de savoir comment calculer les poussées. Ceci se fait en observant une étoile du champ : on prélève l'image de cette étoile par un petit miroir en haut du tube du télescope, et on l'envoie vers une camera CCD. Une telle caméra est une grille de minuscules cellules photoélectriques, disposées comme une grille de mots croisés (chaque cellule produit un pixel de l'image). A un instant donné, l'image de l'étoile se trouve sur la cellule D5 par exemple. Une fraction de seconde plus tard, elle passe sur la cellule D6. L'ordinateur auquel est connectée cette caméra détecte ce changement, et calcule les pressions à exercer par les vérins pour ramener l'image en D5. Ce mécanisme donne un meilleur résultat que ce qu'on obtenait avec la rigidité des miroirs traditionnels. En gagnant sur le poids, sur le temps de refroidissement, sur le coût même, on gagne aussi sur la précision !

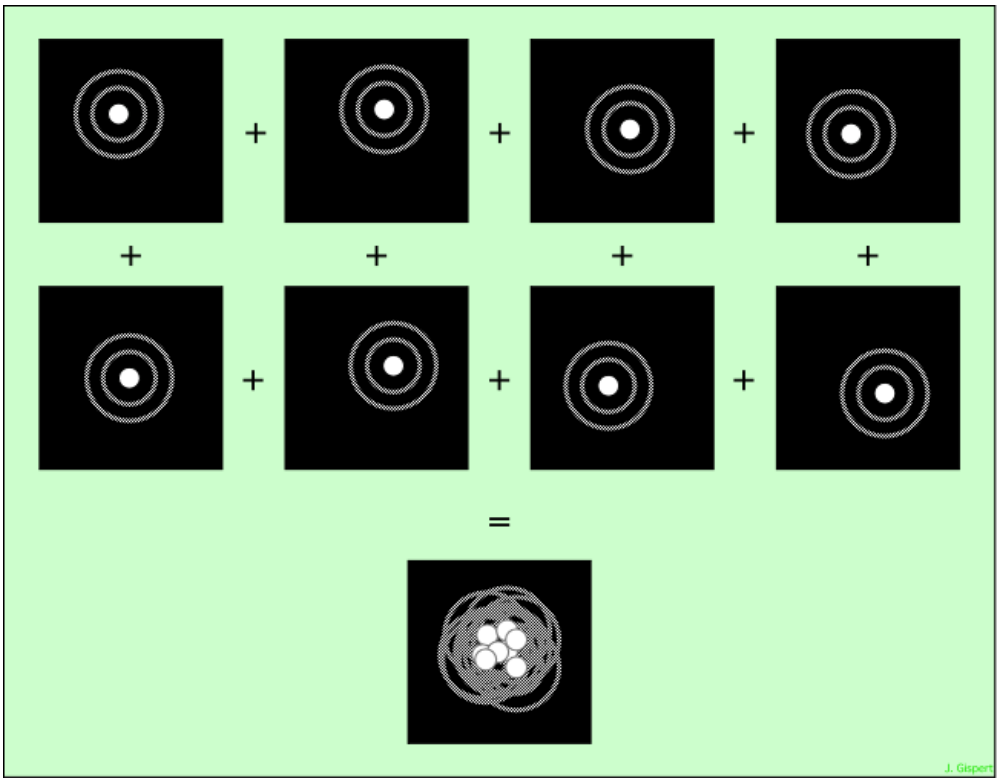
**Le seeing**

Que se passe-t-il lorsqu'on utilise un instrument pour observer le ciel ?

La lumière qui nous arrive des étoiles traverse l'atmosphère de la Terre avant de parvenir sur le miroir. Or l'atmosphère n'est pas parfaite optiquement, loin s'en faut. Ses défauts limitent le pouvoir séparateur d'un télescope, quel que soit son diamètre, à celui d'un instrument d'amateur de 30 cm de diamètre ! Le pouvoir séparateur réel est de l'ordre de 1" d'arc seulement (0,4" dans des conditions exceptionnelles). Cette limite imposée par l'atmosphère se nomme le *seeing*. C'est le pouvoir séparateur effectif de l'ensemble instrument-atmosphère.

Si on a construit des instruments de plus de 30 cm de diamètre (beaucoup plus) c'était donc uniquement pour voir des objets plus faibles. Le gaspillage colossal que représente cette limitation est insuportable pour un astronome normalement constitué… d'autant plus que les organismes financeurs demandent des résultats à la hauteur de leurs efforts !

L'explication du problème est simple dans son principe : la *tache de diffraction* est déplacée très rapidement par la turbulence. Les schémas ci-dessous montrent cette tache avec les *anneaux de diffraction*, tels qu'ils apparaissent successivement. Les images sont séparées d'un dixième de seconde (de temps). La persistence rétinienne accumule ces images pour donner une tache plus grosse, empâtée (figure du bas) :




Une animation permet de visualiser ce qui se passe avec des télescopes de différents diamètres.

Pour atteindre le pouvoir séparateur théorique des instruments, une solution évidente vient à l'esprit : supprimer l'atmosphère ! Non pas en la pompant, selon la technique Shadock, mais en plaçant le télescope en orbite autour de la Terre : c'est ce qui a été fait avec le *H.S.T.* (Hubble Space Telescope). Son miroir de seulement 2,4 m de diamètre (*seulement* s'il était sur Terre) nous a donné les images les plus fines que nous ayons jamais eues, car il atteint 0,05" d'arc de pouvoir séparateur : c'est dix fois meilleur que les meilleures images que l'on puisse obtenir au sol.

**Troisième révolution informatique : l'optique adaptative**

Faut-il donc désormais envoyer les instruments dans l'espace, avec les difficultés de construction, de maintenance, et le prix que cela entraîne ?

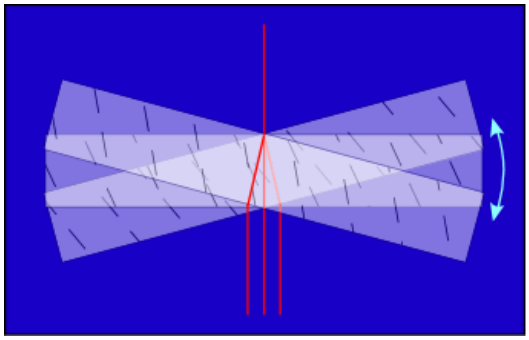
La réponse était *oui* il y a quelques années. Mais maintenant, on peut dire *non* (presque). C'est encore l'informatique qui vient à notre secours, avec une méthode semblable à l'optique active qu'on a vue plus haut.

La turbulence atmosphérique, contre laquelle il faut lutter, a été modélisée par Kolmogorov en 1941, à partir de la structure de l'atmosphère et des échanges d'énergie entre les différentes couches, et aux différentes échelles.

L'atmosphère est ici très simplifiée, sous la forme d'une couche unique oscillant autour d'un point. On la représente par une plaque de verre assez épaisse.

Lorsque la plaque est horizontale, le faisceau la traverse sans déviation. Lorsqu'elle est inclinée, le faisceau est dévié du côté de l'inclinaison.

L'image de l'étoile donnée par ce faisceau oscille donc de part et d'autre de la



position centrale.

Ce shéma montre deux lames de verre identiques :

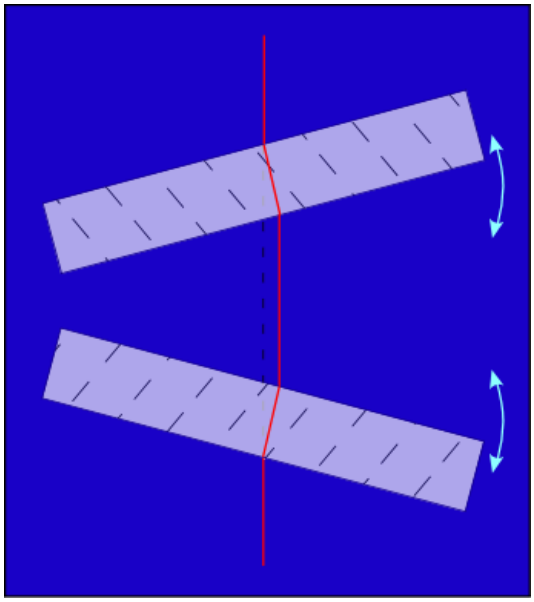
la lame supérieure modélise l'atmosphère, et oscille aléatoirement comme on l'a vu plus haut.

La lame inférieure a été ajoutée, et on la force à osciller comme la première, mais en opposition de phase : lorsque la lame supérieure penche à droite, la lame inférieure doit pencher à gauche d'un même angle.

La déviation du faisceau produite par la lame supérieure est exactement annulée par une déviation opposée en bas. Au bout du compte, le faisceau reste stable pour l'observateur qui se situe en bas.

Cette déformation des images se nomme *TT* pour *Tip and Tilt*. Elle indique la variation angulaire d'arrivée de l'image.

Ce n'est pas la seule déformation due à la turbulence : l'atmosphère se comporte aussi comme si la plaque de verre se gondolait. Il faut donc, en plus, imposer à la plaque inférieure des déformations semblables et opposées. C'est l'ensemble de ces dispositifs qui constitue l'Optique Adaptative.



L'onde nous arrivant d'une étoile est une sphère, dont le rayon est tellement grand, que sa surface est localement plane. Le phénomène que nous venons de décrire cabosse cette onde, et l'optique adaptative la décabosse.

Le *temps de cohérence* est le temps pendant lequel on peut considérer l'image comme stable. Il est de l'ordre de 2,5 à 70 ms. Une pose plus courte donne donc une bonne image, si on peut se contenter de peu de lumière. L'idée de déformer l'image en sens inverse de l'atmosphère est due à Babcock en 1953… Mais la technique n'était pas prête. C'est finalement en Europe, tout particulièrement en France, qu'un premier prototype nommé *Come-on*, a été construit en 1987.

On place une caméra vidéo sur le bord de l'image obtenue par le télescope ; l'image d'une étoile brillante qui servira de guide tombe sur l'un des éléments sensibles de la caméra. L'ordinateur détecte cette image. Une fraction de seconde plus tard, l'image se déplace à cause de la turbulence atmosphérique. Elle tombe sur un autre élément sensible. L'ordinateur le détecte, et commande une pression des vérins pour déformer le miroir afin de ramener l'image à l'endroit où elle était avant.

Cette méthode, nommée optique adaptative, permet de corriger en temps réel les effets de la turbulence, et d'atteindre le pouvoir séparateur théorique de l'instrument, malgré l'atmosphère. Elle est maintenant utilisée sur tous les grands télescopes.

**Sourire**

On entend souvent dire que l'astronomie coûte cher, et ne sert à rien. Evidemment, si on n'est pas curieux de comprendre ce qui nous entoure…

Mais remarquez que tous les constructeurs d'appareils photo numériques vous proposent maintenant des systèmes de compensation de mouvements ! Vous pouvez photographier en courant, et obtenir une image nette. Comment est-ce possible ?

Tout simplement en utilisant le même principe que les astronomes. On analyse l'image donnée par l'objectif, et on déplace un miroir pour la maintenir en place.

Comme quoi les recherches les plus *inutiles* trouvent des applications… utiles à tout le monde !

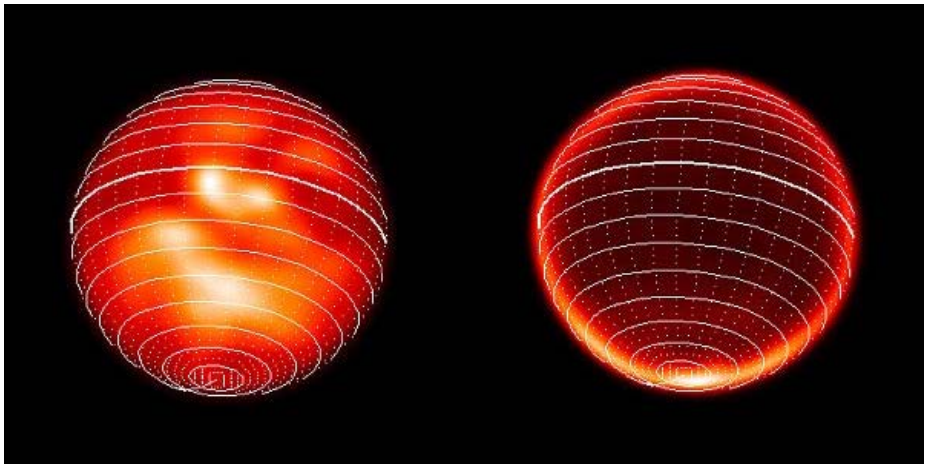
Bien que le principe soit le même (déformer un miroir par des vérins, commandés par ordinateur), la différence entre optique active et optique adaptative tient dans la nature des déformations corrigées :

- **l'optique active** s'applique au miroir principal, et corrige ses déformations provoquées par le vent, par sa position par rapport à la verticale etc.; la fréquence des ajustements est de l'ordre de dix par seconde ;
- **l'optique adaptative** corrige les effets de l'atmosphère, qui sont plus rapides : il faut agir sur le miroir 100 fois par seconde. Cette fois, c'est le miroir secondaire qui est contrôlé.

Sans optique adaptative, un miroir de 8,2 m situé au Cerro Paranal ne donne pas de détails plus fins qu'un télescope d'amateur de 45 cm…

L'optique adaptative ne fait pas partie de la structure principale des télescopes. Ceci permet de modifier les systèmes au cours du temps. Un système nommé *MACAO* (*Multi-Application Curvature Adaptive Optics*) a été installé au foyer Coudé de chacun des 4 grands télescopes (le foyer Coudé est réservé pour l'interférométrie). Le *ratio de Strehl*, qui indique la quantité de lumière présente dans la tache de diffraction. Celle-ci est étalée par la turbulence, et l'optique adaptative la remet en forme. Un ratio de 100 % serait une correction parfaite. Le système MACAO atteint 55 %. Il est utilisé pour l'interféromètre.

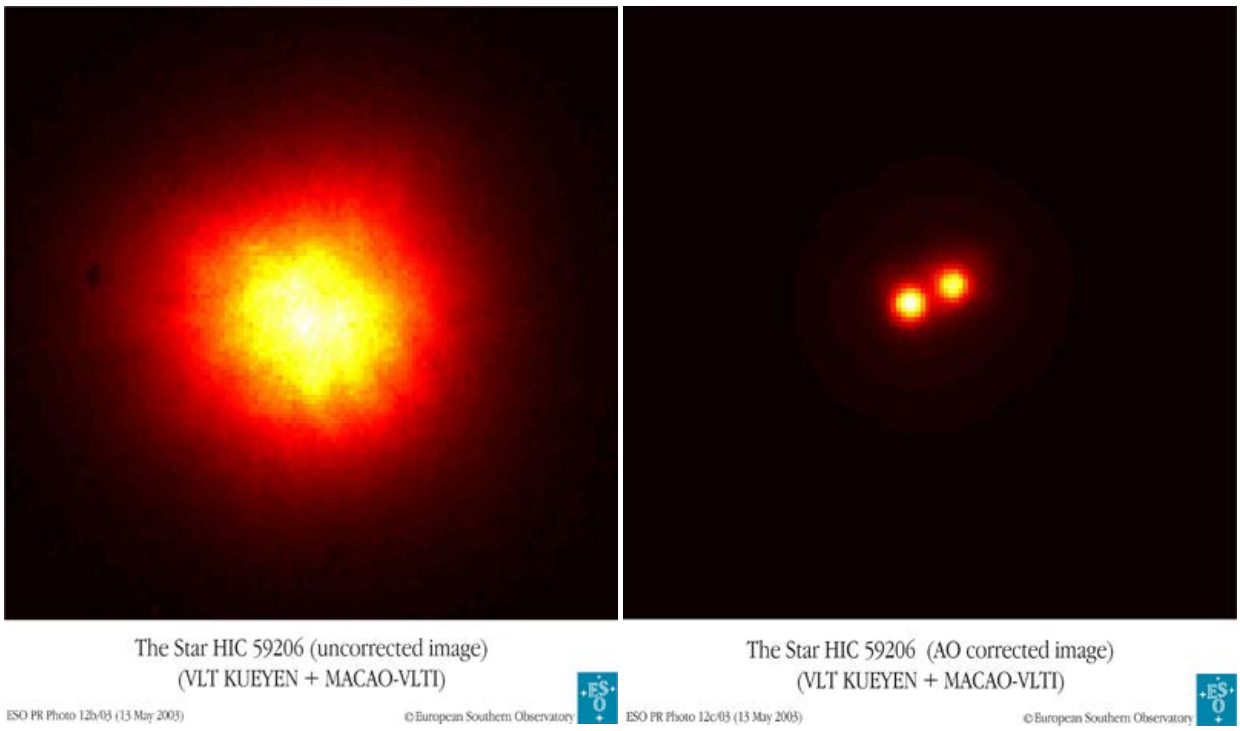
Un autre système d'optique adaptative a été installé à la fin de 2001 sur l'UT 4 du VLT : c'est le système NAOS (*Nasmyth Adaptive Optics System*, ONERA, Observatoire de Paris, Observatoire de Grenoble), au foyer Nasmyth comme son nom l'indique. Le pouvoir séparateur atteint est de 0,015" d'arc, alors que le télescope spatial n'atteint que 0,05". Plus de trois fois mieux. Le miroir qui permet la correction de la turbulence est le cinquième… De ce fait, on perd une certaine quantité de lumière dans les différentes réflexions.



Titan, VLT Yepun + NACO (NAOS-CONICA) photo ESO

Cette photo de Titan montre une résolution de 0,03" d'arc. On distingue un phénomène atmosphérique au pôle sud de Titan. Le rapport de Strehl de NAOS est du même ordre que celui de MACAO.

Voici deux photos prises par le VLT, montrant la différence de qualité que donne un même instrument avec et sans optique adaptative :




La grosse tache se transforme en deux images d'étoiles très proches, maintenant résolues.

L'amélioration du pouvoir séparateur est possible par la concentration de la tache de diffraction, que la turbulence éparpille sur une grande surface. De ce fait, en concentrant la tache de diffraction, on permet à la lumière de toucher toujours le même pixel de la caméra, et on améliore en plus la sensiblilité de l'instrument !

Pour palier à la perte de lumière par réflexion, un miroir secondaire pour ce même instrument est en cours de finition à l'Observatoire de Marseille (équipe de Marc Ferrari). Ce miroir mesure 1,14 m de diamètre, et n'est possible que par l'utilisation d'une méthode de polissage toute nouvelle, développée par Marc Ferrari. Le miroir sera déformé par 1.200 actuateurs, et le rapport de Strehl escompté est de 95 %. Une prochaine publication devrait donner des précisions à ce sujet.

Il y a toutefois une limitation à l'usage de cette technique : elle nécessite, dans le champ observé ou tout à côté, la présence d'une étoile assez

brillante pour permettre le guidage. Ceci limite son emploi à une partie du ciel seulement, car les étoiles brillantes ne sont pas très nombreuses.

**Etoile artificielle**

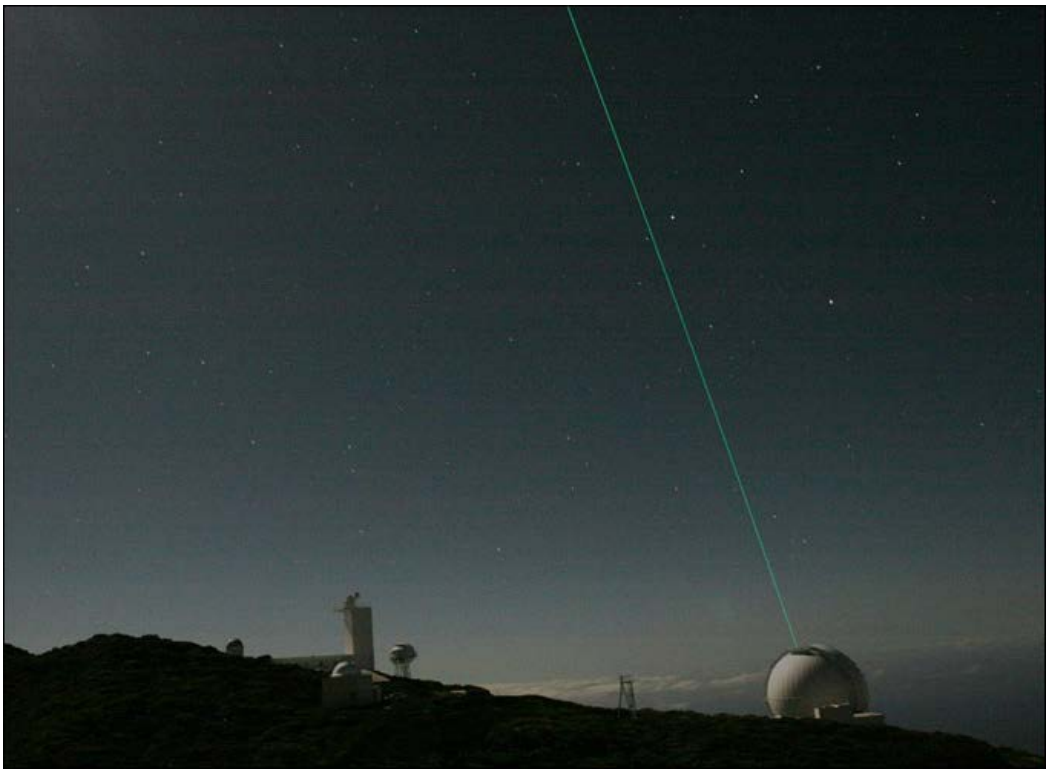
Evidemment, cette nouvelle limitation ne demande qu'à être contournée. C'est à quoi les astronomes s'activent. Le principe est assez simple : on produit une illumination ponctuelle du ciel en altitude. Ce point lumineux apparaîtra semblable à une étoile, et sa lumière traversant l'atmosphère, en subira les perturbations. L'analyse de ces perturbation permettra de guider le système de reconstruction du front d'onde.

On décline ce principe sous deux formes différentes. Dans les deux cas, on utilise un laser dont le faisceau cohérent reste cylindrique, sans se disperser dans l'atmosphère, comme une lumière non cohérente le ferait :

- Utilisation de la diffusion Rayleigh sur les molécules de l'atmosphère. On éclaire l'atmosphère avec un laser puissant, dont le faisceau se diffuse. Une partie de la lumière est rétrodiffusée, et revient vers le télescope émetteur. Elle constitue l'étoile artificielle. L'altitude de diffusion est relativement faible, de 10 à 40 km. Pour choisir l'altitude de rétrodiffusion, on focalise le faisceau.
- Utilisation du sodium à haute altitude. L'atmosphère de la Terre contient une couche de sodium autour de 92 km d'altitude (stratosphère), alimentée par les météorites qui se détruisent dans cette zone. On sait que le sodium présente un doublet de raies spectrales dans la partie jaune, qui est responsable de la couleur de certaines lampes d'éclairage urbain. Si on excite le sodium, il se désexcite en émettant en particulier ces raies. On utilise pour cela un faisceau laser très puissant au gaz carbonique. Le pinceau laser étant très étroit, la zone illuminée est toute petite, et constitue une excellente étoile artificielle. Cette technique est utilisée en particulier au Télescope Keck : laser à 589 nm (raie D du sodium), magnitude de l'étoile artificielle entre 9,5 et 11 (selon la puissance du laser, la collimation et l'épaisseur de la couche de sodium).

On peut faire encore mieux : dans un champ un peu plus vaste, une étoile guide ne suffit pas, l'onde est déformée dans plusieurs directions simultanément. Il faut construire un mécanisme un peu plus complexe, et utiliser plusieurs étoiles guides. Ces systèmes sont en cours d'évaluation, jusqu'à cinq étoiles artificielles.

Nous avons considéré jusqu'ici des observations dans le visible. Mais la turbulence n'est pas la même dans le bleu et dans le rouge, ce qui introduit un chromatisme des images. Par contre, dans l'infrarouge proche, elle ne dépend pas de la longueur d'onde. Aussi, les télescopes actuels privilégient-ils ce domaine de longueur d'onde, qui par ailleurs présente un grand intérêt pour étudier les objets froids.



Diffusion Rayleigh au William Herschel Telescope (4,20 m) La Palma Iles Canaries photo Olivier Martin

La mise en œuvre de ces techniques est délicate, et le résultat n'est pas tout à fait aussi bon que l'usage d'une étoile guide naturelle. Mais les étoiles assez brillantes ne se trouvent qu'au plus dans 1 % du ciel, alors que l'étoile artificielle peut être créée partout. Le défaut principal de l'étoile artificielle est le trajet aller-retour de la lumière, qui ne permet pas de mesurer la déviation de la lumière (*Tip and Tilt*). Pour cela, on utilise une étoile naturelle en plus, mais elle peut être assez éloignée du champ visé pour ne pas limiter la méthode.

On peut se demander alors quel est l'avenir des télescopes spatiaux. Et même penser qu'il est très sombre… Côté pouvoir séparateur et finesse des images, c'est exact. Mais il y a une autre caractéristique de notre atmosphère que l'optique adaptative ne peut pas corriger : c'est l'absorption de la lumière en fonction de la longueur d'onde. Le visible passe la barrière atmosphérique, mais l'infrarouge (sauf le proche), par exemple, est arrêté. Alors, pour faire des études dans les domaines spectraux filtrés par l'atmosphère, rien ne remplacera un instrument en orbite.

**Quatrième révolution informatique : l'interférométrie**

Tentée pour la première fois à Marseille sur le télescope de Foucault, cette technique a été abandonnée par les opticiens à cause des difficultés

qu'elle présente. Mais elle a été récupérée par les radioastronomes, après la seconde guerre mondiale, car le pouvoir séparateur en ondes radio est beaucoup plus faible qu'en optique (le pouvoir séparateur est aussi fonction de la longueur d'onde : plus elle est courte, meilleur il est). Pour obtenir des images de qualité comparable aux images optiques, les radioastronomes auraient dû construire des instruments de plus d'un kilomètre de diamètre. Dans l'impossibilité de le faire, ils ont dû user d'astuce pour obtenir de bonnes images. Il est vrai que la méthode était relativement facile à appliquer, sur le plan mécanique, dans le domaine d'ondes décimétriques. Les radioastronomes ont ainsi appris à reconstruire une image à partir de données interférométriques.

Le problème en optique, où les longueurs d'onde sont de 0,4 à 0,8 micromètres (0,4 à 0,8 millièmes de millimètre), est considérablement plus difficile. En effet, la distance entre les télescopes doit être ajustée avec une précision meilleure que la longueur d'onde. Un système de lignes à retard est donc utilisé pour équilibrer les trajets optiques, et sa mise au point est très délicate.

Cette technique a été développée sur la plateau de Calern, près de Grasse, par **Antoine Labeyrie**. Il a créé deux interféromètres, le premier avec deux télescopes de 25 cm d'ouverture, le second avec deux autres de 1,50 m (*GI2T*). L'avantage de cette technique est simple : le pouvoir séparateur de l'ensemble est celui d'un télescope unique dont le diamètre du miroir serait égal à la distance séparant les télescopes. Les télescopes de 8,2 m du V.L.T. sont séparés de 200 mètres (120 mètres pour les télescopes principaux, 200 mètres en comptant les télescopes secondaires) ; le pouvoir séparateur de l'ensemble sera donc celui d'un miroir de 200 m de diamètre. Mais le pouvoir séparateur est amélioré **dans la seule direction** entre les deux télescopes qui interfèrent. Pour avoir un pouvoir séparateur égal dans toutes les directions, il faut d'autres instruments sur une ligne perpendiculaire. D'où la nécessité de 4 télescopes au minimum. Pour perfectionner encore l'ensemble, 4 télescopes de 1,8 m leur sont associés pour réaliser l'instrument le plus puissant du monde. Son pouvoir séparateur est de l'ordre de 0,0006". C'est 100 fois mieux que le télescope spatial dont on admire les magnifiques images !

Cet instrument est nommé *VLTI* (*VLT Interferometer*). Depuis la fin de 2007, l'ensemble est opérationnel. Mais peut-on dire qu'il est terminé ? Cet instrument est en fait expérimental, tout en étant un magnifique outil de recherche. Et la structure essentielle (les UT et les AT) étant définie une fois pour toutes, tous les instruments qui sont autour peuvent changer au fil des améliorations. Des observations ont été faites, avec des couples de télescopes (*UT* : Unit Telescope, et *AT* : Auxiliary Telescope), mais pas encore avec l'ensemble et les logiciels de synthèse d'image. Tous les résultats déjà obtenus sont excellents, comparés aux performances visées.

Pour un télescope classique, l'augmentation du diamètre entraîne l'amélioration des deux paramètres, pouvoir séparateur et quantité de lumière collectée. Mais dans un interféromètre, les deux sont dissociés : en associant deux télescopes, la quantité de lumière obtenue est fonction de la surface totale des deux miroirs, qui est constante. Par contre, on peut augmenter le pouvoir séparateur en éloignant les deux instruments.

Considérons quatre miroirs de rayon r, chacun ayant la surface $s_r = \pi r^2$. L'ensemble possède une surface de $4 \pi r^2$. C'est la même surface que celle d'un miroir de rayon 2 r :

$S_{2r} = \pi (2r)^2 = \pi (4r^2) = 4 \pi r^2 = 4 s_r$

Ceci est indépendant de la distance entre les télescopes, qui caractérise le pouvoir séparateur.

Ainsi, le VLTI aura le pouvoir séparateur d'un télescope de 200 m de diamètre, mais le pouvoir collecteur d'un 16,4 m seulement.

Les miroirs ont une épaisseur de 17,6 cm, et sont donc souples. Chaque miroir est posé sur 150 vérins pour assurer sa forme. Les U.T. portent des noms empruntés à la langue des indiens Mapuche locaux :

| | | |
|---|---|---|
| UT1 | *Antu* | Le Soleil |
| UT2 | *Kueyen* | La Lune |
| UT3 | *Melipal* | la Croix du Sud |
| UT4 | *Yepun* | Sirius |

Les quatre instruments possèdent chacun 4 foyers : deux foyers Nasmyth, un foyer Cassegrain, et un foyer coudé.

Mais cet instrument est révolutionnaire par d'autres aspects… Il intègre l'optique adaptative et l'optique active, et il est utilisé en interféromètre depuis 2005, en configuration légère de mise au point.

Le VLTI est un instrument exceptionnel par sa conception globale : il peut fonctionner de diverses manières. Tout d'abord, on peut utiliser chacun des 4 UT séparément, déroulant ainsi 4 programmes de recherche simultanés. D ans le même temps, on peut utiliser les 4 AT en mode interférométrique, pour tous les objets dont la luminosité est suffisante pour des miroirs de 1,80 m. On a donc ainsi 5 instruments de premier plan.

Mais on peut aussi impliquer les UT dans l'interférométrie, pour des objets plus faibles. On a alors, pour un coût de fonctionnement plus élevé puisqu'on utilise tout le matériel pour un seul programme, le meilleur instrument actuel à la fois pour la luminosité et le pouvoir séparateur.

**Miroirs composites**

Une autre solution est envisageable pour la construction de grands miroirs. Au lieu de couler un disque de la taille requise, il s'agit de juxtaposer de petits miroirs pour en composer un grand. On le réalise donc par pavage. La difficulté est d'ajuster les composants, de telle manière qu'ils forment une seule surface optique. C'est l'optique active qui permet d'y parvenir. Ce principe est une révolution non informatique dans la construction des téléscopes.

Les américains l'ont adopté pour construire deux télescopes qui surpassent ceux du VLT en diamètre, et qui ont pris le nom du sponsor *Keck*

(Keck Foundation). Leurs miroirs ont 10 m de diamètre, et sont constitués chacun de 36 miroirs hexagonaux de 1,80 m.

Le gain entre 8,2 m et 10 m est assez peu sensible, et les performances individuelles des télescopes sont assez semblables. L'avantage du VLT tient dans l'interféromètre VLTI. Mais le concept de miroir composite peut être utilisé pour des instruments bien plus grands, et les projets de télescopes au sol adoptent tous ce principe.

**Les nouvelles montures d'amateur**

Les progrès de l'électronique permettent maintenant de produire, à des prix très accessibles, des instruments en monture azimutale pilotés par ordinateur. Un microprocesseur délivre largement assez de puissance pour assurer le suivi des deux axes. Une raquette permet de le commander. Deux types de montures existent, la différence portant sur la mise en station :

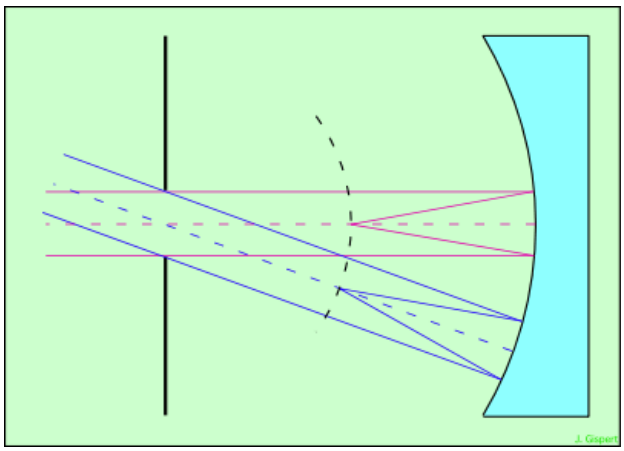
- mise en station assistée ; l'observateur vise successivement deux étoiles brillantes, en orientant le télescope lui-même. Lorsque l'étoile est au centre de l'oculaire, il enregistre la position en appuyant sur un bouton. Cette opération prend quelques minutes, après quoi le télescope est en station.
- mise en station automatique ; c'est la Rolls de l'amateur. Le télescope est muni d'un capteur GPS, qui lui permet de déterminer sa position exacte, et de faire la mise en station automatiquement.

Après cette opération, l'observateur utilise la raquette pour pointer un astre. Les principaux sont en mémoire, et il suffit de donner leur nom pour que le télescope les pointe automatiquement. Par exemple, taper M13. Si l'objet n'est pas connu (comète par exemple), on donne les coordonnées équatoriales.

**Télescopes photographiques**

Inventions de **Bernhard Schmidt** en 1930 à Hambourg, et **Dimitri Maksutov** en Russie. Avantage du Schmidt : grand champ et grande luminosité, parfait pour la photo. Avantages du Maksutov : surfaces sphériques seulement, donc plus facile à construire, et partant moins cher.

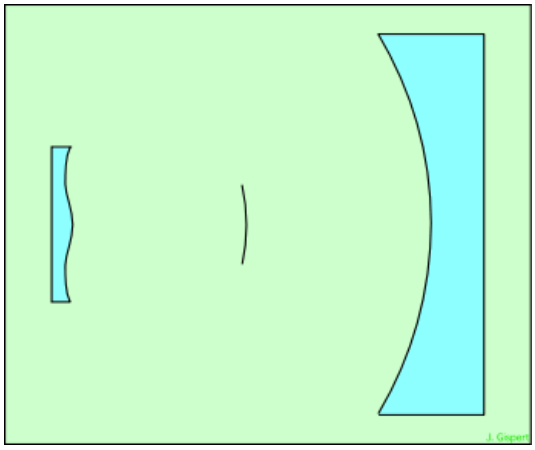
Le principe du Schmidt est très simple : il consiste à utiliser un miroir sphérique, sur une grande partie de sa surface :



Pour limiter les aberrations, on sait qu'on ne peut pas utiliser les rayons loins de l'axe. Mais le diaphragme placé au centre de courbure du miroir, supprime ces rayons. Remarquez que pour les deux faisceaux représentés, il y a symétrie sphérique autour de son axe en pointillés. Donc, on est bien dans les conditions correctes pour l'utilisation du miroir.

On sait aussi que le foyer d'un miroir sphérique se trouve à mi-chemin du centre de courbure. Comme les différents faisceaux ont chacun son axe, les différents foyers se trouvent sur un cercle de même centre que le miroir, et de rayon moitié. Par conséquent, les images se formeront sur une surface sphérique.

Mais ce montage présente une très forte abérration de sphéricité, qu'il faut corriger. Pour ce faire, on constate que les rayons centraux se coupent plus loin que ce cercle, et que les rayons marginaux se coupent plus près. Pour rétablir la situation, il faut modifier le trajet de ces différentes rayons. Ceci se fait par interposition d'une lame transparente, d'épaisseur variable. On la nomme *lame de Schmidt*. Sa forme complexe la rend difficile à tailler. Cependant, les opticiens savent le faire.



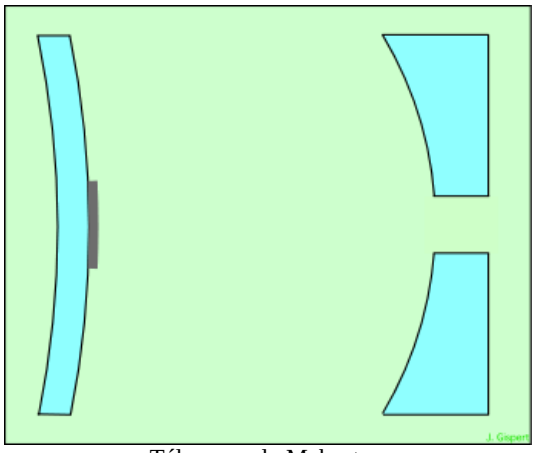
Remarquez que la lame de Schmidt est plus petite que le miroir.

**Télescope de Maksutov**

Maksutov est un opticien soviétique, qui s'est posé le même problème que Bernhard Schmidt. Il a trouvé une autre solution, à la fois proche et différente. En lieu et place de la lame de Schmidt, il place un ménisque sphérique ; c'est une lentille limitée par deux surfaces sphériques concentriques. La lumière traverse le ménisque, se réfléchit sur le miroir sphérique, repart vers le ménisque. Là, un miroir secondaire doit renvoyer la lumière pour permettre l'observation. Plusieurs possibilités s'offrent :

- un miroir plan, qui renvoie la lumière vers le miroir principal, lequel doit être percé ; c'est la formule Maksutov-Newton ;
- un miroir sphérique, qui joue le même rôle ; c'est le vrai Maksutov.

Le miroir plan de la première formule est collé sous le ménisque. Le miroir sphérique de la seconde peut avoir la même courbure que le ménisque. Aussi, il suffit d'aluminier le centre du ménisque pour réaliser le miroir secondaire. Ainsi, l'ensemble des deux miroirs et du ménisque nécessite de tailler au total trois surfaces sphériques. C'est bien plus facile que la réalisation d'un Schmidt.



Télescope de Maksutov

**Télescope de Schmidt Oschin**

Ce principe a été très utilisé, en particulier pour le grand Schmidt du Mont Palomar (télescope *Oschin*), installé en 1948. Grâce à cet instrument, par deux fois, une couverture photographique complète du ciel visible du Mont Palomar a été faite. Ce télescope a une lame de Schmidt de 1,22 mètre, et un miroir de 1,83 mètre. Il a un champ de 36 ° carrés.

Le premier catalogue d'étoiles est le *Palomar Observatory Sky Survey* (ou *POSS I*). Sa magnitude limite est de +21. A partir de 1980, une seconde couverture a été faite, *POSS II*. Elle recense 50 millions de galaxies, 2 milliards d'étoiles, 100.000 quasars. Mais POSS II est limité à la magnitude 21 comme POSS I.

**Formule Schmidt-Cassegrain**

C'est une formule hybride, très utilisée pour les télescopes d'amateur du commerce. La firme Celestron en particulier a maîtrisé la production en série des lames de Schmidt. Le miroir secondaire est collé sous la lame, comme dans un Maksutov.

**Les télescopes spatiaux**

A quoi sert aujourd'hui un télescope spatial, puisqu'au sol, on arrive au pouvoir séparateur théorique ? Le premier télescope spatial a été conçu et lancé avant qu'on ait maîtrisé l'optique adaptative. Mais maintenant, la question peut se poser. Au sol, on ne pourra jamais observer que les longueurs d'onde qui passent la barrière atmosphérique : la fenêtre visible, le très proche infrarouge, la fenêtre radio. Dans les autres gammes, seul un télescope spatial peut observer. Aussi, le mot *télescope* prendra, selon la gamme observée, un sens tout à fait différent de ce que nous

avons étudié jusqu'ici. Plus la gamme visée est lointaine du visible, plus l'instrument sera exotique.

Le *télescope spatial Hubble* (*HST*) a été lancé le 24 avril 1990. Conçu pour être entretenu sur son orbite à une altitude d'environ 600 km lors de missions régulières, il est assez éloigné de la Terre pour ne pas être gêné par les perturbations de l'atmosphère terrestre, mais insuffisamment pour éviter le passage de la Lune, de la Terre et du Soleil dans son champ de vision.

Système optique : L'instrument est équipé d'un miroir primaire de 2,4 m de diamètre, pesant 826 kg, et d'un miroir secondaire de 30 cm de diamètre. Il est construit sur un modèle Ritchey-Chrétien, de focale 57,6 m, ce qui lui donne un rapport F/D de 24. Il travaille dans un spectre allant du proche infrarouge jusqu'à l'UV, soit de 1 mm à 1.150 Å. L'aluminium (110 nm) est protégé par une couche de difluorure de magnésium ($MgF_2$) de 25 nm. Outre la protection qu'elle apporte, elle améliore la réflectivité dans l'ultraviolet.

Malheureusement on découvre peu après son lancement, un défaut d'aberration sphérique sur son miroir primaire. Les images sont floues. Une correction logicielle est mise en place en attendant la première mission de maintenance. Le problème est dû à une erreur de 5 mm sur la longueur de l'instrument, erreur non détectée par des tests au sol insuffisants.

Le 12 février 1993, l'équipage de la navette Endeavour installe un équipement optique correctif, le *COSTAR* (*Corrective Optics Space Telescope Axial Replacement*), construit en partie par le Laboratoire d'Astronomie Spatiale de Marseille. Cet équipement permet enfin au HST d'obtenir des images de qualité.

Instruments optiques : Le télescope peut recevoir jusqu'à 5 équipements optiques, un dans chacune de ses baies axiales et un dernier dans sa baie radiale. Il s'agit de caméras et de spectromètres.

Energie : Le HST fonctionne grâce à l'énergie solaire avec deux panneaux de 2,4 × 12,1 m. Ceux-ci alimentent les deux ordinateurs de bord, ainsi que les autres composants électroniques. 6 batteries au nickel-hydrogène prennent le relais lorsque le télescope est caché du Soleil par la Terre pendant 25 minutes à chaque orbite.

Système de communication : Les données sont transmises au sol par l'intermédiaire du satellite TDRSS: Tracking and Data Relay Satellite System. En direct avec le satellite lorsque ce dernier est visible, sinon les informations sont enregistrées sur bande magnétique pour être ensuite transmises.

**Résumé**

| | | |
|---|---|---|
| 1609 | lunette de Galilée | première lunette utilisée en astronomie, Florence |
| 1670 | télescope de Newton | premier télescope (miroir de bronze), Londres |
| 1864 | télescope de Foucault | premier grand télescope à miroir de verre, Marseille |
| 1948 | télescope *Hale*, mont Palomar | limite mécanique de la monture équatoriale, Californie |
| 1974 | télescope Bolchoï, Zélentchouk | première monture azimutale informatique ; limite supérieure d'un miroir rigide, Caucase |
| 1987 | *Come-on* | premier système d'optique adaptative (Européen : CILAS, ONERA, Observatoire de Paris–Meudon), sur le télescope 3,60 m de l'ESO, La Silla, Chili |
| 1990 | NTT | premier télescope à optique active complète, c'est un prototype pour le VLT |
| 1990 | HST | premier télescope optique spatial, NASA |
| 200? | VLTI | premier grand interféromètre optique, Cerro Paranal, Chili |

NTT fait suite au Nordic Optical Telescope 2,40 m 1988 optique active essentielle.

NTT Ritchey-Chrétien, 3,58 m de diamètre, focale 7,90 m.

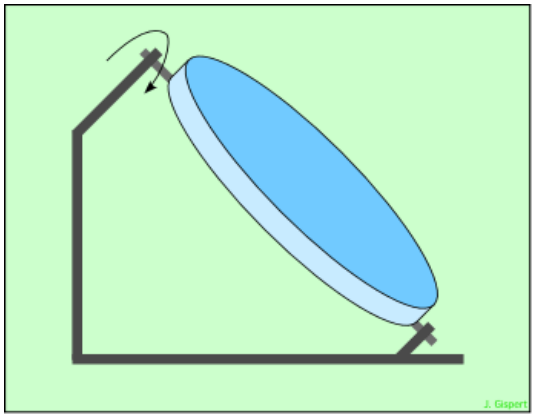
**Les grands instruments**

Une liste des grands instruments existants se trouve dans la fiche consacrée à l'histoire de l'astronomie.

**Cœlestat, sidérostat, héliostat**

Ces trois instruments, dont le nom porte la même terminaison, ont une caractéristique commune. *Stat* signifie stationnaire. Ce ne sont pas des télescopes, mais des accessoires permettant de diriger la lumière d'un astre dans une direction fixe. L'image de l'objet est donc statique.

Le *cœlestat* est un miroir plan collé sur un axe horaire entraîné comme dans une monture équatoriale, mais à une vitesse deux fois moindre (car la réflexion sur un miroir mobile double l'angle). Par construction, la normale au miroir est dans l'équateur. C'est la bissectrice de l'angle que font le rayon incident et le rayon réfléchi. Par conséquent, l'image est symétrique de l'objet par rapport à cette normale. Donc, si l'objet observé est à une déclinaison δ, son image sera vue à une déclinaison -δ.



cœlestat

Le télescope ou la lunette qui observe l'image est donc dirigé vers le miroir, et incliné de cette valeur. Si on veut poser l'instrument horizontalement (à cause de son poids par exemple), on intercale un second miroir, orientable en hauteur, et mobile sur un charriot.

Le cœlestat est utilisé dans deux circonstances essentiellement :

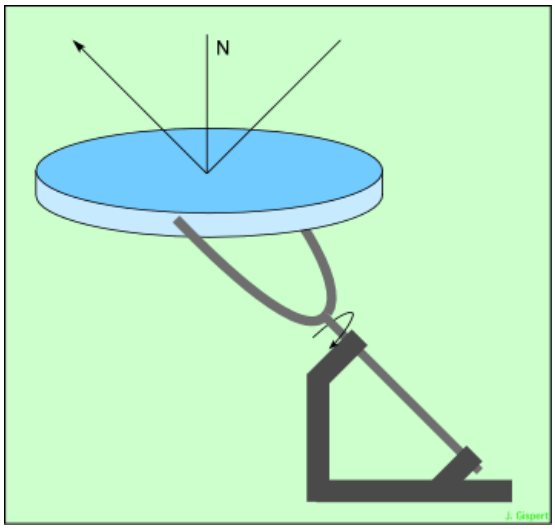
- par les astronomes en mission pour les éclipses, qui doivent être observées là où se produit le phénomène. Il permet de limiter le poids et le volume des instruments transportés ;
- pour les observatoires solaires permanents. Dans ce cas, une variante dirige le rayon réfléchi verticalement vers le bas, pour placer les instruments dans un local à température constante (tour solaire).

La construction d'un bon cœlestat est aussi complexe que celle d'un équatorial. Il n'est pas facile, contrairement à ce que l'on peut penser, de polir un miroir plan, c'est même plus délicat que de polir un miroir parabolique. Le miroir étant la plupart du temps incliné, doit être plus grand que l'instrument vers lequel il dirige le faisceau. Et la mécanique doit être réalisée avec le même soin que pour une monture de télescope.

Le cœlestat donne une image fixe, sans rotation du champ : on peut faire une photo.

Le *sidérostat* est également un instrument à un miroir, mais celui-ci est mobile selon deux axes. L'axe principal a une direction quelconque. L'inclinaison du miroir sur cet axe entraîne une rotation du champ : le point central du champ est fixe, le reste tourne à une vitesse variable selon l'inclinaison de l'axe principal.

Un cas particulier intéressant est le *sidérostat polaire*, dans lequel l'axe principal est parallèle à l'axe du monde. Il permet de diriger le faisceau dans une direction arbitrairement choisie, mais il n'échappe pas à la rotation du champ. Ceci est génant pour la photo, mais n'a pas grande importance pour la spectroscopie.




sidérostat polaire

On peut fixer cette vitesse, à condition d'aligner l'axe principal avec l'axe des pôles. Ceci donne le *sidérostat polaire*. Il renvoie l'image dans la direction de l'axe du monde…

Avec ces principes, de nombreux instruments ont été construits, à des usages divers. La principale motivation est de renvoyer l'image de l'astre observé dans une direction fixe, où se trouve le récepteur, lourd et encombrant.



photo J. Gispert

Sidérostat polaire du Centre d'Astronomie de Saint Michel l'Observatoire, dans les Alpes de Haute Provence.

Le miroir a un diamètre de 1,20 m.

Il renvoie la lumière dans un amphithéatre, où un système de miroirs et un réseau de diffraction permettent de projeter sur grand écran, soit l'image du Soleil dans le visible, soit son spectre à grande dispersion. On peut considérer que l'amphithétre est un récepteur lourd et encombrant…

L'utilisation nocturne permet également de projeter une partie du ciel visible.

Un *héliostat* est un instrument qui dirige la lumière du Soleil vers une direction fixe, mais sans but astronomique. Les héliostats qui ont été construits sont sur ce plan de mauvaise qualité, et n'ont servi que pour des expériences sur la lumière.

Il est impossible de terminer ce paragraphe sans citer le *sidérostat de Foucault* ! On lui doit encore une solution astucieuse à un problème géométrique non évident. Un miroir est placé sur une fourche à axe vertical. A l'arrière du miroir se trouve une tige fixée perpendiculairement.

Un axe polaire est entraîné à vitesse constante, mais l'originalité tient à la liaison entre ces deux éléments : elle n'est pas rigide, mais constituée d'une bielle, solidaire de l'axe polaire, et coulissant sur la tige fixée au miroir. Une considération géométrique permet de montrer que l'image est renvoyée dans une direction horizontale fixe. Mais comme tout sidérostat, cet instrument est affecté par la rotation du champ.

**Lunette méridienne**

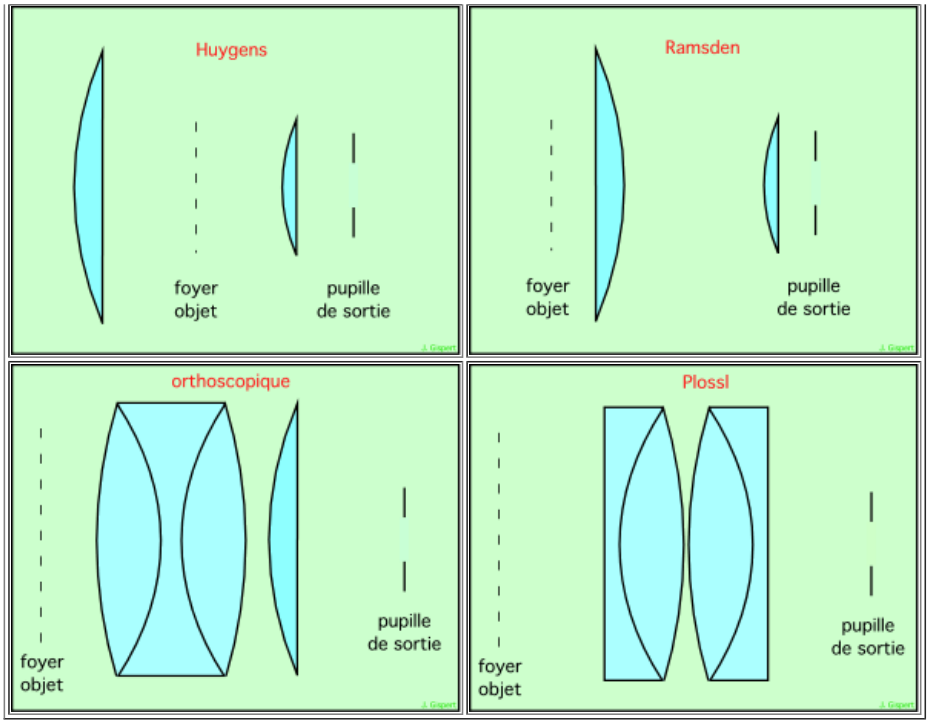
Une *lunette méridienne* est une lunette en monture azimutale particulière, bloquée dans le plan méridien. Elle est posée sur deux piliers, supportant les deux demi-axes horizontaux (tourillons). Par construction, elle ne peut se déplacer que dans le plan du méridien, et il faut attendre, pour observer un astre, qu'il défile dans ce plan.

Bien évidemment, il ne s'agit pas d'observer les propriétés de l'astre, mais *l'instant* de son passage au méridien. C'est donc un instrument qui a été longtemps utilisé pour la cartographie du ciel. On nomme cette lunette, alternativement, *instrument des passages*.

**Les oculaires**

L'oculaire n'est qu'une simple loupe qui permet de grossir l'image donnée par l'objectif, et en rendre l'examen plus confortable. Mais après avoir taillé l'objectif avec les plus grands soins, il serait dommage de gaspiller cette qualité par l'usage d'un mauvais oculaire. L'oculaire étant, fondamentalement, une lentille, est soumis aux mêmes aberrations que l'objectif d'une lunette. Mais elles ne jouent pas le même rôle, car l'objectif et l'oculaire sont employés dans des conditions très différentes. Il faudra mettre en œuvre des solutions semblables, mais pas forcément corriger les mêmes aberrations. En particulier, l'aberration chromatique doit être corrigée par l'emploi de plusieurs verres.

Il existe divers types d'oculaire, qui sont nommé d'après celui qui les a le premier décrits (sauf l'oculaire orthoscopique). Leurs caractéristiques dépendent de la formule optique choisie, et le champ, le grossissement, la clarté diffèrent selon les cas.




Les deux premiers, Huygens et Ramsden, sont assez semblables. Il s'agit de formules dans lesquelles $f_1 + f_2 = 2\,e$, où $f_1$ est la focale du premier verre, $f_2$ celle du second, et $e$ la distance qui les sépare. Cette condition évite le chromatisme de grandeur susceptible d'affecter les oculaires. L'oculaire de Huygens a un champ de 30°, alors que le Ramsden atteint les 20° seulement. Ces oculaires conviennent mieux à des lunettes qu'a des télescopes, qui sont en général bien plus ouverts (rapport $f / D$ plus petit). Ils ne sont pas adaptés aux objets étendus.

**Sphère armillaire**

La sphère armillaire est un instrument explicatif, permettant de représenter les mouvements des astres, et non de les observer (sauf pour les équinoxes…). Vous en trouverez une description détaillée dans un autre chapitre, avec des plans de montage pour en réaliser une.

## *L'avenir*

**Les hypertélescopes**

Quel peut être l'intérêt de construire un grand télescope, plutôt qu'un interféromètre équivalent ? C'est la surface du miroir. Jusqu'à présent, nous avons mis l'accent sur le pouvoir séparateur, ce qui est sans doute un bon choix pour voir des détails. Mais quand on construit un miroir de diamètre double, le pouvoir séparateur est deux fois meilleur, et la surface du miroir (donc la quantité de lumière reçue), est 4 fois supérieure. On peut donc voir des objets plus faibles (plus loin…). Or l'interféromètre, en éloignant les télescopes, augmente beaucoup le pouvoir séparateur, mais la surface n'est que le double de celle d'un télescope isolé de même diamètre. Si la distance des deux télescopes est 10 fois leur diamètre, le pouvoir séparateur sera dix fois meilleur, mais la quantité de lumière reçue ne sera que le double. Ainsi, il est toujours important de construire de grands miroirs (pour les objets faibles), et des interféromètres (pour les détails). Il y a encore beaucoup de travail à faire dans le domaine instrumental.

Quel est l'intérêt de voir plus finement des objets plus faibles ? L'une des grandes interrogations, la plus grande peut-être en astronomie, est la quête de la vie ailleurs. Pour ce qui est du système solaire, il est peu probable d'en trouver ailleurs que sur Terre : Mercure est brûlante et sans atmosphère, Vénus est encore plus chaude, avec une atmosphère de gaz carbonique, d'acide sulfurique, et pas d'eau. Mars est un immense désert (peut-être trouvera-t-on des bactéries dans le sous-sol, mais on n'espère plus rien de mieux).

Ensuite, les 4 planètes géantes sont gazeuses, n'ont pas de sol (ou alors à une profondeur où la température atteint 10.000 degrés). Il reste une faible possibilité de vie dans certains satellites des planètes géantes. Il en est qui sont couverts d'une banquise épaisse de 100 km, et sous laquelle on soupçonne l'existence d'un océan liquide. Là, peut-être…

Sinon, il faudra chercher plus loin. Hors de notre système solaire, c'est-à-dire autour d'autres étoiles. Pour la première fois, en 1995, on a observé à l'Observatoire de Haute Provence, une planète autour d'une autre étoile (51 Pegasi). Depuis, les découvertes se sont multipliées et l'on compte presque un millier de planètes nouvelles autour d'autres étoiles. Mais ces découvertes ont été faites essentiellement par des moyens de mécanique céleste, en analysant les perturbations gravitationnelles de la planète sur son étoile. Ce qui fait qu'on ne sait pas grand chose de ces planètes, à part une vague idée de leur masse.

Si on disposait d'instruments beaucoup plus puissants permettant d'obtenir une image de ces planètes, alors, en rêvant un peu, on peut espérer en obtenir un spectre. Faisons encore une petite digression sur notre système solaire. Regardons les atmosphères des planètes (quand elles en ont). Une seule présente de l'oxygène, et il se trouve que c'est la Terre, où il y a de la vie. Est-ce un hasard ? Non !

Lorsque la Terre s'est formée, elle était chaude et agitée par un volcanisme extrêmement important. Le volcanisme crache beaucoup de gaz, du gaz carbonique, des composés soufrés, de la vapeur d'eau. Ces gaz ont constitué une atmosphère primitive à la Terre. En se refroidissant, la vapeur d'eau a pu se condenser et former les océans. Là s'est développée la vie. Les premiers organismes, unicellulaires, s'accommodaient du gaz carbonique. De plus, ils l'ont utilisé pour constituer leur squelette à base de carbone : absorbant une molécule de $CO_2$, ils la cassaient,

conservaient le carbone pour leur squelette, et rejetaient l'oxygène. Ainsi, petit à petit, ils ont appauvri l'atmosphère en $CO_2$ et l'ont enrichie en $O_2$. C'est la vie qui a produit notre atmosphère actuelle. L'oxygène de la Terre est donc une conséquence de l'apparition de la vie à sa surface.

En extrapolant, si on imagine que les mêmes phénomènes se sont produits ailleurs, alors, la présence d'oxygène dans une atmosphère planétaire serait un indice pour imaginer la présence de vie à sa surface. l'oxygène serait détecté par sa molécule triatomique l'ozone. Construire des instruments capables d'observer le spectre d'une planète extrasolaire est donc un challenge dans le sens de la découverte de vie ailleurs. Il y a donc encore beaucoup de travail en perspective !

**Antoine Labeyrie**

Antoine Labeyrie a construit sur le plateau de Calern, un petit interféromètre optique avec deux télescopes de 1,50 m de diamètre, éloignés de 30 m. Le pouvoir séparateur théorique est de 0,005 seconde d'arc, à comparer avec le pouvoir séparateur du télescope spatial : 0,05 sec. ou celui d'un des VLT : 0,015 sec. Avec cet interféromètre, il a pu prouver que la méthode était utilisable, et mettre au point les systèmes optiques nécessaires (lignes à retard en particulier). Il a réussi à mesurer l'assombrissement au bord de quelques étoiles, ce qui est impossible avec les télescopes traditionnels.

**Projet Carlina**

Antoine Labeyrie est l'initiateur des projets d'hypertélescopes. Le Projet Carlina concerne la réalisation de tels instruments, au sol ou dans l'espace. Leur but est d'imager les étoiles (taches, éruptions…) et leurs planètes (continents, océans…), avec comme objectif final de trouver de la Vie ailleurs.

Le principe est absolument délirant, pour notre regard classique, mais il porte de grands espoirs. Il consiste à réaliser un miroir composite immense, en disposant de petits miroirs (de 25 cm de diamètre, focale 35 m, pas forcément contigus), sur une très grande surface sphérique au sol. Ces miroirs seront immobiles, assurant un positionnement relativement simple. Ils renverront la lumière vers un point du ciel, où se trouvera un ballon captif portant le dispositif focal ! Comme dans le radiotélescope d'Arrecibo, la nacelle portant le dispositif focal pourra se déplacer pour suivre un certain temps l'objet dans le ciel. Par vent faible, les déplacement de la nacelle ne sont que de quelques millimètres.

Deux possibilités s'offrent à ce niveau : soit on place directement une caméra pour imager les observations, soit on place un miroir qui renverra l'image au sol pour l'analyser à l'aide d'instruments trop lourds pour le ballon.

Le projet Carlina n'est pas un télescope définitif, mais un montage de validation réalisable à peu de frais. Il servira à vérifier le fonctionnement des divers organes nécessaires, comme le correcteur de Mertz (correction de l'aberration de sphéricité), le densifieur de pupille (pour corriger l'effet de dilution produit par des miroirs non contigus)…

**OWL, E-ELT**

Un projet européen nommé *OWL* (*OverWhelmingly Large* : extraordinairement grand) a été conçu il y a quelques années, concernant un télescope de 100 mètres de diamètre. Naturellement, il n'était pas question de réaliser un miroir monolithique, et ce grand miroir devait être composite. La finesse des images aurait été 40 fois supérieure à celle du télescope spatial ! Malheureusement, il était *overwhelmingly* coûteux !

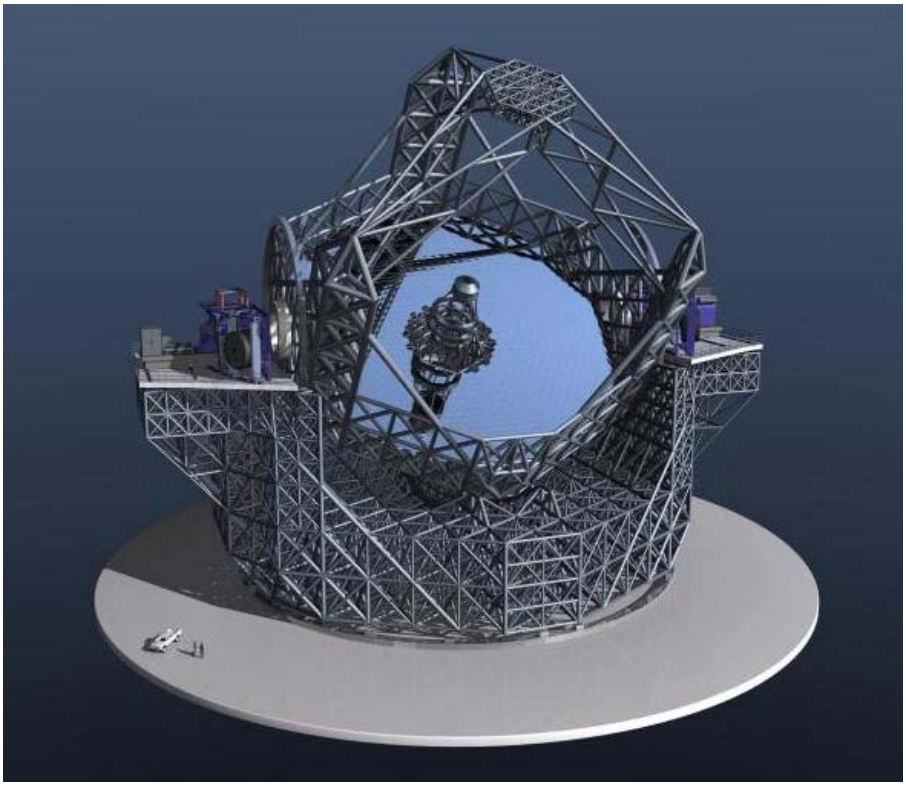
Lors d'une conférence ESO tenue à Marseille (27 novembre - 1 décembre 2006), réunissant 250 astronomes européens, la décision a été confirmée de remplacer le projet *OWL* par le projet *E-ELT* (*European Extremly Large Telescope*), plus modeste dans ses dimensions, mais plus réaliste aujourd'hui. La volonté affirmée est d'obtenir un délai de construction de trois ans ; pour un miroir de 100 mètres, qui serait techniquement faisable, le délai serait considérablement plus long.

Le but premier de ces projets est l'étude des planètes extrasolaires, domaine qui a été ouvert en 1995 avec la découverte de 51 Pegasi B à l'Observatoire de Haute Provence, et qui a littéralement explosé depuis, à tel point que l'on connait maintenant plus de 200 planètes autour d'autres étoiles. Mais elles ont été découvertes par des moyens indirects, qui ne permettent pas d'en connaître les propriétés physiques. C'est à cette tâche que l'on doit s'atteler maintenant, avec bien évidemment des outils adaptés à créer.

Or l'Europe est en compétition dans ce domaine avec les USA en particulier, et l'attente leur aurait laissé la place libre pour faire les découvertes décisives. Le domaine ayant été initié en Europe, il aurait été regrettable de ne pas continuer dans cette voie.

L'étude d'une exoplanète nécessite l'observation en infrarouge, qui permet d'augmenter considérablement le contraste avec l'étoile centrale (l'étoile; -quelques milliers de degrés-, rayonne dans le visible ; la planète -quelques centaines de degrés-, rayonne dans l'infrarouge). Pour cette raison, l'E-ELT sera adapté au visible et à l'infrarouge.

L'E-ELT sera constitué d'un système complexe de 5 miroirs. Le **primaire fera 42 mètres** de diamètre, et sera composé de 906 segments de 1,45 m ajustés par la méthode d'optique active. Le miroir **secondaire mesurera 6 m**… et sera naturellement monolithique. La masse mobile de l'ensemble est de 5.500 tonnes… Pourtant, la structure est aérée pour diminuer son poids !

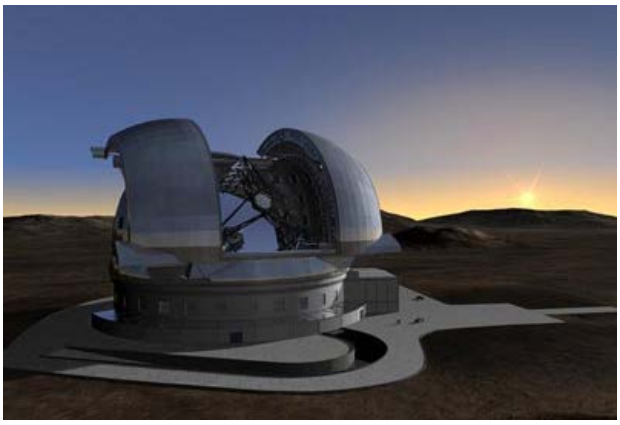


Le télescope E-ELT, montrant son miroir principal et sa structure image ESO

Les deux plateformes visbles sur les côtés permettront d'installer des instruments lourds et performants, comme par exemple des spectrographes. Une voiture et deux personnes donnent l'échelle…

Pour atteindre le pouvoir séparateur théorique de l'instrument, l'optique adaptative est indispensable. Un miroir tertiaire relaiera l'image vers le système adaptatif ; ce miroir ne fera plus que 4,20 m de diamètre. Le système adaptatif lui-même est constitué de deux miroirs. Le premier miroir adaptatif (quatrième du télescope) mesurera 2,50 m de diamètre, et sera soutenu par plus de 5.000 vérins, dont la pression sera actualisée 100 fois par seconde par l'ordinateur de contrôle. Le cinquième miroir aura pour rôle de parfaire la correction de la turbulence. Ces corrections seront pilotées par 5 à 9 étoiles artificielles.

La complexe combinaison à cinq miroirs permettra une parfaite correction des diverses aberrations, pour obtenir un instrument quasi parfait. Les pertes de lumière à chaque réflexion ne sont pas ici cruciales, car la surface du miroir primaire de 1.400 $m^2$ collecte suffisament de lumière pour qu'il en reste bien assez.



L'emplacement de ce télescope a été décidé. Il sera installé dans le désert d'Atacama, au sommet du Cerro Armazones, à 3.060 m d'altitude, et à 20 km à vol d'oiseau du Cerro Paranal, où se trouve le VLT. Les études définitives ont été commencées dès janvier 2007, et la mise en service est prévue pour 2017. Le coût total est estimé à 800 millions d'euros.

Parmi les objets à étudier, outre les exoplanètes, on envisage de cibler les premiers objets de l'Univers, qui sont trop peu lumineux pour les télescopes actuels, les trous noirs supermassifs, et enfin la matière noire qui rempli l'Univers, et dont on ne sait pas grand chose aujourd'hui (même pas si elle existe…).

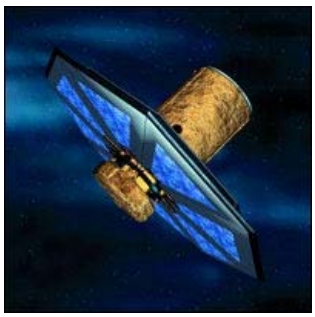
A côté du projet européen, les américains ont deux projets en cours : le *TMT* (*Thirty Meter Telescope*) qui comme son nom l'indique devrait avoir un miroir de 30 mètres, et le *GMT* (*Giant Magellanic Telescope*), un tout petit télescope de seulement 21,50 m… Ces trois instruments ne sont pas totalement indépendants, pour des raisons d'efficacité une certaine complémentarité a été prévue.

Alors que les interféromètres permettent d'obtenir un excellent pouvoir séparateur sans améliorer la collecte de lumière, ces télescopes géants gagnent sur les deux tableaux. Le gain de lumière est capital pour la spectroscopie, et permettra de déterminer la composition d'objets encore ignorée aujourd'hui.

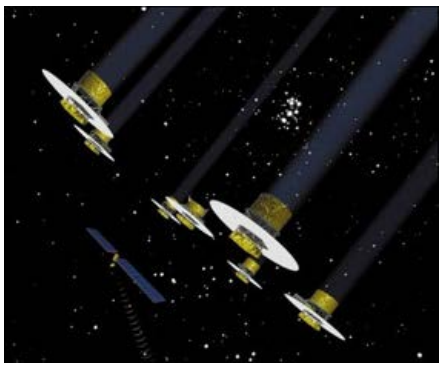
Les instruments à placer derrière le télescope seront facilement interchangeables, permettant d'adapter rapidement le télescope à des observations de type nouveau. Le bond en avant qu'on va faire nous réserve certainement des surprises, et cette versatilité est indispensable pour y réagir. Le gain en finesse des images (pouvoir séparateur) est de 17 fois par rapport au télescope spatial HST !

**Interféromètre spatial**

On projette d'envoyer de grands interféromètres dans l'espace. Le projet européen (ESA) *Darwin* consiste en cinq ou six télescopes séparés de plusieurs centaines de mètres, de 3 à 4 m de diamètre chacun, envoyant la lumière collectée à un module central réalisant l'interférométrie, et communiquant les données à la Terre. Cet ensemble doit être placé au point de Lagrange $L_2$, où la gravité de la Terre équilibre celle du Soleil, autorisant une plus grande stabilité de l'ensemble. Ce système est en cours de développement à l'ESO.



Un des télescopes de Darwin



L'ensemble de l'interféromètre

photos Alcatel Space Industries

Darwin est destiné à rechercher des planètes de type terrestre autour d'étoiles proches, et éventuellement y trouver des traces de vie. Il surveillera 1.000 étoiles proches de la Terre.

Or la vie sur Terre est la seule connue, et c'est elle qui a modifié l'atmosphère en produisant l'oxygène, et du méthane. L'idée est alors très simple : on essayera d'obtenir le spectre d'une planète autour d'une autre étoile ; si on y trouve la signature spectrale de l'oxygène (en fait de sa variété triatomique l'ozone), ce sera un indice pour la présence de vie sur cette planète. Un indice, mais pas une preuve… pour cela, il faudra des études plus poussées.

Ce programme est difficile à remplir à cause du contraste entre la planète et son étoile. Cette dernière est 1 milliard de fois plus brillante. Mais en observant dans l'infrarouge moyen, le contraste n'est plus que de 1 million. Ceci s'explique parce que l'étoile est beaucoup plus chaude que sa planète, et par conséquent leurs rayonnements de corps noir sont assez fortement décalés. Le maximum de rayonnement de la planète est dans l'infrarouge, où l'étoile est fortement affaiblie.

Darwin utilsera la technique de *nulling interferometry*. Cette technique consiste à déphaser un télescope par rapport à un autre, de telle manière que l'étoile soit effacée. Mais la planète n'étant pas située au même endroit, sa lumière arrive par un chemin optique différent, et ne subi pas l'extinction.

Une heureuse coïncidence veut que les traces spectroscopiques de la vie terrestre se trouvent dans cette gamme, avec des bandes d'absorption de l'ozone et du méthane.

Cette gamme d'onde est donc, à double titre, bien adaptée à ce genre de recherches.

Ces observations sont impossibles au sol, d'abord parce que l'infrarouge moyen est absorbé par l'atmosphère, ensuite parce que l'instrumentation elle-même émet de l'infrarouge (rayonnement du corps noir à une température de l'ordre de 20° C). Dans l'espace, la radiation étudiée est disponible, et le télescope est assez froid (40 K) pour ne pas perturber ; on refroidira le capteur jusqu'à 8 K).

Pour que l'interférométrie se réalise parfaitement, la distance des télescopes doit être constante, avec une précision millimétrique. Ceci n'est pas facile à réaliser, mais devrait être possible. Pour cela, les télescopes seront équipés de moteurs ioniques, éjectant de très petites quantités d'ergols à très grande vitesse. Les corrections étant très petites, 5 kg d'ergol seront suffisants pour les 5 ans de l'expérience !

Le lancement devrait intervenir entre 2010 et 2020.

**Défauts**

Aberration des télescopes : la coma loin de l'axe optique pour la photo à grand champ (Voie Lactée, nébuleuses, comètes…) objectifs à lentilles longtemps préférés.

**Autres utilisations de la lumière**

Télescopes et lunettes ne sont que des collecteurs de lumière. Il la concentrent en leur foyer, où se forme l'image, qui est grossie par l'oculaire pour une observation confortable.

La photographie est le premier procédé qui remplace l'œil de l'observateur par un autre capteur, la pellicule. La pellicule joue exactement le même rôle que l'œil, elle fixe la position des astres. Dans une image, il y a deux types d'information différents : la direction d'où provient la lumière, et son intensité. On distingue deux étoiles lorsque leurs directions diffèrent d'une quantité supérieure au pouvoir séparateur de l'œil ; on

est aussi sensible à sa plus ou moins grande brillance. La pellicule joue exactement le même rôle que la rétine.

Un spectrographe est un autre capteur, qui traite la lumière d'une façon différente. Il décompose la lumière en ses différentes couleurs, pour une même direction (une même étoile). Les renseignements que l'on tire de cette observation sont d'une autre nature.

Bien d'autre techniques sont mises en œuvre à l'heure actuelle.

**Photographie**

La photographie a été appliquée à l'astronomie dès l'époque des daguéréotypes. Mais uniquement pour des objets très lumineux, à cause de la faible sensibilité. Elle est irremplaçable pour conserver et publier une observation, que l'on peut revoir longtemps après, caractéristique essentielle aux progrès de l'astronomie. Par rapport à l'œil, outre la persistence, elle présente des avantages et des inconvénients :

- elle accumule les photons (ils s'additionnent dans la pellicule, et non dans la rétine) ;
- elle les diffuse, ce qui agrandi la tache de diffraction ;
- elle présente un *défaut de réciprocité* qui limite sa sensibilité ;
- elle a un mauvais rendement quantique.

Le premier point est une qualité, les trois autres des défauts. La différence entre la pellicule photo et l'œil est essentielle : une image ne dure qu'une fraction de seconde sur la rétine, mais elle s'accumule au cours du temps sur le film. Cette propriété additive des pellicules permet d'atteindre des objets bien plus faibles que ce que l'on voit à l'oculaire.

Une pellicule photographique est un support, soit rigide (plaque de verre, astronomie professionnelle), soit souple (pellicule plastique), sur laquelle est appliquée une couche sensible contenant une substance photosensible. L'action de la lumière sur cette substance (l'apport d'énergie du photon), produit une modification électrochimique. Le développement termine ce processus. Des atomes ou molécules se forment, qui sont opaques à la lumière. La plus ancienne substance utilisée est le nitrate d'argent, et le développement produit des cristaux d'argent. Sur la plaque ou la pellicule, on a donc des molécules côte à côte qui vont former l'image. La première idée qui vient à l'esprit est que l'image d'une étoile va affecter une molécule, et que, pas conséquent, la finesse de la photo est limitée par la taille de ces molécules.

Ceci n'est pas vrai, la taille des grains de l'émulsion n'est pas le facteur limitatif.

Cette taille va de quelques micromètres, à un demi micromètre seulement. Mais l'image d'une étoile n'est pas constituée d'un seul grain : la lumière diffuse dans l'émulsion, et de nombreux grains autour de celui qui la reçoit sont affectés. Il s'ensuit une image stellaire bien plus grande que le grain élémentaire. On considère que la zone affectée sur la pellicule est de l'ordre de 50 µm.

Avec un télescope ou une lunette standard, la tache de diffraction est bien plus petite que l'image obtenue. Si deux images stellaires (donc séparées par l'objectif) se projettent dans un cercle de 50 µm de diamètre, elle formeront une seule image. La photo limite donc le pouvoir séparateur de l'instrument, la finesse des images. Des détails facilement visibles à l'oculaire sont absents de la pellicule. Ce problème a été résolu de deux façons différentes :

- par une amélioration des pellicules (au fil du temps, de nouvelles émulsions ont été produites, avec un grain plus fin) ;
- par un allongement de la focale.

Le premier point est évident, mais il ne permet pas de progrès vraiment spectaculaires.

L'allongement de la focale grossit l'image focale. Il suffi donc de l'augmenter suffisamment pour dépasser le diamètre de diffusion dans la pellicule. Mais ceci nécessite des longueurs focales extrêmes, avec un rapport F / D de 100 ou plus… Pour un télescope tel que les VLT, la focale serait de 800 m… C'est donc un moyen pour améliorer la photographie, des planètes par exemple, mais on ne peut atteindre de telles valeurs.

Le défaut de réciprocité est une diminution de la sensibilité avec le temps d'exposition. Une pose de deux minutes accumulera deux fois plus de lumière qu'une pose d'une minute. Mais une photo de dix minutes accumulera bien moins que dix fois plus de lumière. Inutile donc de prolonger indéfiniment une pose pour atteindre des astres plus faibles : au bout d'un certain temps, on ne gagne plus rien. La sensibilité indiquée sur l'emballage de la pellicule n'est valable que pour des poses relativement courtes.

Mais la pire difficulté vient du très mauvais rendement des surfaces sensibles. On appelle *rendement quantique* d'une pellicule, le nombre de photons qu'il faut accumuler en provenance d'une étoile pour que l'image apparaisse. Les bonnes pellicules n'ont qu'un rendement de l'ordre de quelques pour cent au mieux. Considérons un cristal de nitrate d'argent à la surface d'un film. Lorsqu'il reçoit 100 photons, 2 ou 3 d'entre eux ont une chance de modifier ses propriétés chimiques, amenant la formation d'une image. Les autres sont totalement perdus. C'est la raison pour laquelle la photographie demande de si longues poses.

Signalons toutefois une amélioration des pellicules à destination astronomique : *l'hypersensibilisation*. Il s'agit d'un traitement physico-chimique qui augmente nettement le rendement quantique d'une pellicule, mais sans atteindre les 10 %.

La véritable nouveauté est venue des capteurs électroniques, dont nous parlerons plus loin.

Avant de terminer ce paragraphe, il faut tout de même considérer le champ de la photo. Il est, avec un télescope normal, de quelques dizaines de minutes d'arc, au mieux. Or l'une des taches les plus importantes qui ont été faites depuis l'invention de la photo, est la cartographie du ciel. Il s'agit donc de couvrir la surface entière du ciel, et nous allons calculer combien de photos sont nécessaires si le champ est d'un demi-degré (30 minutes). On divise le ciel en carrés de 30 minutes de côté. Le ciel entier est gradué de -90° à +90° en hauteur, et de 360° en azimut (toutes autres coordonnées donneraient le même résultat). En hauteur, on aura donc 180° / 0,5° = 360 carrés. En azimut, ce sera 360° / 0,5 = 720. Pour paver tout le ciel, il faudra donc 360 x 720 = 259.200 photos… On n'a pas encore fini !

De plus, si on veut photographier la galaxie d'Andromède par exemple, on s'appercevra vite qu'elle ne tient pas toute entière dans le champ. Il faudra photographier par petits morceaux, et les rassembler ensuite.

Ces deux remarques vous montrent que les télescopes construits pour l'observation visuelle ne sont pas adaptés à certains usages. Les opticiens

ont travaillé pour construire des instruments spécialisés pour la photo, nous en verrons deux types plus loin.

**CCD**

Depuis peu, on dispose d'un nouveau type de capteur dont le rendement quantique (la proportion de photons utiles) est radicalement meilleur : il atteint 80 % dans le domaine visible. Il n'est donc plus nécessaire d'attendre très longtemps pour accumuler assez de photons pour former l'image.

Les progrès sont absolument spectaculaires. Les photos planétaires prises par le télescope du Mont Palomar (télescope Hale de 5 m de diamètre) dans les années 50 sont concurencées aujourd'hui par les amateurs équipés de télescopes somme toute modestes. Il n'y a pas de miracle là-dessous, mais une explication simple.

Pour obtenir une image de Mars, le télescope du Palomar devait poser plusieurs secondes. Pendant ce temps, l'atmosphère vibre par la turbulence, et dégrade gravement les images. Le pouvoir séparateur résultant est limité à 1 seconde d'arc à peu près.

Aujourd'hui, un amateur disposant d'une webcam derrière un télescope de 25 cm peut prendre une série d'une centaine de clichés, avec un temps de pose petit devant le temps de turbulence. Parmi ces clichés, certains seront affectés par la turbulence, d'autres non. On sélectionne les bons, et on les additionne pour obtenir une image pratiquement exempte de turbulence. Elle atteint le pouvoir séparateur de l'instrument, qui est de l'ordre de la demi-seconde…

Voilà une façon de contourner un problème, celui de la stabilité des images : disposer d'un capteur suffisament sensible pour faire des poses très courtes, qui figent la turbulence !

Vous avez parfaitement compris que cette technique ne s'appliquera pas aux objets faibles, pour lesquels le temps de pose reste long, même pour un capteur CCD. L'optique adaptative est indispensable dans ce domaine.

**Les spectres**

Les informations portées par un spectre solaire ou stellaire sont tellement importantes, que leur obtention est primordiale. On pourrait presque penser, si on devait choisir entre l'imagerie et la spectroscopie, que la seconde est plus importante (vous savez, si vous deviez emporter un seul livre sur une île déserte…).

Aussi, toutes les techniques permettant d'obtenir ces précieux spectres présente un intérêt capital en astronomie. Pour obtenir un spectre, la première difficulté est la faible lumière. Dans le cas du Soleil, premier étudié, il n'y a pas de problème. C'est plutôt l'excès de lumière qui gêne.

Mais pour la plus brillante des étoiles, il faut déjà un instrument sensible : un bon collecteur de lumière, c'est-à-dire un télescope présentant une surface la plus grande possible (le plus grand diamètre). Ce fut l'un des moteurs de la recherche astronomique, et de la course aux grands instruments. Aujourd'hui, on dispose de nombreux télescopes suffisants pour prendre les spectres des étoiles jusqu'à une magnitude assez élevée.

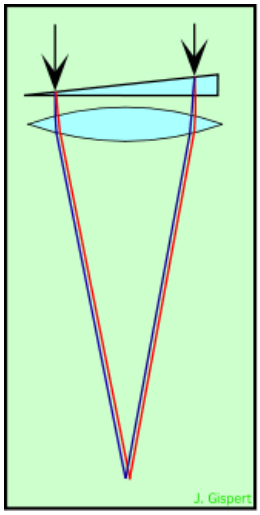
Comment fait-on ? Tout simplement en plaçant un prisme **derrière** le télescope. Attention, le prisme n'a pas une réponse linéaire. Il disperse davantage le bleu que le rouge. Aussi, un spectre photographié derrière un prisme n'a pas la même échelle sur toute la gamme. Difficile d'en déduire des informations numériques. Par contre, un réseau de diffraction presque linéaire, aussi ce sont les réseaux qui sont utilisés aujourd'hui.

Mais un autre problème se présente : l'obtention d'un grand nombre de spectres demande un temps dont on ne dispose pas. Une étoile prise au hasard peut avoir n'importe quel spectre : l'étudier en détail est parfois passionant, le plus souvent décevant… Comment trier entre les étoiles intéressantes et les autres ? La solution est très simple : si on pouvait prendre des spectres à basse résolution d'un grand nombre d'étoiles, on pourrait faire le tri entre elles. On saurait lesquelles sont intéressantes, et demandent une étude poussée, lesquelles ne méritent pas qu'on s'y attarde.

**Prisme-objectif**

Un instrument a été inventé pour résoudre ce problème : c'est le *prisme-objectif*. Comme son nom l'indique, il s'agit d'un prisme placé devant l'objectif, et non pas derrière le télescope. Alors, la lumière des étoiles est dispersée **avant** de former une image ; ainsi, on verra sur la photo non pas un spectre, mais autant de tout petits spectres qu'il y a d'étoiles. Ils ne sont pas détaillés, mais ils indiquent de quel type spectral est chaque étoile du champ. Donc, ils permettent d'analyser d'un seul coup d'œil toutes les étoiles visibles dans le champ d'un télescope. Si des étoiles présentent des raies d'émission, elles sautent aux yeux.

L'idée de départ a été donnée par Karl Schwarzschild en 1913, mais n'a pu aboutir à cause de problèmes techniques. C'est Charles Fehrenbach, à Marseille, qui l'a développée en associant deux prismes tête-bêche, l'un en flint et l'autre en crown-baryum. Pour une certaine longueur d'onde centrale, les deux prismes ont le même indice de réfraction. Mais pour les autres longueurs d'onde, ils varient en sens inverse. La longueur d'onde centrale n'est pas déviée. On fait une pose, puis on retourne le prisme de 180°, et on fait une seconde pose sur le même cliché. Ceci donne pour chaque étoile deux images parallèles et de sens opposés. Le décalage entre les deux spectres d'une même étoile permet d'estimer sa vitesse radiale.



Principe du prisme-objectif

Après, on peut prendre des spectres à haute résolution des étoiles intéressantes trouvées. Chaque observation ne donnera alors qu'un seul spectre.

**Spectroscope, spectrographe**

Un spectroscope est un instrument permettant de visualiser le spectre d'un astre. Il est généralement abondonné aujourd'hui au profit des spectrographes, qui enregistrent le spectre sur un support. Ce fut d'abord sur plaque photographique, c'est aujourd'hui sur des supports électroniques, à l'aide de CCD dont le rendement quantiques est infiniment meilleur.

**Stéréocomparateur**

A l'avènement de la photographie, la recherche des astéroïdes et des comètes a bénéficié des nouvelles possibilités, mais une difficulté est vite apparue.

Deux photos d'une même région du ciel, prises à un certain intervalle de temps, enregistrent les étoiles dans la même position. Mais une comète ou un astéroïde se déplacent assez rapidement, et leurs images ne seront pas au même endroit sur les clichés. Par conséquent, la comparaison des deux images doit montrer le déplacement, et signaler l'objet mobile.

La difficulté est de comparer visuellement les clichés. L'objet recherché est souvent de faible magnitude, et se trouve noyé dans un fond d'innombrables étoiles faibles. Il s'avère très difficile de le distinguer, d'autant plus qu'on n'est pas sûr de son existence !

Pour pallier ces difficultés, on a inventé le *stéréocomparateur*. Son principe est simple : c'est un appareil d'optique qui présente les deux clichés alternativement, avec un faible intervalle de temps entre les deux. Si les deux images sont parfaitement superposées, les étoiles fixes sembleront immobiles, alors que l'objet mobile sautera rapidement d'une position à l'autre. C'est tout bêtement le principe du cinéma, qui reconstitue le mouvement par une succession d'images fixes.

Animation représentant un stéréocomparateur

---

## *Les autres rayonnements*

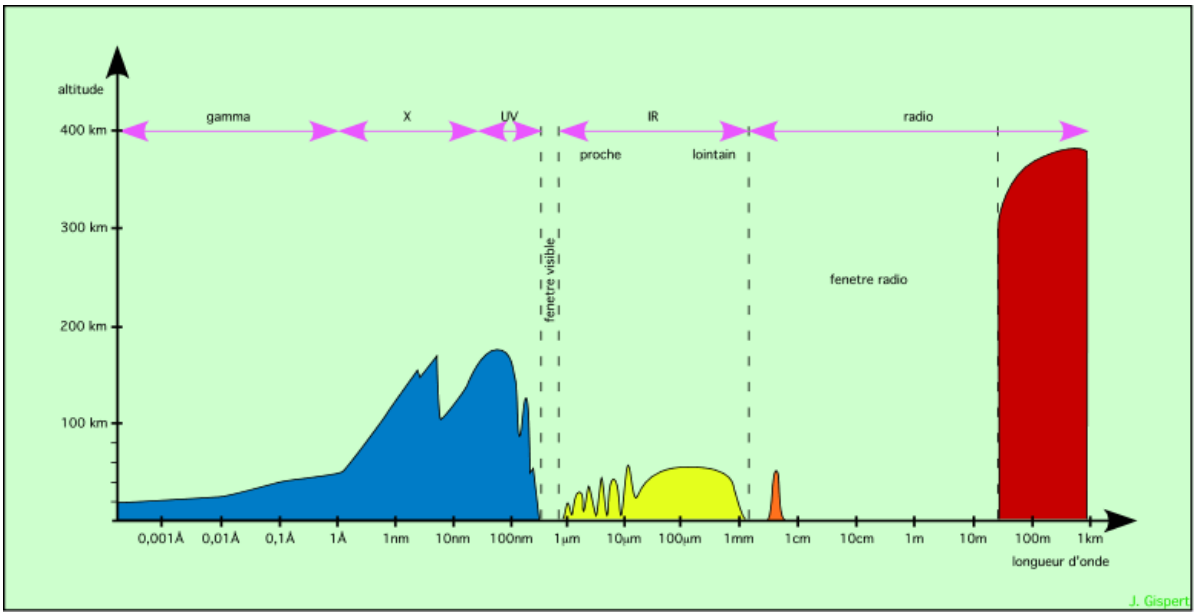
Après la lumière, qui saute aux yeux ( ! ), serait-il judicieux de s'intéresser aux autres longueurs d'onde ?

La réponse est très simple : oui, pour la raison suivante. Les phénomènes physiques qui nous permettent, grâce à la technologie, de produire les autres rayonnements, peuvent se produire naturellement dans l'Univers. La lumière est émise lorsqu'il y a assez d'énergie, et ce sont les atomes et molécules qui la produisent. Tous ces ingrédients sont disponibles à profusion dans l'Univers, ce qui suffit pour croire que tous les rayonnements peuvent être émis par les astres. Le sont-ils réellement ? La possibilité de la chose ne fait pas la chose elle-même, et seule l'observation est à même de trancher.

Comment les observer ? Cette question présente deux aspects :

- les rayonnements en question arrivent-ils jusqu'à la Terre ?
- comment peut-on les capturer pour former des images ? ou pour en tirer d'autres informations ?

Voyons tout d'abord le premier point. La Terre est entourée d'une atmosphère, composée essentiellement d'azote, d'oxygène, ainsi que de composants mineurs : gaz carbonique, méthane, argon… Nous savons que les atomes et molécules absorbent certains rayonnements : c'est ainsi qu'on détermine la composition du Soleil par analyse de la lumière qui traverse son atmosphère. Il se passe la même chose dans notre atmosphère, et certains rayonnements sont absorbés. Dans le visible, seules quelques raies, nommées raies telluriques dans le spectre du Soleil, sont éliminées. Mais d'autres longueurs d'ondes sont éliminées en totalité. Le schéma ci-dessous montre la transparence (et l'opacité…) de notre atmosphère à l'ensemble des rayonnements électromagnétiques. On constate que le visible arrive au sol en totalité (raies telluriques mises à part), mais la plupart des autres longueurs d'onde sont supprimées. On nomme *fenêtres* les bandes de rayonnements qui atteignent le sol :




L'absorption des rayonnements est représentée avec des couleurs différentes, depuis le bleu jusqu'au rouge, c'est-à-dire des plus énergétiques aux moins énergétiques. On voit ainsi que la partie bleue correspond aux rayons gamma, X et UV. Les gammas sont absorbés à une vingtaine de kilomètres d'altitude, les X et les UV disparaissent plus haut. Dans le domaine X, on voit que les ondes autour de 10 nm parviennent jusqu'à 100 km d'altitude, hauteur à laquelle atteignaient les fusées dans les années 1950 à 1060.

La fenêtre visible est presque totalement transparente, et ses ailes IR et UV sont elle-mêmes accessibles sur une faible largeur. Les UV qui arrivent au sol sont ceux qui produisent le bronzage ( pas seulement hélas). L'IR est presque totalement absorbé. Enfin, plus loin apparaît la fenêtre radio, pour les ondes millimétriques à décamétriques. C'est le domaine de la radio-astronomie. Remarquez enfin la bande rouge : les rayonnements de grande longueur d'onde sont totalement absorbés, et jusqu'à une altitude élevée (400 km).

Ce graphique explique que l'astronomie se soit développée dans le visible (l'œil est le récepteur naturel), dans le proche IR et le proche UV (la pellicule photo, moyennant quelques adaptations, convient), plus récemment dans le domaine radio. Les autres zones ne peuvent être exploitées depuis le sol, et des moyens à la fois physiques (récepteurs) et de transport (ballons, fusées, satellites), ont été nécessaires. Aujourd'hui, presque tout le domaine électromagnétique a été plus ou moins exploré, à l'exception des ondes radio au-dessus de quelques dizaines de mètres de longueur d'onde. Dans ce domaine, il faudrait des antennes de grande dimension pour avoir un pouvoir séparateur non ridicule, placées dans l'espace…

Dans l'étude de ces différents rayonnements, un chapitre est consacré aux radiotélescopes et un autre aux observations millimétriques.

---=OO=---

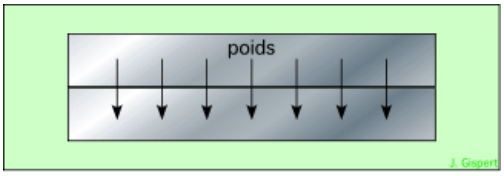
# Taille d'un miroir



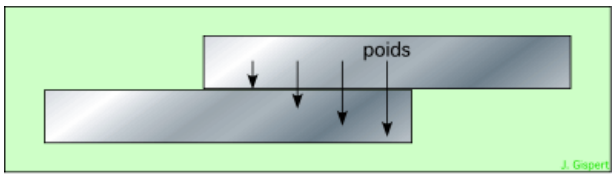
La taille des miroirs se fait de façon très simple, bien que les contraintes soient très fortes. Cependant, il faut être très méticuleux. On utilise deux disques de verre de même diamètre : l'un sera le miroir, l'autre sera un outil. Si on veut réaliser un bon miroir, il faut utiliser des disques spéciaux, qui sont fournis en général avec les divers abrasifs nécessaires à la taille. Pour faire des essais, on peut toujours se procurer de la glace de St Gobain (verre à vitre), qui se trouve chez les bons vitriers. Le plus difficile dans ce cas, est de couper la glace en disques…

Les manipulations décrites ici concernent la réalisation d'un miroir d'amateur; mais la technique est assez semblable pour les instruments professionnels. La différence importante tient dans l'automatisation nécessaire pour les gros miroirs, susceptible de produire des défauts systématiques.

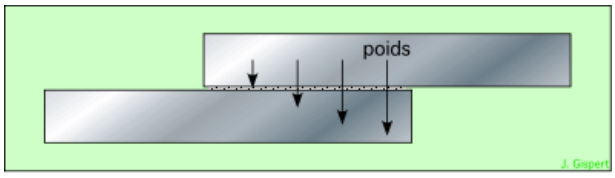
Sur une table ronde légèrement plus grande que le miroir, on pose les deux disques l'un sur l'autre. Le futur miroir est dessus, l'outil dessous. Si on les aligne bien, le poids du miroir appuie régulièrement sur toute la surface de l'outil :




Mais si on le fait déborder, la partie débordante est dans le vide, et ne subit donc aucune pression. Tout le poids du miroir produit une pression forte sur son centre, et sur le bord de l'outil :




On dépose maintenant un peu d'eau et d'abrasif (du *carborundum*, ou carbure de silicium SiC, que l'on appelle plus simplement *carbo* ; c'est une sorte de sable noir à grains très durs, plus durs que le verre) au centre de l'outil avant d'y poser le miroir :




Puis on frotte le miroir sur l'outil, en lui faisant décrire des mouvements en forme de huit, faisant déborder le miroir d'un côté de l'outil, puis de l'autre, etc... En même temps, on tourne autour de la table. Ainsi, les frottements vont user là où se fait la pression : au centre du miroir (dessus), et au bord de l'outil (dessous). Le miroir se creuse, et l'outil se bombe.

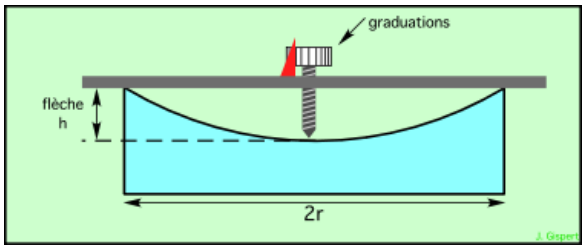
L'abrasif arrache de petits morceaux de verre, qui se mélangent à lui. Les grains eux-même s'usent, et s'arrondissent en diminuant de taille. Petit à petit, on obtient une boue grise qui finit par sécher (évaporation de l'eau). Il faut arrêter, laver le miroir, et remplacer le carbo et l'eau. Une telle manipulation s'appelle une *séchée*.

Considérez un instant deux surfaces de forme **quelconque** identiques. Etant identiques, elle s'emboîtent bien dans UNE position (la tête d'une vis et le bout du tournevis par exemple). Mais elles ne peuvent pas glisser ni tourner l'une par rapport à l'autre (pour le tournevis, c'est préférable). Par contre, si les surfaces sont des plans, vous pouvez les faire glisser et tourner librement en les maintenant parfaitement en contact (un livre sur la table). Il en est de même pour deux sphères, qui peuvent tourner l'une par rapport à l'autre dans tous les sens, en restant parfaitement en contact. Un exemple se voit tous les jours dans la rue : le crochet de traction d'une caravane sur la voiture est une sphère de métal ; l'attache de la caravane est une sphère en creux. Les deux ont le même diamètre, et s'emboîtent parfaitement l'une dans l'autre. Ainsi, la voiture peut tirer la caravane malgré les virages et les cahots.

Le plan et la sphère sont les **seules** surfaces assez régulières (possédant les symétries suffisantes) pour vérifier ces propriétés. Puisque notre miroir se creuse au centre, ce ne peut pas être un plan. Ce sera donc une sphère. Par conséquent, le miroir et l'outil seront deux sphères qui s'emboîtent parfaitement l'une dans l'autre.

En procédant de la sorte, on taille le miroir jusqu'à ce qu'il ait la courbure souhaitée (qui décidera de ses propriétés optiques). Pour mesurer cette courbure, on utilise un *sphéromètre*. Un sphéromètre simple peut être réalisé à l'aide d'une bonne règle métallique, percée en son centre

d'un trou taraudé. La règle est posée sur le bord du miroir en cours de taille. Un boulon est vissé au centre, jusqu'à ce qu'il touche le verre. Connaissant le pas du boulon, il suffit de compter combien de tours on effectue pour atteindre le verre, depuis le bord de la règle, pour connaître la flèche.




Sphéromètre

La molette graduée est placée de telle manière que le bout de la vis affleure sous la règle. On note la graduation, repérée par l'index rouge. On tourne alors la molette jusqu'à ce que la vis touche le verre, et on note la nouvelle graduation. La différence entre les deux mesures donne le nombre (fractionnaire) de tours effectués. Connaissant le pas de vis, on en déduit la longueur de vis entre la règle et le verre, donc la flèche du miroir.

Notons : h la flèche mesurée, r le rayon du miroir, et R son rayon de courbure. La focale étant la moitié du rayon de courbure (f = R / 2), il est très facile de montrer que :

$$h = 2f - \sqrt{4f^2 - r^2}$$

Connaissant le diamètre du miroir à tailler (donc r), et la focale f voulue, on calcule la flèche à donner. Au cours de l'ébauchage, on vérifie périodiquement la flèche, et on arrête lorsqu'elle est atteinte.

**Doucissage**

Il ne faut plus creuser, mais l'abrasif utilisé jusqu'ici a fait de gros dégats ! Les deux surfaces sont approximativement sphériques, mais ne s'adaptent pas bien l'une à l'autre, les irrégularités étant importantes. On va continuer le travail avec du carbo plus fin, qui diminuera les défauts, sans creuser davantage. Après quelques séchées (une dizaine, ou une vingtaine), on passe à un abrasif encore plus fin... Ou utilise souvent de *l'émeri*, ou corindon $Al_2O_3$. A chaque étape, il faut vérifier la surface du futur miroir, pour s'assurer de son uniformité.

Lorsque les deux disques sont parfaitement sphériques et bien doucis (doux au toucher), cette phase est terminée. Le miroir est dépoli, et ne réfléchi que très peu de lumière.

**Polissage**

Il est temps maintenant de polir. On utilise pour cela un abrasif extrêment fin. Il y a essentiellement trois substances utilisées : le *rouge à polir* (oxyde de fer qu'on fabrique en calcinant de l'oxalate ferreux), le *rose* (oxyde de cérium), et le *blanc* (oxyde de zirconium ou oxyde de titane).

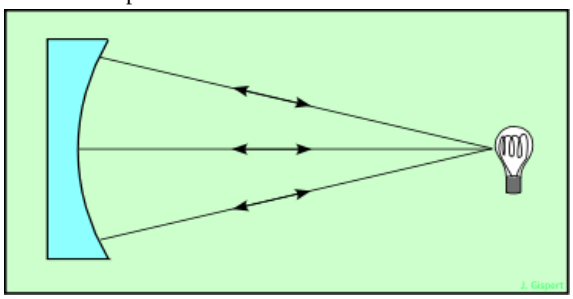
Pour ne pas abimer la surface du miroir, il faut garnir l'outil d'une couche de cire (mélange de cire d'abeille et de *poix* = résine de pins nordiques). On dépose à la surface de l'outil une couche épaisse de ce mélange, on y ménage un réseau orthogonal de stries profondes destinées à évacuer le trop plein d'abrasif (comme les structures d'un pneumatique évacuent l'eau). On place l'outil sur le miroir, et un poids sur l'outil. On laisse reposer assez longtemps (au moins 24 h) pour que la poix s'écrase un peu et prenne parfaitement la forme sphérique du miroir.

Le travail est semblable à celui de la phase précédente, mais miroir **dessous**. Lorsque le miroir est parfaitement transparent, sans présenter le moindre voile, le polissage est terminé. Si le miroir ne dépasse pas 10 cm de diamètre, le travail est achevé. En effet, pour cette petite taille, la différence entre la sphère et la parabole est négligeable, et le miroir sphérique obtenu est suffisant.

Mais pour un miroir plus grand, la surface doit être parabolique (comme les antennes de télévision par satellite, puisque le problème est le même). La différence entre le paraboloïde et la sphère reste très faible, il est donc possible de modifier la sphère pour obtenir le résultat souhaité. Mais ce travail est très délicat, et demande des vérification précises. Un appareillage de contrôle est nécessaire.

**Foucaultmètre**

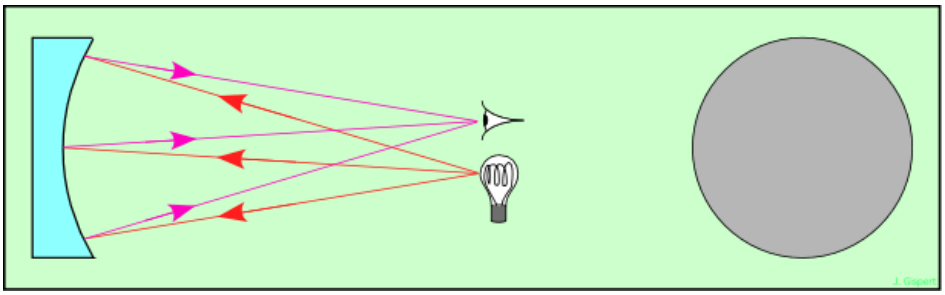
C'est Léon Foucault (toujours lui) qui a créé cet instrument, qu'on nomme *foucaultmètre*. Il utilise les propriétés de la lumière pour visualiser les défauts de surface du miroir.<:p>



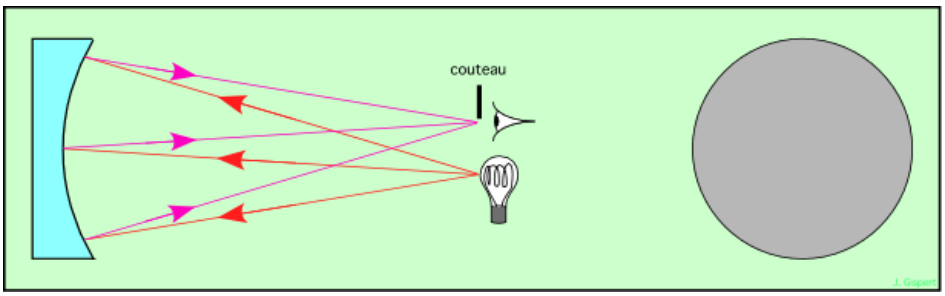
Ce schéma montre une source lumineuse, supposée ponctuelle, placée au centre de courbure du miroir. Tout rayon issu de la lampe se propage donc selon un rayon de la sphère que constitue le miroir. Il arrive à la surface de celui-ci perpendiculairement, et repart donc exactement en sens inverse.

Par conséquent, tous les rayons issus de la source repartent vers la source.

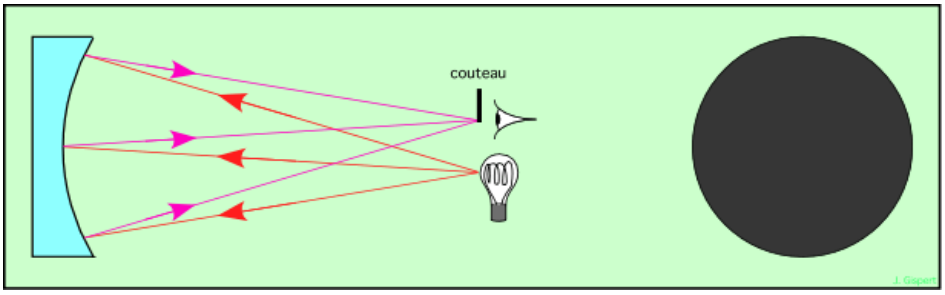
On décale légèrement la source lumineuse hors de l'axe, de façon à faire la place pour l'œil de l'observateur. Le déplacement étant faible, les rayons issus de la source vont tous converger, à très peu près, en un point symétrique par rapport à l'axe. L'observateur verra donc, en chaque point du miroir, la même quantité de lumière. Le miroir doit apparaître uniformément gris (on parle de *teinte grise*, l'aspect du miroir est représenté à droite) :



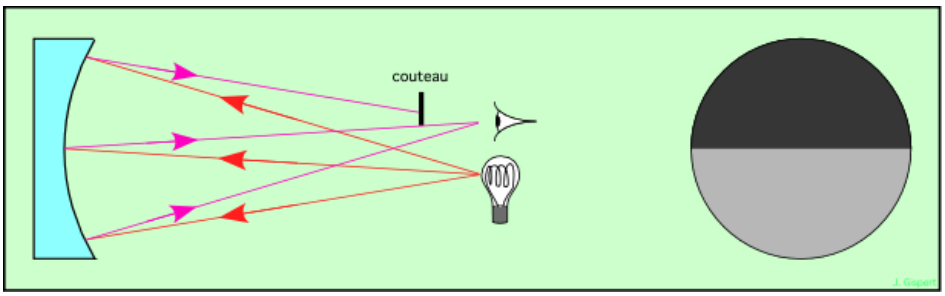
On place maintenant un *couteau* (lame de métal à bord très franc) juste à côté du point de convergence. Les rayons lumineux n'en sont pas affectés, puisqu'ils passent en totalité. L'apect du miroir reste le même, en teinte grise :




Si on pousse légèrement le couteau vers le bas (sur le dessin), il va intercepter **tous les rayons simultanément**. Le miroir s'éteint **instantanément** sur toute sa surface :

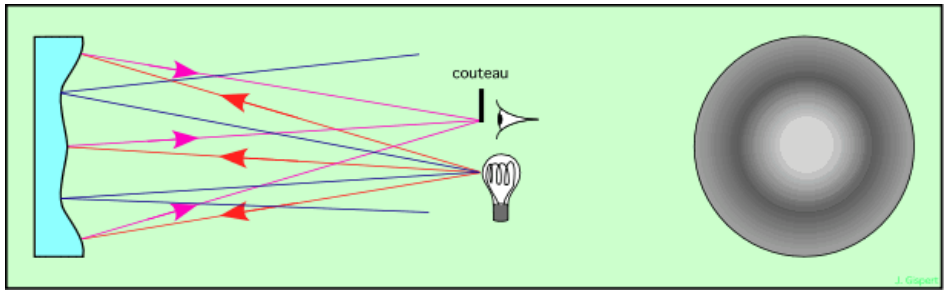



Est-on sûr de placer le couteau exactement au centre de courbure ? D'ailleurs, comment déterminer la position de ce centre ? On sait à peu près où il se trouve par construction (sphéromètre). Mais la précision ne suffit pas. Pour répondre à ces deux questions, il suffit de faire un schéma avec le couteau en avant ou en arrière du centre de courbure :

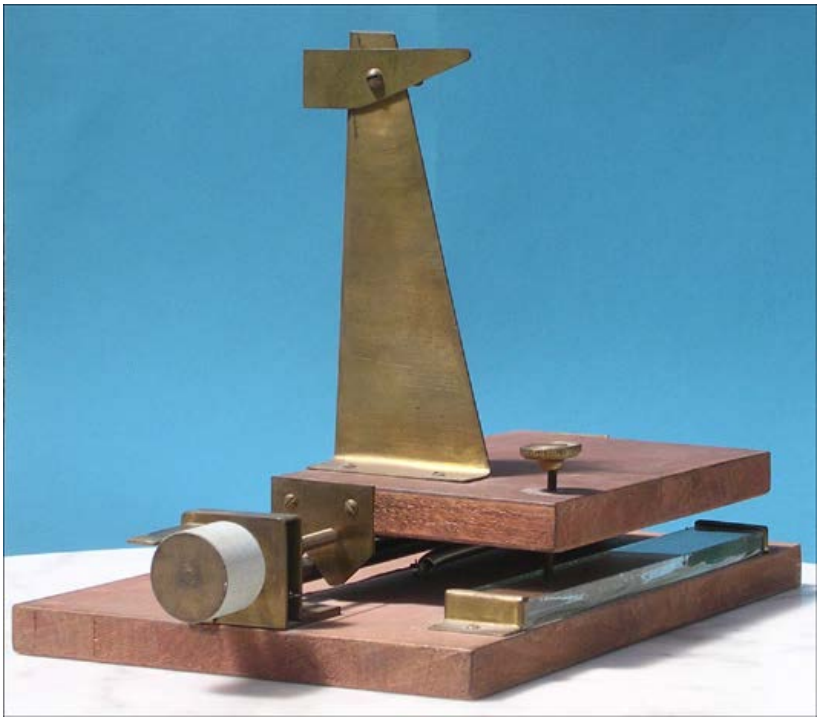



Sur le schéma ci-dessus, le couteau est figuré en avant du centre de courbure. Lorsque le couteau descend, il intercepte d'abord les rayons venant du haut, et le miroir s'obscurcit en partie. A mesure que le couteau descend l'ombre se propage sur le miroir. L'ombre vient du **même côté** que le couteau. Faites un schéma semblable avec le couteau en arrière du centre de courbure, et vous constaterez que l'obscurcissement se fait alors par le bas (parce que les rayons se croisent au centre de courbure), c'est-à-dire qu'elle se déplace en **sens inverse** du couteau. Le côté d'où vient l'ombre nous indique donc si le couteau est en avant ou en arrière du centre de courbure. Il suffit de le déplacer d'avant en arrière jusqu'à produire l'extinction brutale de toute la surface. On est alors sûr que le couteau est au centre de courbure, et sa distance au miroir nous permet de mesurer précisément la focale (qui est la moitié du rayon de la sphère).

Supposons maintenant qu'il y ait un défaut à la surface du miroir. Le défaut se traduit par une pente anormale, et les rayons qui y parviennent ne seront pas réfléchis vers le centre de courbure. Pour simplifier l'explication, considérons un cas fréquent, où le centre est relevé et le bord rabattu :




Les parties anormales du miroir font perdre des rayons, réfléchis en dehors du centre de courbure. Elles apparaissent en teinte plus sombre. Ainsi, visuellement, on peut déterminer exactement où se trouvent les défauts de réalisation du miroir, et savoir si ce sont des creux ou des bosses. Il ne reste plus qu'à les corriger... ce qui est plus facile à dire qu'à faire ! Mais l'outil de mesure est défini, sa réalisation est assez facile. En voici un exemplaire :



Foucaultmètre réalisé par J. Gispert, d'après des plans de J. Texereau photo J. Gispert

Sur cette photo, la source lumineuse a été retirée pour une plus grande clarté. Le foucaultmètre est constitué d'un bâti sur lequel se déplace un chariot. Le chariot est posé sur une tige métallique, sur laquelle il coulisse par deux pièces de cuivre taillées en V. Il s'appuie de l'autre côté sur le bâti, par une vis (à droite de la photo) posée sur une plaque de verre (glissement sans heurts). La vis permet d'incliner le chariot, et par suite le couteau que l'on voit au sommet de ce dernier. Sous le chariot, un ressort de rappel est visible, qui le tire vers la vis de réglage. Celle-ci est munie d'un tambour gradué (à gauche de la photo), qui permet de lire précisément le nombre fractionnaire de tours effectués.

Avec ce montage, le couteau peut être déplacé très précisément d'avant en arrière, et latéralement. L'éclairage, non présenté sur la photo, se pose sur le bâti, près du couteau. La source lumineuse est constituée d'un support muni d'une douille portant une ampoule. Celle-ci est dépolie pour une meilleure répartition de la lumière. L'ampoule est enfermée dans un cylindre métallique, dans lequel est percé un petit trou qui constituera la source pour l'observation du miroir.

On observe le futur miroir en plaçant l'œil le plus près possible du couteau. En réglant l'avancement du couteau, on le place très précisément dans le plan focal du miroir. Ensuite, par des déplacements latéraux, on vérifie la forme comme il a été indiqué plus haut.

**Retouches**

Les retouches du miroir sont locales. A l'aide du foucaulmètre, on a déterminé les zones à corriger. Il reste à fabriquer un petit outil (petit disque de verre garni de poix) et à retoucher **localement** le miroir, aux endroits déterminés à l'aide du foucaultmètre. Après une séance de retouche (courte), il faut laisser refroidir le miroir, afin d'éviter toute dilatation du verre. Lorsqu'il est en équilibre thermique avec la pièce (24 h plus tard), on peut le vérifier au foucaultmètre (il faut établir un bulletin de contrôle). On détermine la suite du travail à faire, et on la fait immédiatement. On recommence ce cycle tant que le miroir n'est pas satisfaisant.

Le travail de retouche est donc à la fois délicat et long. Il faut beaucoup de patience pour tailler son propre miroir... Au fil des jours, on arrivera à lui donner la forme parfaite.

Pour qu'un miroir soit optiquement bon, il faut que les défauts qui subsistent à sa surface soient petits devant la longueur d'onde de la lumière. On note $\lambda$ celle-ci, et on indique la qualité du miroir en donnant la taille, en fraction de longueur d'onde, du plus grand défaut du miroir.

Vous pourrez constater, si vous regardez des catalogues de miroirs proposés par certains magasins, que les miroirs vendus sont à $\lambda / 6$ ou $\lambda / 8$. Ceci signifie que le plus gros défaut est inférieur au $1/6^{e}$ (resp. $1/8^{e}$) de la longueur d'onde de la lumière observée (visible).

Un amateur soigneux et patient peut réaliser ses miroirs à mieux que λ / 10.

**Aluminiure**

Il reste à rendre le miroir réfléchissant, en déposant à sa surface une fine couche d'aluminium.

Cette opération nécessite un appareillage relativement complexe, pompe à vide assez poussé ($10^{-5}$ mm de Hg), et générateur de courant assez intense pour vaporiser l'aluminium. On trouve un tel matériel dans certains laboratoires, mais c'est sans doute là le point le plus aléatoire de la fabrication d'un miroir.

On suspend le miroir de verre dans une cloche à vide, face utile en-dessous. Au dessous du miroir, on place de petits morceaux d'aluminium dans un creuset électrique. Une fois le vide réalisé dans la cuve, on envoie un fort courant pour chauffer le creuset à 1.300°, ce qui a pour effet de vaporiser l'aluminium. Les atomes d'aluminium forment une atmosphère dans la cuve, et vont se déposer sur toutes les surfaces froides. Le verre du miroir est ainsi recouvert d'aluminium, mais les parois de la cloche également. Si celle-ci est en verre, elle devient brusquement miroir elle-même et renvoie l'image de la pièce où l'on se trouve. Les irrégularités du dépôt ne dépassent pas 1 %.



Cuve à vide contenant le miroir (en haut) ; l'aluminium est vaporisé en bas photo J. Gispert

Cette photo montre un miroir en cours d'aluminiure. Le miroir est accroché en haut de la cuve, ce qui évite la chute de gouttes d'aluminium, qui se produisent parfois si la résistance est au-dessus du miroir. La pompe à vide est dans le bâti qui supporte la cuve. L'aluminium est en cours d'évaporation, et la paroi de la cuve commence à réfléchir la lumière de la pièce.



Cloche à vide, Observatoire de Haute Provence photo J. Gispert

La photo ci-dessus montre la cloche à vide pour l'aluminiure du miroir du télescope 193 cm. Elle est située juste en-dessous de la coupole. Lorsque le remplacement de l'aluminium est nécessaire, le miroir est sorti de son barillet, descendu au sous-sol, et placé, après nettoyage, dans cette cuve pour réaluminiure.

Si vous envisagez de tailler un miroir, il est bien préférable, avant toute chose, de prendre contact avec un club d'astronomes amateurs dans votre région, qui pourra -on peut l'espérer- vous guider. Les explications ci-dessus ont pour but de faire comprendre comment on peut tailler un miroir et le contrôler, mais sont bien trop concises pour en permettre la réalisation sans autres données.

Il existe un excellent ouvrage sur ce sujet, intitulé *la construction du télescope d'amateur 2* (CTA2), écrit par Jean Texereau. Mais ce livre est maintenant très ancien, sur certains points dépassé, et de toutes façons non réédité. Avec un peu de chance, vous pouvez le trouver chez un antiquaire... Cependant, une version informatique est accessible sur le site d'Astrosurf.

Pour les grands miroirs, trop lourds pour être manipulés à la main, une machine à tailler est indispensable. Mais elle pose un problème majeur : par construction, elle présente des erreurs périodiques, qui vont se traduire par des défauts sur le miroir. A la main, on ne fait jamais deux fois le même geste, exactement. Mais on sait aujourd'hui fabriquer ces machines.

Les télescopes étant totalement exempt d'aberration chromatique, on peut fabriquer des miroirs beaucoup plus ouverts que les lunettes. Ces dernières sont couramment à F/D = 15 ou 20, obligeant à construire des tubes démesurément longs. Les télescopes sont ouverts à moins de 6. Celui du Mont Palomar est à 3,3 ! Ceci permet de diminuer la longueur du tube, donc son poids, et autorise donc de faire des instruments de plus grand diamètre. Mais la contrepartie est un champ exempt de coma de seulement 10'.

Toutefois, il existe des formules optiques plus complexes donnant un champ plus important : les télescopes photographiques de Schmidt (une lame de fermeture complexe et un miroir sphérique), les Maksutov (un ménisque sphérique de fermeture et un miroir sphérique), les Ritchey-Chrétien (des miroirs hyperboliques).

---=OO=---




La vitesse de la lumière est supérieure à la vitesse du son ;
c'est pourquoi bien des gens ont l'air brillants…
jusqu'à ce qu'ils ouvrent la bouche.
*Coluche*

C'est la nuit qu'il est beau de croire à la lumière
"Chantecler"
*Edmond Rostand*

## Plan


Les divers rayonnements
Le visible
Les autres rayonnements
Les ondes

Nature de la lumière
- Interférences
- Les fentes de Young
- L'effet photoélectrique
- Le rayonnement de corps noir

Propriétés de la lumière
- Réflection
- Réfraction
- Diffraction
- Vitesse de la lumière

Production des rayonnements :
- Rayonnement thermique
- Lois de Khirchoff
- Les luminescences
- La fluorescence
- L'atome d'hydrogène
- raies d'absorption
- Séries de raies
- Ionisations
- Raies interdites

Principe d'incertitude d'Heisenberg

Raie à 21 cm de l'hydrogène neutre
Spectroscopie
Rayonnement synchrotron
Rayonnement de freinage (*bremsstrahlung*)
l'effet Doppler-Fizeau
Les diffusions
Rayleigh
Mie


### *Rayonnements électromagnétiques*

Commençons par une énumération, qui peut paraître un peu hétéroclite :

- la lumière visible, avec les 7 couleurs de l'arc-en-ciel ;
- les infrarouges, que l'on détecte par la chaleur qu'ils transportent ;
- les U.V. qui provoquent le bronzage (et autres…) ;
- les ondes radio, qui nous permettent de transmettre des programmes radio ou T.V., mais aussi le téléphone portable, les communications avec les avions et les bateaux et, ce qui intéresse directement les astronomes, la transmission des données et images recueillies par les sondes spatiales ;
- les ondes radar, qui permettent de guider les avions, ou de piéger les chauffards, mais aussi de cuire des poulets dans les fours à micro ondes ;
- les rayons X utilisés en radiographie ;
- les rayons Gamma, si dangereux dans les centrales nucléaires ;
- *et un raton-laveur !*

Seuls la lumière visible et l'infrarouge sont sensibles. U.V., Gammas et X ont cependant des effets biologiques, quelquefois très graves.

Tous les éléments de cette énumération sont de même nature : ce sont des *rayonnements électromagnétiques*.

#### Le visible

Le visible est la partie du rayonnement électromagnétique que nous voyons, autrement dit celle à laquelle nos yeux se sont adaptés au cours de

l'évolution. C'est une toute petite fenêtre, dans les rayonnements électromagnétiques, dont les longueurs d'onde vont de 0,4 à 0,8 µm. Nos yeux sont cependant capables de discerner dans ce faible intervalle toutes les couleurs que nous connaissons, et de voir toutes les merveilles que la nature nous offre. Quelles beautés nous seraient accessibles si notre spectre était plus large ?

Pour répondre à cette question, il faut d'abord s'interroger sur notre environnement immédiat. Nous vivons à la surface de la Terre, et sommes baignés par son atmosphère. La source de lumière est le Soleil, qui émet tous les rayonnements, mais dans des proportions diverses. En fonction de sa température superficielle de 6.000°, son maximum d'énergie se situe dans le visible, dans la partie jaune-verte. C'est donc tout naturellement que nos yeux, comme ceux des animaux, se sont adaptés à cette partie où l'énergie est à profusion. Mais il y a une autre explication : l'atmosphère absorbe certains rayonnements. Fort heureusement pour nous, car ils ont des effets biologiques destructeurs, les rayons ultra-violets et gamma ne passent pas la barrière. En fait, seuls le visible, le proche infra-rouge, et certaines ondes radio traversent l'atmosphère.



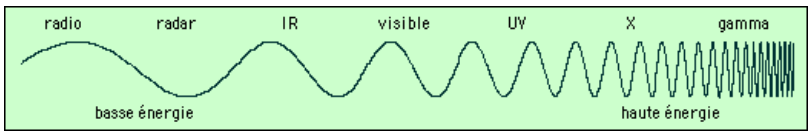
spectre visible seul (le reste ne peut être vu…)

L'astronomie a utilisé l'œil nu pour tout instrument pendant des millénaires. Aussi, seuls les rayonnements visibles servaient à décrire l'univers. Les ondes radio ont été utilisées dès qu'on a su les détecter, ce qui s'est produit après la seconde guerre mondiale. La situation a radicalement changé depuis peu, lorsque les moyens spatiaux ont permis de détecter les ondes qui ne traversent pas l'atmosphère. L'astronomie infra-rouge, ultra-violette, gamma est donc toute récente, et ne se fait que dans l'espace.

**Les autres rayonnements**

Si tous les rayonnements cités au début sont semblables, pourquoi leurs effets sont-ils si différents ? Parce qu'ils ne transportent pas la même énergie.

Ils se classent de la manière suivante :




Plus les ondes sont serrées (haute fréquence = courte longueur d'onde) plus elles transportent d'énergie.

Vous voyez sur le schéma que les rayons gamma sont beaucoup plus énergétiques que les ondes radio par exemple. Le tableau suivant montre les fréquences et longueur d'onde des divers rayonnements :

| | |
|---|---|
| **rayons gamma** | $\lambda < 5\ 10^{-12}$ m |
| | $\nu > 6\ 10^{19}$ Hz |
| **rayons X** | $\lambda$ de $5\ 10^{-12}$ m à $5\ 10^{-9}$ m |
| | $\nu$ de $6\ 10^{19}$ Hz à $6\ 10^{16}$ Hz |
| **ultra-violet** | $\lambda$ de $5\ 10^{-9}$ m à $8\ 10^{-7}$ m (= *0,8 µm*) |
| | $\nu$ de $6\ 10^{16}$ Hz à $7,5\ 10^{14}$ Hz |
| **visible** | $\lambda$ de $4\ 10^{-7}$ m = *0,4 µm* à $8\ 10^{-7}$ m = *0,8 µm* |
| | $\nu$ de $7,5\ 10^{14}$ Hz à $3,75\ 10^{14}$ Hz |
| **infra-rouge** | $\lambda$ de $8\ 10^{-7}$ m = *0,8 µm* à $10^{-3}$ m |
| | $\nu$ de $3,75\ 10^{14}$ Hz à $3\ 10^{11}$ Hz |
| **micro-ondes** | $\lambda$ de $10^{-3}$ m à 1 m |
| | $\nu$ de $3\ 10^{11}$ Hz à $3\ 10^{8}$ Hz |
| **ondes radio** | $\lambda$ de 1 m à $10^{5}$ m |
| | $\nu$ de $3\ 10^{8}$ Hz à 3.000 Hz |
| **ondes longues** | $\lambda > 10^{5}$ m |
| | $\nu < 3.000$ Hz |

Les ondes radio et radar n'ont pas d'effets biologiques connus (excepté peut-être de cuire les poulets dans les fours à micro-ondes). A l'autre extrémité du spectre, les rayons gamma sont très dangereux. Cela est dû au fait qu'ils apportent beaucoup d'énergie, et détruisent les molécules biologiques.

Une grande partie de ce que nous savons sur l'Univers nous est apporté par les rayonnements. Il faut en connaître parfaitement les propriétés, savoir dans quelles circonstances ils sont émis par les astres, et le lien qui existe entre les circonstances d'émission et leurs propriétés. En

déterminant les propriétés des rayonnements que l'on capte, on arrive à remonter aux circonstances de l'émission, et donc à connaître l'objet responsable.

L'Astronomie est une formidable école de patience, et nécessite beaucoup de connaissances en physique et d'astuce pour obtenir des résultats.

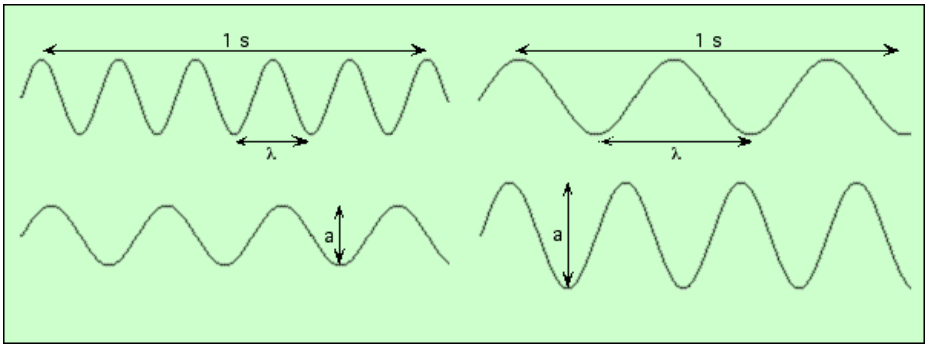
L'atmosphère de la Terre est transparente pour la lumière visible, et certaines ondes radio ; elle est opaque pour tous les autres rayonnements, d'où l'intérêt pour les observations spatiales.

On subdivise l'infrarouge, pour des raisons pratiques, en trois parties : proche, moyen et lointain. Le proche infrarouge va de 0,8 à 2,5 µm, l'infrarouge moyen va de 2,5 à 25 µm, et l'infrarouge lointain s'étend de 25 à 1.000 µm (= 1 mm).

Les explications à propos de la lumière nécessitent la connaissance élémentaire des ondes. Nous continuerons donc par là. Si vous possédez déjà ces notions, vous pouvez aller directement au paragraphe sur la nature de la lumière.

## *Les ondes*

Les rayonnements électromagnétiques sont des ondes. Une onde est une variation périodique d'un phénomène physique, comme les ronds que l'on produit à la surface de l'eau en jetant une pierre. Une onde est caractérisée par sa *longueur d'onde*, qui est la distance entre deux maxima ou minima successifs :




En haut à gauche, fréquence de 5 Hz ; à droite 2,5 Hz
en bas, l'amplitude de l'onde de droite est double de celle de gauche.

La longueur d'onde se note en général λ (lambda). Elle se mesure en mètres, (très souvent dans une subdivision, millimètre, micromètre, nanomètre). Sur le schéma ci-dessus en haut, la courbe de droite montre une longueur d'onde double de celle de gauche.

Les flèches placées au-dessus des courbes montrent la durée d'une seconde. Le nombre d'oscillations par seconde est nommé *fréquence*. Il est très souvent noté ν (nu). L'unité est le *hetrz* (abbréviation Hz) : 1 hertz = 1 oscillation par seconde. Les ondes sont partout dans la nature : à la surface de l'eau, dans les sons (les fréquences audibles sont comprises entre 20 et 20.000 hertz), dans la lumière (les longueurs d'onde du visible sont comprises entre 0,4 et 0,8 µm, et leurs fréquences de $4\ 10^{14}$ à $8\ 10^{14}$ hertz)… Ces diverses ondes sont produites par des phénomènes physiques différents.

L'onde oscille à une vitesse qui lui est propre. Plus cette vitesse est grande, plus les ondes sont serrées. A gauche, il y a 5 oscillations dans une seconde. A droite, il y en a seulement deux et demie. Lorsque la longueur d'onde double, le nombre d'oscillations par seconde diminue de moitié. Ces deux grandeurs sont donc liées.

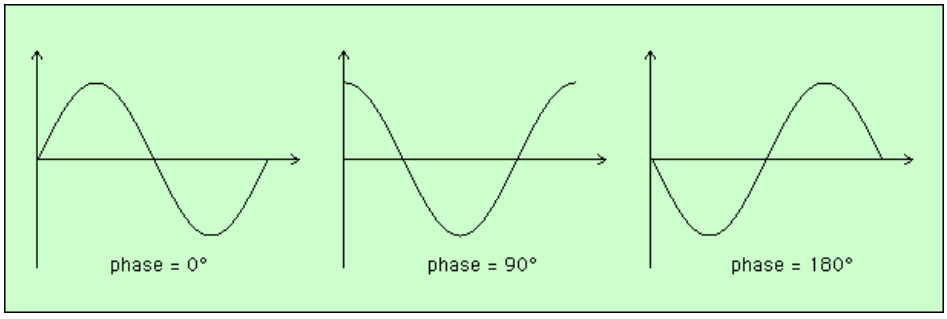
Pour les ondes électromagnétiques, il existe une relation très simple entre la longueur d'onde et la fréquence :

$$\lambda \nu = c$$

où c est la vitesse de la lumière.

Dans les deux dessins du bas, on voit deux ondes de même fréquence (ou de même longueur d'onde), mais de hauteurs différentes. On précise cette notion en nommant *amplitude* l'écart entre les valeurs maximale et minimale d'une onde.

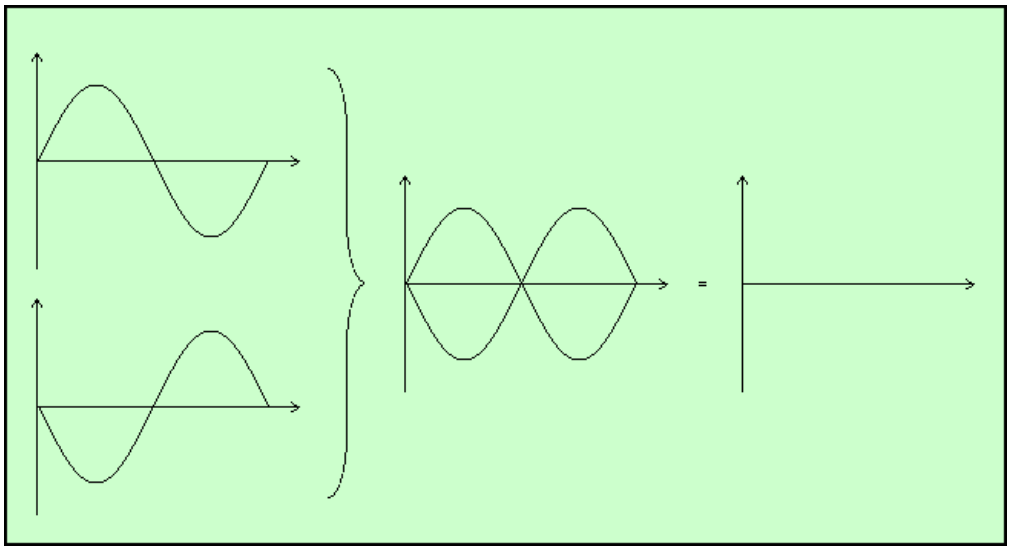
Une dernière grandeur est nécessaire pour caractériser totalement une onde : la *phase*. L'examen des trois courbes ci-dessous montre une même onde (même fréquence et même amplitude), mais décalée d'un dessin à l'autre :




La phase est le décalage. On la note le plus souvent φ (phi). Elle s'exprime en degrés. Le premier dessin est réalisé avec une phase nulle, le

second avec φ = 90°, et le dernier avec φ = 180°. Remarquez que le premier et le dernier dessin sont symétriques par rappport à l'axe horizontal : là où le premier est maximum positif, le dernier est maximum négatif. Pour exprimer celà, on dit qu'ils sont en *opposition de phase*.

L'opposition de phase a une importance capitale en physique. Si on ajoute deux ondes identiques mais en opposition de phase, le résultat est une absence d'onde ! En effet, en chaque point, la valeur de l'une est exactement l'opposée de celle de l'autre, et donc elles s'annulent…



Sur le schéma ci-dessus, vous voyez à gauche deux ondes de même fréquence, et en opposition de phase. Si on ajoute ces ondes, on obtient le schéma au centre, où les deux courbes sont représentées. Vous voyez qu'en chaque point sur l'axe horizontal, les valeurs correspondantes sur les deux courbes sont égales et opposées. Leur somme est donc nulle, ce qui se voit sur le graphique de droite.

Si on applique cela à du son, un bruit et son opposé donnent… du silence ! Et ce principe a été effectivement envisagé pour insonoriser une pièce : un micro capte le bruit extérieur, un amplificateur le restitue en opposition de phase et l'injecte dans des haut-parleurs. Vous entendez simultanément le son extérieur et sa copie en opposition de phase, c'est-à-dire rien.

Mais ce principe a des applications autrement plus intéressantes pour l'astronome. Il est à la base de l'interférométrie, qui permet de construire des télescopes dont la puissance dépasse largement celle qu'on peut escompter par les méthodes élémentaires.

Si les deux ondes, au lieu d'être rigoureusement en opposition de phase, sont décalées d'une phase différente de 180°, il y aura aussi addition des valeurs des deux ondes, mais le résultat sera très différent.

Animation expliquant les interférences

La radiotéléphonie (radio) utilise des ondes électromagnétiques comme support. Il faut des fréquences assez élevées pour assurer une bonne transmission. Or les fréquences de la voix sont beaucoup plus faibles. On utilise alors l'onde électromagnétique comme *porteuse*, et on la module pour lui faire transporter le signal. La modulation se fait sur l'un des paramètres de l'onde. On distingue donc *modulation d'amplitude*, *modulation de fréquence* et *modulation de phase*. La modulation d'amplitude a été, et reste, utilisée pour les communications en ondes longues, moyennes et courtes ; elle est assez sensible aux perturbations. La modulation de fréquence est principalement utilisée aujourd'hui pour la radio ; elle est bien plus résistante aux parasites, et donne un grand confort d'écoute. La modulation de phase est peu usitée, mais elle est de nature très semblable à la modulation de fréquence.

## *Nature de la lumière*

C'est l'un des grands problèmes de la physique.

Historiquement, les Grecs de l'Antiquité pensaient que la lumière était formée de particules trop petites pour être distinguables, qui étaient émises par les yeux et nous renseignaient sur les objets qu'elles touchaient. C'est une conception *corpusculaire*.

Après avoir créé l'interprétation géométrique de la lumière (Descartes), les physiciens du XVIII$^{e}$ siècle ont cherché à comprendre l'arc-en-ciel, la dispersion des couleurs par le prisme… Sur un plan plus pratique, ils s'inquiétaient des aberrations dans les instruments d'optique. Tout ceci les a amenés à étudier la lumière dans des conditions très particulières, par exemple dans l'expérience des fentes de Young.

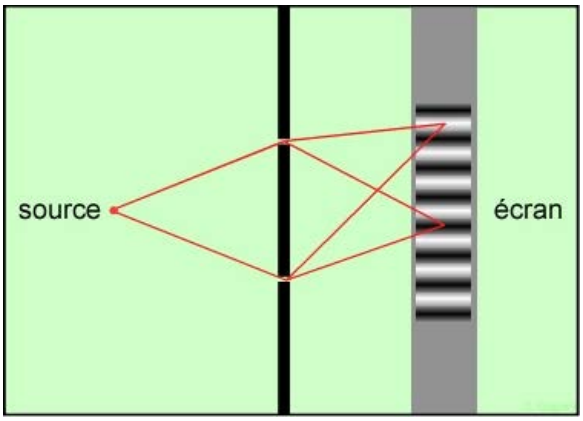
L'explication de cette expérience passe nécessairement par un aspect *ondulatoire* de la lumière : la lumière est une onde qui interfère. Du coup, la conception corpusculaire a été rejetée. A la fin du XIX$^{e}$ siècle, les jeux étaient faits, mais l'Histoire n'était pas finie.

L'effet photoélectrique, découvert à cette époque-là, permet le passage d'un courant électrique entre deux électrodes distantes, lorsqu'elles sont éclairées par une lumière bleue, et rien si on les éclaire en rouge. Ce seuil est inexplicable dans le cadre ondulatoire, et a obligé les physiciens à reconsidérer la lumière comme corpusculaire.

La lumière est donc assez complexe pour nous présenter, selon notre façon de l'observer, deux aspects qui *a priori* sont contradictoires. La Mécanique Quantique a unifié ces deux aspects.

**Les interférences**

La première observation de ce phénomène a été faite par Young, avec l'expérience des *fentes de Young*. Une source lumineuse assez puissante éclaire un écran percé de deux fentes parallèles. La lumière passe par ces fentes, et va éclairer un second écran derrière le premier. La théorie géométrique de Descartes dit que l'on devrait voir une image de chaque fente, dans l'alignement de la source. Au lieu de cela, on observe une série de raies sombres et brillantes :

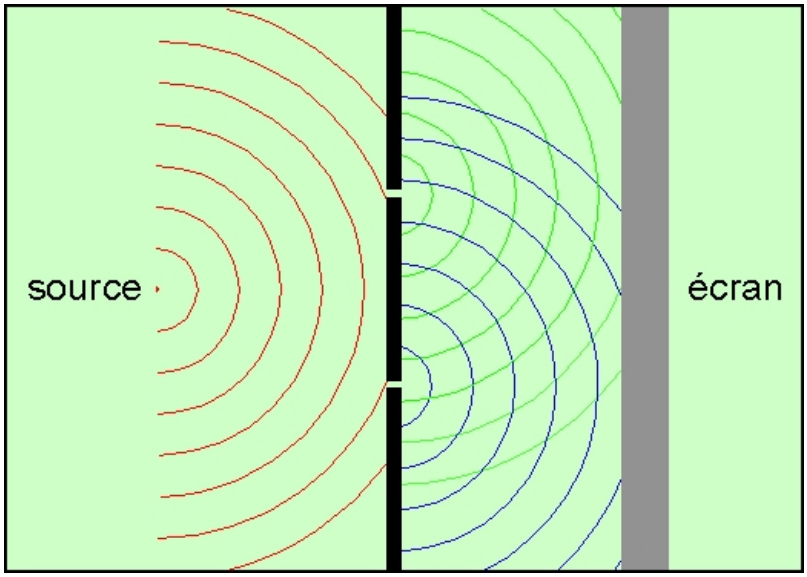



La théorie géométrique est donc prise en défaut. Pour expliquer un tel comportement de la lumière, il faut considérer qu'elle est une onde.

## *Explication des fentes de Young*

Au lieu d'envoyer des rayons rectilignes, la source émet un système d'ondes concentriques. Ces ondes vont frapper l'écran percé, et le traverser par les deux fentes. Mais puisqu'il n'y a pas de direction privilégiée à l'entrée des fentes, il n'y en aura pas non plus à la sortie. Alors, chaque fente va se comporter comme une nouvelle source, et émettre son propre système d'ondes. Ces ondes ont les mêmes propriétés que celles émises par la source, donc même fréquence et même amplitude. Mais la traversée des fentes va modifier la phase.

Imaginez que deux ondes quittent les fentes avec la même phase (par exemple elles sont toutes les deux à leur maximum, on observe une crête). Si elles parcourent jusqu'à l'écran une distance multiple exact de la longueur d'onde, elles arriveront avec la même phase (par exemple le maximum, une crête). Mais si l'une fait un trajet un peu plus long, alors, elle sera en retard par rapport à la première, et n'arrivera pas au maximum. Si l'écart est exactement d'une demi-longueur d'onde, elle arrivera au minimum, dans un creux. Alors, la lumière éclairant l'écran en ce point sera la somme Max + Min, ou crête + creux, qui est nulle, puisque le Min a la même valeur que le Max, mais négative. Donc en ce point on aura l'obscurité :




Aux endroits où les ondes arrivent en phase, elle s'additionnent et donnent un maximum de lumière. Aux endroits où elles arrivent en opposition de phase, l'interférence est destructrice, et on obtient l'obscurité totale. Ceci explique donc parfaitement l'aspect observé. On peut également calculer la distance des franges brillantes, et on constate que le calcul est vérifié par l'observation.

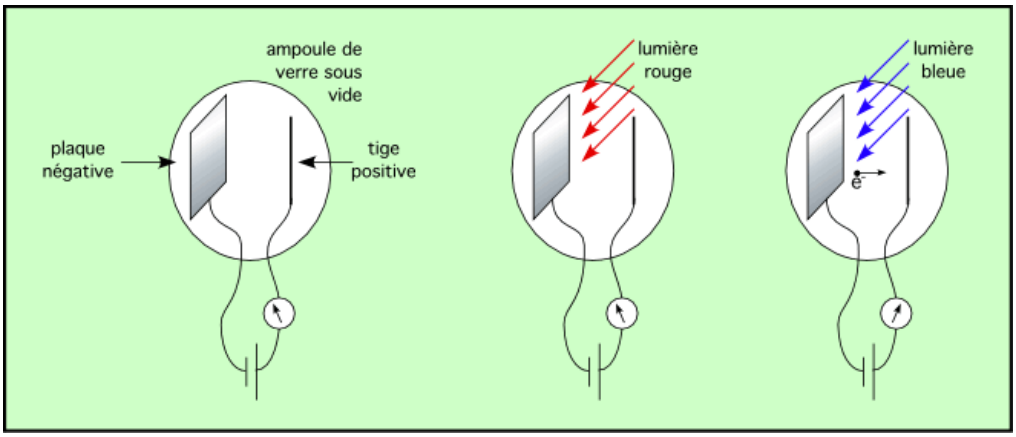
Vous pouvez par exemple imaginer que les cercles dessinés sur le schéma représentent les crêtes des ondes. Alors, les points de l'écran où se croisent deux cercles sont ceux où les deux ondes arrivent en une crête. Elles donnent donc une amplitude maximum. Ce sont les points où l'on observera l'éclat maximum.

L'expérience des fentes de Young est donc parfaitement expliquée par la théorie ondulatoire de la lumière, qui trouve ainsi son explication… provisoire !

**L'effet photoélectrique**

C'est lui qui a provoqué la grande surprise à la fin du XIX$^{e}$ siècle.

On place dans une cellule de verre sous vide, une plaque et une tige métalliques qui ne se touchent pas. La plaque est connectée au pôle négatif d'une pile, la tige au pôle positif. Un ampèremètre est placé en série dans le circuit. Lorsqu'on éclaire la plaque avec une lumière rouge, si intense soit-elle, il ne se passe rien. Si on éclaire avec une lumière bleue, un courant passe. On vérifie de plus que ce courant est proportionnel à l'intensité de la lumière.



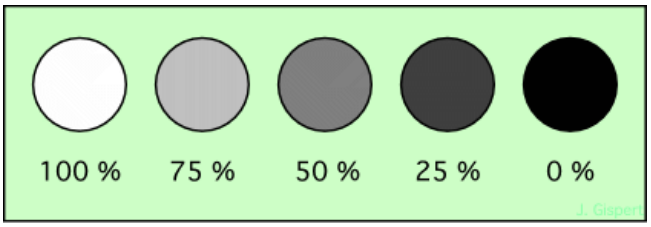

On ne sait pas expliquer cet effet avec une onde, la présence de ce seuil n'est pas justifiée. Par contre, si on considère que la lumière est faite de petites particules qui possèdent chacune une petite énergie, proportionnelle à leur couleur (leur fréquence), l'explication devient naturelle : à basse fréquence (rouge), l'énergie de chaque particule est trop petite pour arracher un électron à la plaque ; à fréquence plus élevée (plus bleue), l'énergie dépasse le minimum nécessaire pour arracher un électron. Alors, l'électron libéré de la plaque est attiré par l'électrode positive (la tige) et se dirige vers elle. Le flux d'électron crée un courant électrique (qui par convention est en sens inverse du déplacement des électrons : le courant va du plus vers le moins, alors qu'il est produit par un flux d'électrons en sens inverse).

C'est Albert Einstein qui a expliqué ainsi l'effet photoélectrique, et proposé de nommer *photon* ce petit grain de lumière.

**La lumière est de nature corpusculaire**

**Le rayonnement de corps noir**

Lorsqu'on regarde un objet -en physique on dit un corps-, on lui attribue une couleur. Celle-ci est déterminée par les ondes lumineuses qui l'éclairent, et qui sont réfléchies par le corps. Par exemple, une boule rouge présente cette couleur parce qu'elle réfléchit les rayons rouges, et absorbe les autres. Lorsqu'on la regarde, on ne perçoit que les seuls rayons qu'elle renvoie, rouges. Si la boule est bleue, elle réfléchit le bleu, et absorbe le reste. Certains corps sont neutres. La neige par exemple est blanche parce qu'elle réfléchit pareillement toutes les couleurs. Lorsqu'on la regarde, on voit donc toutes les couleurs de l'arc-en-ciel, dont le mélange est blanc. Les nuages sont gris, parce qu'ils réfléchissent pareillement aussi toutes les couleurs, mais ils en absorbent une partie, la même pour toutes. C'est pourquoi ils apparaissent moins lumineux, gris.




Le schéma ci-dessus montre des disques gris, plus ou moins brillants. Celui de gauche renvoie 100 % de la lumière qu'il reçoit, il apparait blanc. Les suivants sont de moins en moins réfléchissants, et paraissent donc de plus en plus sombres. Celui de droite est noté 0 % réfléchissant. Mais ce n'est pas le cas vraiment… En fait, il réfléchit très peu de lumière. On peut maintenant définir le corps noir, qui est une notion théorique.

Un *corps noir* est **un corps en équilibre thermique**

Cet équilibre a deux aspects, selon les particules considérées : l'équilibre thermique des atomes qui constituent le corps, et celui des photons. Pour les atomes, ce sont les chocs entre eux qui uniformisent leurs vitesses (agitation thermique). On conçoit assez facilement que ces chocs puissent, à la longue, leur communiquer une vitesse bien répartie autour d'une moyenne. Pour les photons, les choses sont un peu plus subtiles. Ils possèdent aussi une énergie, fonction de leur couleur (de leur fréquence). Imaginez que des photons entrent dans le corps noir considéré (depuis l'extérieur) : ils apporteraient de l'énergie, et donc rompraient l'équilibre. Réciproquement, si des photons sortaient, ils emporteraient de l'énergie et rompraient l'équilibre dans l'autre sens.

Ceci donne l'autre aspect d'un corps noir : **c'est un objet matériel qui n'échange aucune énergie avec l'extérieur**. De ce fait, il n'émet rien, donc ne brille absolument pas, c'est ce qui justifie son nom. On devrait même dire qu'il est super noir, parce que les corps réels n'atteignent jamais cette limite.

Alternativement, on peut considérer que le bilan énergétique du corps noir est nul, puisqu'il n'émet ni n'absorbe d'énergie. Mais une autre façon d'obtenir un bilan nul est que l'entrée soit exactement égale à la sortie ! C'est le cas si le corps est parfaitement absorbant, et aussi parfaitement émissif, indépendamment de la longueur d'onde. C'est pourquoi le spectre d'un corps noir ne dépend que de sa température, et nullement de sa composition.



Corps noir approché (au mieux, dans les trous bien brillants) photo J. Gispert

C'est dans les trous que le corps noir est le mieux approché, parce que la surface par laquelle la braise peut émettre un rayonnement (celui qu'on voit) est la plus petite. Dans les laboratoires de physique, un corps noir est approché par un four très bien isolé, et percé d'un tout petit trou, nécessaire pour l'observation.

Le corps noir n'existe pas en réalité, mais certains objets s'en approchent beaucoup. C'est le cas de :

- la photosphère du Soleil (ce serait un très bon rayonnement de corps noir s'il n'y avait pas les raies d'absorption, produites par l'atmosphère du Soleil) ; ce cas est celui où tout rayonnement incident est absorbé, et également tout rayonnement est émis ;
- 'un morceau de fer chauffé… le confinement est moins bon.

L'équilibre entre les atomes et les photons s'explique par leurs interactions, par divers mécanismes dont les contributions cumulées représentent bien la courbe du corps noir.

Les lois de l'émission de lumière par un corps noir ont été décrites par Stefan et Wien, et sont inexplicables dans le cadre ondulatoire. Elles sont parfaitement compatibles avec l'aspect corpusculaire de la lumière. Nous les traiterons plus loin, bien qu'elles aient leur place ici, parce qu'elles découlent d'un mode de production de la lumière, que nous verrons avec les autres.

**La solution**

Interprétation **corpusculaire**, pour expliquer l'effet photoélectrique, **ondulatoire**, pour expliquer les interférences, comment concilier l'inconciliable ?

On doit donc **admettre** que la lumière présente *à la fois* ces deux aspects. Ainsi, le photon est une particule accompagnée d'une onde. On a appellé cette théorie *Mécanique Ondulatoire*.

A la suite de ce travail, Louis de Broglie a généralisé cette dualité : **toute** particule doit être accompagnée d'une onde, et posséder donc des propriétés à la fois ondulatoires et corpusculaires. Cette idée de génie est à la base de la *Mécanique Quantique* (qui généralise la Mécanique Ondulatoire), qui nous permet aujourd'hui de comprendre les objets compacts, naines blanches, étoiles à neutrons ou autres objets plus exotiques encore !

Maintenant que nous connaissons la nature de la lumière, nous pouvons étudier ses propriétés, et ses modes d'émission.

## *Propriétés de la lumière*

**Réflexion et réfraction**

La lumière se propage en ligne droite, c'est un fait d'observation courante. Il suffit pour s'en aperçevoir d'éclairer le ciel par une nuit humide avec une lampe torche. Ou encore, de voir les rayons issus du Soleil former une gloire.



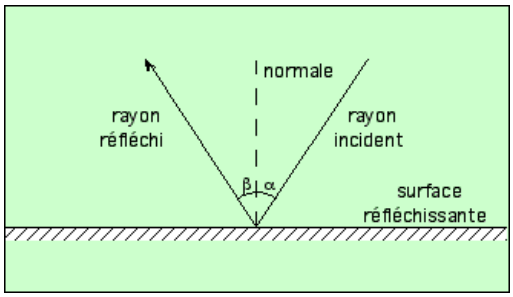
Soleil en gloire, oued Tamenkrist, Tassili du Hoggar photo J. Gispert

**Réflexion**

Mais l'expérience quotidienne nous montre que ce principe de base admet des exceptions. La première est la réflexion. Certaines surfaces, par exemple métalliques, bien polies, renvoient la lumière dans une direction différente. Descartes a été le premier à s'intéresser scientifiquement à ce phénomène, et il en a donné la première loi de Descartes :

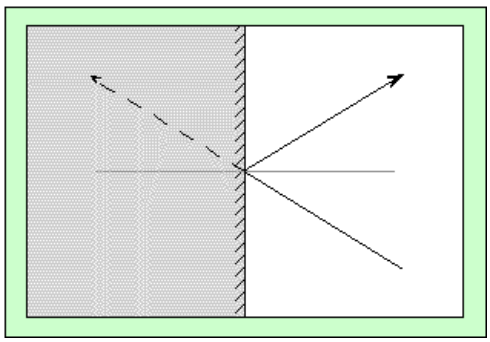
**le rayon incident et le rayon réfléchi font un même angle par rapport à la normale**

La normale est une droite perpendiculaire, que l'on imagine élevée au point où le rayon incident touche le miroir (la surface réfléchissante). Le schéma ci-dessous l'explique :




Les angles α et β sont égaux.

Ceci s'explique très bien, si on garde en mémoire que la lumière se propage en ligne droite. Le miroir introduit une perturbation, que la lumière négocie pour continuer le plus droit possible. Le schéma ci-dessous montre que le rayon réfléchi est tout simplement le symétrique du rayon qui continuerait en l'absence du miroir.

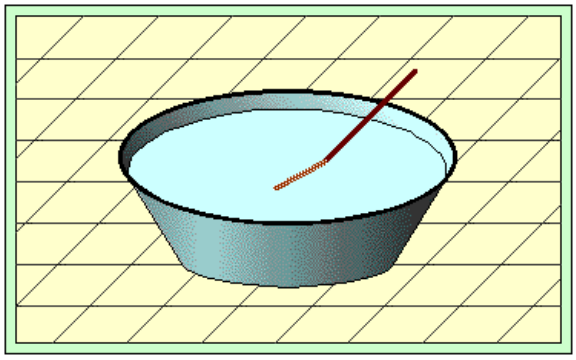


Le rayon incident en bas à droite, et le rayon fictif à gauche font le même angle par rapport à la normale. Et par symétrie, le rayon fictif et le rayon émergeant font le même angle par rapport au miroir : c'est son symétrique.

On remarque que dans la réflexion la lumière ne change pas de milieu : elle reste dans l'air.

**Réfraction**

Prenons une bassine pleine d'eau, et plongeons-y un bâton bien droit. Nous avons l'impression que le bâton est cassé au niveau de la surface de l'eau. C'est parce que l'eau n'a pas les mêmes propriétés optiques que l'air, on dit le même *indice de réfraction*.



La lumière va toujours en ligne droite, à l'approximation géométrique près, tant que le milieu traversé est à indice de réfraction constant. Mais si la lumière traverse une surface où l'indice change, elle est déviée. Ceci se produit toujours quand il y a variation d'indice, qu'elle soit brutale ou continue. Si la variation d'indice est continue, le rayon est courbe. L'indice de réfraction de l'air est différent de celui de l'eau, et c'est pourquoi la règle semble cassée à l'interface entre l'air et l'eau.

Comme pour la réflexion, la lumière continue le plus droit possible, en s'accomodant de la perturbation imposée par le changement d'indice.

**La diffraction**

Plus généralement, dès qu'une onde lumineuse rencontre un obstacle, elle est perturbée par *diffraction* : le bord de l'obstacle se comporte un peu comme les fentes de Young, et produit une nouvelle source lumineuse. Toutes ces sources vont interférer, donc perturber l'onde, et sont la cause des limitations de l'optique.

La finesse des images données par un instrument se caractérise donc par la nature ondulatoire de la lumière. L'explication géométrique considérant des rayons rectilignes est fausse (valable en première approximation seulement). Il est plus réel de regarder les vaguelettes circulaires faites à la surface par une pierre jetée dans l'eau. Elles présentent un phénomène qui se produit également avec la lumière. Il se forme des ondes, qui partent du point de chute et dessinent des cercles concentriques. Si les vaguelettes heurtent un obstacle, elles s'y réfléchissent, et se mélangent avec celles qui arrivent. Au lieu de la belle ordonnance initiale, on voit un certain désordre.

L'image d'une étoile ponctuelle donnée par un instrument parfait (de construction) n'est pas ponctuelle ; la lumière ne se concentre pas en un seul point infiniment petit, mais s'étale en une *tache de diffraction*. L'énergie lumineuse est concentrée pour 90 % dans la tache, et les 5% restant dans des anneaux qui l'entourent, les *anneaux de diffraction* (ceci est un phénomène ondulatoire, qui n'a rien à voir avec l'aberration chromatique).

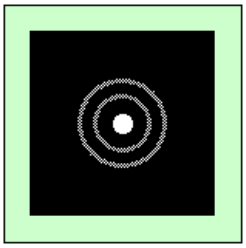
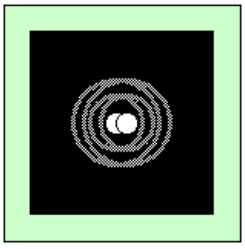


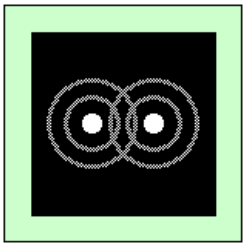
Image télescopique d'une étoile
figure de dirraction

Dans un instrument d'optique, le bord de l'objetif ou du miroir est un obstacle ; c'est lui qui produit la tache de diffraction. On comprend alors facilement que plus les bords du miroir sont loin l'un de l'autre, plus faible sera la perturbation. C'est ce qui explique que la tache de diffraction soit plus petite dans un instrument plus grand.

Considérons la voiture dont on a parlé dans le premier chapitre. Chaque phare donne une tache de diffraction. Le faux disque (la tache elle-même) contient 19/20$^{e}$ de la lumière de l'étoile. Les anneaux se partagent donc très peu de lumière, c'est pourquoi ils sont difficiles à voir.



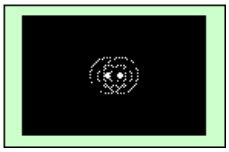
La voiture est loin, les taches de diffraction des deux phares sont très proches angulairement. Mélangées, on ne peut pas les distinguer.



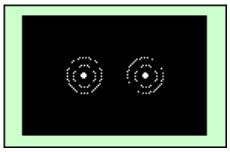
La voiture est plus proche, les deux taches plus éloignées angulairement, elle se séparent.

Nous venons de considérer l'observation à l'oeil nu. Si maintenant on utilise un instrument d'optique, par exemple des jumelles, ce que nous venons de dire s'applique encore, mais les taches de diffraction sont plus petites. Ceci est dû à l'importance relative moins grande des bords de l'instrument : pour un miroir ou un objectif deux fois plus grand, la surface, donc la quantité de lumière reçue, est multipliée par 4 alors que la longueur du bord perturbateur n'est multipliée que par 2. La perturbation est donc relativement deux fois moins importante. Ce qui fait qu'un miroir deux fois plus grand donne des images deux fois plus fines.

Elles se séparent donc plus facilement :



A la même distance que dans le dessin du haut (à l'oeilnu), les deux taches sont déjà distinctes (la distance des centres est la même, mais les tâches étant petites, ne se mélangent pas).



Et elles sont d'autant mieux séparées lorsque la voiture est plus proche.

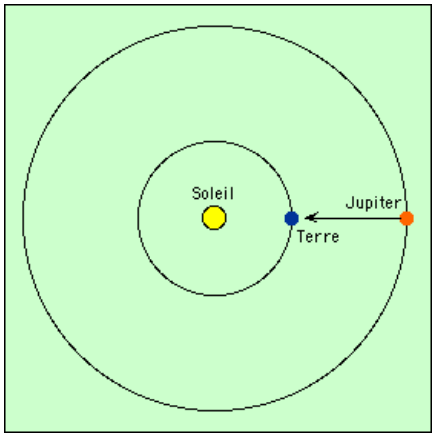
On peut comprendre ce phénomène de tache de diffraction en observant certains documents imprimés. Les photos de couverture de magazine sont en quadrichromie ; elles sont formées de petits points de couleurs différentes qu'on peut très bien voir à l'aide d'un loupe. La loupe augmentant le pouvoir séparateur de l'oeil, on distingue très bien les points, et l'image est alors très mauvaise ! Les imprimeurs tirent donc parti d'un défaut de l'œil pour réaliser leurs travaux…

Les instruments d'optique astronomique sont destinés à augmenter le pouvoir séparateur, en permettant de distinguer des détails de plus en plus fins dans les objets observés.

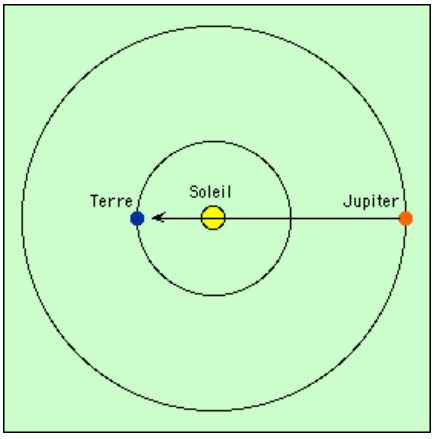
**Vitesse de la lumière**

La lumière, et plus généralement tous les rayonnements électromagnétiques, se déplace à vitesse finie. Nous avons l'impression, quand on allume une pièce, que tout s'éclaire instantanément. C'est faux, mais c'est des milliers de fois trop rapide pour que nous voyions le déplacement des rayons. A cause de cette extrême rapidité, on a longtemps pensé que la propagation de la lumière était instantanée.

Mais certains savants ont pressenti au cours des siècles que la lumière pourrait se déplacer à une vitesse finie. Il a fallu attendre 1675 pour que Römer en donne une mesure : la théorie des satellites de Jupiter était faite, grâce à la Gravitation Universelle. Il était possible de prévoir avec précision les éclipses des satellites galiléens. Or les instants calculés étaient en avance ou en retard sur les observations. De plus, le décalage était cyclique, avec une période d'un an ! Ceci prouvait que les écarts étaient liés au mouvement de la Terre sur son orbite, et Römer en a donné l'explication (attention, sur le schéma les orbites ne sont pas à l'échelle) :




La Terre et Jupiter (en opposition) sont séparées de 780 - 150 = 630 millions de km




6 mois plus tard (conjonction), elles sont séparées de 780 + 150 = 930 millions de km.

Lorsque Jupiter est en opposition, la distance Terre-Jupiter est de 630 millions de km. La lumière provenant d'une éclipse met 35 minutes pour parvenir à la Terre (35 minutes = 2.100 secondes à 300.000 km par seconde = 630 millions de km). On voit l'éclipse 35 minutes après qu'elle se soit effectivement produite.

Six mois plus tard (Jupiter est en conjonction) la distance est de 930 millions de km. La lumière provenant d'une autre éclipse met 52 minutes pour parvenir à la Terre. Cette seconde éclipse sera vue de la Terre 52 minutes après qu'elle se soit produite. Donc, selon la position relative de la Terre et de Jupiter, on verra l'écart de temps entre deux éclipses augmenté de 52 - 35 = 17 minutes, ou diminé d'autant. Une théorie des éclipses des satellites de Jupiter ne tiendra pas compte de cette différence, et les instants observés seront donc en avance ou en retard d'un bon quart d'heure sur les instants calculés.

Cet écart de temps correspond à la différence de distance parcourue par la lumière, donc à 300 millions de km (deux fois la distance Terre-Soleil). Si la lumière met 17 minutes pour parcourir 300.000.000 km, c'est qu'elle effectue 300.000.000 / 1.020 = 294.000 km / s.

Avec les données dont il disposait, Römer a déduit une vitesse de 225.000 km $s^{-1}$ (il utilisait une valeur fausse de la distance Terre-Soleil ; avec la valeur exacte, son calcul aurait donné 298.000 km $s^{-1}$). La valeur admise maintenant est de presque 300.000 km $s^{-1}$, exactement 299.792,458 km $s^{-1}$. Il faut bien comprendre que c'est la vitesse de la lumière DANS LE VIDE. Dans tout milieu matériel transparent, la lumière se propage à une vitesse moindre. Et c'est cette différence de vitesse qui explique la réfraction.

La lumière blanche résulte d'un mélange de toutes les couleurs. Un arc-en-ciel, un vase en cristal taillé frappé par un rayon de soleil, séparent les couleurs et les rendent visibles. Lorsqu'on a séparé les couleurs, on dit qu'on a réalisé un *spectre*. Le spectre d'une lumière montre donc de quelles couleurs elle est composée. Là s'arrête l'expérience quotidienne.

Si on analyse la lumière d'une ampoule électrique à l'aide d'un prisme assez dispersif, ou d'un réseau de diffraction, on y découvre les couleurs de l'arc-en-ciel, passant graduellement de l'une à l'autre, sans rupture. Le changement de couleur est continu. On dit qu'on observe un **spectre continu**.

> Un réseau de diffraction est une plaque de verre rayée de nombreux trait parallèles. Les pentes des rayures captent la lumière, et de l'une à l'autre produisent des interférences. Ceci permet de décomposer la lumière.
>
> Un réseau donne des résultats meilleurs qu'un prisme, parce que la distance entre deux raies d'absorption est proportionnelle à la différence de longueur d'onde entre ces deux raies. Ceci permet de mesurer directement la différence de longueur d'onde. Ce n'est pas le cas avec un prisme.
>
> On fait des copies en plastique d'un réseau en verre, bien plus économiques, et donnant de bons résultats.

Maintenant, captons sur le prisme la lumière du Soleil, passant par un petit trou dans les volets fermés. Faisons tomber le spectre sur une feuille de papier blanc. Nous y voyons le spectre continu, assez semblable à celui de l'ampoule. Mais avec un peu d'attention, on arrive à distinguer des raies sombres, qui coupent le spectre continu. Ces raies semblent réparties au hasard, mais les scientifiques n'admettent le hasard que s'ils y sont obligés. Dans le cas des raies sombres du spectre, on constate que leur position ne varie jamais. Ce n'est donc pas le hasard qui les produit ! On a donc cherché à comprendre d'où venaient ces raies.

On peut encore changer de source lumineuse, et observer le spectre de la lumière émise par une petite ampoule témoin, qu'on utilise dans certains interrupteurs. Ces ampoules sont de petits tubes à décharge au néon, et leur lumière est jaune-orangée. Le spectre nous réserve des surprises : il n'y a pas de spectre continu, mais seulement quelques raies brillantes (les plus brillantes étant dans la partie jaune-orangé, ce qui explique la couleur globale de la lumière émise).

Quels mécanismes produisent le spectre continu, les raies, d'émission ou d'absorption ? Pour le savoir, il a fallu comprendre la nature de la lumière et la structure de l'atome.

Rappelons-nous que la lumière est à la fois ondulatoire (c'est une onde électromagnétique) et corpusculaire (elle est constituée de photons). Nous avons vu un schéma qui montre que la couleur de la lumière provient de sa longueur d'onde. On peut le dire différemment, si on considère le photon associé à l'onde : la couleur provient de l'énergie de ce photon. Un photon de faible énergie correspondra à une onde radio, un photon de très haute énergie est un photon gamma (c'est pour cela que les rayons gammas sont très dangereux pour la vie, car avec leur énergie, ils détruisent les molécules biologiques). Dans le domaine visible, les photons rouges sont moins énergétiques que les photons bleus.

La vitesse de la lumière dans le vide est constante, elle vaut c = 299.792,458 km $s^{-1}$ . Cette constance est surprenante, car la Mécanique Classique admettait l'addition des vitesses, qui est contradictoire avec cette observation. Ceci est à la base de la théorie de la Relativité Restreinte, et par suite de la Relativité Générale.

A cette vitesse, la lumière met 1,3 secondes pour aller de la Terre à la Lune, 8 minutes pour aller du Soleil à la Terre, 6 heures pour aller du Soleil à Pluton…

## *Production des rayonnements*

L'émission de rayonnements électromagnétiques peut se faire par divers mécanismes. Selon leur nature, on distingue :

- le rayonnement thermique ;
- les luminescences ;
- le rayonnement synchrotron ;
- le rayonnement de freinage (bremsstrahlung, free-free).

Ces rayonnements possèdent des propriétés différentes, dont l'analyse permettra de déterminer les conditions physiques et les mécanismes qui ont présidé à l'émission. Ils seront donc la source essentielle des renseignements obtenus sur les objets observés.

### Le rayonnement thermique

Le rayonnement thermique est produit par tout corps chauffé. Il n'est pas nécessaire de chauffer **fortement** pour produire un rayonnement, mais il le faut pour le rendre visible. En effet, comme nous l'avons déjà signalé plus haut à propos du morceau de fer, la couleur du rayonnement émis varie selon la température. Le filament d'une ampoule à incadescence est porté à 2.000 ; il rayonne une lumière blanche. Lorsque le morceau de fer refroidit, la couleur émise va du bleu vers le rouge puis, lorsque nous ne voyons plus rien, vers l'infrarouge. Mais il continue d'émettre tant que sa température dépasse le zéro absolu (-273 ). Autant dire qu'il émet toujours…

Certaines pellicules photographiques sont sensibles à l'infrarouge, et permettent de photographier la nuit. Le paysage apparaît assez sombre ; les êtres vivants, par leur rayonnement propre, sont plus clairs (sauf peut-être les reptiles…).

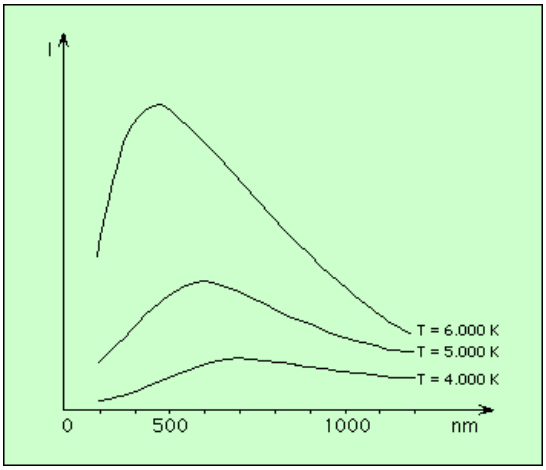
Ces rayonnements thermiques ont posé un très gros problème à la physique de la fin du XIX$^{e}$ siècle : la Mécanique Classique, qui expliquait si bien les phénomènes connus alors, ne représentait pas la répartition de ces rayonnements. L'étude de cette répartition est à la base d'une grande révolution : la naissance de la Mécanique Quantique. Un changement très profond de point de vue a permis d'expliquer parfaitement les émissions thermiques, connues sous le nom de *rayonnement du corps noir*.

L'énergie totale rayonnée par un corps noir, par unité de temps et de surface, est fonction de sa température ; elle est donnée par la loi de :

$$\mathbf{E = \sigma T^4} \qquad \textbf{loi de Stefan-Boltzman}$$

A une température double, l'énergie rayonnée est donc $2^4 = 16$ fois plus grande. Ceci nous montre que les étoiles chaudes perdent beaucoup plus d'énergie que les autres.

Un corps réel quelconque peut être comparé au corps noir à la même température : ses propriétés sont proportionnelles. L'étude du corps noir, idéal, est donc très utile. Elle débute par le tracé de la courbe donnant l'intensité lumineuse en fonction de longueur d'onde (donc de la couleur), qui est présentée ci-dessous.




Considérons la courbe du haut. On remarque immédiatement qu'elle est fort loin d'être constante, et présente un maximum très marqué vers 500 nm (c'est dans le vert). Elle correspond à une température de 6.000 K (à peu près la température du Soleil). Elle nous indique qu'un corps noir à 6.000 K émet de la lumière à toutes les longueurs d'onde (de toutes les couleurs), mais beaucoup plus dans le vert que dans le rouge.

La seconde courbe correspond à une température de 5.000 K, et son maximum se trouve vers 600 nm. La dernière enfin a son maximum vers 700 nm pour T = 4.000 K.

La longueur d'onde du maximum est donnée **en micromètres** par (T en Kelvins) :

$$\mathbf{\lambda_m = 2.898 / T} \qquad \textbf{loi de Wien}$$

On en déduit tout de suite que la comparaison de ces courbes théoriques avec le spectre réel d'une étoile permet de déterminer la température de surface (de la photosphère) de cette étoile, à la condition qu'on puisse l'assimiler à un corps noir, ce qui est faisable en première approximation. C'est une des méthodes permettant de déterminer la température du Soleil.

**Pourquoi un corps chauffé rayonne-t-il ?**

C'est Max Planck qui a trouvé l'explication. La température d'un corps mesure l'agitation des particules qui le composent. Ces particules sont des atomes, ionisés ou non, comprenant des protons (de charge électrique positive) dans leurs noyaux, et des électrons liés aux noyaux ou libres. Toutes ces particules chargées, en se déplaçant, s'entrechoquent et émettent des photons. L'énergie du photon émis correspond exactement à celle perdue par la particule, en diminuant sa vitesse.

Dans un gaz à la température T, toutes les particules ne vont pas à la même vitesse. La température correspond à une vitesse moyenne des particules, mais chacune prise à part peut s'éloigner beaucoup de cette moyenne. Certaines vont beaucoup plus vite, d'autres beaucoup plus lentement. En se heurtant, leur vitesse change, et elles émettent éventuellement un photon. Ce mécanisme est nommé *thermalisation*.

On conçoit donc qu'on puisse trouver, dans le rayonnement, des photons de toutes les longueurs d'onde, mais avec un maximum correspondant à la vitesse moyenne (qui est celle du plus grand nombre de particules). Ainsi, l'origine physique du phénomène est comprise, et le fond continu de rayonnement des étoiles avec.

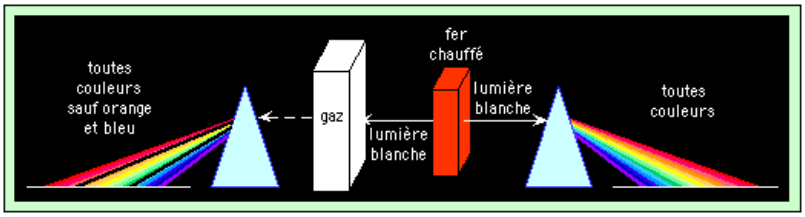
Nous allons maintenant passer à un tout autre mécanisme, qui donne un spectre discret (en mathématiques, et par extension en physique, discret signifie non continu ; les entiers constituent un ensemble discret, car entre 1 et 2 il n'y en a aucun ; les nombres réels par contre sont continus : entre x et y il y a toujours leur moyenne, qui est aussi un nombre réel).

**Lois de Kirchhoff**

Kirchhoff a étudié les émissions de lumière, et en a déduit des lois :

- Tout corps chaud émet un rayonnement continu, qui contient **toutes les couleurs** (spectre continu : on passe continûment d'une couleur à une autre) ; ce rayonnement ne dépend pas de l'élément considéré ;
- Le spectre de la lumière émise par un gaz, sous faible pression, n'est pas continu, mais présente seulement quelques raies brillantes, sur un fond sombre (sans lumière). Donc, un gaz dans ces conditions n'émet que quelques radiations bien précises. L'important est que ces couleurs changent d'un gaz à un autre : **elles les caractérisent**. Le spectre est comme les empreintes digitales : une signature du gaz. On appelle ces raies des *raies d'émission*.
- Enfin, si la lumière émise par un corps chaud (contenant toutes les couleurs) traverse un gaz froid, elle en ressort privée de certaines couleurs, qui laissent donc des raies noires dans le spectre. Ces couleurs disparues sont exactement celles que ce gaz émettrait s'il était chaud (confirmant donc bien le fait qu'elles constituent sa signature). On les appelle *raies d'absorption*, et elles indiquent donc qu'un gaz froid a été traversé par la lumière, et quel est ce gaz.

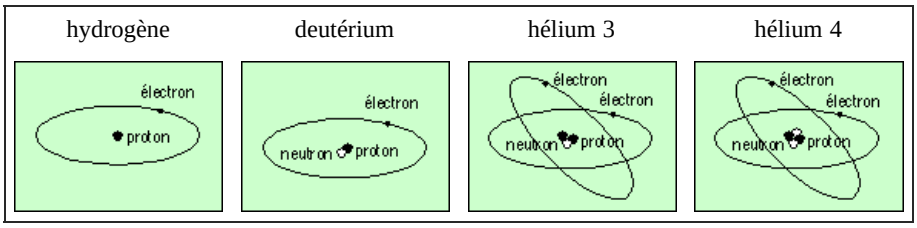
Le schéma ci-dessous explicite ces trois lois :




On voit à droite un spectre continu, alors qu'à gauche il manque les couleurs correspondant aux raies d'absorption du gaz interposé (orange et bleu). Un morceau de fer chauffé à blanc est placé entre deux prismes. Mais d'un côté on intercale un récipient contenant un gaz. La lumière émise par le fer traversera donc le gaz avant d'être décomposée par le prisme. Dans un spectre, la partie continue, le fond coloré, est nommé *continuum*.

La première de ces lois peut se constater simplement : mettez un morceau de fer dans la cheminée. Lorsque sa température augmente, il va se mettre à briller, d'abord en rouge sombre, puis en rouge vif, et enfin en blanc si on le chauffe très fortement. Les corps les moins chauds émettent une lumière à dominante rouge, les plus chauds une lumière à dominante bleue (c'est le contraire des robinets ! ). Donc la couleur dominante de la lumière indique la température du corps. C'est de cette manière qu'on a déterminé la température du Soleil (6.000 ).

**Représentation des atomes**




**Attention** : le modèle de Bohr, illustré ci-dessus, a été défini au début du XX$^{e}$ siècle ; depuis, la Mécanique Quantique a modifié la vision que l'on a d'un atome. Pour être totalement correct, on ne doit plus parler d'orbites (notion classique) mais *d'orbitale*. La différence est que dans une orbite, on connaît exactement, à un instant donné, à la fois la position et la vitesse de la particule. En Mécanique Quantique, le principe d'incertitude d'Heisenberg interdit cette connaissance simultanée, et donc sur une orbitale, on peut savoir où se trouve l'électron, sans connaître se vitesse, ou bien connaître sa vitesse sans savoir où il est…

Le modèle de Bohr ne sert plus que pour des raisons pédagogiques (sous la réserve indiquée ci-dessus).

**Les luminescences**

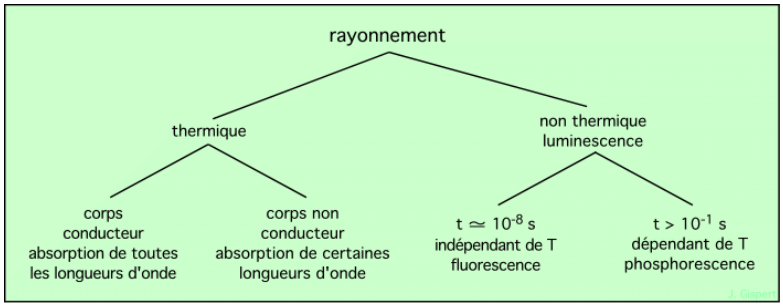
La luminescence est une émission de rayonnements électromagnétiques par un mécanisme non thermique. La lumière émise par les vers luisants, par les souches pourrissantes, est une luminescence.

La luminescence est produite en deux temps : excitation puis émission. On distingue deux formes différentes : la fluorescence et la phosphorescence :

- la *fluorescence* :
  l'émission est presque immédiate après l'excitation (délai de l'ordre de $10^{-8}$ s) ;
  elle ne dépend pratiquement pas de la température ;
- la *phosphorescence* :
  l'émission se produit de quelques dizaines de secondes à plusieurs jours après l'excitation ;
  elle dépend fortemement de la température.

Lorsqu'un atome est excité, l'électron peut retomber spontanément vers un état métastable (relativement stable). Il reste alors dans cet état jusqu'à ce qu'un petit apport d'énergie le ramène sur un état instable, d'où il retombe en émettant un photon. C'est le mécanisme de la phosphorescence.

La fluorescence est un phénomène produisant un spectre de raies : il ne contient que certaines longueurs d'onde bien particulières, et rien ailleurs.

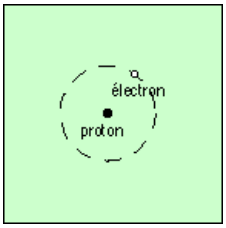



Ces lois sont empiriques, elles décrivent et synthétisent les résultats des expériences. Il faut maintenant expliquer ces résultats. Tournons-nous donc vers la structure des atomes, et voyons d'abord de quoi est fait le plus simple d'entre eux.

**Fluorescence**

La *fluorescence* est un phénomène produisant un spectre de raies : il ne contient que certaines longueurs d'onde bien particulières, et rien ailleurs.

**l'atome d'hydrogène**




Le noyau de l'atome est constitué d'une seule particule, nommé **proton**. Le proton possède une charge électrique unitaire positive.

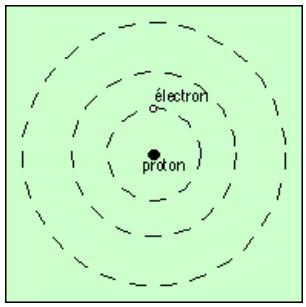
Un **électron** (autre particule portant une charge électrique unitaire négative, et 1.840 fois plus légère), est lié par l'attraction électrostatique au proton autour duquel il tourne (attraction entre charges de signes opposés, répulsion entre charges de même signe).

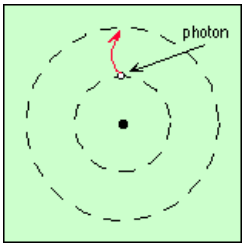
Ce **modèle planétaire** de l'atome d'hydrogène a été proposé par Niels Bohr au début du XX$^{e}$ siècle.

Contrairement aux planètes, qui peuvent circuler à n'importe quelle distance de leur étoile, l'électron n'a à sa disposition que des orbites bien particulières. La plus proche du noyau est appellée **orbite fondamentale**, ou de niveau 1. La seconde est de niveau 2, etc. Entre les orbites de niveau 1 et 2, il n'y en a pas d'autres possibles.

Chaque orbite est caractérisée par une certaine valeur de l'énergie, qui est d'autant plus grande que l'orbite est plus loin du noyau.

Dans la figure ci-contre, l'électron est sur l'orbite fondamentale, de plus basse énergie. Il y est donc stable, comme un pendule est stable en position verticale (plus basse énergie potentielle).




L'électron se trouve donc normalement sur l'orbite fondamentale. Il peut passer sur une autre orbite plus éloignée (d'énergie supérieure), à condition qu'on lui fournisse l'énergie correspondant à la différence d'énergie entre les deux niveaux.

Cette énergie peut lui être communiquée par des chocs avec d'autres atomes, par un champ électrique, ou bien par un photon dont la couleur correspond à cette énergie (figure ci-contre). Dans ce dernier cas, le photon est absorbé.

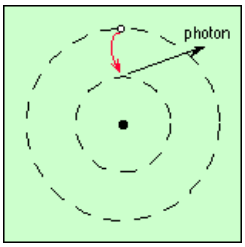
C'est là l'origine des *raies d'absorption*.

Puisque les orbites basses sont de moindre énergie que les orbites hautes, elles sont plus stables. L'électron aura donc toujours tendance à retomber vers une orbite basse. Mais son énergie diminue donc.

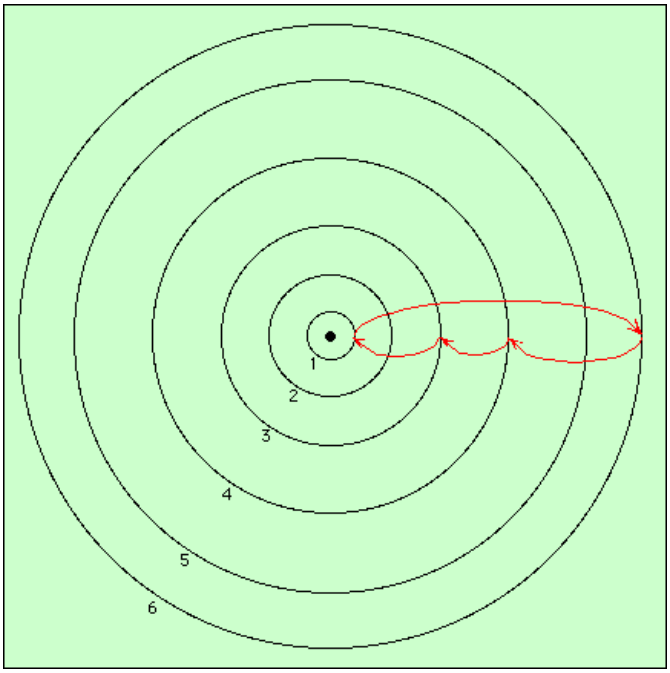
Pour assurer la conservation de l'énergie, il émet un photon dont la couleur est exactement celle qui correspond à la différence d'énergie entre les deux orbites.

C'est l'origine des *raies d'émission*.

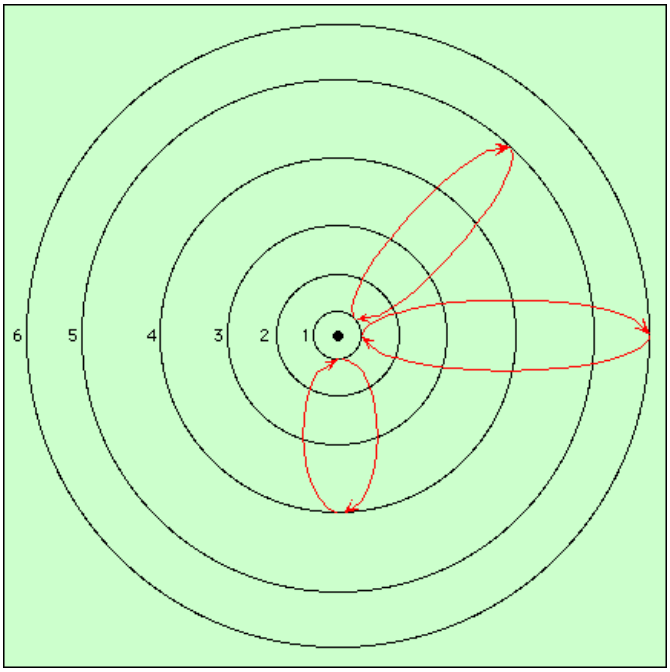
Puisque les raies d'émission et d'absorption correspondent à des transitions dans les deux sens entre les mêmes niveaux d'énergie, elles ont nécessairement la même couleur. On peut dire aussi que la même raie pourra se manifester en émission ou en absorption selon les circonstances.




Lorsqu'un atome est fortement excité, l'électron passe sur une orbite haute en sautant les orbites intermédiaires. Ensuite, pour se désexciter, il a la possibilité de retomber sur toute orbite de niveau inférieur. Il peut donc retomber sur une orbite proche, en émettant un photon de longueur d'onde correspondante, puis de là retomber encore à un autre niveau inférieur, jusqu'à revenir au niveau de base. Il va donc effectuer une cascade en émettant un photon à chaque saut. On observera alors autant de raies d'émission qu'il y a de niveaux dans la cascade :



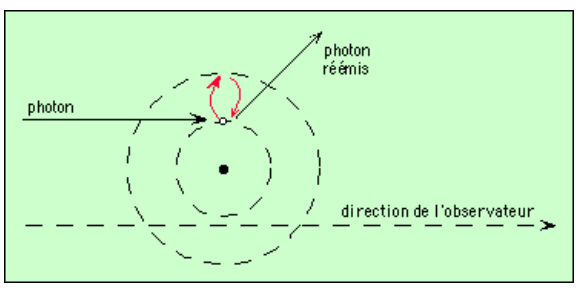

Si l'électron retombe sur le niveau d'où il provient, on parle de *fluorescence de résonance* :




**Pourquoi des raies d'absorption ?**

Le mécanisme que nous venons de voir pour expliquer les raies d'absorption pose un problème : l'absorption se fait lorsqu'un photon ayant la bonne énergie touche l'atome. L'électron est expédié sur une orbite plus haute, instable (à cause de l'énergie plus grande). Il va donc retomber spontanément vers l'orbite plus basse, en émettant un photon de même énergie, de même couleur. Par conséquent, un photon a été absorbé, un photon identique émis, donc il n'y a pas de perte, et il ne devrait pas y avoir de raie d'absorption !

Considérons une expérience qui mette en jeu ce phénomène.




On voit que le photon absorbé venait vers l'observateur, alors que le photon réémis se dirige dans n'importe quelle direction ! On n'a alors que très peu de chances pour que le photon émis prenne la même direction que le photon absorbé. Les raies d'absorption s'expliquent ainsi, bien que

le nombre de photons réémis soit égal au nombre de photons absorbés.

Tout ce que nous venons d'exprimer à propos de l'atome d'hydrogène se transpose pour n'importe quel autre élément. Mais l'atome d'hydrogène est le plus simple de tous. Précisons que le noyau d'un atome quelconque est constitué de protons et de neutrons. Les raies sont dues aux influences électriques de ces particules.

Lorsqu'un électron est excité (placé sur une orbite haute), il va retomber spontanément sur une orbite plus basse. Le temps qu'il passe sur l'orbite haute est très bref, et pendant ce temps-là il n'arrive en général rien à l'atome. La transition peut donc se produire et la raie est émise.

**Emission et absorption**

Ces deux phénomènes sont basés sur le même mécanisme d'excitation-désexcitation des atomes. Ils sont donc très proches. Pourtant, leurs manifestations sont pratiquement opposées. Une précision s'impose.

Pour produire une émission, il faut exciter l'atome. Bien sûr, l'absorption d'un photon peut fournir l'énergie nécessaire. Mais ce n'est pas la seule possibilité. Dans un milieu chaud, et assez dense, comme certaines nébuleuses, les atomes sont agités par l'énergie thermique, et s'entrechoquent. L'énergie cinétiuqe dissipée lors du choc est tout à fait capable d'exciter, et même parfois d'ioniser, ces atomes. Il n'est donc pas forcément nécessaire d'envisager une absorption pour provoquer l'émission.

**Largeur des raies**

Les raies spectrales, telles que nous venons de les découvrir, devraient avoir une largeur infiniment petite. En effet, tous les photons émis proviennent d'une différence d'énergie exactement identique, donc leur fréquence doit être rigoureusement la même. C'est ce qu'on appelle une lumière monochromatique. Mais la réalité est un petit peu différente.

Toute raie présente une largeur finie, petite (la plupart du temps), mais non nulle. Comment l'explique-t-on ?

- Tout d'abord, la durée de vie d'un niveau excité a une valeur finie, de l'ordre de $10^{-8}$ à $10^{-9}$ seconde pour les états instables. Ceci entraîne un élargissement de la raie, dû à l'application du principe d'incertitude (voir détail ci-dessous) ;
- Ensuite, les atomes émetteurs sont à température non nulle, et donc entraînés dans l'agitation thermique. Ils présentent donc des vitesses aléatoires, qui par effet Doppler-Fizzeau, décalent légèrement certains photons vers le rouge, d'autres vers le bleu. Et donc élargissent la raie. Cet élargissement est bien plus important que la largeur naturelle (premier mécanisme).
- Enfin, les collisions entre les atomes émetteurs perturbent l'émission, et élargissent les raies.

> La précision de l'énergie sur le niveau excité est fonction du temps que dure le niveau : plus le temps est long, plus est précise l'énergie (par le principe d'incertitude). Donc, si l'état excité est métastable (durée supérieure à 0,1 s), sa grande durée donne une énergie très précise, et par conséquent une raie fine. Les états instables par contre, de très faible durée, produisent une imprécision sur l'énergie, qui par conséquent élargit la raie.
>
> Plus précisément, le Principe d'Incertitude établit que $\Delta E \, \Delta t \geq \quad / 2$. En utilisant la définition $E = \quad \nu$, on arrive à $d\nu / \nu \geq \lambda / 4 \pi c \, dt$, où dt représente la durée de vie du niveau, et $d\nu / \nu$ est la largeur relative de la raie. On appelle *largeur naturelle* cette largeur de raie. Remarquez que pour les états métastables (raies interdites par exemple), la durée de vie étant bien plus longue, la largeur naturelle de raie est bien plus petite.

Au total donc, toute raie spectrale présente une largeur finie, mais sa forme n'est pas rectangulaire , mais présente un profil en cloche : c'est une *courbe de Gauss* ou *gaussienne*. On peut vérifier cela sur tous les spectres à bonne résolution. Cette forme des raies ne permet pas de les comparer directement. Aussi, les astronomes ont-ils défini la *largeur équivalente* : c'est la largeur qu'aurait une raie rectangulaire hypothétique, de même surface, et qui descendrait jusqu'au continuum. Ceci est une normalisation de la largeur de raie.

## *Séries de raies*

**L'atome de Bhor**

Niels Bhor a étudié le spectre de l'hydrogène, qui présente les raies apparemment les plus régulières. Il en a déduit un modèle de l'atome d'hydrogène, connu sous le nom d'*atome de Bhor*. Ce modèle s'inscrit dans la Mécanique Classique, et doit être abandonné maintenant au profit d'un modèle compatible avec la Mécanique Quantique. Mais il possède des propriétés didactiques assez intéressantes pour qu'on l'étudie en première approximation. Il a d'ailleurs permi dezs découvertes, comme celle du Deutérium, ainsi que les séries de raies hors du visible.

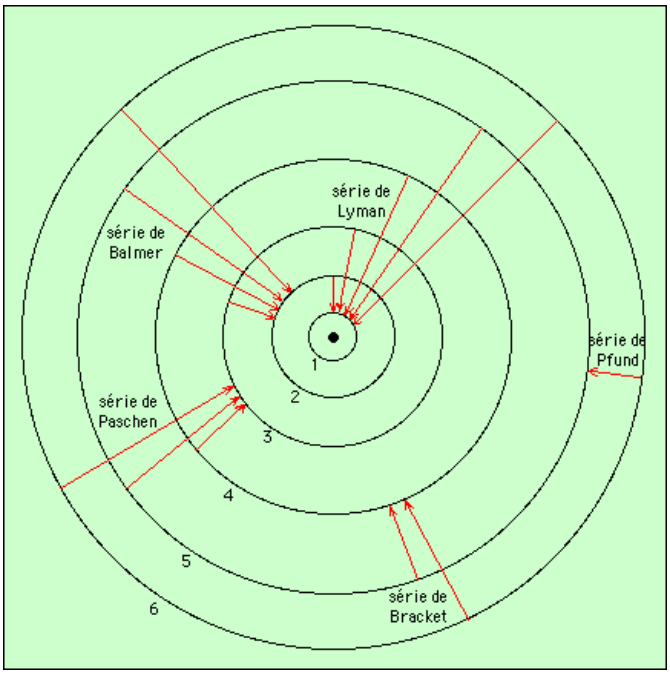
On risque une formule ? On note E l'énergie du photon ; $\nu$ sa fréquence (qui correspond à son énergie, donc à sa couleur) ; h est une constante nommée **constante de Planck**. L'énergie du photon est donnée par :

| **$E = h \nu$ loi de Planck** |
|---|

Lorsque l'électron retombe, il émet un photon dont la longueur d'onde (la couleur) est déterminée par les positions des deux orbites. Chaque couple d'orbites donne donc une raie différente de toutes les autres.

Pour l'atome d'hydrogène, on considère les séries de raies, déterminées par l'orbite sur laquelle l'électron retombe. Les six premières orbites donnent les séries suivantes :

| | |
|---|---|
| - série de Lyman | niveau 1 |
| - série de Balmer | niveau 2 |
| - série de Paschen | niveau 3 |
| - série de Bracket | niveau 4 |
| - série de Pfund | niveau 5 |
| - série de Humphreys | niveau 6 |




Ce schéma est indicatif, les distances entre les différentes orbites ne sont pas respectées.

Il existe une infinité de niveaux d'énergie dans chaque série, et il existe une infinité de séries. Balmer a étudié la série des raies de l'hydrogène dans le visible (depuis nommée *série de Balmer*), et a obtenu empiriquement la formule : $\nu = R_0 (1/4 - 1/m^2)$ (m > 2). Le niveau de base de la série de Balmer étant n = 2, on voit que la formule s'écrit : $\nu = R_0 (1/n^2 - 1/m^2)$ (m > n). Elle a été vérifiée avec une excellente précision pour les autres séries, dont le niveau de base est n.

> Balmer a trouvé la formule avec 1/4. On a vite généralisé en remplaçant 1/4 par $1/2^2$, puis par $1/n^2$. Alors, il devint évident qu'il devait y avoir aussi des séries de raies pour n = 1, n = 3… C'est ainsi que Lymann a observé la série qui porte son nom dans l'UV (après avoir calculé la position théorique des raies) ; puis la même démarche a été suivie par Paschen dans l'infrarouge…

**Calcul des orbites**

A chaque orbite correspond une énergie de liaison de l'électron. L'énergie correspondant à l'orbite n est donnée par :

$$E_n = \frac{-E_0}{n^2}$$

où $E_0$ est une constante, caractéristique de l'élément considéré. L'énergie du niveau 1 est donc $-E_0$ (n=1) ; l'énergie du niveau 2 est $-E_0 / 4$ (n=2) ; celle du niveau 3, $-E_0 / 9$. On voit donc que cette énergie diminue très rapidement lorsqu'on s'éloigne du noyau.

L'énergie n'est pas définie de façon absolue, mais seulement relative. On ne peut définir que des variations d'énergie. Aussi, pour fixer une valeur, le choix est arbiraire. On décide alors de fixer à 0 l'énergie de liaison de l'électron, lorsqu'il est totalement libre du noyau, c'est-à-dire lorsqu'il est renvoyé à l'infini (influence du noyau nulle). Avec ce choix, l'énergie $E_0$ vaut -13,6 eV. Elle est forcément négative. La formule se simplifie en $E_n = -13{,}6 \text{ eV} / n^2$. On peut faire le tableau des premières valeurs :

| **n** | **énergie (eV)** |
|---|---|
| 1 | -13,6 |
| 2 | -3,4 |
| 3 | -1,5 |

| | |
|---|---|
| 4 | -0,85 |
| 5 | -0,54 |
| 6 | -0,38 |
| 7 | -0,28 |
| 8 | -0,21 |

En tombant de l'orbite m à l'orbite n, l'électron émet un photon dont l'énergie correspond à la **différence d'énergie** entre les deux niveaux $E_m$ - $E_n$ ; sa fréquence n est telle que :

$$h\nu = E_m - E_n = \frac{-E_0}{m^2} - \frac{-E_0}{n^2} = E_0\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right)$$

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \qquad \nu = \frac{c}{\lambda} \qquad \text{d'où : } h\frac{c}{\lambda} = E_0\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right)$$

$$\text{et } \lambda = \frac{hc}{E_0} \times \frac{1}{\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}}$$

On définit la constante de Rydberg par le premier terme de la relation obtenue (son inverse), et on considère d'autre part l'autre terme $t_{m,n}$ :

$$R = \frac{E_0}{hc} \qquad t_{m,n} = \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}$$

$$\text{d'où } \lambda = \frac{1}{R\, t_{m,n}}$$

Prenons le cas de la **série de Balmer de l'hydrogène** ; elle est caractérisée par **n = 2**, m > 2. Calculons $t_{m,2}$ pour diverses valeurs de m :

$$m = 3 \quad \frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} = \frac{1}{4} - \frac{1}{9} = 0{,}25 - 0{,}111 = \mathbf{0{,}1388}$$

$$m = 4 \quad = \frac{1}{4} - \frac{1}{16} = 0{,}25 - 0{,}06251 = \mathbf{0{,}1875}$$

$$m = 5 \quad = \frac{1}{4} - \frac{1}{25} = 0{,}25 - 0{,}041 = \mathbf{0{,}21}$$

$$m = 6 \quad = \frac{1}{4} - \frac{1}{36} = 0{,}25 - 0{,}02777 = \mathbf{0{,}222}$$

$$m = 7 \quad = \frac{1}{4} - \frac{1}{25} = 0{,}25 - 0{,}0204 = \mathbf{0{,}2296}$$

$$m = 10 \quad = \frac{1}{4} - \frac{1}{100} = 0{,}25 - 0{,}01 = \mathbf{0{,}24}$$

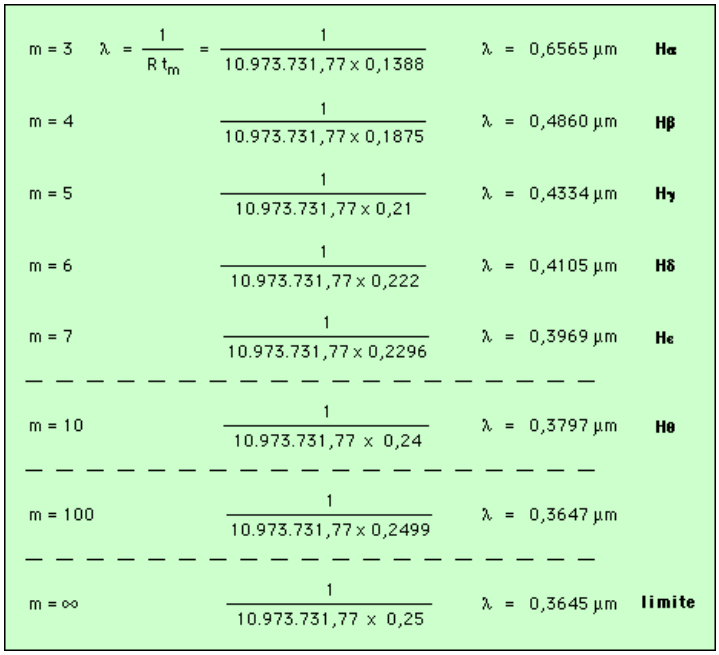
$$m = 100 \quad = \frac{1}{4} - \frac{1}{10000} = 0{,}25 - 0{,}00001 = \mathbf{0{,}2499}$$

$$m = 1000 \quad = \frac{1}{4} - \frac{1}{1000000} = 0{,}25 - 0{,}0000001 = \mathbf{0{,}249999}$$

$$m = \infty \quad = 0{,}25 - 0 = \mathbf{0{,}25}$$

On voit que ce terme $t_{m,2}$ tend vers une limite de 0,25 lorsque m tend vers l'infini. Les raies correspondantes se déduisant de ce terme constituent une série dont les espacements sont de plus en plus faibles, jusqu'à ce qu'elles ne soient plus discernables.

On peut maintenant calculer les longueurs d'onde des différentes raies de Balmer :




Ce calcul montre que les deux premières raies sont éloignées (0,6565 - 0,4860 = 0,1705 µm entre Hα et Hβ), les deux suivantes un peu moins (0,4860 - 0,4334 = 0,0526 µm entre Hβ et Hγ), et ensuite les raies se rapprochent tellement vite, que le spectroscope ne pourra même plus les distinguer. La valeur t = 0,25 correspond à ce que l'on appelle la limite de Balmer ; la longueur d'onde précise de la limite de Balmer est λ = 0,364771 µm.

C'est exactement ce qu'on observe sur un spectre de l'hydrogène, en partie dans le visible pour la série de Balmer. La première raie est isolée, la seconde et les quelques suivantes aussi, mais elles se rapprochent de plus en plus ; puis vient une bande constituée d'un grand nombre de raies indiscernables. Mais la limite de Balmer se trouve dans l'infrarouge (toutes les raies sont dans l'infrarouge à partir de Hε). Le nombre de raies séparées dépend de la finesse du réseau utilisé.

Au-delà de la série de Balmer, on note encore de la lumière : l'énergie correspondante est alors supérieure à l'énergie d'ionisation de l'atome d'hydrogène, et la lumière est émise par un électron qui arrive de l'infini pour se recombiner à l'atome. L'énergie de l'électron est quelconque, et le spectre produit est continu. Mais cette émission faiblit rapidement en s'éloignant de la limite de Balmer.

On peut faire le même calcul pour les autres séries. Pour la première, la **série de Lyman** qui correspond à **n = 1**, on obtient $t_{2,1}$ = 0,75 pour le premier terme, et $t_{2,\infty}$ = 1 pour la limite. Les longueurs d'onde associées sont donc : λ = 0,1215 µm pour la première raie et λ = 0,0911 µm pour la limite. Toutes les raies de Lyman étant comprises entre ces valeurs, ont des longueurs d'onde plus petites que 0,4 µm, et sont donc dans l'ultraviolet. Elles sont donc inobservables à l'oeil.

Pour la série de Paschen, n = 3. On trouve t = 0,0486 pour le premier terme et t = 0,1111 pour la limite, ce qui donne les longueurs d'onde : λ = 1,875 µm pour la première raie et λ = 0,820 µm pour la limite. Ces deux longueurs d'onde étant supérieures à 0,8 µm, toute la série se trouve dans l'infrarouge.

Le même calcul donne pour la série de Bracket les longueurs d'onde λ = 4,050 µm pour la première raie, et λ = 1,458 µm pour la limite. Toute la série est dans l'infrarouge.

Enfin, pour la série de Pfund : λ = 7,409 µm et λ = 2,278 µm. La série entière est dans l'infrarouge.

On peut résumer tout ceci par le tableau suivant :

| série | première raie | limite | domaine |
|---|---|---|---|
| Lyman | 0,1215 µm | 0,0911 µm | ultraviolet |
| Balmer | 0,6570 µm | 0,3647 µm | UV / visible |
| Paschen | 1,875 µm | 0,820 µm | infrarouge |
| Bracket | 4,050 µm | 1,458 µm | infrarouge |
| Pfund | 7,409 µm | 2,278 µm | infrarouge |

Seule la série de Balmer est partiellement dans le visible ; pour toutes les autres, il faut utiliser des récepteurs sensibles à l'infrarouge ou à l'ultraviolet pour les détecter.

**Rapport avec la Mécanique Classique**

La Mécanique Quantique marque une rupture avec la Mécanique Classique. Cette rupture était nécessaire pour expliquer les phénomènes qui résistaient à toute tentative classique. Mais on a exprimé le *principe de correspondance*, qui dit que lorsqu'on se rapproche des conditions macroscopiques, les lois de la Mécanique Quantique doivent converger vers celles de la Mécanique Classique. On peut le vérifier ici sur les raies spectrales d'une série d'ordre élevé.

La formule de Balmer $\nu = R_0 (1/n^2 - 1/m^2)$ (m > n), pour n élevé (série fortement excitée), est équivalente à un oscillateur classique (mouvement vibratoire simple). En effet, pour des niveaux m voisins de n ($m \approx n$), la différence m - n est petite devant m et n. Le terme $1/n^2 - 1/m^2 = (m^2 - n^2) / n^2 m^2 = (m + n)(m - n) / n^2 m^2 \approx 2n (m - n) / n^4 = 2 (m - n) / n^3$. Donc $\nu = 2R_0 (n - m) /n^3$. La fréquence est donc proportionnelle à m - n. C'est-à-dire que pour n - m = 2, on obtient le double de la fréquence de base (n = 1). Pour n - m = 3, on obtient le triple… On reconnait là les harmoniques d'un oscillateur (note de musique par exemple). Par conséquent, lorsqu'on considère les électrons les moins liés à l'atome (n élevé), **on retrouve un comportement quasi classique**.

Enfin, signalons que ce principe de correspondance permet de calculer la constante de Rydberg, qui jusqu'ici n'était qu'une valeur numérique introduite pour les besoins de la formule.

**Autres atomes**

La théorie de l'atome d'hydrogène était, toutes proportions gardées, facile à faire… en comparaison des autres atomes. Plus le nombre de protons augmente, plus les choses se compliquent par les interactions entre les électrons, et par la complexification du champ produit par les protons, la charge positive n'étant plus ponctuelle. La détermination théorique des niveaux d'énergie demande des calculs tout juste à la portée des grands ordinateurs actuels.

Lorsque les atomes ont la facheuse idée de se regrouper en molécule, ce qu'ils font volontiers (minimum d'énergie), le physicien quantique n'a plus qu'à rendre son tablier… ou presque. La complexité du champ produit par les noyaux qui constituent la molécule entraîne la disparition des simples raies spectrales au profit de véritables bandes larges. C'est ainsi qu'on observe les bandes de la vapeur d'eau, de la chlorophylle…

**Ionisation**

Que se passe-t-il si un atome d'hydrogène dans l'état fondamental (son électron au niveau 1) est frappé par un photon de longueur d'onde 0,0900 µm par exemple ? Cette longueur d'onde étant plus courte que la limite de la série de Lyman, le photon dispose d'une énergie supérieure. Par conséquent, il est capable de faire sauter l'électron au-delà de l'orbite la plus lointaine. Alors, l'électron ne sera plus du tout attaché au noyau. Il deviendra un électron libre, et l'atome d'hydrogène aura perdu son électron. On dit qu'il est *ionisé*. Puisque sa neutralité électrique provenait de l'équilibre entre la charge positive du noyau et la charge électrique de l'électron, l'atome présente maintenant une charge positive.

Un atome est dit ionisé s'il a perdu un ou plusieurs électrons. Un atome ionisé n'est plus neutre, mais porte une charge électrique correspondant à l'excès de ses protons par rapport aux électrons qu'il lui reste.

Un atome peut être ionisé de plusieurs façons différentes, qui consistent à lui donner de l'énergie sous une forme quelconque. Nous avons déjà vu que, si on fournit à l'atome une énergie correspondant à la différence d'énergie entre deux niveaux, on peut faire passer un électron d'un niveau à un niveau supérieur. Il découle de ce que nous venons de calculer que si on lui fournit une énergie supérieure à celle de la limite de Lyman, on peut arracher l'électron. Appliquons la formule trouvée plus haut à la limite de Lyman, et déduisons-en l'énergie nécessaire :

$$\lambda = \frac{hc}{E_0} \times \frac{1}{\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}} \qquad \text{pour } n = 1 \text{ (Lyman) et } m = \infty \quad \lambda = \frac{hc}{E_0} \times \frac{1}{\frac{1}{1^2} - 0} = \frac{hc}{E_0}$$

$$\text{d'où : } \frac{c}{\nu} = \frac{hc}{E_0} \qquad \text{et donc } \mathbf{h\nu = E_0}$$

Par conséquent, la valeur $E_0$ que nous avons utilisée plus haut représente **l'énergie d'ionisation de l'hydrogène**.

**Notation**

On note un élément ionisé par son symbole chimique, suivi d'un nombre en chiffres romains dont la valeur donne le **nombre d'électrons perdus + 1**.

Ainsi, le fer neutre se note Fe I, le fer ionisé une fois (qui a perdu 1 électron) Fe II, le fer ionisé deux fois Fe III etc. Dans certaines circonstances, à très haute température, on peut trouver de fortes ionisations, comme par exemple Fe XIV.

**Raie H*α***

Elle appartient à la série de Balmer, il s'agit donc d'une raie résultant d'une transition à partir du niveau 2 de l'atome d'hydrogène : transition du niveau 2 au niveau 3 en absorption, du 3 au 2 en émission. Elle apparaîtra donc dans des milieux suffisamment chauds pour que les atomes d'hydrogène soient excités au second niveau. Sa longueur d'onde de 0,6563 µm la situe dans le visible, dans le rouge… Elle donne sa couleur caractéristique, et par suite son nom, à la chromosphère du Soleil.

**Raies interdites**

On a observé dans certaines régions du ciel (nébuleuses) des raies spectrales impossibles à interpréter en fonction des spectres obtenus au laboratoire. On a cru un temps à la découverte d'un nouvel élément (bien vite nommé nébulium !), mais on a bientôt trouvé une autre explication.

Nous avons vu qu'un atome excité (dont l'électron est sur une orbite supérieure) se désexcite spontanément en émettant un photon. Mais il faut

ajouter que chaque transition a une durée de vie statistique particulière. Considérons toujours l'atome d'hydrogène à titre d'exemple. Les orbites de rangs 2, 3, etc. sont **instables**, l'électron ne peut y séjourner que pendant un temps de $10^{-8}$ secondes ! il retombe donc spontanément vers une orbite plus basse, en émettant un photon. Dans les conditions de vide obtenues au laboratoire, le temps séparant deux collisions successives d'atomes est supérieur à $10^{-8}$ seconde, et donc l'atome peut émettre cette raie, avant de subir une perturbation pr choc. C'est pourquoi on qualifie ces raies de *raies permises*

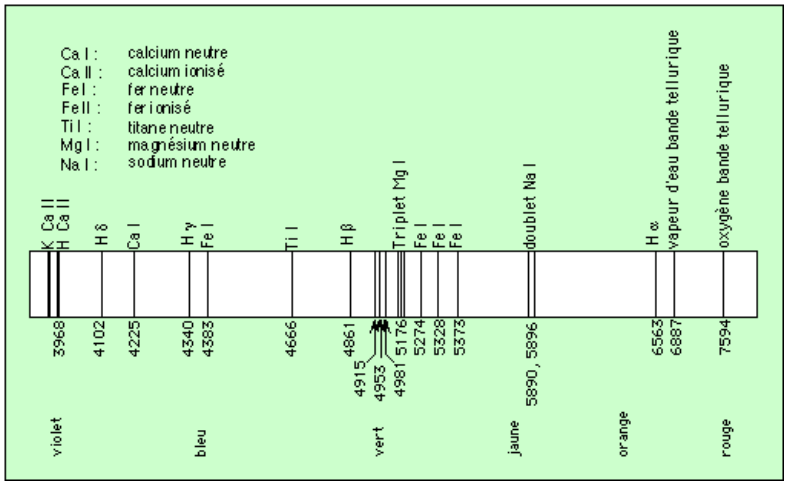
Cependant il existe des orbites métastables entre l'orbite 1 et l'orbite 2. Ces raies sont produites par un mécanisme un peu différent de ce que nous avons vu plus haut. L'électron peut y séjourner de 1/4 de seconde jusqu'à une une heure. Dans ce laps de temps, au laboratoire, l'atome subit forcément des collisions avec d'autres atomes bien avant de se désexciter spontanément (le vide qu'on est capable de produire n'est pas suffisant…). Le choc fournit de l'énergie à l'électron, qui change d'orbite. On ne peut donc pas observer la lumière émise par ces transitions, dans les conditions d'expérience. On les appelle donc *raies interdites* !

Par contre, dans le milieu interstellaire, la densité est assez faible pour qu'un atome puisse se promener pendant une heure sans subir de collision ; son électron a donc le temps de retomber sur l'orbite en-dessous en émettant la lumière correspondante. Ces orbites sont proches de l'orbite fondamentale, il suffit de peu d'énergie pour y faire sauter l'électron : un choc produit par un autre électron y parvient. Les électrons arrachés à leur atome (produits par la photo-ionisation due à la lumière intense des étoiles chaudes proches) peuplent ces niveaux métastables. Les raies interdites sont intenses dans les nébuleuses.

Les raies interdites ont été expliquées en 1927 par Bowen.

**Spectre simplifié du Soleil**

Il montre un fond continu brillant, de toutes les couleurs, coupé par des raies sombres (les raies d'absorption).




**La raie à 21 cm**

Il existe une raie particulière, dans le domaine radio, qui est d'une grande importance en astronomie, et ne s'explique pas par le mécanisme précédent. Le transfert d'un électron d'une orbitale à une autre demande une quantité d'énergie excessive dans certains milieux trop froids. Mais il existe un mécanisme plus fin, qui est reponsable de cette raie à 21 cm de longueur d'onde.

Un atome d'hydrogène neutre (dans un milieu froid) est constitué d'un proton (noyau) et d'un électron. Ces deux particules possèdent une propriété dont nous n'avons pas encore parlé. On la nomme spin (de l'anglais tourner).

Considérons toujours nos particules comme de petites boules dures (cette image n'est pas correcte en Mécanique Quantique, mais elle permet de se faire une idée approximative de la question). Comme de petites boules, elles peuvent tourner sur elles-mêmes. Mais dans le monde quantique, les choses ne se font pas n'importe comment : tous les axes de rotation et toutes les vitesses ne sont pas permis, loin de là. En fait, deux possibilités seulement se présentent. On peut se figurer une particule tournant (toujours à la même vitesse) avec un axe vertical, soit dans un sens soit dans l'autre.

Avec toutes ces restrictions, le proton et l'électron peuvent donc tourner dans le même sens (parallèles) ou bien en sens inverse l'un de l'autre (antiparallèles). Ces deux états diffèrent d'une très faible énergie, et par conséquent il est facile de modifier l'état de rotation (le spin) de l'électron.

L'énergie nécessaire à ce changement d'état peut être fournie par un photon qui sera absorbé. Et l'atome ainsi excité se désexcite en émettant un même photon. L'énergie concernée étant faible, ce photon se trouve dans le domaine radio.

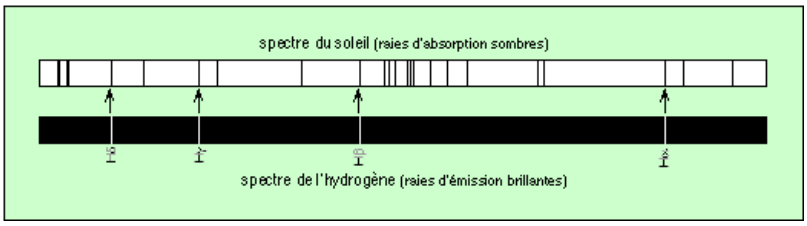
## *Utilité de la spectroscopie*

L'astronome dispose grâce à cette propriété de LA solution pour sonder les planètes et les étoiles à distance (ça tombe bien, car pour aller faire les analyses sur place…). Deux ans seulement avant ces découvertes, le philosophe Auguste Comte expliquait dans son cours qu'on ne saurait jamais de quoi était fait le Soleil, puisqu'on ne pouvait pas aller prélever des échantillons…

La lumière (dans toutes les longueurs d'ondes) est le moyen le plus important de connaissance des astres (on a quelques informations provenant de la physique des particules, et on en espère des ondes gravitationnelles ; tout le reste provient de la lumière). C'est elle qui nous a apporté à peu près tout ce que nous savons de l'Univers, et principalement par la spectroscopie :

- **Température**. La couleur générale d'une étoile nous indique sa température. Un morceau de fer chauffé est rouge sombre si sa température reste assez basse, puis rouge vif, puis blanc… ceci à mesure que la température s'élève. Ainsi, en déterminant quelle couleur est la plus brillante dans le spectre d'une étoile, on détermine sa température de surface. Ceci a donné une température de 6000 pour le Soleil. D'autres étoiles sont beaucoup plus chaudes, jusqu'à 50.000 . D'autres plus froides, jusqu'à 2.000 .

- **Composition des astres**. On photographie dans le laboratoire les spectres de tous les éléments chimiques. Nous avons vu qu'ils étaient tous différents. On photographie ensuite le spectre d'une étoile. On met côte à côte ce spectre et celui de l'hydrogène (pris au laboratoire) ; si les raies spectrales de l'hydrogène se voient sur le spectre de l'étoile, c'est qu'elle contient de l'hydrogène :




  En répétant cette opération pour tous les éléments, on détermine leur présence dans les étoiles.

  N'oublions pas toutefois que la lumière que nous recevons d'une étoile provient de sa photosphère, c'est-à-dire de sa basse atmosphère. La composition qu'on en déduit est donc celle de ses couches superficielles, et pour connaître sa composition interne, il faut faire appel à la théorie, notamment des réactions nucléaires et du transport de l'énergie.

- **Proportions**. Si dans l'atmosphère du Soleil un élément est peu abondant, une partie seulement de la lumière correspondant à ses raies spectrales sera absorbée ; la raie dans son spectre sera moins sombre. En mesurant l'assombrissement d'une raie, on arrive donc à mesurer la quantité de l'élément correspondant dans l'atmosphère d'une étoile.

- **Vitesse**. Lorsqu'une voiture passe rapidement devant nous, le bruit de son moteur change : il est aigu lorsqu'elle se rapproche, puis grave lorsqu'elle s'éloigne. Avec la lumière, le même phénomène se produit ; si une étoile s'éloigne de nous, son spectre glisse vers le rouge, et si elle se rapproche, il glisse vers le bleu. Les raies spectrales ne correspondent plus alors à celles mesurées en laboratoire. Pour rétablir la correspondance, il faut faire glisser le spectre photographié au laboratoire par rapport à celui de l'étoile. La mesure du déplacement nécessaire donne la vitesse de l'étoile par rapport à nous.

  > C'est ainsi qu'on a découvert expérimentalement **l'expansion de l'Univers** : toutes les galaxies s'éloignant de nous, leurs spectres sont systématiquement décalés vers le rouge. Ce phénomène est nommé *décalage spectral*. Dans l'Univers proche, il peut se produire vers le rouge ou vers le bleu (le bleu correspondant à une vitesse de rapprochement), par suite de mouvements locaux, tandis que dans l'Univers lointain il est toujours vers le rouge, sa valeur étant bien plus élevée que celle des mouvements locaux.

  Par ce procédé, on a même découvert **des planètes autour d'autres étoiles**, car leur présence modifie la vitesse de l'étoile autour de laquelle elles tournent.

- **Rotation**. Lorsqu'une étoile tourne sur elle-même, l'un de ses bords s'approche de nous alors que l'autre s'éloigne. La différence de vitesse entre les deux bords nous donne la **vitesse de rotation de l'étoile**.
- **Champ magnétique**. Si dans le laboratoire on photographie un spectre, mais en plaçant l'expérience dans un champ magnétique, on s'aperçoit que les raies spectrales sont dédoublées. Et d'autant plus que le champ magnétique est plus intense (effet Zeeman). Lorsque les raies spectrales d'une étoile apparaissent ainsi dédoublées, on sait donc qu'elle possède un champ magnétique, et on peut en mesurer l'intensité par l'écartement des raies dédoublées.

  On sait que les taches solaires sont dues à de forts champs magnétiques ; elles traduisent l'activité du Soleil. Par l'analyse spectrale du champ magnétique, on peut donc avoir des indications sur **l'activité des autres étoiles**.

---

Or dès 1814, Fraunhofer avait observé de telles raies d'absorption dans le spectre du Soleil, sans savoir ce qui les produisait. Ils les a désignées par des lettres, qu'on utilise encore. Ces raies correspondent à des éléments chimiques du Soleil, mais relativement froids. Pour cela, ils doivent être loin du Soleil, c'est-à-dire dans son atmosphère.

Les raies d'absorption que l'on observe dans le spectre solaire varient en fonction de la hauteur de l'astre sur l'horizon. On observe des raies à l'horizon qu'on ne voit pas au zénith. Ces raies sont produites par l'atmosphère terrestre, traversée en plus grande épaisseur à l'horizon. Ces raies sont pour beaucoup dues à la vapeur d'eau.

Tout d'abord, on constate que l'électron peut être arraché à l'atome ; celui-ci ne sera plus alors constitué que de son seul proton. Ainsi dépouillé, on dit qu'il est **ionisé**. Pour lui arracher l'électron, il faut lui fournir de l'énergie ; par exemple celle d'un photon ! Quelle quantité d'énergie faut-il fournir pour déloger l'électron ? Une énergie qui dépend de l'orbite sur laquelle il circule. Si le photon possède justement cette énergie-là, il sera absorbé par l'atome, et l'électron sera arraché. Le photon possédait donc l'énergie d'ionisation de l'atome. Un photon qui possède une énergie bien précise correspond à une couleur particulière. Si on envoie sur l'atome de la lumière de toutes les couleurs (spectre continu), l'atome va absorber pour s'ioniser, un photon qui possède la bonne énergie. S'il y a beaucoup d'atomes, la plupart des photons de cette couleur seront éliminés. Il apparaîtra une raie noire à la place correspondante dans le spectre. C'est une raie d'absorption.

On peut maintenant parler des séries de raies : considérons les raies d'émission. L'électron peut tomber vers l'orbite **fondamentale** à partir de toute autre. Pour chaque transition, il produira une raie particulière. L'ensemble de ces raies se nomme **série de Lyman**.

Si on considère les raies obtenues quand l'atome tombe sur le niveau 2, on obtient la série de Balmer. Vers le niveau 3, la série de Paschen…

Nous venons de voir le principe de l'émission de lumière par les atomes, en l'illustrant sur l'atome d'hydrogène de Bhor. Nous allons voir maintenant l'ensemble des raies que cet atome est capable d'émettre.

Un photon est émis à chaque fois que l'électron en orbite autour de l'atome d'hydrogène, retombe d'une orbite haute vers une orbite plus basse. Nous avons vu qu'il est possible de les numéroter. Entre deux telles orbites consécutives, l'électron ne peut jamais se trouver.

Constante de Rydberg :

$$R = \frac{m_e e^4}{8 \varepsilon_0^2 h^3 c} = 10\,973\,731{,}568\,5\ m^{-1}$$

$m_e$ : masse de l'électron ; e : charge de l'électron ; $\varepsilon_0$ : permittivité du vide ; c : célérité de la lumière.

---

**Le rayonnement synchrotron**

Il est dû à des électrons relativistes, qui se déplacent dans un champ magnétique. Un électron se déplaçant dans un champ magnétique parcourt une trajectoire en spirale, dont l'axe est la direction du champ. Puisqu'il ne va pas en ligne droite, il subit une accélération, et donc émet un rayonnement. La fréquence du rayonnement, nommée fréquence de Larmor, est donnée par f = 2,8 H, où H est le champ magnétique (H en gauss et f en mégahertz). On conçoit donc que la mesure de f donne immédiatement la valeur de H. Ce sera un excellent moyen de déterminer le champ magnétique interstellaire.

Mais cette relation n'est valable que pour des vitesses faibles de l'électron (classique). Lorsque l'électron est relativiste (sa vitesse est une fraction notable de la vitesse de la lumière), il émet aussi des harmoniques : des photons dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence de Larmor. De plus, le maximum d'énergie est émis non pas sur le fondamental, mais sur un harmonique de rang élevé. Pour ces hamoniques élevés, la différence de fréquence entre deux harmoniques consécutifs est plus petite que la largeur de chaque harmonique. Les différents harmoniques autour du maximum se chevauchent donc, et on obtient un spectre continu au lieu d'un spectre de raies.

Dans un nuage interstellaire, très vaste, tous les électrons n'ont pas la même énergie, et le champ magnétique n'est pas rigoureusement constant. Le spectre observé sera donc la somme des spectres, ce qui en modifie la forme.

Enfin, le rayonnement synchrotron est fortement polarisé. Cette dernière caractéristique permettra de le distinguer parfois d'un rayonnement thermique.

L'émission synchrotron ne peut se produire que dans les plasmas de très haute température, où les électrons sont très fortement accélérés, par exemple dans les gaz éjectés par les supernovæ.

La particule décrit une spirale autour des lignes de champ magnétique. Le rayon de cette spirale est d'autant plus grand que la particule va plus vite. Et puisqu'elle perd de l'énergie, elle ralentit et donc décrit une spirale de plus en plus serrée. Bien sûr, elle continue d'émettre des photons, mais ceux-ci sont de plus en plus rouges à mesure que le temps passe.

Considérons un unique électron, lancé à une vitesse v. Le premier photon qu'il va émettre dans le champ magnétique correspond à cette vitesse, et sera par exemple bleu, pour fixer les idées. Après cette émission, sa vitesse aura diminué, et le prochain photon émis sera moins bleu, plus rouge. **Le premier photon émis est donc le plus bleu possible**.

Considérons maintenant une source émettant un grand nombre d'électrons rapides, par un mécanisme physique quelconque. Tous les électrons n'auront pas exactement la même vitesse, mais il y aura une vitesse maximum. Ceux qui posséderont cette vitesse émettront les photons les plus bleus. Le spectre de ce rayonnement aura donc une limite : on n'observera aucun photon plus énergétique que cette limite, et on verra par contre des photons de toutes couleurs en allant vers le rouge.

Autre propriété de ce rayonnement : si la source émet une bouffée d'électrons, puis plus rien, on verra des photons bleus au début, puis des photons de plus en plus rouge. La couleur changera avec le temps, et rapidement il n'y aura plus de photons bleus. Pour qu'on observe toujours des photons correspondant à la vitesse maximale, il faut que la source soit permanente.

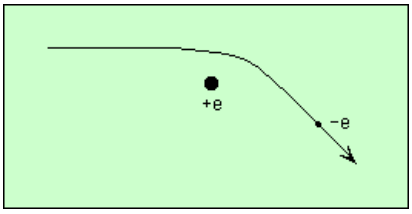
Un spectre synchrotron émis par une source permanente est donc continu, comme les spectres thermiques. Mais l'existence d'une limite vers le bleu les en distingue facilement. La répartition des intensités n'est pas non plus semblable.

Le nom de ce rayonnement vient d'un type d'accélérateur de particules utilisé par les physiciens au début du XX$^{e}$ siècle. Le mouvement des particules chargées dans ce système était synchronisé par des variations de champ magnétique. De ce fait, ces machines ont été nommées *accélérateurs synchrotrons*.

**Le rayonnement de freinage**

Ce rayonnement se produit dans un milieu ionisé, où des électrons légers se déplacent à grande vitesse dans un gaz de noyaux (positifs) beaucoup plus lents (parce que plus massifs). Les noyaux sont des ions positifs, qui influencent par attraction électrostatique les électrons négatifs passant à proximité. Un électron influencé voit sa vitesse changer, en particulier sa direction est modifiée. L'accélération subie provoque une émission de lumière.

En passant près du noyau, l'électron l'entraîne légèrement, en lui communiquant une faible énergie. C'est ce transfert d'énergie qui produit le rayonnement. La quantité d'énergie échangée étant très faible, le photon sera de grande longueur d'onde, c'est un photon radio.




Comme le freinage est proportionnel à la distance à laquelle l'électron passe, et à sa vitesse par rapport au noyau, toutes les énergies sont possibles, elles ne sont pas quantifiées. On obtient par conséquent un rayonnement continu.

Le terme de *free-free* signifie que l'électron est libre avant l'interaction, et qu'il est toujours libre après. Il passe donc de l'état libre à l'état libre. Le nom de *rayonnement de freinage* s'explique tout naturellement. Enfin, le mot de *bremsstrahlung* est le terme allemand couramment utilisé (de *bremsung* = freinage, *strahlung* = rayonnement).

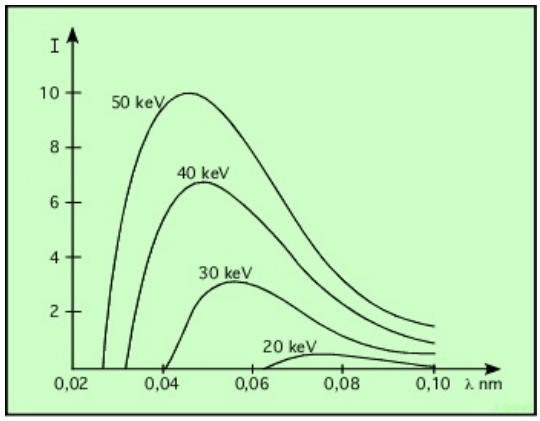
Si l'électron est stoppé, toute son énergie cinétique est transformée en rayonnement. Il n'est donc pas possible, pour un flux d'électrons de vitesse donnée, de produire un rayonnement plus énergétique. Par conséquent, il existe une longueur d'onde minimale produite par ce rayonnement. Pour des longueurs d'onde plus courte, on n'observera aucun rayonnement. C'est la première caractérisation du bremsstrahlung.

$$\lambda_0 = h\ c\ /\ E_0$$

où $E_0$ est l'énergie cinétique de l'électron

Ensuite, si l'électron passe de plus en plus loin du noyau, l'interaction est de plus en plus faible, et l'énergie rayonnée de plus en plus basse. Dans un plasma, un flux d'électrons présente toutes les approches possibles, et donc le spectre du rayonnement montrera la quantité totale d'énergie produite par l'ensemble des électrons, selon leur distance d'approche au noyau. On observe alors un spectre qui présente un maximum d'intensité pour une longueur d'onde $\lambda_{max}$ telle que :

$$\lambda_{max} = 3\ /\ 2\ \lambda_0$$




intensité du bremsstrahlung dans les rayons X

L'énergie rayonnée par bremsstrahlung est aussi d'autant plus grande que les noyaux responsables sont plus lourds. Aussi, le schéma ci-dessus ne porte pas d'indication absolue d'intensité.

Le spectre n'a pas la même forme qu'un spectre thermique (rayonnement de corps noir), mais la caractéristique essentielle est la coupure aux courtes longueurs d'onde, qui n'existe pas dans un spectre de corps noir. C'est donc ce qui permet de les différencier dans un spectre réel, et nous donne ainsi des indications sur le phénomène qui produit la lumière observée.

**L'effet Doppler-Fizeau**

L'effet Doppler concerne le son. Lorsqu'une source sonore s'approche, le son qu'elle émet est décalé vers les aigus, par la compression de l'onde sonore. Lorsque la source s'éloigne, le son est décalé vers les graves par la dilatation. Cet effet est très facile à constater dans la vie de tous les jours (train s'approchant d'une gare en klaxonant (en quittant la gare)). Christian Doppler l'a théorisée, comme phénomène associé à une onde se propageant dans un milieu matériel (l'air, ou l'eau…).

Hippolyte Fizeau a montré qu'un effet de même nature se produisait sur les ondes lumineuses, qui se propagent aussi bien dans le vide (donc en dehors d'un milieu matériel). Cet effet porte le nom de Doppler-Fizeau.

L'effet Doppler (milieu matériel) a des applications pratiques, par exemple en médecine où il permet de mesurer la vitesse du sang dans les vaisseaux, pour en déterminer l'état. L'effet Doppler-Fizeau (radar) sert aussi dans les aéroports pour contrôler les mouvements des avions, et sur les routes où il offre aux gendarmes les moyens de traquer les contrevenants…

Mais l'application qui nous concerne ici est relative à la vitesse des objets célestes qui nous entourent. Le radar permet de mesurer la distance précise des planètes à la Terre, et par là même une mesure très précise de l'unité astronomique. Il utilise une source d'énergie terrestre, et ne permet donc pas d'atteindre des objets lointains. La mesure des décalages spectraux utilise en général la partie visible du spectre, et donne la vitesse radiale (par rapport à l'observateur, en éloignement ou rapprochement). La cosmologie est basée sur cette connaissance des vitesses radiales, qui ont donc une importance capitale.

**Décalage spectral**

Le décalage spectral, exprimé en termes de Doppler-Fizeau, se définit par le nombre z tel que $z = \Delta\lambda / \lambda$, où $\lambda$ est la longueur d'onde de la lumière observée. De ce fait, $\lambda = \lambda_0 (1 + z)$.

## *Les diffusions*

Lorsque la lumière rencontre de la matière, il se produit des interactions qui en changent les propriétés. Les transformations produites dépendent du rapport entre la longueur d'onde de la lumière, et la taille des objets rencontrés. Ces différentes possibilités ont été étudiées chacune par un chercheur particulier, dont le nom est attaché au phénomène.

**Diffusion de Rayleigh**

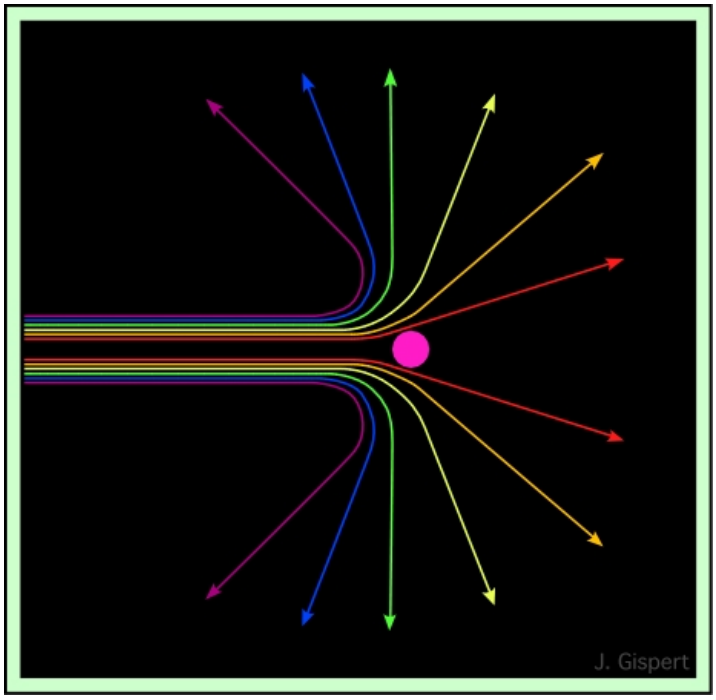
Elle est produite par des atomes, bien plus petits que la longueur d'onde de la lumière. Elle produit un changement de direction de la lumière.

animation montrant la diffusion de Rayleigh

Cette animation montre une onde incidente, qui vient frapper un atome. Le noyau de celui-ci, figuré en noir, est trop lourd pour être influencé par l'énergie de l'onde. Mais il n'est est pas de même des électrons qui constituent son cortège électronique. Légers, ils sont entraînés par l'onde, qui leur donne un mouvement oscillatoire de même fréquence qu'elle. Bien sûr, l'énergie qui sert à déplacer les électrons est prise à l'onde, qui se trouve donc affaiblie. Les électrons étant des particules chargées, émettent de la lumière lorsqu'ils sont mis en mouvement. Mais cette lumière est émise dans une direction quelconque. On a figuré par des cercles concentriques jaunes la lumière émise dans toutes les directions par les électrons.

On montre que l'absorption produite est en $1 / \lambda^4$ (c'est l'intensité de la lumière diffusée). Elle dépend donc fortement de la longueur d'onde.

Le violet ayant une longueur d'onde plus courte que le rouge, sera beaucoup moins diffusé : le rapport de longueur d'onde est de l'ordre de 2 (0,4 et 0,8 micromètres), donc le rapport des intensités est $2^4 = 16$. Le violet est 16 fois plus diffusé que le rouge. Si on éclaire un tel milieu par une lumière blanche, le rouge sera transmis en grande partie, alors que le violet et le bleu seront fortement diffusés.




Diffusion par un atome ou une molécule

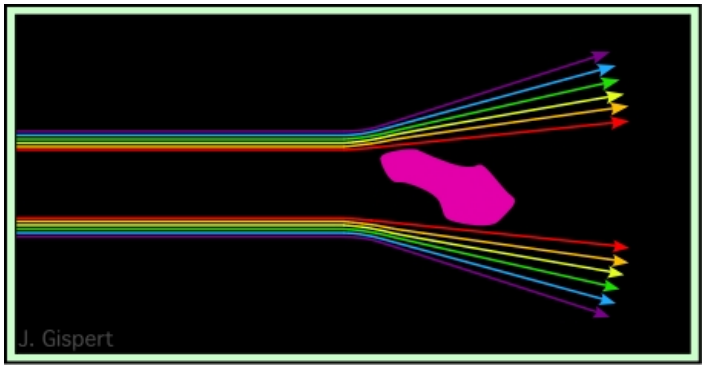
C'est ce qui se passe dans notre ciel. Les molécules qui constituent le ciel de la Terre ($O_2$, $N_2$) sont plus petites que la longueur d'onde de la lumière visible. Elle vont donc diffuser selon la loi de Rayleigh. Par conséquent, le bleu est fortement diffusé dans toutes les directions.

Si on regarde en direction du Soleil, celui-ci nous apparaîtra privé de ses radiations bleues : on voit le Soleil plutôt jaune, alors qu'il est en réalité jaune-vert. Mais le vert - bleu = jaune. Si au contraire on regarde dans une autre direction, on verra la lumière diffusée par les molécules, c'est-à-dire la radiation bleue. C'est ce qui donne sa couleur à notre ciel.

Lorsque le Soleil se couche, ses rayons traversent une bien plus grande épaisseur d'atmosphère. La diffusion en est fortement augmentée. Les rayons bleus sont totalement diffusés, et le Soleil apparaît rouge, et beaucoup moins brillant.

**Diffusion de Mie**

C'est celle qui est produite par des particules dont la taille est bien supérieure à la longueur d'onde de la lumière. Les interactions sont bien plus complexes, et surtout **dépendent peu de la longueur d'onde**. L'absorption produite ici est en $1 / \lambda$.




Entre le bleu et le rouge, il n'y a qu'un rapport 2 en longueur d'onde. Il n'y aura donc qu'un rapport 1/2 sur la diffusion des deux couleurs. Pratiquement, toutes les couleurs sont diffusées de manière sensiblement égale, et assombries pareillement. C'est ce qui explique que les nuages, constitués de goutellettes d'eau minuscules mais bien plus grosses que la longueur d'onde de la lumière, diffusent également toutes les couleurs. Ils nous apparaissent par conséquent blancs ou gris.

---=OO=---



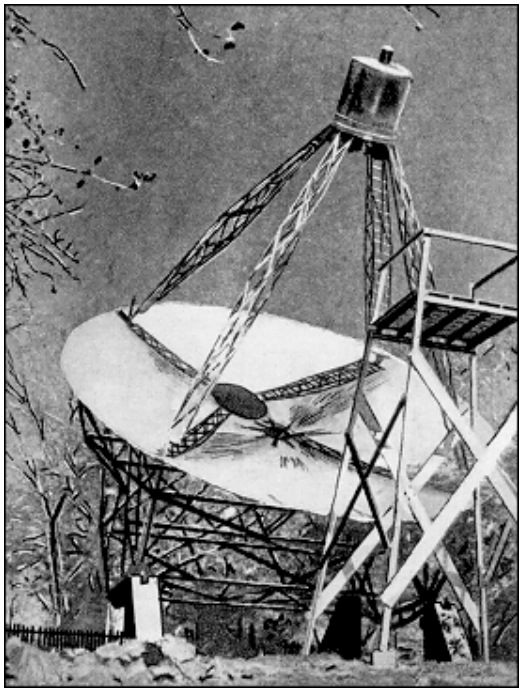

La première observation radioastronomique a été faite accidentellement par Karl Jansky en 1933. Il cherchait à éliminer le bruit de fond d'un récepteur de radio dans le domaine décamétrique. Le bruit de fond est produit par l'agitation thermique des électrons dans l'appareil lui-même, et ne peut être supprimé que si le récepteur est à la température de 0 K. A une température non nulle (donc à toute température réelle), un bruit de fond est inévitable. Il est d'autant plus intense que la température est plus élevée.

Jansky mesurait le bruit de fond qu'il recevait, et le trouvait plus intense que ce que le calcul prévoyait. Après avoir éliminé toutes sortes de sources possibles, il ne restait plus qu'une seule explication : un rayonnement radioélectrique provenait de l'espace. Il a remarqué que le bruit capté était variable au cours de la journée et, mesurant la période de cette variation, il a trouvé 23 h 56 mn. On reconnait là la période sidérale de rotation de la Terre, ce qui montre que le surcroît de bruit n'était pas lié à la Terre, mais à l'espace extérieur. Les antennes utilisées par Jansky étaient simplement des dipôles, des fils électriques tendus.

Vers 1935, en utilisant des antennes directrices, il a montré que le rayonnement était plus intense vers la Voie Lactée, et particulièrement dans la direction du Sagittaire.

**Premier radiotélescope**

Son travail a été repris en 1945 par Groote Reber, qui a construit lui-même une antenne à miroir parabolique de 9 m de diamètre. Le miroir renvoie les ondes vers son foyer, où est placé l'antenne réceptrice. Il a établi, à la longueur d'onde de 1,87 m, la première carte du ciel montrant les isophotes (lignes qui émettent la même intensité lumineuse) de la Voie Lactée.



Premier radiotélescope, de Groote Reber

Karl Jansky est donc le découvreur des ondes radio cosmiques, et Groote Reber le créateur de la radioastronomie. Ce radiotélescope a été transporté, il est aujourd'hui visible à Green Bank en Virginie.

Le radar a été inventé et utilisé lors de la seconde guerre mondiale. A la fin de celle-ci, certains appareils ne servant plus ont été récupérés par des astronomes pour constituer des paraboles réceptrices à peu de frais. Ce sont les ancêtres des radiotélescopes.

**Pouvoir séparateur**

La radioastronomie s'est heurtée dès le début à son problème de fond : le pouvoir séparateur d'un radiotélescope est catastrophique. Ce n'est pas dû à une mauvaise construction, mais aux longueurs d'onde observées. Nous avons vu que le pouvoir séparateur d'un instrument est lié à son diamètre et à la longueur d'onde observée, mais nous nous sommes limités à la partie visible du spectre. Entre 0,4 et 0,8 µm, la variation du pouvoir séparateur en fonction de la longueur d'onde est négligeable. Mais si on passe aux longueurs d'ondes radioélectriques, tout change.

Le pouvoir séparateur d'un instrument dépend du diamètre ET de la longueur d'onde. Soient D le diamètre de l'instrument et $\lambda$ la longueur d'onde ; le pouvoir séparateur est donné en radians par :

$$p = 1{,}037\ \lambda / D$$

En multipliant par $180 / \pi$, on obtient la valeur de p en **degrés** :

$$p = 59{,}42\ \lambda / D$$

Le diamètre et la longueur d'onde doivent être donnés dans la même unité.

A une longueur d'onde plus grande correspond un pouvoir séparateur plus mauvais. Or, les ondes radios utiles en astronomie sont de l'ordre de la dizaine de centimètres ou du mètre, au lieu de 0,4 à 0,8 millièmes de mm en optique. Pour $\lambda = 1{,}87$ m = 1.870.000 µm (Groote Reber), le pouvoir séparateur sera 1.870.000 / 0,5 = 3.740.000 fois plus mauvais que dans le visible… $p = 59{,}42 \times 1{,}87 / 9 = 12{,}35°$. Vous avez bien lu, 12 degrés ! 24 fois le diamètre apparent du Soleil (à la même époque, le plus grand télescope optique faisait 2,5 m ; le miroir de Groote Reber était donc bien plus grand).

Autant dire que sans l'imagination des radioastronomes, leur discipline serait morte dans l'œuf.

C'est pour cette raison qu'il n'existe pas de petit radiotélescope, mais bien au contraire des géants.

**Constitution**

Un radiotélescope est comme un télescope optique : il allie un collecteur de lumière à un détecteur. Comme en optique, les signaux les plus faibles sont les plus intéressants, et on doit les capter dans de bonnes conditions. Il faut donc, pareillement, augmenter la surface de réception des ondes, et les concentrer en un point où se trouve le détecteur. On utilise donc des miroirs qui renvoient les ondes vers le détecteur, comme on le fait dans un télescope optique.

Mais la longueur d'onde n'est pas du tout la même, ce qui est fortement contraignant pour le pouvoir séparateur. Toutefois, c'est un avantage pour la réalisation des miroirs : les défauts de surface d'un bon miroir doivent être inférieurs au dixième de la longueur d'onde observée. En radio, l'observation à 21 cm de longueur d'onde (hydrogène neutre) se contente donc d'une surface réalisée à 2 cm près ! Pour faire de grands miroirs, c'est infiniment plus pratique.

Mais il y a une autre caractéristique liée à la longueur d'onde. Une surface conductrice réfléchit une onde dès lors que sa maille est bien plus petite que la longueur d'onde. En optique, ce sont les distances interatomiques qui constituent la maille du miroir (en gamma, ces distances sont trop grandes…). En radio, un grillage fait parfaitement l'affaire ! Pour observer à 21 cm, une maille de l'ordre du centimètre suffit largement. Il s'ensuit un considérable allègement des miroirs ! Inutile de construire des plaques continues et massives. Ceci est vrai pour les longueurs d'onde assez grandes, lorsqu'on va jusqu'au millimétrique (longueur d'onde de l'ordre du millimètre), les contraintes se rapprochent de celles de l'optique.

## *Monture*

Comme en optique, il faut pointer et suivre les objets à observer, et le plus simple pour cela consiste à placer l'instrument sur une monture mobile. La plus adaptée est la monture équatoriale, comme dans le visible, et celle-ci a été utilisée pour certaines radiotélescopes. Le radiotélescope de 43 m de Green Bank est le plus grand en monture équatoriale. Mais le poids des miroirs limite l'usage de cette solution.

Comme en optique, encore une fois, les mêmes causes produisant les même effets, on doit envisager des montures azimutales pour porter des miroirs plus lourds. La plupart des radiotélescopes mobiles sont ainsi montés. Ils sont formés d'un bâti, qui roule sur un rail circulaire pour pointer en azimut. Sur le bâti, un axe horizontal permet de pointer en hauteur.

**Effelsberg**

Le plus grand radiotélescope mobile a été, jusqu'à l'an 2000, celui d'Effelsberg en Allemagne, donc le diamètre du miroir attteint 100 mètres !

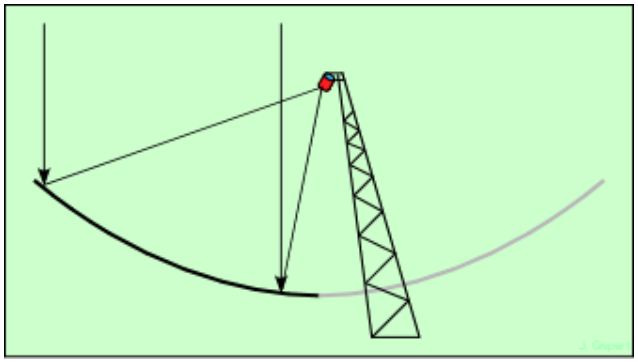


Effelsberg

Ce radiotélescope a été construit en 1971. Sa distance focale est de 30 m, et la surface collectrice de 1.850 $m^2$. La précision d'usinage de la surface est meilleure que 0,5 mm.L'ensemble pèse 3.200 tonnes. Le miroir est une *parabole homologue*, ce qui signifie que ses supports ont été calculés de telles manière que leurs déformations inévitables maintiennent une forme parabolique à la surface, au prix d'un léger déplacement du foyer (le récepteur est ajustable de manière à suivre les déplacements du foyer). La déformation homologue a été imaginé en 1960 par Hoerner.

**Green Bank GBT**

Le radiotélescope GBT (Green Bank Telescope) de Green Bank, aux Etats-Unis, présente une particularité intéressante. Alors que tous les autres miroirs sont des calottes paraboliques (l'axe du paraboloïde passe par le centre de la calotte), le miroir de Green Bank est aussi un morceau de paraboloïde, mais découpé dans une portion ne contenant pas l'axe. L'axe est en bordure, ce qui fait que le support et l'antenne ne font pas d'obstruction comme il est d'ordinaire de le voir.



Green Bank

La partie en grisé du paraboloïde n'existe pas ; elle a été dessinée pour bien montrer quelle partie a été utilisée.

Le radiotélescope d'Effelsberg n'a été surpassé que d'un cheveu (?) par celui de Green Bank aux USA, dont la parabole, de bord elliptique et non circulaire, fait 100 × 110 m. On peut vraiment dire que ces deux instruments sont équivalents.

**Radiotélescope de Torun**

La ville natale de Nicolas Copernic s'est dotée d'un grand radiotélescope de 32 m de diamètre, aui a été installé en 1994.



Radiotélescope de 32 m de Torun, Pologne photo J. Gispert

La photo montre la structure qui supporte le miroir principal, ainsi que le miroir secondaire et son support. Le faisceau radio est renvoyé vers le centre du

primaire : il s'agit d'un montage Cassegrain, le récepteur se trouvant au niveau du miroir primaire.

Cet instrument est utilisé en VLBI (Very Large Base Interferometer) en conjonction avec ceux de Merlin, Nançay et Bonn.

L'observatoire de Jodrell Bank a construit un radiomètre qui a été monté sur la sonde européenne Planck. Depuis 2000, réutilisant cette pratique, il développe un récepteur multi-pixel, nommé OCRA (*One Centimetre Receiver Array*), destiné au radiotélescope de Torun. Comme son nom l'indique, cet appareil observera à 1 cm de longueur d'onde, ce qui correspond à une fréquence de 30 GHz. OCRA comprendra 100 pixels, en une matrice 10 × 10.

Deux instruments de validation int été construits :

- OCRAp, qui comprend deux cornets de réception ;
- OCRA-F (OCRA FARADAY), qui en comprend 8 (4 × 2), extensible à 16.

OCRAp a fonctionné jusqu'en 2009, année où il a été remplacé par OCRA-F.

L'intérêt de ces instruments, naturellement cryogéniques, est le remplacement des composants traditionnels par des circuits intégrés spécialisés.

La multiplicité des cornets permetra de réaliser une couverture du ciel beaucoup plus rapidement. L'un des buts de cette expérience est d'analyser l'effet SZ (Sunayev-Zel'dovitch), interaction entre le fond cosmologique (photons) et des électrons de grande énergie, par effet Compton inverse. Les électrons communiquent leur énergie aux photons, dont la fréquence augmente. L'observation de ce rayonnement modifié permet en particulier de détecter des amas de galaxies qui, trop éloignés, sont difficiles à distinguer du fond du ciel.

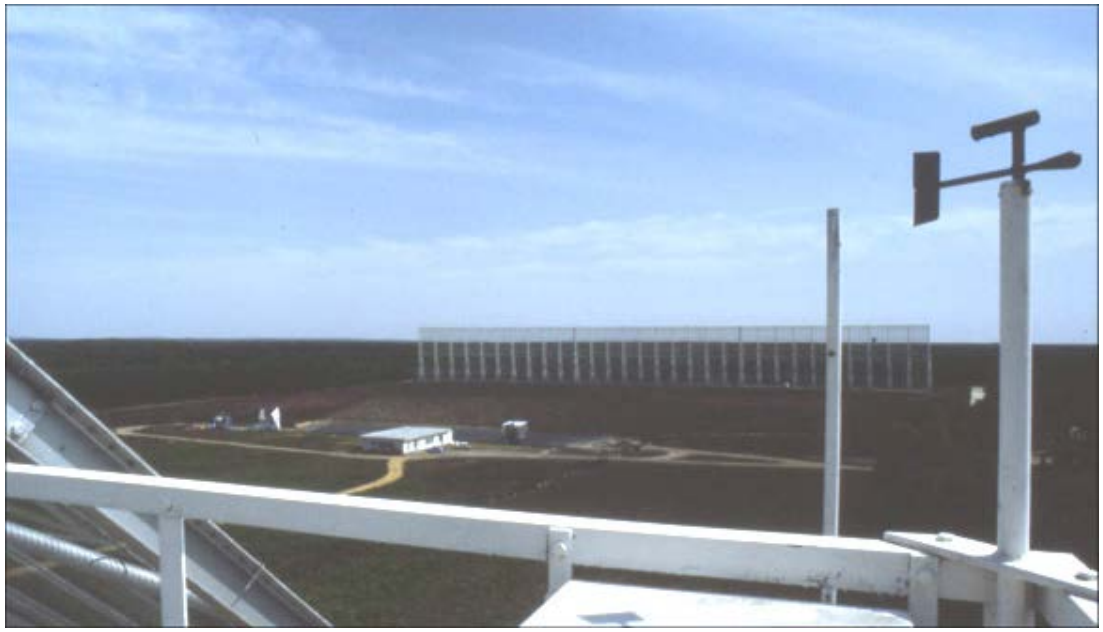
**Radiotélescopes non orientables**

Mais là encore, les montures ont des limites, qui sont atteintes pour des miroirs d'une centaine de mètres de diamètre. Pour aller plus loin, il faut sacrifier la mobilité, au moins en partie.

**Nançay**

Sacrifice partiel d'abord. On utilise le principe de l'héliostat (encore un instrument créé dans le visible...). Un miroir plan renvoie le faisceau vers le miroir principal, qui peut être fixe. C'est le principe qui a été retenu pour le radiotélecope de Nancay, en France. Le miroir plan est mobile en hauteur (pivotant suivant un axe horizontal), mais pas en azimut. Il est dirigé vers le méridien sud, et ne peut renvoyer le faisceau que lorsque l'astre à observer passe dans le méridien. Alors, les ondes sont réfléchies vers le miroir principal qui est horizontal et fixe. Au foyer de celui-ci est placée l'antenne. Si les conditions énoncées ci-dessus étaient rigoureusement respectées, les observations ne dureraient qu'un fraction de seconde… Il faut donc les assouplir. On observera non pas au méridien strict, mais dans le voisinage du méridien. Ce qui veut dire que la source va se déplacer horizontalement dans le miroir principal. Si celui-ci était parabolique, comme on s'y attendrait, on aurait une image correcte seulement au méridien. Pour tolérer les mouvements, il faut que le miroir primaire soit sphérique. Ce qui introduit bien sûr une aberration de sphéricité, qu'il faudra corriger par ailleurs. Mais le faisceau se déplaçant, le foyer va se déplacer aussi, le long d'une ligne courbe, parallèle au miroir primaire. L'instrument permet une observation de l'ordre d'une heure, le foyer se déplaçant d'une soixantaine de mètres.

Cette technique a été développée à Nançay, en France. Le miroir sphérique, pour simplifier la construction, n'est pas inscrit dans une calotte sphérique, mais dans une bande placée horizontalement. Il est fixe.



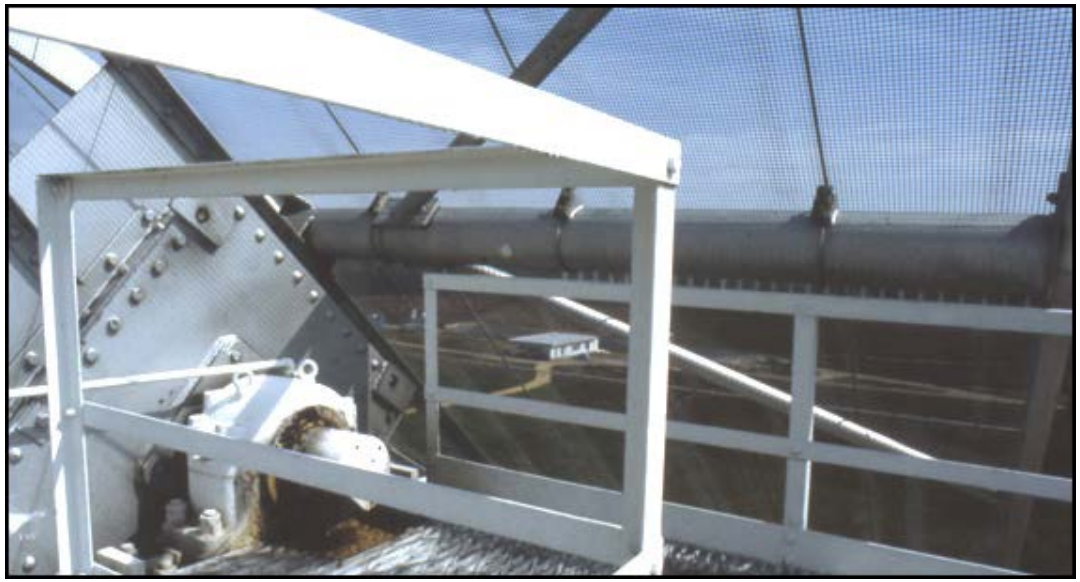
Radiotélescope de Nançay photo J. Gispert

On voit sur cette photo, au premier plan à gauche, une petite partie du miroir plan, incliné, qui renvoie les ondes du ciel vers le miroir sphérique, tout au fond de l'image. Ce dernier concentre le faisceau vers son foyer, où se trouve l'antenne de réception. Cette antenne est dans le tout petit bâtiment cubique au centre de l'image. L'antenne est mobile, elle se déplace sur une voie ferrée circulaire, afin de suivre le déplacement de la source pendant une durée raisonnable vis-à-vis des aberrations.

Le miroir plan mesure 200 m de longueur, et 40 m de hauteur. Il est situé à 460 m du miroir sphérique. Le miroir sphérique est long de 300 m et haut de 35 m (remarquez qu'il est plus long que le miroir plan, pour permettre une utilisation prolongée) ; sa distance focale est de 460 m.

Son pouvoir séparateur est de 1 minute d'arc à 6 cm de longueur d'onde, et de 3 minutes à 21 cm (la raie de l'hydrogène neutre). La précision de pointage est de quelques millièmes de degrés.

Ce radiotélescope a été achevé en 1965.



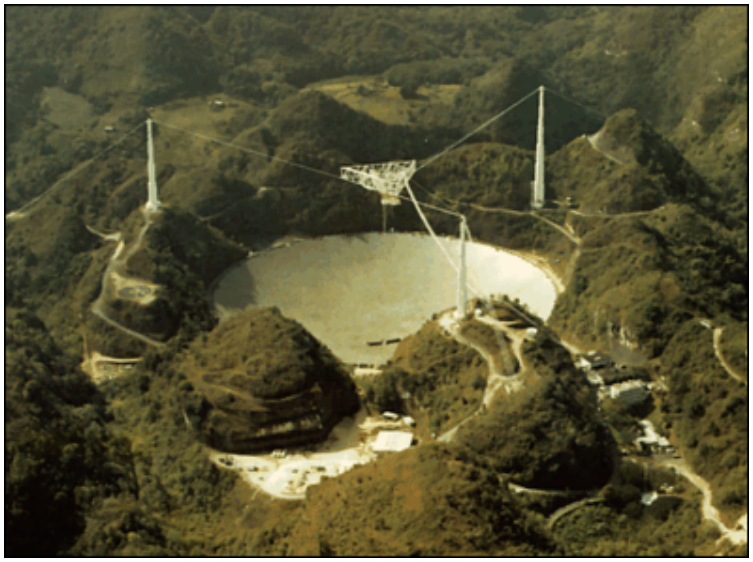
Détail du miroir plan photo J. Gispert

Sur cette image, on voit le grillage qui sert de miroir plan, photographié depuis l'une des plateformes de service. Les longueurs d'onde observées étant supérieures à 6 cm, un grillage à mailles fines est suffisant pour constituer un très bon miroir. On voit, à gauche et vers le bas, l'axe qui permet d'incliner le miroir plan, pris dans l'un des paliers qui le supportent.

**Arecibo**

La dernière solution, pour construire des instruments encore plus grands, consiste à placer un miroir fixe, et à attendre que la source à observer veuille bien défiler devant par la rotation de la Terre. Evidemment, tout le ciel n'est pas accessible avec cette méthode, mais seulement une étroite zone autour du point visé par l'appareil. On mesure l'intensité du signal reçu et on la reporte sur un écran d'ordinateur : la brillance de chaque point sera proportionnelle au signal. On arrive comme cela à construire une image. Mais le plus petit détail visible sur cette image est définie par le pouvoir séparateur de l'instrument.

Pour agrandir un peu la zone exploitable, on place l'antenne sur un support mobile, comme à Nançay, et on la déplace au-dessus du miroir. Cette technique a été mise en œuvre à Arecibo, dans un cratère naturel dont le fond a été tapissé par le miroir. Le diamètre atteint 300 mètres.



Arecibo

**RATAN**

Le radiotélescope RATAN 600 est situé à proximité du télescope Bolchoï (le 6 m russe). Mis en service en 1974, il est le plus grand radiotélescope du monde. Son nom vient de son diamètre de 600 m. Mais ce n'est pas un miroir sphérique complet. Il s'agit d'un anneau de miroirs, qui renvoient le flux vers le centre de l'anneau. Là, un récepteur capte la totalité du faisceau.

Il observe de 610 MHz à 30 GHz. Il est utilisé principalement dans la bande centimétrique, et son pouvoir séparateur atteint 2 secondes d'arc. Il est très utilisé pour l'observation du Soleil, en particulier de la couronne.

La rotation de la Terre sert pour le balayage de la source, qui permet de construire l'image.

Avec les grands radiotélescopes mentionnés ci-dessus, on atteint un pouvoir séparateur qui est presque de l'ordre des performances des télescopes au sol sans optique adaptative. Mais les radioastronomes ont plus d'un tour dans leur sac, et ils ont développé une technique de performances bien supérieures.

**Interféromètres**

Même avec de très grands instruments comme ceux décrits ci-dessus, les radioastronomes ne disposaient pas du pouvoir séparateur nécessaire pour la compréhension de nombreux phénomènes. Il leur a fallu faire preuve de beaucoup d'imagination...

La solution qu'ils ont trouvée est *l'interférométrie*. Une onde provenant d'un point lumineux, et voyageant selon deux trajets optiques différents (de longueur différente), arriveront avec un léger décalage dans le temps. Ce décalage se traduit par un déphasage : les ondes n'oscillent plus au même moment. Si on les additionne, on produit des interférences.

Pour obtenir la même onde par deux trajets optiques différents, on utilise deux radiotélescopes. Le décalage dépend de la distance entre les deux antennes. Le pouvoir séparateur de l'ensemble est donné par la distance qui sépare les 2 antennes, et non par leur diamètre. Il suffit donc d'éloigner les antennes le plus

possible pour améliorer la qualité des images. La longueur d'onde en radio permet de faire cela assez facilement, car les réglages ne sont pas trop précis. Les radioastronomes ont même pu enregistrer séparément les signaux reçus par les deux antennes, puis les recombiner plus tard (pour cela, ils enregistrent en même temps des signaux horaires très précis, donnés par une horloge atomique).

En poussant la méthode au maximum, ils sont arrivés à utiliser le radiotélescope de Jodrel Bank en angleterre, avec celui de Parkes en Australie ! La distance entre les deux est de l'ordre de 10.000 km, ce qui donne l'équivalent d'un miroir de 10.000 km de diamètre !!! 10 millions de mètres alors que les astronomes optiques en étaient à 1 m dans les années 40. Donc les radioastronomes avaient obtenu un pouvoir séparateur bien meilleur que leur collègues optiques.

Mais attention, ce n'est vrai que dans la direction des deux antennes. Dans la direction perpendiculaire, on n'a que le pouvoir séparateur correspondant aux antennes, c'est-à-dire à leur diamètre. On peut alors associer 4 instruments, selon une disposition en croix, et le tour est joué. Les radioastronomes ont construit de tels instruments sur certains sites, par exemple à Nançay.

En utilisant tous ces instruments, les radioastronomes ont découvert beaucoup d'astres émettant des ondes radios, produites par divers mécanismes physiques intéressants. Des astres d'un type nouveau, non prévu, ont été observés : c'est le cas des pulsars et des quasars.

Evidemment, les opticiens ne sont pas restés sur ce constat. Ils ont à leur tour développé l'interférométrie. Pour eux, la tache a été beaucoup plus difficile, car les tolérances de construction sont liées à la longueur d'onde : elles sont un million de fois plus draconiennes en optique qu'en radio. Mais Antoine Labeyrie, sur le plateau de Calern, près de Grasse, a montré le chemin. Tous les grands intruments optiques en cours de réalisation seront des interféromètres.

**Liste des plus grands radiotélescopes**

| nom | date | lieu | dimension | λ |
|---|---|---|---|---|
| Arecibo | 1963 | Porto Rico | 305 m | 50 |
| Effelsberg | 1972 | Allemagne | 100 m | 17 |
| Green Bank | 1998 | USA (Virginie) | 100 m | 60 |
| Nançay | 1965 | France | miroir sphérique 300 m × 35 m de haut ; miroir plan 200 m × 40 m | 9 à 21 cm |
| Jodrell Bank | 1957 | G.-B. | 76 m | 200 |
| Parkes | 1961 | Australie | 64 m | 6 |
| Algonquin | 1967 | Canada | 50 m | 30 |
| Nobeyama | 1970 | Japon | 45 m | 3 |
| Green Bank | | USA | 42 m | 20 |

---=OO=---




Dans la conquête du domaine électromagnétique, l'astronomie millimétrique est assez récente. Elle se trouve à la limite entre la radio proprement dite (micro-ondes), et les ondes infrarouges. Elle s'adresse à des objets assez froids, et concerne donc la formation de nombreux objets : planètes, étoiles (nuages en effondrement), galaxies, amas de galaxies, et même la chimie des nombreuses molécules présentes dans les nuages qui peuplent l'espace.

Comme pour l'astronomie optique, on peut envisager des observations au sol, ou dans l'espace. Pour observer du sol, il faut considérer l'absorption de l'atmosphère : la vapeur d'eau, abondante sur Terre, possède des bandes d'absorption juste dans le domaine de longueur d'onde considéré. Aussi, il faut se placer dans un endroit où la vapeur d'eau est le moins abondante. C'est le cas des déserts. Mais même au Sahara, il reste un peu de vapeur dans l'atmosphère. Pour s'en affranchir, il est bon de s'installer en altitude.

La longueur d'onde considérée étant plus longue qu'en optique, il faut de grands instruments pour avoir un pouvoir séparateur correct. On doit donc envisager de grandes paraboles, un peu comme en radioastronomie. Mais la différence tient dans la réalisation de surface : les défauts admissibles sur le miroir doivent être, dans tous les cas, plus petits que le dixième de la longueur d'onde. Dans le cas de la radioastronomie, cette contrainte est assez facile à réaliser ; mais ici, il faut construire une grande parabole à mieux que le dixième de millimètre d'erreur. Ce qui représente un problème important pour de grands miroirs. C'est pourquoi on n'a pas encore construit d'antenne de plus de 15 m de diamètre.

Comme en radioastronomie (et même en astronomie optique), on se tourne donc vers les interféromètres. Les techniques nécessaires sont intermédiaires entre celles de l'optique et celles de la radioastronomie.

Enfin, il est évident que l'observation spatiale serait, comme en optique, libérée de tous les défauts de l'atmosphère. Mais là aussi, il faut tenir compte des limites technologiques, pour construire le miroir, et pour le lancer dans l'espace.

Dans ce qui suit, nous allons voir les différents instruments existant ou en cours de développement.

**Le Pico Veleta (au sol)**

L'*IRAM* (*Institut de RAdioastronomie Millimétrique*) a été fondé en 1979 ; c'est une coopération entre la France, l'Espagne et l'Allemagne. L'IRAM s'est doté de deux instruments, celui du Pico Veleta en Espagne, et celui du Plateau de Bure à 2.552 m d'altitude, dans les Alpes françaises, près de Gap.

Le Pico Veleta est doté d'une antenne unique de 30 m de diamètre, observant dans la gamme de 0,8 à 3 mm (qui correspond à des fréquences de 80 à 350 GHz). Cet instrument a découvert plus de 20 molécules dans le milieu interstellaire, dans des comètes, et dans les atmosphères de certaines planètes ou satellites. L'observation, en particulier, de la chute de la comète Shoemaker-Levy 9 sur Jupiter, a montré que des molécules d'oxyde de carbone CO, d'acide cyanhydrique HCN, et de sulfure de carbone CS, ont été formées au moment de l'impact.

**L'interféromètre du Plateau de Bure (au sol)**

L'instrument du Plateau de Bure est un interféromètre. Commencé en 1985, les premières observations de l'interféromètre ont été effectuées en 1988. Il comprend actuellement 6 antennes de 15 m de diamètre chacune, montées sur rails, ce qui permet d'ajuster leur distance pour modifier le pouvoir séparateur. La distance maximale sur l'axe est/ouest est de 760 m, et de 368 m sur l'axe nord/sud. Les observations se font à 1,3 mm de longueur d'onde, ou 230 GHz de fréquence.



Trois antennes du Plateau de Bure photo IRAM

L'accès au plateau se faisait par un téléphérique, qui a été accidenté en 1999. La malchance continuant, un hélicoptère de liaison s'est écrasé quelques mois après. Total : 25 morts. L'astronomie peut parfois être dangeureuse, comme toute activité humaine...

Récemment, une expérience impressionante a été réussie entre ces deux instruments (celui du Pico Veleta, et une seule antenne au Plateau de Bure). A une distance de 1.150 km, il n'est pas question de faire entre eux de l'interférométrie directe. Mais il est possible d'enregistrer les signaux reçus par chacun, en même temps que des signaux horaires très précis fournis par des horloges atomiques. Plus tard, ces signaux seront combinés par un ordinateur pour simuler les interférences, et donc obtenir une résolution correspondant à la distance entre les deux antennes (et la longueur d'onde observée). Ces expériences ont été menées à deux longueurs d'ondes différentes : 1,4 mm (0,25 milli arcseconde), et 3 mm (0,5 milli arcseconde).

Les cibles ont été des quasars, et la source Sagittarius A (proche du centre de la Voie Lactée). L'observation des quasars permettra de préciser leur structure interne, et celle de Sagittarius A devrait discriminer entre certains modèles d'acrétion par un trou noir supposé être au centre de la Galaxie.

Ces observations, effectuées en octobre 1994, ont été les premières en interférométrie dans le domaine millimétrique.

Dans la gamme 3 mm, aucun autre télescope n'atteint les performances de ceux de l'IRAM.

**JCMT James Cleck Maxwell Telescope (au sol)**

Le JCMT est un télescope millimétrique, de 15 mètres de diamètre, observant dans la gamme de 0,35 à 2 mm. Il est en monture alt-azimutale, et comprend un système d'optique active pour compenser les déformations de surface en fonction de la gravité ou de la température. Le faisceau est accessible par un foyer Cassegrain ou par un foyer Nasmyth.

Il a été construit par le Royaume Uni, le Canada et les Pays Bas. Il est installé près du sommet du Mauna Kea à Hawaï, à 4.092 m d'altitude.

**ALMA**

*ALMA* (c'est le sigle *Atacama Large Millimeter Array*, mais le mot *alma* signifie *âme* en espagnol) observe dans la fenêtre millimétrique ; il est installé dans le désert d'Atacama, et utilise un réseau d'antennes. En fait, le nom dit tout ! Quoi que...

Tout d'abord, qu'est-ce que la fenêtre millimétrique ? A strictement parler, il s'agit d'ondes radio ; mais comme les ondes électromagnétiques sont une(s) et indivisible(s), il n'existe pas de barrière physique entre les différents domaines. Les barrières sont seulement définies par les récepteurs utilisés. Ainsi, le domaine d'ALMA s'étend de 9,6 à 0,3 mm, c'est-à-dire des ondes millimétriques à proprement parler, à la frontière de l'infra-rouge (qu'on place un peu arbitrairement vers 1 mm).

Reportons-nous au rayonnement du corps noir, comme d'habitude. Un objet de température T rayonne le maximum de son énergie à la longueur d'onde $\lambda$. Inversement, si on connait $\lambda$, on retrouve la température T, c'est ce qui permet de dire qu'ALMA va observer des objets dont la température est comprise entre 3 et 100 K (entre -270° et -170° C, correspondant à des ondes de 30 à 950 GHz). C'est l'Univers froid qui est sa cible, donc :

- étude du fond cosmologique à 3 K ;
- imagerie à 0,1" de résolution ;
- étude des nuages de gaz moléculaires (10 K), à partir desquels se forment les étoiles et leurs planètes ; donc étude de la formation (actuelle) de ces objets, mais aussi des molécules organiques présentes dans le nuage ;
- détection des raies d'émission de CO et de CII (Carbone ionisé) dans une galaxie normale (Voie Lactée) jusqu'à un redshift de z = 3 en moins de 24 heures d'observation ;
- imagerie des mouvements de gaz dans les protoétoiles, et dans les disques protoplanétaires autour de jeunes étoiles de type solaire, à des distances atteignant 150 pc (distance du nuage d'Ophiucus par exemple). Ceci permettra d'étudier leur composition chimique, les phénomènes physiques qui s'y déroulent, et leur champ magnétique. Mieux, la finesse des images permettra d'observer les lacunes gravitationnelles produites par la présence de planètes en formation à l'intérieur ;
- les galaxies (toutes les températures s'y rencontrent) ;

les objets poussiéreux lointains, dont le rayonnement tombe dans ce domaine par décalage spectral. Le rayonnement qu'ils ont émis, par exemple dans le visible, se trouve reçu dans le domaine millimétrique. Ainsi, ALMA pourra étudier la formation des premières galaxies, jusqu'à un décalage spectral de 10 ;
- les molécules interstellaires ;
- les indices d'une vie éventuelle.

Pour réaliser un tel instrument, il faut d'abord s'assurer qu'il reçoive des ondes ! Or son domaine est en-dehors de la fenêtre qui va du visible au proche infra-rouge. Mais en altitude, la fenêtre s'ouvre, par manque d'air absorbant (vapeur d'eau surtout). Pour cela, ALMA est installé sur le (plateau de) *Llano de Chajnantor*, à une quarantaine de kilomètres d'Antofagasta au Chili. A 5.000 m d'altitude, ce site bénéficie d'une très grande transparence de l'atmosphère, et d'un air très sec : c'est un désert. De plus, ce plateau mérite son nom, il est très plat sur une grande étendue, permettant d'installer toutes les antennes du réseau. Il doit abriter également deux autres instruments : *CBI* (*Cosmic Background Imager*) et *APEX*.



ALMA en images de synthèse photo ESO/H.Zodet

ALMA est un très grand interféromètre, atteignant cette excellente résolution, grâce à une ligne de base de 14 km. Il comprend 64 antennes de 12 m de diamètre, financées à égalité par l'ESO et la NFS (USA), plus 8 antennes de 8 m ajoutées par le Japon.

Son installation sera terminée en 2010. Cet instrument sera alors, et pour assez longtemps, le plus grand et le plus précis de tous ceux qui seront consacrés aux objets froids : il réunira la meilleure sensibilité, le meilleur pouvoir séparateur, et la meilleure couverture en fréquence. Les difficultés techniques sont nombreuses, car pour observer les micro-ondes, il faut refroidir le récepteur de chaque antenne à très basse température (quelques degrés Kelvin). Le signal ainsi reçu sera amplifié et numérisé, puis expédié par des fibres optiques vers le centre de calcul. Un ordinateur très puissant est nécessaire pour traiter cette masse d'information. Il devrait atteindre 16 teraflops (16.000 milliards d'instructions par seconde).

De plus, les détecteurs sont capable d'analyser un signal presque à la limite quantique.

**APEX (au sol)**

APEX (*Atacama Pathfinder EXperiment*) est un télescope millimétrique, dont le miroir mesure 12 m de diamètre. Il est installé à côté d'ALMA.



Le télescope APEX photo Andreas Lundgren

La photo montre le télescope, avec les deux cabines accrochées juste en-dessous de l'antenne, où se trouvent les deux foyers Nasmyth. On voit, au bout des supports, le miroir secondaire qui renvoie le faisceau vers le trou percé dans le miroir principal. Enfin, derrière le miroir se trouve le foyer Cassegrain. Bien que de forme surprenante, cet instrument est bien un télescope !

**VLA (au sol)**



Vue du réseau VLA Image courtesy of NRAO/AUI

Le *Very Large Array*, ou *VLA*, est situé dans la plaine de San Augustin, à proximité de Socorro, au Nouveau-Mexique, à 2.124 m d'altitude. C'est un radiotélescope formé d'un réseau de 27 antennes paraboliques orientables identiques de 25 m de diamètre chacune, pesant 230 tonnes, mobiles sur des voies de chemin de fer disposées selon un tracé formant un immense Y (deux branches de 21 km et un pied de 19 km).

Chaque antenne possède son propre récepteur, dont les signaux sont transmis à un site central où ils sont combinés : l'image haute résolution ainsi obtenue équivaut à celle d'un très grand radiotélescope, dont le diamètre serait égal à la distance maximale séparant les antennes. La meilleure résolution angulaire atteinte est d'environ 0,04 seconde d'arc (configuration 36 km à 43 GHz).



Image courtesy of NRAO/AUI and David Andrew Gilder

Le VLA peut se constituer en 4 configurations différentes. La configuration visible sur la photo de gauche est la plus petite, qui ne fait qu'un kilomètre d'extension. Les autres configurationsfont 3,6 km, 10 km et enfin 36 km.

Le VLA est en cours de rénovation. Il va devenir le EVLA (Expanded Very Large Array). Les antennes vont être améliorées, et un nouveau corrélateur (ordinateur qui mélange les données pour simuler l'interférométrie) est en cours d'installation.

**Télescope Herschell (dans l'espace)**

L'Agence Spatiale Européenne (ESA) a réalisé un télescope spatial destiné à observer depuis l'infrarouge lointain jusqu'au domaine millimétrique, c'est à dire de 60 à 670 µm. C'est le plus grand télescope spatial dans ce domaine. Le projet était initialement dénommé FIRST (*Far InfraRed and Sub-millimetre Telescope*), puis a été renommé Herschell.

Le lancement, initialement prévu pour le mois de juillet 2008, a été réalisé finalement le 14 mai 2009. C'est une fusée Ariane V qui l'a envoyé dans l'espace, conjointement avec le satellite Planck. Herschell a été immédiatement propulsé vers le point de Lagrange L2, à 1,5 millions de km de la Terre (orbite de Lissajous). Il y est parvenu le 15 juillet. La phase opérationnelle a commencé dès le 21 juillet.



Télescope spatial Européen Herschell
ESA/ AOES Medialab; image de fond HST (NASA/ESA/STScI)

Le poids total du télescope est de 3.300 kg. Il doit fonctionner jusqu'aux années 2011-2012. C'est le plus grand télescope spatial contruit à ce jour, avec un miroir de 3,5 m. Sa taille est limitée par les possibilités de lancement.

Ce miroir est particulier, car il est réalisé en *carbure de silicium*. Le choix de ce matériau a été dicté par les contraintes que le miroir doit subir au cours de sa vie : des vibrations violentes au moment du lancement, une accélération de 10 g, ensuite une température de -200° C. Et malgré cela, le miroir doit conserver ses qualités optiques parfaites. De plus, une autre contrainte de lancement concerne le poids : or le carbure de silicium permet de réaliser un miroir de 280 kg, alors qu'il peserait 1,5 tonne s'il était en verre (moins du 1/5$^{e}$ du poids du verre). Le carbure de silicium est très rigide, léger, et présente un très faible coefficient de dilatation et une faible conductivité thermique. Toutes ces qualités l'ont fait choisir, malgré les nombreuses difficultés technologiques.

En effet, on ne sait pas aujourd'hui couler un disque de carbure de silicium de la taille du miroir. Tout ce qu'on sait faire, ce sont des bandes. Alors, la solution retenue a été de réaliser 12 pétales, et de les souder pour obtenir le disque. Mais souder du carbure de silicium n'est pas une mince affaire. Il a fallu construire un four spécial, permettant de monter à 1.400° C, et développer toute la technologie nécessaire.

Ensuite, le miroir a été poli, puis testé dans des conditions mécaniques proches de celles qu'il devait subir lors du lancement. Les tests thermiques comprenaient plusieurs refroidissements à -200°.

Le but principal de ce télescope est de découvrir comment se sont formées les premières (*first*) galaxies, ce qu'on ignore totalement aujourd'hui. Pour les observer au moment de leur formation, il faut regarder loin (dans le temps, donc dans l'espace). Par conséquent, le décalage vers le rouge de ces galaxies les amène dans la région spectrale accessible au télescope.

Mais le télescope observe également les objets froids proches, donc en particulier les nuages de gaz et de poussières où se forment les étoiles (et les molécules qui s'y trouvent), et les disques d'acrétion dans lesquels se forment des planètes. Il peut également observer les comètes et leurs atmosphères (transitoires), ainsi que les planètes.

Pour observer un objet froid, qui émet dans l'infra-rouge lointain ou les micro-ondes, il ne faut pas que l'instrument lui-même perturbe la mesure. Pour cela, il doit être plus froid encore... Il est nécessaire de refroidir à 1,6 K toutes les parties essentielles du télescope. Pour cela, le satellite Herschel emportait un réservoir de 2.400 litres d'hélium liquide superfluide qui, en s'évaporant lentement, refroidit l'appareil. Ce système cryogénique a été réalisé par la Société Air Liquide à Grenoble.

**Résultats de Herschell**

Les résultats de cette expérience sont importants dans plusieurs domaines :

- Le résultat majeur est la découverte d'eau abondante dans les zones de formation d'étoiles. Le satellite est capable de détecter l'eau sous forme gazeuse. Il en a trouvé dans le cœur des nuages en cours d'effondrement en étoile, dans les disques protoplanétaires, et il a observé d'immenses réservoirs d'eau gelée dans des comètes autour d'étoiles déjà formées. Autour de la proto-étoile W43-MM1, il a trouvé 0,11 M d'eau, soit 150 millions de fois celle contenue dans nos océans (1,4 milliards de km$^3$).
- Dans la même étoile, les mouvements de la vapeur d'eau témoignent d'une turbulence supersonique. La vitesse des gaz augmente avec la distance croissante à l'étoile. Ceci est une contrainte importante pour choisir parmi les modèles de formation des étoiles massives.

- Lors de la formation d'une étoile, l'eau joue un rôle de refroidissement dans le disque, dont l'importance se mesure aujourd'hui par l'abondance trouvée. Ce refroidissement est important dans les étoiles de grande masse (plus de 8 M ).
- L'eau dans un disque protoplanétaire ne peut être stable (solide) qu'à une distance suffisante du centre, où la température est assez basse. C'est là que se forment les comètes qui plus tard, par le jeu des perturbations, viendront apporter l'eau aux planètes plus proches de leur étoile. Cette étude nous donne donc des indications sur ce qui a pu se passer dans notre système, lors de sa formation. Herschell a détecté, dans le disque protoplanétaire *TW Hydræ* (étoile T Tauri âgée de 10 millions d'années, d'une masse de 0;6 M , à 175 AL de nous), de la vapeur d'eau à une température inférieure à 100 K, qui pourrait se condenser en comètes. Elle se trouve dans une zone étroite où la condendation en glace et l'évaporation sont en équilibre (l'évaporation est due à l'apport d'énergie par des photons issus de l'étoile). La quantité détectée correspond à 0,5 % de celle qui constitue les océans terrestres. Comme il ne s'agit que de la fraction qui se trouve en équilibre condensation-évaporation, elle dévoile une quantité totale correspondant à des centaines de fois l'eau de nos océans.
- Le rapport D/H
- Enfin, les mouvements de l'eau dans l'environnement des étoiles en formation apportent des informations très précieuses sur la turbulence qui y règne, donc sur les phénomènes physiques qui la gouvernent.
- Combinés avec ceux du satellite américain Spitzer, les résultats de Herschell ont montré des variations de luminosité aussi rapides que quelques semaines sur des disques protostellaires. On s'attendait à des périodicités de quelques siècles au moins, et ceci montre une turbulence très importante dans cet environnement. La naissance d'une étoile est tout sauf un processus calme !

---=OO=---

# Sphère armillaire



La *sphère armillaire* est un instrument utilisé au deuxième siècle avant JC en Grèce, au premier siècle avant JC en Chine. Mais elle a probablement été imaginée bien avant.

Une *armille* est un bracelet, ce mot venant du latin *armilla* : anneau de fer, bracelet, ou collier. Armille désigne également un anneau que certains champignons portent au pied (*armillaires*).

La sphère armillaire est une combinaison de cercles emboîtés, permettant de représenter certains mouvements des astres. Une sphère armillaire simple (deux cercles perpendiculaires) a permis à Ptolémée de déterminer l'heure de l'équinoxe. Plus tard, Sosigène a repris cette observation pour la réforme du calendrier de Grégoire XIII.

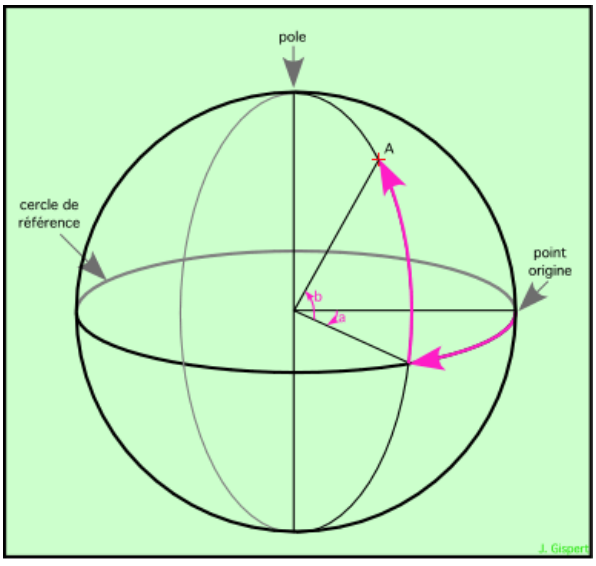
Des sphères armillaires extrêmement complexes ont été construites, dont l'usage devait nécessiter un long appprentisage. En particulier celle d'Antonio Santucci construite à Florence en 1585.

La sphère présentée ici est une version pédagogique, destinée à illustrer les différents systèmes de coordonnées astronomiques (à l'exception des coordonnées galactiques). Son utilisation permet de comprendre les saisons, les mouvements des étoiles et du Soleil en différents points de la Terre (équateur, latitudes moyennes, pôles). On peut expliquer le soleil de minuit, les tropiques et les cercles polaires.

Des plans sont fournis pour exécuter une sphère armillaire en contreplaqué. Sa réalisation est facile, quoique nécessitant pas mal de soins.

Les explications qui suivent sont détaillées, afin de décrire pas-à-pas les composants de la sphère, et d'en expliquer l'utilité. Vous pourrez trouver une photo de la sphère complète à la fin de ce chapitre.

Un *système de coordonnées* est un couple d'angles, mesurés sur deux cercles perpendiculaires. L'un des cercles est un cercle de référence, sur lequel on choisit un point origine (angle d'intersection avec un autre cercle perpendiculaire). L'astre visé est le point A de la sphère céleste. Par définition, il est sur un grand cercle passant par le pôle. Les deux coordonnées sont : l'angle a que fait la direction de l'astre avec la direction origine, et l'angle b qui mesure la distance de l'astre au cercle de référence :




On peut construire une infinité de tels systèmes de coordonnées, le choix du cercle de référence et du point origine étant arbitraires, ainsi que le sens de rotation. Quatre systèmes sont utilisés en astronomie, dont les propriétés dépendent du choix des références.

Une même étoile possède, à chaque instant, des coordonnées dans chacun des systèmes considérés. Des calculs de trigonométrie sphérique permettent, plus ou moins facilement, de passer de l'un à l'autre. Le point capital est que, pour un astre donné :

- dans un premier système, ses deux coordonnées varient à chaque instant ;
- dans le second, une seule coordonnée varie ;
- dans le troisième, les deux coordonnées sont fixes (en négligeant la précession des équinoxes, qui est très lente) ;
- le dernier système est particulier pour le Soleil ; l'une de ses coordonnées y est fixe.

**Le bâti**

Cette première photo montre le bâti de la sphère, constitué de trois pièces principales : deux pieds à angle droit, et un cercle horizontal. Remarquez sur le cercle les deux encoches, qui permettront le glissement de l'équipage mobile. Ces encoches sont dans le plan nord-sud du pied.



Remarquez également sur ce pied nord-sud, en bas, les quatre petites pièces en forme de goutte d'eau, qui sont destinées à guider l'équipage mobile.

Le cercle qui constitue le haut du bâti est le *cercle horizon*. C'est le cercle de référence pour le système de *coordonnées horizontales*.

Lorsque la sphère est posée sur une table, en s'inclinant pour placer les yeux à la hauteur du cercle horizon, tout ce qu'on voit au-dessus est dans le ciel, tout ce qui est au-dessous est sous l'horizon, donc invisible pour l'observateur.

L'horizon est gradué selon *l'azimut*. L'azimut est l'angle que forme un point quelconque avec le sud. L'origine de l'azimut (azimut 0°) est le point sud de l'horizon, à l'encoche de gauche ici. L'azimut est croissant du sud vers l'ouest (le point ouest a pour azimut 90° ; il est au fond sur la photo), puis vers le nord…

Attention, les marins ont aussi la notion d'azimut, orienté dans le même sens, mais avec l'origine au point nord de l'horizon.

L'utilisation de ce système se justifie par la possibilité de déterminer précisément la verticale du lieu (à l'aide d'un fil à plomb, ou mieux par l'utilisation d'un bain de mercure qui donne l'horizontale).

Le *cercle de hauteur* a été mis en place. Il s'agit en fait d'un demi-cercle, muni de deux pieds permettant de le poser dans une orientation quelconque sur l'horizon. Le cercle de hauteur porte également le joli nom d'*almucantarat*.

Le cercle de hauteur est gradué en degrés, de 0° sur l'horizon, à 90° au zénith (même graduation de chaque côté). La partie en-dessous de l'horizon, non matérialisée, est graduée de 0° à -90° (*nadir* = point opposé au zénith).

La sphère doit être posée sur une table, horizontalement, de telle manière que le pied portant les gouttes d'eau soit orienté nord-sud. L'une des deux encoches du cercle horizon est donc au nord, l'autre au sud.

Pour repérer un astre dans le ciel, la méthode la plus simple est de repérer d'abord sa hauteur dans le ciel (angle qu'il fait avec l'horizon). On tourne le cercle de hauteur pour qu'il contienne l'astre. En imaginant qu'on place l'œil au centre de la sphère, l'angle qu'on lirait sur le cercle de hauteur est la hauteur de l'astre.

Puisque le cercle de hauteur contient l'astre visé, il suffit de lire la graduation sur laquelle il se trouve sur le cercle horizontal : par définition, c'est l'azimut de l'astre.



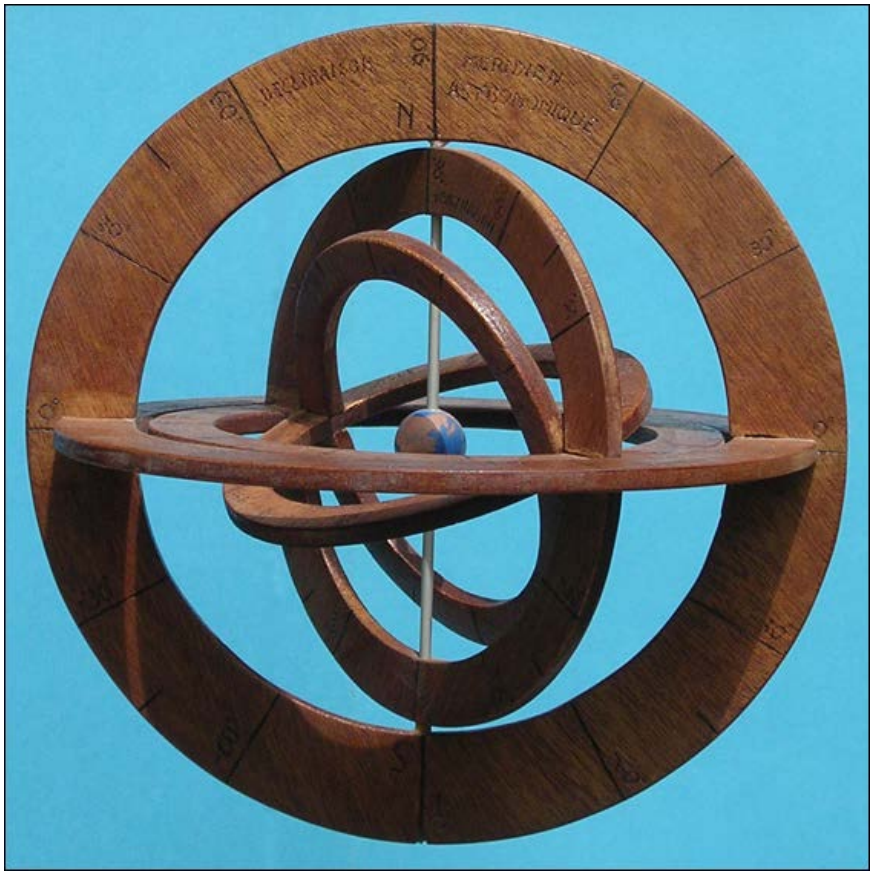

L’horizon et le cercle de hauteur matérialisent donc le premier système de coordonnées astronomiques : l’azimut et la hauteur. Remarquez que ces deux angles sont relatifs à l’horizon. Si on se place en un endroit différent de la Terre, l’horizon sera différent, et les deux coordonnées du même astre aussi. Pour cette raison, on dit que l’azimut et la hauteur sont des *coordonnées locales*.

Il serait difficile de communiquer le résultat d’observations si on les donnait en coordonnées locales. Le destinataire serait obligé de faire un calcul de trigonométrie sphérique non évident pour adapter les données communiquées à son propre lieu d’observation. Pour cette raison, les astronomes ont cherché un repère plus universel.

**L’équipage mobile**

Ils l’ont vite trouvé en considérant l’équateur de la Terre, qui est un plan particulier commun à tout le monde. Remarquez qu’au pôle nord, l’horizon est parallèle à l’équateur ! Cette remarque permet de dire que les coordonnées que nous allons définir sont simplement les coordonnées horizontales pour un observateur idéal qui se trouverait au pôle nord. Lorsqu’on fait une observation, on doit donc noter les coordonnées qu’aurait l’astre pour cet observateur idéal. Un correspondant à qui on communiquerait ces coordonnées ferait le calcul inverse.

Mais aucun calcul n’est nécessaire. Les télescopes en monture équatoriale permettent de lire directement les bonnes coordonnées : il suffit de placer un cercle gradué perpendiculaire à l’axe polaire de l’instrument, donc parallèle à l’équateur, pour y lire directement l’une des coordonnées. L’autre coordonnée se lira sur un cercle placé perpendiculairement à l’axe de déclinaison.




L'équipage mobile présenté suspendu à la verticale

L'équipage mobile comprend trois couples de cercles. Chaque couple représente un système de coordonnées (cités ici dans l'ordre du plus grand au plus petit) :

- à l'extérieur, les cercles de *coordonnées horaires* (*angle horaire* et *déclinaison*) :
  - *cercle horaire* : le plus grand cercle présenté ici horizontalement. Il porte *l'angle horaire*, gradué en heures (l'heure est une unité d'angle, 24 h correspondent à 360°, une heure correspond donc à 15°). Il est orienté dans le sens des aiguilles d'une montre (vu de dessus, c'est-à-dire du nord). Son origine 0 h est au méridien sud. Ce cercle ne tournant pas par rapport au bâti, **au cours de la nuit, l'angle horaire d'une étoile augmente** constamment.
  - *méridien astronomique*. C'est le grand cercle vertical visible ici. Il porte la *déclinaison*. Il sera placé dans le bâti, et pourra basculer entre les deux encoches du cercle horizontal, pour régler la latitude. La latitude est correctement réglée lorsque le cercle horaire est parallèle à l'équateur de la Terre. L'angle qu'il fait alors avec le point sud du cercle horizon est égal à la latitude du lieu. **La déclinaison d'un astre ne change pas** au cours du temps.
- le second couple tourne autour de l'axe polaire (gris, vertical sur la photo). Il est identique au précédent, mis à part cette rotation. En le faisant tourner en 23 h 56 mn 4 s, il suivra rigoureusement les astres. C'est le système de *coordonnées équatoriales*.
  - le cercle perpendiculaire à l'axe polaire (ici horizontal) porte *l'ascension droite*, graduée en heure, mais orienté, contrairement à l'angle horaire, dans le sens trigonométrique (sens inverse des aiguilles d'une montre, toujours vu du nord). L'origine des ascensions droites est le *point gamma*, ou *point vernal*, ou *équinoxe de printemps*, qui se voit devant et à droite, à l'intersection avec le plus petit cercle. Au cours de la nuit, ce système tourne autour de l'axe polaire en un jour sidéral (23 h 56 mn 4 s). Ce qui fait qu'une étoile reste constamment en face de la même graduation des ascensions droites.
  - l'autre cercle porte la *déclinaison*. Cette coordonnée porte le même nom que dans le système horaire, et ses valeurs sont identiques (elle n'est pas affectée par la rotation). Ce cercle est perpendiculaire au cercle d'ascension droite, qu'il coupe au niveau des deux équinoxes. Il est nommé *colure des équinoxes*. **Les deux coordonnées équatoriales d'une étoile sont indépendantes du temps**.
- le dernier couple, qu'on voit incliné, représente les *coordonnées célestes*.
  - Le cercle presque horizontal représente le trajet parcouru par le Soleil au cours de l'année, vu de la Terre. Son *obliquité* est égale à 23° 26', inclinaison de l'équateur sur l'écliptique. Le 4 juillet, le Soleil se trouve au point le plus haut à droite, le 4 janvier il se trouve au point le plus bas, en bas à gauche. Il porte la *longitude céleste*, graduée en degrés, croissant dans le sens trigonométrique (vu du nord), son origine étant au point vernal.
  - le cercle perpendiculaire est la *latitude céleste*. Elle est graduée de la même manière que la déclinaison. Ce système est adapté au calcul des éphémérides du Soleil et des planètes. Une fois les calculs de position effectués, une conversion permet de trouver les coordonnées équatoriales de ces astres, afin de les pointer avec un télescope.

**Temps sidéral**

Par définition, le *temps sidéral* $T$ est l'angle horaire du point gamma. Alors, la relation liant l'angle horaire $H$ d'un astre à son ascension droite $\alpha$ est très simple :

$$H = T - \alpha$$

On peut la réécrire sous la forme $\alpha = T - H$ ; $T$ et $H$ variant avec la même période (le jour sidéral) et en sens inverse, il est facile de comprendre que a soit constant pour une étoile donnée. Bien sûr, ce raisonnement ne tient pas compte de la précession des équinoxes, qui introduit une lente dérive de $H$ par rapport à $T$.

Il n'est pas possible de montrer des photos de chaque détail de la sphère. Pour plus de précision, vous pouvez consulter les plans qui permettent de la construire.



L'équipage mobile est ici en place, réglé pour une latitude moyenne, de 43° nord. Le cercle horaire (vu par la tranche) est parallèle à l'équateur (le cercle de hauteur n'a pas été mis pour une plus grande clarté).

Les deux autres systèmes de cercles de l'équipage mobile tournent autour de l'axe polaire. Leur rotation, se faisant autour d'un axe parallèle à l'axe du monde, et en sens inverse, annule la rotation des astres. C'est ce qui permet d'avoir des coordonnées équatoriales fixes pour un astre donné (puisque le cercle qui les repère est entraîné à la même vitesse que les étoiles).

Remarque : la précession des équinoxes fait varier très lentement les coordonnées équatoriales d'une étoile. Il faut toujours préciser par rapport à quel équinoxe (1950, 1975, 2000…) elles sont données. Mais cette dérive n'altère pas la sphère armillaire, car il suffit de placer son point gamma dans la bonne direction.

**Utilisation de la sphère armillaire**

Le principe de son utilisation consiste à orienter l'équipage mobile en fonction de la latitude du lieu d'observation, puis à le faire tourner autour de l'axe polaire, les astres étant supposés fixes par rapport aux cercles des coordonnées équatoriales.

**I-** Collez un petit morceau de pâte à coller, ou de mie de pain, sur le cercle de longitude céleste. Il représentera le Soleil, à sa position du jour. Au cours de l'année, il se déplace dans le sens des longitudes croissantes. A certaines époques, il est en-dessous de l'équateur (entre l'équinoxe d'automne et l'équinoxe de printemps, donc pendant l'automne et l'hiver), à d'autres au-dessus (entre l'équinoxe de printemps et l'équinoxe d'automne, donc pendant le printemps et l'été). Au point gamma, il traverse l'équateur en allant vers le dessus (au nord).

Choisissez de placer le Soleil au point d'intersection des cercles, au point gamma (équinoxe de printemps). Faites tourner l'équipage dans le sens des aiguilles d'une montre (vu du nord). Vous constaterez que le Soleil effectue son tour en passant alternativement au-dessus et au-dessous de l'horizon : c'est l'alternance du jour et de la nuit. Remarquez tout d'abord qu'à son coucher, le Soleil descend vers l'horizon en suivant une ligne inclinée de 43° à peu près. Une animation pilotable, simulant en partie une sphère armillaire, donne des explications complémentaires.

Notez les endroits, sur l'horizon, où le Soleil se lève et se couche : ce sont les points *est* et *ouest* de l'horizon. En regardant la sphère du dessus, vous verrez que la partie qui correspond au jour est égale à celle qui correspond à la nuit. Dans cette position du Soleil, on a donc les nuits égales (aux jours) ; en latin, *equæ nox* = équinoxe. Nous sommes à l'équinoxe de printemps, car en continuant sa course apparente, le Soleil va monter au-dessus de l'équateur. Avant de changer de position, notez, sur le cercle de hauteur placé en postion nord-sud, la hauteur du Soleil à midi (point le plus haut). Vous devez lire une valeur de l'ordre de 43°. Nous l'expliquerons plus loin.

Positionnez maintenant le Soleil au point le plus haut du cercle de longitude. Effectuez un tour complet de l'équipage, et notez les positions de lever et de coucher du Soleil sur l'horizon. Vous verrez qu'elles se situent au nord-est et au nord-ouest. Et en regardant le cercle horizon de dessus, il vous sera facile de constater que le trajet diurne du Soleil est à peu près double de son trajet nocturne : le jour dure 16 h, et la nuit 8 h seulement. On est au solstice d'été. Notez maintenant la hauteur du Soleil à son point le plus haut. Vous devriez touver à peu près 67°.

Enfin, positionnez le Soleil au point le plus bas du cercle de longitude, et faites les même manipulations. Vous constaterez que la durée de la nuit est double de celle du jour. On est au sosltice d'hiver. La hauteur du Soleil n'est que de l'ordre de 20°.

Ainsi, ces trois opérations simples vous montrent la variabilité de la durée des jours, et comment le Soleil se déplace en apparence dans le ciel au cours de l'année, et vous permet de visualiser la hauteur du Soleil au-dessus de l'horizon, à midi, aux différentes époques.

En résumé :

- au solstice d'hiver, la nuit est deux fois plus longue que le jour, donc la Terre se refroidit deux fois plus longtemps qu'elle ne se chauffe au Soleil ; c'est le contraire au solstice d'été ;

- le Soleil est très haut sur l'horizon en été, et très bas en hiver. La même quantité d'énergie qu'il apporte s'étale sur une grande surface en hiver, et sur une surface toute petite en été.

Ces deux phénomènes jouent dans le même sens : le Soleil nous apporte bien plus d'énergie au mètre-carré en été qu'en hiver. C'est ce mécanisme qui explique les différences de température, sans faire intervenir la distance légèrement variable entre le Soleil et la Terre (qui d'ailleurs joue dans l'autre sens, elle est plus courte en hiver qu'en été).

**II**- Modifiez maintenant la position de l'équipage mobile : basculez-le complètement pour amener l'axe polaire dans le plan de l'horizon, comme il est montré sur la photo :



Où se trouve-t-on ? Faites un petit dessin représentant la Terre, son axe polaire, et un plan tangent à la sphère, et parallèle à l'axe. Ce plan est forcément à l'équateur. C'est là qu'on se trouve…

Pour le comprendre autrement, imaginez le ciel, tel qu'on le voit en France Métropolitaine par exemple. En regardant vers le nord, vous verrez l'étoile polaire à une hauteur de l'ordre de 45° (la latitude du lieu). Imaginez que vous alliez VERS le sud. La Terre étant ronde, l'étoile polaire descendra dans le ciel. Si vous arrivez à l'équateur, vous aurez l'étoile polaire exactement à l'horizon. Puisqu'elle figure l'axe de la Terre, vous constaterez que cet axe est parallèle à l'horizon. C'est justement la position dans laquelle on vient de placer la sphère armillaire. Donc, le réglage ainsi fait correspond à l'équateur.

Refaites toutes les manipulations faites à 43° de latitude nord, avec le Soleil successivement placé à l'équinoxe de printemps, au solstice d'été, et au solstice d'hiver. Notez, comme précédemment, selon la latitude :

- l'inclinaison du trajet du Soleil sur l'horizon à son coucher (il se couche verticalement à l'équateur, pratiquement horizontalement aux pôles) ;
- la vitesse du coucher de Soleil ;
- la durée du jour et de la nuit.

Comparez aux valeurs trouvées pour une latitude moyenne.

**III**- Modifiez encore la position de l'équipage mobile : redressez-le complètement pour mettre l'axe polaire vertical, comme il est montré sur la photo :



au pôle nord

Où se trouve-t-on maintenant ? L'axe polaire étant perpendiculaire au sol, l'étoile polaire est au zénith. On est donc au pôle nord.

Pour finir de comprendre les mouvement apparents du Soleil, refaites toutes les manipulations précédentes. Vous constaterez qu'au solstice d'hiver, le Soleil effectue tout son tour diurne (24 heures), en restant au-dessous de l'horizon. Il n'y a donc pas de jour, c'est la longue nuit polaire.

De jour en jour, le Soleil se déplace sur le cercle de longitude céleste, dans le sens des longitudes croîssantes. Il se rapproche donc doucement de l'horizon. Un mois à peu près avant l'équinoxe de printemps, le jour commence à poindre. Mais on ne voit toujours pas le Soleil… Finalement, il va poindre tout juste, et faire un tour complet pratiquement sans grossir… Au fil des jours, il s'élève doucement au-dessus de l'horizon, pour être totalement levé au bout d'une semaine à peu près. Le coucher de Soleil, à l'automne, durera tout autant. Le Petit Prince apprécierait-il d'avoir un si long coucher de Soleil, mais unique ?

Continuez à déplacer le Soleil, et vous verrez qu'au solstice d'été, il se trouvera à 23° au-dessus de l'horizon, à son point le plus haut. Le Soleil de minuit est maintenant expliqué.

**Autre utilisation**

Réglez la sphère pour une latitude moyenne (45°). Placez le Soleil au solstice d'été, et regardez à quelle hauteur il se trouve à midi. Vous noterez 67° à peu près, comme on l'a déjà vu plus haut. Ce qui signifie que le Soleil n'est pas au zénith, mais bien en dessous. Déplacez le Soleil sur le cercle de longitude, vous constaterez que jamais, quelle que soit la date, le Soleil n'atteint le zénith. N'en déplaise aux romanciers qui prétendent le contraire…

Pourriez-vous trouver un réglage de la sphère tel que le Soleil passe effectivement au zénith ? Réponse affirmative, il suffit de se placer à l'équateur. Mais pas à n'importe quelle date ! A l'équateur, le Soleil passe au zénith deux fois par an, aux deux équinoxes. Au cours de l'année, il se balance dans le ciel (à midi) de part et d'autre du zénith, s'en éloignant au maximum aux deux solstices.

Déplacez la sphère, en réglant une latitude à 10°. Le Soleil passe au zénith à deux dates dans l'année, mais ce n'est plus aux équinoxes. Si vous continuez à vous déplacer vers le nord, jusqu'à 23°, ces deux dates se rapprochent du solstice, et l'une de l'autre. Finalement, à 23° de latitude nord, vous constaterez que les deux dates ont convergé vers une seule : le sosltice d'été. C'est la limite en latitude, des zones où le Soleil passe au zénith. Par définition, cette limite est le Tropique du Cancer. Bien sûr, on peut effectuer les manipulations symétriques dans l'hémisphère sud, et mettre en évidence le Tropique du Capricorne. Par conséquent, les tropiques délimitent, à la surface de la Terre, une bande dans laquelle le Soleil passe une à deux fois par an au zénith.

Maintenant, vous avez une maîtrise suffisante de la sphère armillaire pour trouver vous-même les manipulations à faire pour mettre en évidence les cercles polaires. Ils jouent un rôle symétrique à celui des Tropiques, mais le phénomène sur lequel ils sont basés est le Soleil de minuit. Ils délimitent les calottes polaires, dans lesquelles le Soleil ne se couche pas au moins un jour par an.

**Autre inclinaison de l'équateur**

Que se passerait-il si l'inclinaison de l'équateur sur l'écliptique avait une valeur différente de 23° ? Il est difficile de construire une sphère armillaire dans laquelle cette inclinaison serait réglable. Mais l'animation montrant le coucher de Soleil permet de le faire très simplement !



la sphère complète

**Plans de la sphère**

Vous pouvez construire votre propre sphère armillaire sur le modèle décrit, en téléchargeant les plans.

---=OO=---




## *Plan*

**Orbites**
Positions relatives
Révolution synodique
Jour sidéral
Année sidérale
Perturbations
Points de Lagrange
Orbite apparente
Planètes telluriques et géantes
Distances au Soleil
Tableau relatif aux orbites

**Globes**
Energie reçue
Albédo
Effet de serre
Tableau relatif aux globes
Diamètre
Masse
Conditions à la surface
Différenciation
Composition
Géologie
Volcanisme
Champ magnétique
Magnetosphère

**Atmosphères**
Création
Conservation
Evolution

Examen des planètes
Limite du système solaire
Curiosités

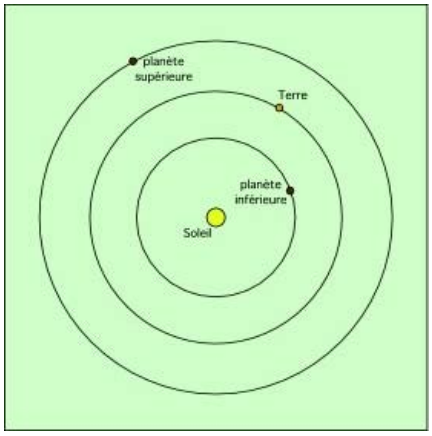
### Positions relatives des planètes

Les positions relatives des planètes sont nommées par rapport à l'observateur, donc par rapport à la Terre. Ce sont, dans le mouvement apparent qu'elles décrivent autour de la Terre, les points particuliers, qui présentent une caractéristique géométrique remarquable : l'opposition, les conjonctions, les élongations et les quadratures. Positionnons d'abord les planètes par rapport à la Terre :

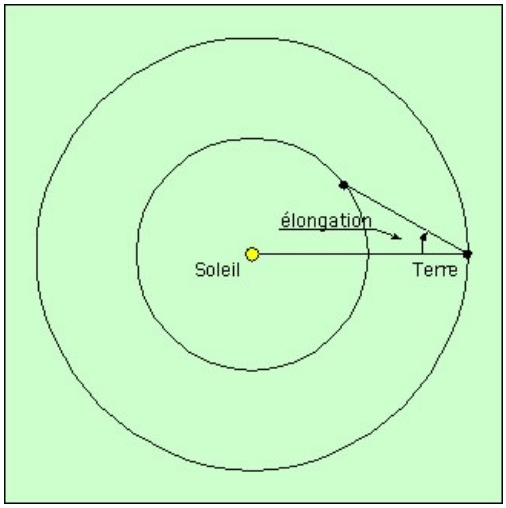
On appelle *planètes supérieures* celles dont l'orbite **contient** l'orbite de la Terre.

On appelle *planètes inférieures* celles dont l'orbite **est contenue** dans l'orbite de la Terre.

Les planètes inférieures sont donc celles qui sont plus proches du Soleil que la Terre, les supérieures plus lointaines.



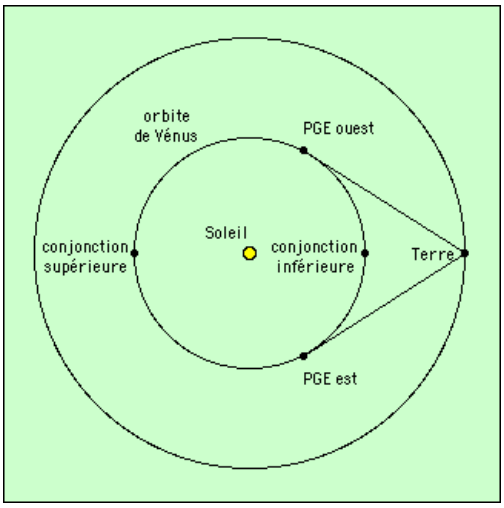

On repère une planète, dans le ciel, par rapport à son éloignement apparent du Soleil (vu depuis la Terre). L'angle entre la position du Soleil et celle de la planète se nomme *élongation*. Le schéma montre le système solaire vu du nord :




Ce schéma montre l'élongation pour une planète inférieure.

**Planètes inférieures**

En tournant autour du Soleil, les planètes se présentent l'une par rapport à l'autre sous des aspects différents. Les anciens astronomes ont donné des noms à ces positions particulières, qui présentent un intérêt. Le schéma ci-dessous montre celles qui correspondent à une planète inférieure (plus proche du Soleil), vue de la Terre :

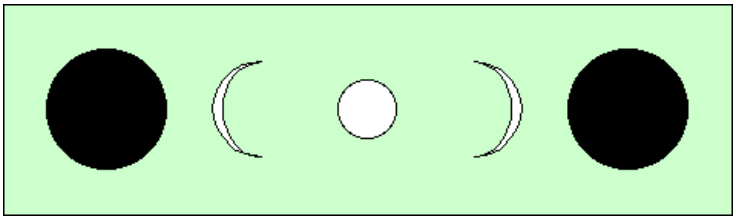



Le cercle extérieur représente l'orbite de la Terre. Le cercle intérieur représente l'orbite de Vénus (ou de Mercure). La première chose à remarquer est que la planète ne se verra dans le ciel qu'au voisinage du Soleil. Vénus ne sera jamais visible à minuit ! (Pour cela, elle devrait être à l'opposé du Soleil). Et Mercure étant encore plus proche du Soleil, s'en éloignera encore moins, ce qui la rend difficilement observable.

Lorsque Vénus se trouve exactement entre le Soleil et la Terre, on dit qu'elle est en *conjonction inférieure* avec le Soleil (du latin *cum* : avec). A ce moment-là, le côté éclairé par le Soleil est totalement invisible depuis la Terre. On est exactement dans la même situation que pour la Lune, lorsqu'elle est nouvelle : Vénus présente elle aussi des phases marquées.

Lorsque la Terre, Vénus et le Soleil forment un angle droit, l'angle qui sépare Vénus du Soleil, vu depuis la Terre (son élongation), est le plus grand possible. On dit pour cela que Vénus est à sa *plus grande élongation*. On précise Ouest, si elle est à l'Ouest du Soleil, autrement dit si on la voit se lever le matin un moment avant le Soleil, ou bien Est si elle se couche un moment après le Soleil le soir.

Lorsque Vénus est alignée avec le Soleil, mais qu'elle se trouve de l'autre côté, on dit qu'elle est en *conjonction supérieure*. Les adjectifs inférieure et supérieure sont ici encore relatifs à la distance. Dans ce cas, on voit le côté totalement illuminé par le Soleil, comme la pleine lune. Mais remarquez qu'à la conjonction inférieure, Vénus est beaucoup plus proche qu'à la conjonction supérieure. De part et d'autre de la conjonction inférieure, Vénus apparaît comme un fin croissant, alors qu'à la conjonction supérieure elle se montre comme un tout petit disque plein.

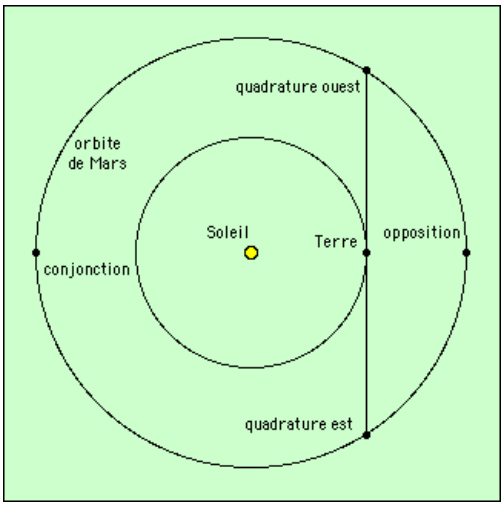


Lors d'une conjonction supérieure, le Soleil devrait se trouver exactement devant Vénus ! Ce n'est pas le cas, parce que l'orbite de la planète n'est pas exactement dans le même plan que celle de la Terre, et Vénus passe un peu au-dessus ou un peu au-dessous du Soleil. Les situations

où elle passe exactement devant sont très rares (passages).

**Planète supérieure**

Pour une planète supérieure, les choses se présentent un peu différemment, car l'orbite de la Terre se trouve contenue entièrement dans l'orbite de la planète considérée. De ce fait, cette dernière peut se trouver n'importe où dans le ciel : son élongation varie de 0 à 360°.




Lorsque la planète se trouve de l'autre côté du Soleil, et alignée avec lui, la situation est la même que pour une planète inférieure ; on parle encore de *conjonction* (son élongation est nulle). Mais la planète ne pouvant jamais passer entre la Terre et le Soleil, il n'y aura pas de conjonction inférieure. La conjonction supérieure étant la seule possible, on omet le qualificatif.

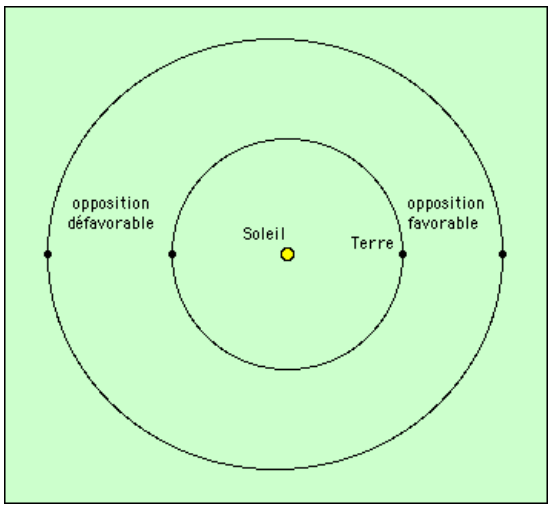
Lorsque la planète est dans une direction perpendiculaire à celle du Soleil, elle passe au méridien au moment où le Soleil se couche ou se lève (élongation de ± 90°). On appelle ces instants les *quadratures*, *quadrature ouest* quand la planète est à l'Ouest du Soleil, *i.e*. lorsqu'elle est au méridien au lever du Soleil, *quadrature est* sinon.

Remarque : au moment des quadratures, l'angle planète-Terre-Soleil est droit, et la ligne planète-Terre est tangente à l'orbite de la Terre. On constate donc que, vu de la planète, la Terre est à sa plus grande élongation. Les quadratures des planètes supérieures sont donc les plus grandes élongations de la Terre, vue de la planète.

Lorsque la Terre se trouve entre le Soleil et la planète, on voit que la planète est opposée au Soleil : on parle d'*opposition* (élongation de 180°). C'est donc le moment le plus approprié pour l'observer :

- sa distance à la Terre est minimale ;
- elle est au méridien à minuit.

Ajoutons que les orbites des planètes étant elliptiques, la distance à l'opposition n'est pas toujours la même. Dans le cas de Mars, dont l'orbite est assez excentrique, la variation est significative. On parle d'*opposition favorable* (à l'observation) ou d'*opposition périhélique* lorsque la distance est minimale.




L'excentricité de Mars vaut 0,09 ; sa distance moyenne au Soleil est de l'ordre de 228 millions de km. A son périhélie, Mars se trouve donc à 207 millions de km du Soleil, alors qu'à l'aphélie elle s'en éloigne à 248 millions. L'orbite de la Terre étant sensiblement circulaire, la distance entre les deux planètes à l'opposition varie entre 248 - 150 = 98 et 207 - 150 = 57 millions de kilomètres. Comme on le voit, la différence est très significative.

Enfin, à l'opposition on voit l'hémisphère éclairé par le Soleil exactement en face (au moment de la conjonction, la planète est inobservable, car cachée par le Soleil). Dans les situations intermédiaires, on voit une partie seulement de la face éclairée. La planète présente donc un effet de phase, comme la Lune, mais elle ne peut jamais être nouvelle. Cet effet de phase, assez sensible pour Mars, est déjà très faible pour Jupiter, à

cause de l'éloignement. Pour Saturne, et *a fortiori* pour Uranus, Neptune et Pluton, il est pratiquement négligeable.

**Révolution synodique**

La *révolution synodique* est le temps au bout duquel une planète revient dans un même alignement avec la Terre par rapport au Soleil. Ce n'est pas une propriété intrinsèque d'une planète ; elle est relative à la Terre. Par exemple, c'est la durée entre deux oppositions successives pour une planète supérieure.

La révolution synodique se calcule donc simplement à partir de la durée des années sidérales de la planète et de la Terre. Soient S la révolution sidérale d'une planète ; σ sa révolution synodique ; et T la révolution sidérale de la Terre.

Au bout du temps T, la Terre a effectué exactement un tour autour du Soleil, et se retrouve alignée avec la même étoile. Au temps T correspond le tour complet, donc 2 π. Pendant une unité de temps, elle effectue donc la fraction de tour $\omega_T = 2 \pi / T$. C'est la vitesse angulaire. Et pendant un temps t, elle fera t fois plus, donc 2 π t / T.

Le même raisonnement s'applique à l'autre planète, qui dans le même temps t effectue la fraction de tour : 2 π t / S.

**Si la planète est plus lointaine** que la Terre, la Terre va plus vite qu'elle. Au bout du temps t, l'écart entre elles sera 2 π t / T - 2 π t / S.

Pour que l'opposition revienne, il faut que cet écart atteigne 2 π. Puisqu'elle revient par définition au bout du temps t = σ, on a :

$$2 \pi \sigma / T - 2 \pi \sigma / S = 2 \pi$$

On peut simplifier par 2 π :

σ / T - σ / S = 1

d'où :

$$\frac{1}{\sigma} = \frac{1}{T} - \frac{1}{S}$$

Si la planète est plus proche du Soleil que la Terre (Mercure ou Vénus), elle va plus vite que la Terre, et l'écart est : 2 π t / S - 2 π t / T.

La suite du raisonnement est la même, et on a seulement un changement de signe :

$$\frac{1}{\sigma} = \frac{1}{S} - \frac{1}{T}$$

Remarquez que si la révolution sidérale S de la planète augmente fortement (cas des planètes lointaines), 1/S devient très petit, voisin de 0. Donc, plus on s'éloigne du Soleil, plus la révolution synodique se rapproche de la révolution sidérale de la Terre : σ → T.

Le tableau ci-dessous donne les valeurs de la révolution synodique, et les distances et diamètres apparents pour les positions extrêmes (plus proche à la Terre, et plus lointaine). Vous vérifierez que la révolution synodique des planètes d'Uranus à *Pluton* est très proche de la révolution sidérale de la Terre.

| **planète** | | **Mercure** | **Vénus** | **Mars** | **Jupiter** | **Saturne** | **Uranus** | **Neptune** | ***Pluton*** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **révolution synodique** | | 116 j | 1 an 218 j | 2 an 49 j | 1 an 33 j | 1 an 12 j | 1 an 4 j | 1 an 2 j | 1 an 1 j |
| **opposition/ conjontion inférieure** | **distance à la Terre (UA)** | 0,53 à 0,7 | 0,277 | 0,36 à 0,64 | 4 | 8,5 | 18 | 29 | 28 à 47 |
| | **diamètre apparent** | 9" à 12" | 60" | 14" à 26" | 49,5" | 20" | 4" | 2" | 0,1" à 0,06" |
| **conjonction (supérieure)** | **distance à la Terre (UA)** | 1,3 à 1,47 | 1,7 | 2,5 | 6 | 10,5 | 20 | 31 | 30 à 49 |
| | **diamètre apparent** | 4" à 5" | 10" | 3" | 33" | 15" | 3,5" | 2,2" | 0,1" à 0,06" |

On constate que seule Vénus, à la conjonction inférieure, présente un diamètre apparent à la limite de la perception à l'œil nu (mais regardez le schéma plus haut qui montre les phases de Vénus, et vous constaterezqu'elle est alors dans la direction du Soleil, et difficile à observer). Si vous tenez compte de la turbulence atmosphérique qui a limité le pouvoir séparateur des meilleurs télescopes à 1/2 seconde d'arc, vous comprendrez qu'il était impossible, avant l'ère spatiale, de donner la moindre indication pertinente sur les planètes lointaines : le diamètre apparent de Neptune vaut à peine 4 fois le seeing…

Pluton est laissée dans le tableau (en italique), mais ce n'est pas une planète principale comme on l'a nommée longtemps. Depuis 1992, on a découvert de nombreux corps qui partagent le même type d'orbite, dans la même zone transneptunienne, la même composition (glaces + silicates). On en a même trouvé un plus gros que Pluton (Eris). Mais Pluton reste le prototype de ces objets, ce qui justifie sa place ici.

**Jour sidéral, jour solaire**

Les planètes tournent sur elles-mêmes, nous en avons l'évidence par la succession des jours et des nuits. Mais la durée du jour est variable tout au long de l'année, ce qui nous oppose une vraie difficulté lorsqu'on veut préciser les choses. Pire encore, le midi vrai, instant où le Soleil passe au méridien, n'est pas régulier. Tout ceci s'explique très bien en considérant les différents mouvements de la Terre, mais nécessite des calculs complexes.

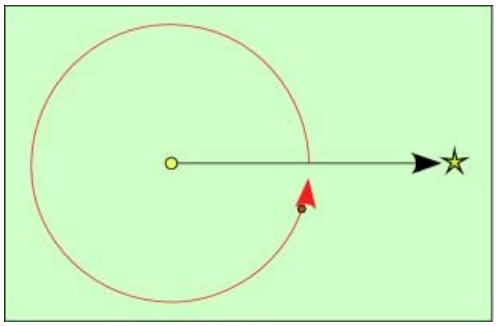
Or l'observation des étoiles montre une bien plus grande régularité. Si on observe le ciel toutes les nuits, on constate rapidement qu'une même étoile repasse par le méridien régulièrement avec une période de 23 h 56 mn 4 s. Les étoiles étant situées très loin, on peut considérer qu'elles représentent un repère fixe par rapport auquel on peut mesurer la rotation de la Terre. C'est le jour stellaire, qui ramène la même étoile au méridien. On nomme *jour sidéral* la période qui ramène le point vernal au méridien du lieu. La précession des équinoxes produit une légère différence entre le jour stellaire et le jour sidéral : elle est de 0,0084 s, et 1 jour sidéral = 23 h 56 mn 4,0905 s. Le jour sidéral est d'une grande régularité, assurée par la masse énorme de la Terre (inertie).

Une planète se déplaçant autour du Soleil, le *jour solaire* (sa période de révolution par rapport au Soleil, la durée qui sépare deux midis successifs) est un peu différente. Au bout d'un jour sidéral, la planète s'est déplacée par rapport au Soleil, qui n'est plus dans l'alignement. Pour lui refaire face, la planète doit tourner encore un peu ; le jour solaire est un peu plus long que le jour sidéral. Pour la Terre, la différence est d'un peu moins de 4 minutes.

Le jour solaire est le résultat de deux mouvements : rotation de la planète sur elle-même, et déplacement autour du Soleil. La combinaison de ces mouvements est complexe ; elle est détaillée dans un chapitre à part.

**Année sidérale**

L'*année sidérale* est le temps que met la Terre, dans son mouvement autour du Soleil, pour revenir en face de la même étoile. Il ne faut pas la confondre avec l'*année tropique*, ou année des saisons, qui est l'intervalle de temps entre deux équinoxes de printemps successifs. Il y aurait identité entre les deux s'il n'y avait pas la précession des équinoxes !



L'année sidérale est un peu plus longue que l'année tropique, elle vaut 365,25636 jours. Le retour de l'équinoxe de printemps est donc un peu en avance par rapport aux étoiles.

**Perturbations**

A chaque instant, on peut caractériser l'orbite d'une planète par un petit nombre de paramètres, qui définissent la forme et la position de l'orbite dans l'espace. Si on considère le Soleil tout seul dans l'espace, avec la Terre qui tourne autour, on a ce qu'on appelle le problème des deux corps. Les équations de la gravitation permettent de calculer très facilement la forme de l'orbite, de montrer que c'est une ellipse, de calculer la vitesse de la Terre en chaque point de son orbite etc.

Mais si on ajoute Jupiter pour pimenter un peu la sauce, on a de grosses surprises (c'est normal avec une planète géante…). Lorsque la Terre se trouve placée entre le Soleil et Jupiter, elle subit l'attraction de chacun en sens inverse, et l'attraction de Jupiter diminue donc d'autant celle du Soleil. Par contre, lorsque Jupiter est du même côté de la Terre que le Soleil, son attraction s'ajoute. Entre ces deux positions extrêmes, tous les intermédiaires existent, et à chaque instant la Terre est attirée dans une direction qui n'est pas celle du centre du Soleil, mais qui est celle de Jupiter. On dit que le mouvement de la Terre est perturbé (ou troublé) par la présence de Jupiter.

Mathématiquement, ce problème, dit des trois corps, est beaucoup plus difficile que le précédent. Il existe essentiellement deux façons de le résoudre : les méthodes dites des *perturbations générales* (calcul analytique, on recherche la forme de l'orbite) ou des *perturbations spéciales* (on intègre le mouvement par des méthodes de calcul numérique).

Les perturbations générales permettent d'expliquer le mouvement, mais elles représentent une théorie difficile. C'est pourquoi, surtout maintenant avec l'aide des ordinateurs, on préfère utiliser les perturbations spéciales pour prédire les positions.

Dans les cas particuliers présentés ci-dessus (Terre, Soleil, Jupiter) des simplifications permettent de procéder à la méthode analytique. On définit alors à chaque instant les éléments de l'orbite en supposant que Jupiter a brusquement disparu. C'est une orbite képlérienne. Il ne reste qu'à calculer de quelle manière les éléments de cette orbite changent sous l'influence de Jupiter. Ces élément variables sont appelés *éléments osculateurs*, et l'orbite qu'ils décrivent est *l'orbite osculatrice*.

**Stabilité des orbites**

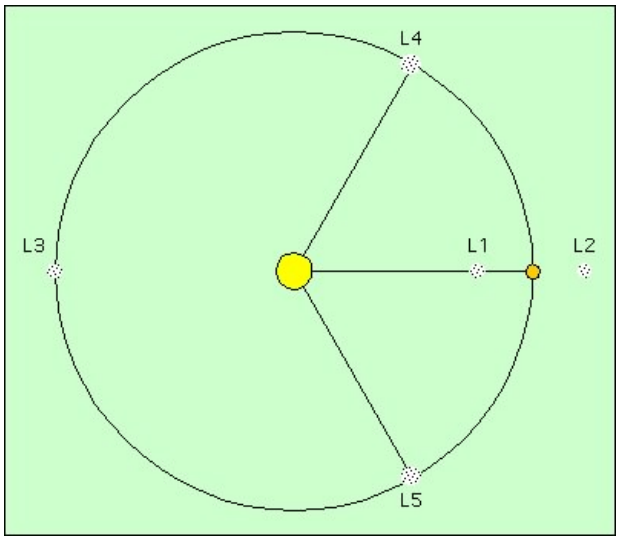
Depuis quelques années ou dizaines d'années, on s'est posé le problème de la stabilité des orbites. En observant sur terre des fossiles vieux de centaines de millions d'années, on peut vérifier que la rotation de la Terre a ralentit, car à cette époque le jour durait 20 heures seulement (ce qui faisait davantage de couchers de Soleil, mais y avait-il un Petit Prince pour les admirer ? ). On peut se demander aussi si l'année avait la même valeur ? Pour que celle-ci soit différente, il faudrait bien sûr que la Terre soit sur une autre orbite, afin de respecter les lois de Kepler.

Les travaux récents, avec de nombreuses simulations sur ordinateur à l'appui, montrent que les mouvements des planètes, à long terme, sont instables et même chaotiques. L'axe de rotation de la Terre peut très bien changer d'orientation, ce qui bouleverserait les saisons. Mais ceci est pour plus tard, et il y aura beaucoup de couchers de Soleil à voir avant…

**Les points de Lagrange**

Lagrange a étudié le problème des trois corps : trouver les orbites de trois objets massifs en interaction gravitationelle ; ce problème n'admet pas de solution analytique, c'est-à-dire qu'il n'existe pas en général de formule mathématique donnant la position de chaque objet (le problème des deux corps admet la solution bien connue représentée par les lois de Kepler). En considérant que deux des trois corps ont une masse importante, et le troisième une masse négligeable, il a trouvé une solution stable au problème (les deux corps massifs suivront un mouvement képlérien).

Considérons le cas du Soleil et de Jupiter comme corps massifs. Lagrange a montré qu'il existe trois points, dans le plan de l'orbite de Jupiter, où de petits objets pourraient demeurer. Il existe aussi deux autres points situés sur l'axe qui joint la Terre au Soleil, et de part et d'autre de la Terre. Ces points sont nommés points de Lagrange, désignés L1 à L5, et sont représentés sur le schéma ci-dessous :




Un petit corps lâché en l'un de ces points, sans vitesse initiale par rapport aux deux corps massifs, doit y rester indéfiniment. C'est-à-dire que l'ensemble tourne en bloc : un objet en L1 reste constamment entre Jupiter et le Soleil, en L2 il reste opposé au Soleil… En L4 et L5, les objets partagent l'orbite de Jupiter.

Mais une analyse plus fine de la situation montre une grande différence entre ces points : si on pousse un peu un objet situé en L1, L2 ou L3, il s'écartera un tout petit peu de son point d'équilibre. Mais, loin d'y revenir, il va s'en éloigner indéfiniment… On dit quece sont des points d'équilibre instable. Vous pouvez comprendre cela en imaginant une tige de métal : si vous la suspendez comme un pendule, vous pourrez l'écarter de sa position d'équilibre verticale, elle y reviendra vite. Par contre, vous pouvez aussi la mettre en équilibre à l'envers, la tige vers le haut. Mais l'expérience quotidienne nous indique bien que cet équilibre si difficile à atteindre, est très instable, et la tige va retomber.

Les deux points L4 et L5 sont par contre stables : si un objet qui s'y trouve en est écarté légèrement, par suite d'une perturbation, il y reviendra spontanément. Dans ces conditions, on peut imaginer que de petits astéroïdes qui se seraient trouvés sur l'orbite de Jupiter y soient restés. Nous verrons que c'est le cas non seulement pour Jupiter, mais pour d'autres planètes aussi, et que ces points seront utilisés par l'astronautique pour autoriser des observations impossibles autrement.

**Orbites apparentes**

Vues depuis la Terre, les orbites des planètes présentent des particularités.

Tout d'abord, les deux planètes inférieures (plus proches du Soleil), semblent se balancer de part et d'autre du Soleil. On ne les observe jamais très loin de lui, et donc on ne peut les observer qu'en début ou en fin de nuit. L'observation de Mercure est de ce fait très difficile, bien que la planète soit assez lumineuse.

La composition des mouvements de la Terre et d'une planète fait décrire à cette dernière, sur le fond des étoiles, une trajectoire apparente curieuse, présentant parfois des boucles. La plupart du temps, la planète semble se déplacer sur le ciel dans le sens direct. Mais parfois, elle s'arrête, puis repart en arrière. Pendant quelques temps, elle se déplace dans le sens rétrograde, puis s'arrête à nouveau pour repartir dans le sens direct. Ce comportement s'appelle *rétrogradation*.

On peut le représenter par une Animation : rétrogradation d'une planète supérieure.

**Classification des planètes**

Il y a autour du Soleil 9 planètes, dont on a déjà vu les orbites. Nous allons voir maintenant leur constitution. On les classe en deux groupes, en excluant Pluton dont on ne sait vraiment pas grand-chose, aucune sonde n'étant allé l'explorer. Le premier groupe est celui des planètes *Telluriques* (mot qui signifie "semblables à la Terre"), il comprend les 4 premières à partir du Soleil, donc Mercure, Vénus, la Terre et Mars. Ces planètes-là sont rocheuses, constituées essentiellement de matériaux réfractaires, des silicates. Elles contiennent aussi une grande quantité de fer et de nickel (c'est la constitution du noyau de la Terre). Pour cette raison, leur densité est élevée.

Le deuxième groupe est celui des *planètes géantes*. Il comprend Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune. Jupiter étant la plus massive de toutes, on les appelle également *planètes joviennes*. Ce sont des planètes gazeuses, composées pour l'essentiel d'hydrogène, de méthane (le gaz des marais), et enfin d'ammoniac ! Un vrai paradis. Ajoutons à cela que ces planètes ne possèdent pas de sol, puisqu'elles sont gazeuses. En descendant vers le centre on subit une pression de plus en plus élevée, jusqu'au moment où les gaz vont se liquéfier, comme dans une bouteille

de butane. Si on s'enfonce encore dans cet océan, on pourra sans doute trouver de l'hydrogène à l'état métallique (donc conducteur de l'électricité). Enfin, on pense aussi que tout au centre ces planètes abritent un noyau rocheux, comme la Terre, mais 10 fois plus massif (donc 2,15 fois plus gros) !

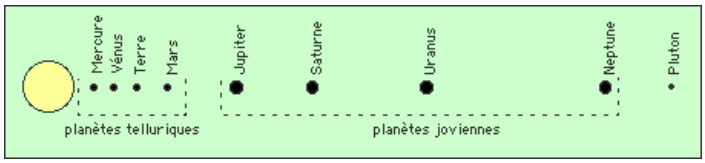



Schéma très simplifié du système solaire

Les échelles ne sont pas respectées.

La distinction entre ces deux groupes de planètes, qui sont de nature vraiment dissemblable et qui se séparent en fonction de leurs distances au Soleil, pose un problème pour expliquer la formation du système solaire : pourquoi les planètes rocheuses sont-elles près du Soleil, et les gazeuses loin ? Nous donnerons l'explication plus loin, en étudiant la formation du système solaire.

**Distances au Soleil**

Lorsqu'on a réussi à calculer les distances des planètes au Soleil, on a tout naturellement cherché une loi qui permette de les représenter. Titius a obtenu un résultat de la manière suivante :

Formons une suite de nombres en commençant par 0, puis 0,3, et ensuite en **doublant** à chaque fois :

0 - 0,3 - 0,6 - 1,2 - 2,4 - 4,8 - 9,6 - 19,2 - …

Maintenant, on ajoute 0,4 à chaque nombre :

0,4 - 0,7 - 1,0 - 1,6 - 2,8 - 5,2 - 10,0 - 19,6 - …

Si on prend la distance de la Terre au Soleil pour unité, on voit que les nombres obtenus ci-dessus représentent assez bien les distances des planètes au Soleil. Mettons les chiffres obtenus en correspondance avec les distances exprimées en unités astronomiques :

| | **Mercure** | **Vénus** | **Terre** | **Mars** | | **Jupiter** | **Saturne** | **Uranus** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **nombre de Titius** | 0,4 | 0,7 | 1,0 | 1,6 | 2,8 | 5,2 | 10,0 | 19,6 |
| **distance en UA** | 0,387 | 0,723 | 1,0 | 1,523 | | 5,202 | 9,554 | 19,218 |

On remarque qu'Uranus, découverte plus tard, s'adapte bien à cette suite. Et également que la valeur 2,8 ne correspond à aucune planète connue ! Cette loi due à Titius n'a pas été retenue pas ses contemporains. Elle a été reprise plus tard par Bode, qui l'a popularisée. Depuis, on la nomme loi de Titius-Bode.

Le vide à la distance 2,8 est apparu comme un manque à combler, et les astronomes se sont attelés à la tâche. Ce fut fait par la découverte des astéroïdes. Entre Mars et Jupiter, on trouve des milliers de petits corps, semblables à des planètes telluriques, mais beaucoup plus petits. Ils tournent autour du Soleil sur des orbites très proches les unes des autres, et qui sont sensibles à l'influence de Jupiter. Ils forment une ceinture autour du Soleil, nommée *ceinture des astéroïdes*. Ces petits corps sont des restes inutilisés de la formation du système solaire : Jupiter les a empêchés de former une planète, mais même s'ils avaient pu se rassembler en un seul corps, il aurait été très petit.

Et ce n'est pas tout ! Au-delà de Neptune, on connait maintenant de nombreux petits corps de composition un peu différente. Ils forment une autre ceinture autour du Soleil, beaucoup plus éloignée que l'autre et donc plus froide. On a découvert en 1930 un objet de type planétaire, qui a été nommé Pluton, et qui a été considéré comme la neuvième planète. Mais depuis, on a découvert d'autres objets sur des orbites assez semblables, et de taille allant jusqu'à la moitié de celle de Pluton. Récemment, un nouvel objet encore a été observé dans cette région du système solaire, qui est sans doute plus gros que Pluton. L'ensemble de tous ces objets est nommé *ceinture de Kuiper*.

Partons encore un peu plus loin du Soleil. Sa gravité joue encore, et s'il y avait des objets au-delà de la ceinture de Kuiper, ils feraient partie de notre système. Malheureusement, on est maintenant si loin du Soleil que les corps qui se trouveraient là seraient très mal éclairés, et donc très peu lumineux. Une planète comme la Terre ne serait pas visible avec les moyens actuels. Et on n'a rien observé dans cette région… Mais certaines comètes ont des orbites très aplaties, qui montrent qu'elles proviennent de ces confins du système solaire. Leurs inclinaisons sont quelconques, elles proviennent de toutes les directions de l'espace. On considère qu'elles forment un système sphérique centré sur le Soleil. C'est le *nuage de Oort*.

Le système solaire peut maintenant se représenter comme ceci :

<table>
<tr><td rowspan="3">Soleil</td><td rowspan="2">planètes telluriques</td><td rowspan="2">ceinture des astéroïdes</td><td colspan="2">planètes géantes</td><td rowspan="2">ceinture de Kuiper</td><td rowspan="2">nuage de Oort</td></tr>
<tr><td>gazeuses</td><td>glacées</td></tr>
<tr><td>Mercure, Vénus, la Terre, Mars</td><td>Céres, Pallas, Vesta, Junon…</td><td>Jupiter, Saturne</td><td>Uranus, Neptune</td><td>Pluton-Charon, Varuna, Chaos…</td><td>milliards de comètes</td></tr>
<tr><td colspan="2">système plat</td><td>système épais</td><td colspan="2">système plat</td><td>système épais</td><td>système sphérique</td></tr>
</table>

Jupiter et Saturne sont nommées aujourd'hui *Géantes Gazeuses*, alors qu'Uranus et Neptune sont les *Géantes Glacées*. La raison de cela est que

le noyau des deux premières n'est qu'une petite proportion de la masse totale de la planète, alors que le noyau des deux autres est majoritaire. Celles-là sont donc constituées principalement de roches et de glaces, ce qui justifie cette appellation.

**Tableau relatif aux orbites**

| Planète | demi grand-axe | | vitesse | année sidérale | excentricité | inclinaison orbite | inclinaison axe rotation | nb satellites |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $10^6$ km | /Terre (UA) | km/s | | | | | |
| **Mercure** | 58 | 0,38 | 48 | 87 j 23 h 15 mn 22 s | 0,21 | 7° | 2° | 0 |
| **Vénus** | 108 | 0,72 | 35 | 225 j | 0,01 | 3° 23' | 177° 18' | 0 |
| **Terre** | 150 | 1 | 30 | 365 j 6 h 9 mn 9,75 s | 0,02 | 0° | 23° 26' | 1 |
| **Mars** | 228 | 1,52 | 24 | 1 an 321 j | 0,09 | 1° 51' | 23° 59' | 2 |
| **Jupiter** | 778 | 5,20 | 13 | 11 ans 314 j | 0,05 | 1° 18' | 3° 7' | 63 |
| **Saturne** | 1 430 | 9,54 | 9,6 | 29 ans 167 j | 0,06 | 2° 29' | 26° 44' | 31 |
| **Uranus** | 2 871 | 19,19 | 6,8 | 84 ans 7 j | 0,05 | 0° 46' | 97° 51' | 27 |
| **Neptune** | 4 505 | 30,06 | 5,4 | 164 ans 280 j | 0,01 | 1° 46' | 29° 35' | 13 |
| ***Pluton*** | 5 914 | 39 | 4,7 | 248 ans 157 j | 0,25 | 17° 12' | 98° 18' | 1 |

L'année tropique pour la Terre vaut 365 j 5 h 48 mn 46 s.

**Petite remarque** : dans le disque du système solaire (tout ce qui tourne autour du Soleil, sauf le nuage de Oort), les distances au Soleil vont de 58 millions de km pour Mercure, à 5.914 millions de km pour Pluton (représentatif de la Ceinture de Kuiper). Donc, elles varient dans un rapport de 1 à 1.000. Pluton est 1.000 fois plus loin du Soleil que Mercure.

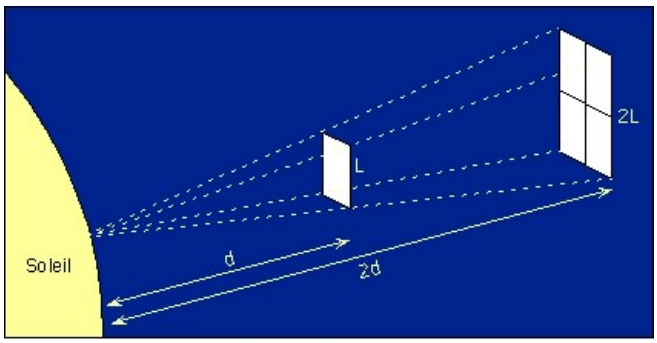
## *Les globes*

### Température

Déterminer la température d'une planète en fonction de sa position dans le système solaire n'est pas très difficile, mais nécessite quelques soins. Plusieurs paramètres jouent, pas tous dans le même sens.

### Energie brute reçue du Soleil

La Terre tourne autour du Soleil à 150 millions de km. Cette distance va nous servir de repère pour comprendre les conditions qui règnent à la surface des autres planètes. A une distance double, la lumière reçue est étalée sur une surface quadruple :




Sur ce schéma, vous voyez une coupe ; vérifiez en mesurant d, 2d, L et 2L.

Les deux zones blanches représentent donc deux carrés de côté L et 2L, donc de surfaces $L^2$ et 4 $L^2$. Par conséquent, les mêmes rayons solaires couvriront une surface 4 fois bn plus grande, donc la même chaleur sera répartie sur une surface quadruple, et une même surface en recevra 4 fois moins. Plus généralement, le rapport des chaleurs reçues est l'inverse du carré du rapport des distances :

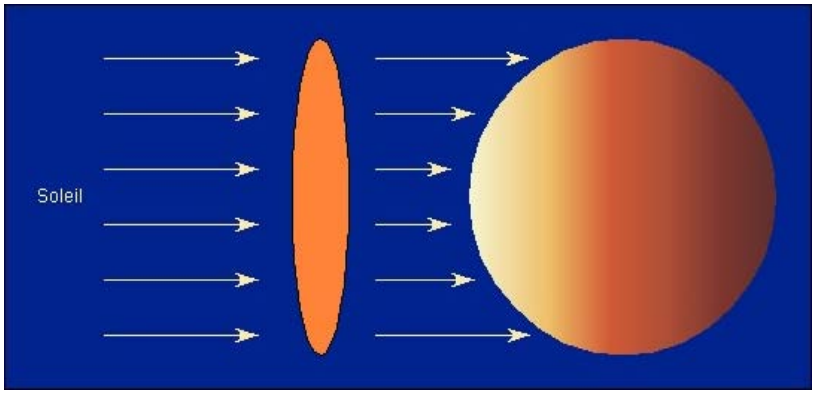
$$\frac{E_p}{E_T} = \left(\frac{d_T}{d_p}\right)^2$$

Dans cette formule, on a remplacé la chaleur, notion mal définie, par l'énergie reçue du Soleil qui a un sens physique plus précis. La chaleur dépend bien sûr de l'énergie reçue. L'énergie reçue par la planète ($E_p$) se calcule donc en multipliant celle reçue par la Terre ($E_T$) (à 150 millions de km) par le rapport des distances au carré :

$$E_p = E_T \left( \frac{d_T}{d_p} \right)^2$$

Nous utiliserons cette formule pour chaque planète. $d_T$ et $d_p$ sont respectivement les distances de la Terre et de la planète au Soleil. C'est la *loi de Pogson*.

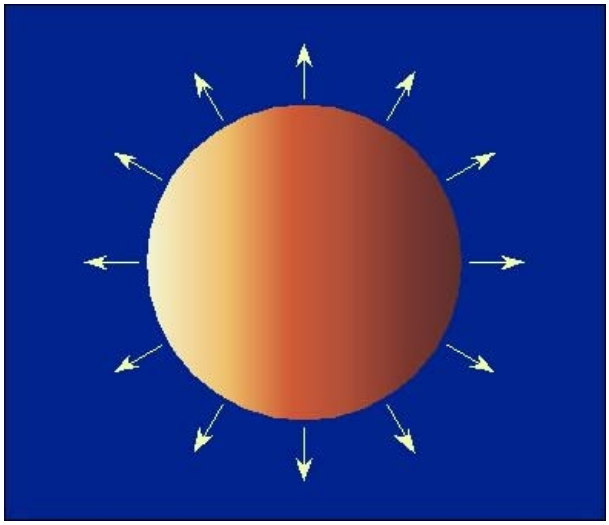
Il faut maintenant déterminer comment se répartit l'énergie arrivant sur la planète.




Le schéma montre la planète, les rayons du Soleil qui arrivent de gauche, et un cercle de même rayon r que la planète. La lumière qui traverse ce cercle va toucher la planète, celle qui passe à l'extérieur continue son chemin dans l'espace. La surface de ce cercle est $s = \pi r^2$, et l'énergie qui frappe la planète lui est proportionnelle. Cette énergie contribue au chauffage de la planète. Mais elle ne touche que l'hémisphère tourné vers le Soleil, alors que l'autre est dans la nuit. Pour chauffer tout le sol, cette énergie se répartira sur la totalité de la surface de la planète, c'est à dire d'une sphère de rayon r. La surface de cette sphère est $S = 4 \pi r^2$, quatre fois plus grande. Par conséquent, l'énergie reçue sur chaque mètre-carré de la planète ne sera que le quart de celle qui arrive sur chaque mètre carré à son voisinage.

**Refroidissement**

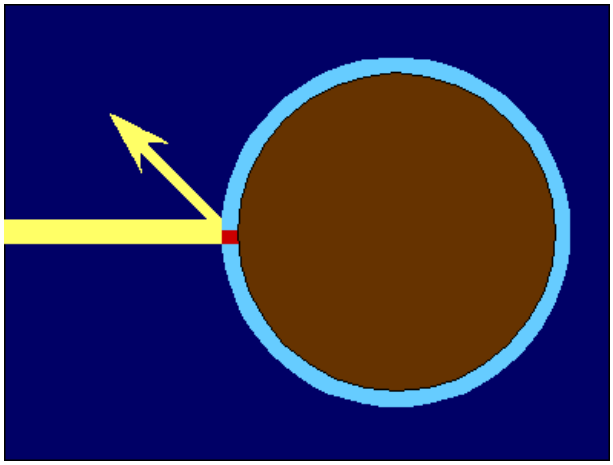
Toute planète est isolée dans l'espace froid, et donc perd de sa chaleur par rayonnement. Ceci se produit dans toutes les directions de l'espace, comme le montre le schéma suivant :



En première approximation, c'est un rayonnement de corps noir, donc la longueur d'onde n'est fonction que de la température. Etant donné le niveau des températures planétaires, le maximum d'intensité du rayonnement se situe dans l'infra-rouge.

**Albédo**

La température à la surface d'une planète doit être fonction des phénomènes que nous venons de décrire. Sont-ils les seuls à considérer ? Notre analyse est valable si toute l'énergie reçue est absorbée et contribue au chauffage, mais ce n'est pas le cas ! L'atmosphère ou le sol renvoie une partie de l'énergie reçue dans l'espace, comme la surface d'un lac reflète une partie de la lumière du Soleil (c'est grâce à cette partie que nous voyons la planète). Seule une fraction de l'énergie disponible chauffera la planète. *L'albédo* caractérise la blancheur de la planète (*alba* signifie *blanc* en latin), et indique la proportion de lumière renvoyée. Un albédo de 1 correspond à un miroir, qui renvoie toute la lumière reçue. Un albédo de 0 correspondrait à un corps qui absorbe tout rayonnement.



L'albédo est donc une notion importante pour comprendre la température qui règne au sol d'une planète. Sur le schéma, on voit une planète pourvue d'une atmosphère (en bleu clair). L'atmosphère réfléchit une partie de la lumière solaire dans l'espace, et le reste (représenté en rouge) arrive au sol. Le sol des planètes n'ayant pas d'atmosphère renvoie lui aussi une partie de la lumière incidente, mais en général elle est plus faible. Aussi l'albédo des planètes sans atmosphère et des astéroïdes est assez faible.

La chaleur au niveau du sol sera alors fonction de la proportion de lumière reçue du Soleil que l'atmosphère laisse passer. Considérons Vénus et la Terre. Vénus est à 100 millions de km du Soleil, la Terre à 150. Vénus reçoit donc $(150 / 100)^2 = 1{,}5^2 = 2{,}25$ fois plus d'énergie que la Terre. Mais l'albédo de Vénus est de 0,66. Son sol ne reçoit donc que 1 - 0,66 = 0,34 ou 34 % de l'énergie reçue. Par contre, l'albédo de la Terre est de 0,39 ; le sol de la Terre reçoit 1 - 0,39 = 0,61 ou 61 % de l'énergie disponible.

| planète | énergie reçue | albedo | fraction transmise | énergie au sol |
|---|---|---|---|---|
| Vénus | 2,25 W | 0,66 | 34 % | 0,765 W |
| Terre | 1 W | 0,39 | 61 % | 0,61 W |

Pour chaque watt qui arrive au niveau de l'orbite terrestre, il en parvient 0,61 W au sol. Mais Vénus en reçoit 1 W × 2,25 = 2,25 W, dont elle ne garde que 34 % c'est-à-dire 2,25 W × 0,34 = 0,765 W.

On voit là l'importance de l'albédo : bien que plus proche du Soleil, Vénus reçoit au sol une énergie du même ordre que celle reçue par la Terre. Mais il y a encore un effet important pour les planètes ayant une atmosphère…

**Effet de serre**

Un autre effet d'importance capitale est l'effet de serre, phénomène d'actualité sur notre Terre. La lumière visible qui arrive au sol de la planète réchauffe ce dernier. Le sol chaud va à son tour rayonner comme tout corps chaud. La nature du rayonnement émis dépend de la température. Il se situe dans l'infrarouge. Or l'atmosphère de la planète n'est pas forcément transparente à ces longueurs d'onde : l'énergie qui arrive sous forme de rayonnement visible ne parvient pas à repartir sous forme d'infrarouge. Elle est piégée par l'atmosphère, et donc réchauffe la planète. C'est *l'effet de serre*, ainsi appelé parce qu'il est responsable de la température douce à l'intérieur d'une serre de jardinage (les vitres de la serre jouent le même rôle que l'atmosphère de la planète et retiennent l'infrarouge). Il existe un effet de serre naturel sur Terre, et c'est grâce à lui que nous jouissons de températures agréables. Il peut être plus intense comme nous le verrons plus loin.

On peut résumer les effets des différents phénomènes qu'on vient d'étudier dans un tableau qui indique dans quel sens varie la température au sol d'une planète, selon sa distance au Soleil, son albédo et l'effet de serre, et en tenant compte du fait que l'énergie interceptée est répartie sur une surface 4 fois plus grande (celle de la sphère) :

| | distance au Soleil | répartition sur toute la surface | albédo | effet de serre |
|---|---|---|---|---|
| **valeur forte** | éclairement faible | éclairement divisé par 4 | énergie transmise faible | forte augmentation de température |
| **valeur faible** | éclairement fort | éclairement divisé par 4 | énergie transmise forte | faible augmentation |

Ces effets cumulés font que Vénus, par exemple, présente une température au sol beaucoup plus élevée que celle de la Terre, mais seul l'effet de serre en est vraiment responsable, car les deux autres s'annulent pratiquement.

**Tableau relatif aux globes**

| Planète | diamètre | | | aplatissement | jour sidéral | masse | | | densité | | pesanteur | | vitesse de libération km/s |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | km | /Terre | angulaire max | | | kg | /Terre | /Jupiter | g/cm$^3$ | /Terre | m/s/s | /Terre | |
| **Mercure** | 4.880 | 0,382 | 12,4" | 0 | 58 j 15 h 36 mn | $3{,}303\ 10^{23}$ | 0,055 | $1{,}74\ 10^{-4}$ | 5,43 | 0,98 | 3,78 | 0,39 | 4,3 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Vénus** | 12.075 | 0,95 | 65,3" | 0 | 243 j 0 h 14 mn | $4,870\ 10^{24}$ | 0,82 | $2,56\ 10^{-3}$ | 5,25 | 0,95 | 8,60 | 0,88 | 10,3 |
| **Terre** | 12.758 | 1 | - | 0,0034 | 23 h 56 mn 4 s | $5,976\ 10^{24}$ | 1 | $3,15\ 10^{-3}$ | 5,52 | 1 | 9,81 | 1 | 11,2 |
| **Mars** | 6.792 | 0,53 | 25,6" | 0,0052 | 24 h 37 mn 22 s | $6,421\ 10^{23}$ | 0,107 | $3,38\ 10^{-4}$ | 3,94 | 0,72 | 3,72 | 0,38 | 5,0 |
| **Jupiter** | 142.880 | 11,21 | 49,8" | 0,0483 | 9 h 50 mn 28 s | $1,900\ 10^{27}$ | 318 | 1 | 1,33 | 0,24 | 23,12 | 2,34 | 59,5 |
| **Saturne** | 120.960 | 9,45 | 20,8" | 0,098 | 10 h 13 mn 23 s | $5,688\ 10^{26}$ | 95,18 | $2,99\ 10^{-1}$ | 0,69 | 0,13 | 9,05 | 0,93 | 35,6 |
| **Uranus** | 51.100 | 4,007 | 3,7" | 0,00229 | 17 h 54 mn | $8,684\ 10^{25}$ | 14,53 | $4,57\ 10^{-2}$ | 1,29 | 0,23 | 7,77 | 0,79 | 21,3 |
| **Neptune** | 44.990 | 3,39 | 2,1" | 0,017 | 19 h 6 mn | $1,024\ 10^{26}$ | 17,13 | $0,54\ 10^{-1}$ | 1,64 | 0,3 | 11 | 1,12 | 23,3 |
| ***Pluton*** | 2.284 | 0,18 | < 1" | 0 | 6 j 9 h 17 mn | $1,29\ 10^{22}$ | 0,002 | $0,68\ 10^{-5}$ | 2,07 | 0,37 | 0,4 | 0,04 | 1,1 |

Le diamètre angulaire maximum est l'angle sous lequel on voit la planète lorsqu'elle est au plus près de la Terre. Jupiter est assez confortable à observer dans un télescope d'amateur, mais on concevra facilement qu'on ne distingue aucun détail sur Pluton… Pour Vénus, le problème est différent. Lorsque son diamètre est maximal, elle est nouvelle (voir plus haut). C'est au contraire lorsque son diamètre est minimal qu'on la voir de face. De plus, il n'y a rien à observer…

La masse est donnée en kilogrammes et par rapport à la Terre. On constate que Jupiter est 318 fois plus massive que la Terre.

Le diamètre donné ensuite nous montre que Jupiter est 11 fois plus gros que la Terre !

La densité est importante, car elle tient compte de la masse et du volume. Plus elle est élevée, plus les matériaux qui constituent la planète sont eux-même denses. La densité de Saturne de seulement 0,7 nous montre qu'elle ne peut être constituée que des gaz les plus légers, hydrogène et hélium.

La pesanteur est donnée par rapport à la Terre. Vous pouvez calculer votre poids sur une planète avec la calculette ci-dessous. Le rapport est celui donné dans la colone "pesanteur / Terre" du précédent tableau.

Animation : calculette donnant le poids sur une autre planète

**Diamètre, aplatissement et période de rotation**

Le diamètre indiqué est la mesure à l'équateur de la planète. La colonne suivante indique l'aplatissement. Lorsqu'une planète tourne rapidement sur elle-même, la force centrifuge à l'équateur contrecarre la gravitation, et provoque un renflement équatorial. La planète n'est pas sphérique, mais aplatie aux pôles. *L'aplatissement* est le rapport (a - b) / a, où a est le diamètre équatorial, et b le diamètre polaire. Appliquée à Jupiter, cette formule montre que son diamètre polaire est de 135.978 km, presque 7.000 km de différence. Dans un télescope d'amateur, on distingue nettement que la planète n'est pas ronde ! Le phénomène est encore plus marqué pour Saturne.

Remarquez dans le tableau que les planètes qui tournent lentement ont un aplatissement nul, celles qui tournent vite sont nettement aplaties. Ce phénomène est amplifié lorsque les planètes sont gazeuses.

**Masse, densité, pesanteur et vitesse de libération**

Les masses sont données en kilogrammes, et par rapport à la Terre. Cette dernière valeur est plus représentative de la taille de la planète.

La densité est une notion importante, car elle nous indique instantanément quelle est la composition globale de la planète :

- faible, il s'agit de matériaux légers, tels que du gaz,
- forte il s'agit de matériaux lourds, essentiellement des silicates.

On voit de plus que la forte densité des planètes telluriques implique la présence en leur sein d'un noyau lourd, constitué des éléments les plus denses qui puissent se former dans les étoiles, le nickel et le fer. La masse volumique moyenne des 4 planètes telluriques est de 5,03 $g/cm^3$, et la moyenne des planètes géantes est de 1,24 $g/cm^3$ seulement. Ces deux valeurs justifient pleinement les deux classes de planètes.

La pesanteur découle de la masse et du rayon de la planète. C'est la force avec laquelle elle attire un corps posé à sa surface. Ainsi définie, cette notion n'aurait pas de sens sur les planètes gazeuses, qui n'ont pas de surface ! La surface solide est alors remplacée par la surface visible, qui est le sommet de l'atmosphère, ou zone dans laquelle l'atmosphère devient opaque.

Enfin, la vitesse de libération est celle qu'il faut donner à un projectile pour qu'il ne retombe pas sur la planète. C'est par exemple la vitesse qu'une fusée doit donner à une sonde pour l'expédier vers une autre planète. Mais cette notion est très importante car elle indique la possibilité de retenir une atmosphère : si la vitesse de libération est plus petite que la vitesse à laquelle se déplacent les atomes de l'atmosphère, ces derniers quittent définitivement la planète. Elle n'aura donc pas d'atmosphère. C'est le cas de Mercure.

**Tableau relatif aux conditions à la surface**

| Planète | albédo | pression au sol (bar) | température | | jour sidéral | jour solaire | sens |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | min | max | | | |
| **Mercure** | 0,06 | 0 | -185° | +430° | 58 j 15 h 36 mn | 175 j 22 h 33 mn | mixte |
| **Vénus** | 0,66 | 92 | +500° | +500° | 243 j 0 h 14 mn rétrograde | 116 j 18 h | rétro |
| **Terre** | 0,39 | 1,013 | -80° | +60° | 23 h 56 mn 4 s | 24 h | direct |
| **Mars** | 0,16 | 0,007 | -120° | +10° | 24 h 37 mn 22 s | 24 h 39 mn 35 s | direct |
| **Jupiter** | 0,42 | - | -150° | -150° | 9 h 50 mn 28 s | 9 h 50 mn 31 s | direct |
| **Saturne** | 0,45 | - | -170° | -170° | 10 h 13 mn 23 s | 10 h 13 mn 24 s | direct |
| **Uranus** | 0,53 | - | -213° | -213° | 17 h 54 mn | très variable | - |
| **Neptune** | 0,66 | - | -215° | -215° | 19 h 6 mn | 19 h 6 mn 1 s | rétro |
| ***Pluton*** | 0,5 | 0 ? | -236° | -236° | 6 j 9 h 17 mn | semblable à Uranus | - |

La pression au sol n'a pas de sens pour les planètes géantes, celles-ci étant gazeuses : c'est la notion de sol qui n'a pas de sens. On voit que Mercure n'a pas d'atmosphère, et que celle de Mars est 100 fois plus légère que la nôtre, qui est elle-même 100 fois plus légère que celle de Vénus.

**Différenciation**

Les planètes se sont formées par accrétion de petits objets (planétésimaux). Ceux-ci avaient tous la même composition, à très peu de chose près. Ainsi, en se collant les uns aux autres, ils ont formé un objet de grande taille (et donc de grande masse) homogène. Mais à mesure que la masse croît, la pression et la température centrales augmentent. Assez, finalement, pour fondre les matériaux constitutifs. Un fois ceux-ci liquides, il se passe ce qui se passe dans une émulsion d'huile et d'eau quand on la laisse en paix : l'huile surnage, ou si vous préférez, l'eau sédimente au fond, car elle est plus lourde (plus dense).

Ainsi, si la planète est en fusion, et si ses matériaux présentent des densités différentes, il est naturel de penser que les plus lourds vont tomber au centre, alors que les plus légers vont surnager en surface, où ils vont constituer une espèce de croûte. Ce mécanisme de tri est nommé *différenciation*.

Pour qu'elle se produise, il faut donc que la température soit assez élevée pour que les matériaux soient fluides. Ceci nécessite une masse suffisante. Les plus petites planètes ne seront pas ou peu différenciées, les plus grosses le seront vraiment. On verra ce phénomène pour chacune des planètes étudiées. Tant qu'une planète n'est pas totalement refroidie, la différenciation peut se poursuivre. Il semble que ce soit le cas encore à l'heure actuelle pour Jupiter.

**Forme des planètes**

Les objets sont ronds pour atteindre un état d'équilibre de potentiel gravitationnel minimum. Prenons un exemple : la Terre présente des montagnes ; elle n'est donc pas tout à fait ronde. Mais chacun sait qu'une pierre au sommet d'une montagne a tendance à tomber vers la vallée. De ce fait, la montagne va un peu diminuer, et la vallée un peu se combler. La pierre au fond de la vallée ne remontera jamais la pente toute seule. Le nouvel état : pierre au fond de la vallée, est donc plus stable que l'ancien : pierre au sommet de la montagne. On comprend donc que la nature ira toujours spontanément de l'état le moins stable vers l'état le plus stable. Petit à petit, si rien ne vient perturber, les montagnes vont se détruire et combler les vallées. Ce qui nous permet de voir des montagnes sur la Terre aujourd'hui, c'est une formidable énergie qui les reconstruit à mesure qu'elles se détruisent. Sur les corps ne disposant pas d'une telle énergie, la reconstruction ne se produit pas, et la forme sphérique est plus parfaite. Si la gravité est trop faible par contre, elle ne produira pas ce nivellement, et le corps conservera toujours sa forme première, qui peut être quelconque. C'est le cas des petits astéroïdes.

**La composition des planètes**

Mercure, Vénus, la Terre et Mars sont constituées principalement de fer, nickel, et silicates.

Jupiter et Saturne contiennent principalement de l'hydrogène et de l'hélium. Cependant, elles présentent au centre un petit noyau constitué de matériaux lourds (silicates) et de glaces.

Uranus et Neptune ont une composition semblable, mais la proportion de glaces est bien plus élevée. Pour cette raison, on les appelles *géantes glacées*.

Enfin, les objets de Kuiper (Pluton et les autres) sont constitués de silicates et de glace d'eau.

La Lune, bien que formée dans la même région que la Terre, ne contient pas de fer ni de nickel, mais seulement des silicates.

Io (satellite de Jupiter) est constitué de silicates, mais Europe, Ganymède et Callisto (satellites de Jupiter également) contiennent aussi de la glace d'eau, comme Triton (satellite de Neptune).

**Géologie**

Est-ce de l'astronomie ? On pourrait se poser la question, mais si on répondait par la négative, il faudrait rejetter également la mécanique céleste (la mécanique est une discipline à part entière). En fait, on a de l'astronomie une idée qui correspond à un certain état de l'art, dans lequel les planètes apparaissaient comme des points lumineux, ou au mieux comme de petits disques montrant difficilement quelques taches colorées. Il n'était pas question de parler de montagnes ou d'océans, tout au moins avec un réel appui observationnel.

Depuis que les sondes spatiales se sont développées, et ont atteint un niveau technique excellent, on peut observer des détails très fins à la surface des planètes, on peut même effectuer des analyses chimiques des roches qui constituent la surface. Dans ces conditions, il devient tout à fait raisonnable de concevoir la surface d'une planète tellurique comme celle de la Terre, d'envisager de quelles roches elle est constituée, et de décrire l'histoire de sa formation.

On dispose de données suffisantes (pour un début) pour Vénus et Mars. Mercure a été observée maintenant par deux sondes, et les données disponibles permettent de faire une analyse géologique assez correcte.

Sur Vénus et Mars, on a observé certaines structures qu'on retrouve sur Terre, et d'autres spécifiques. Nous étudierons les formations particulières en étudiant Vénus.

**Volcanisme**

Le volcanisme est connu et étudié depuis très longtemps sur Terre. Mais on a découvert des volcans aussi sur Mars (le plus grand du système solaire en particulier), et sur Vénus. Il y a eu des épanchements de lave sur la Lune (qui ont constitué les mers), et sur Mercure. Enfin, on a observé un volcanisme très curieux sur certains gros satellites, Io (Jupiter) et Triton (Neptune). Ces objets étant très loins du Soleil, sont très froids. Il ne s'agit pas, là-bas, de laves au sens où nous l'entendons. On a parlé de cryovolcanisme, car les températures impliquées seraient très basses (moins de 300° C). Mais ce n'est le cas que pour Triton. Sur Io, il s'agit au contraire de laves très chaudes.

**Champ magnétique**

Les champs magnétiques trouvent leur origine dans le cœur des astres de grande taille. La Terre à l'image de la plupart des planètes du système solaire possède un champ magnétique naturel, tel qu'en tout point de la planète, dans l'atmosphère ou sous terre, l'aiguille aimantée d'une boussole s'oriente. En première approximation c'est le champ d'un dipôle : ses lignes de forces sont distribuées dans l'espace comme celles d'un barreau aimanté situé au centre de la Terre. Ce champ magnétique semble engendré par effet dynamo par le noyau ferreux liquide. Des mouvements de convection dans les noyaux métalliques chauds et liquides alliés à la rotation, mettant en mouvement des particules chargées électriquement seraient à l'origine du champ magnétique, mais le processus est encore mal compris dans le détail. Dans les planètes gazeuses c'est l'hydrogène liquide ionisé (hydrogène métallique) qui produirait dans sa rotation le champ magnétique.

Pour qu'une planète possède un champ magnétique, elle doit disposer d'une source d'énergie interne pour l'entretenir, tourner, et son noyau doit être liquide.

Les planètes se refroidissant progressivement, le noyau se solidifie petit à petit, la dynamo ralentit puis finit par s'arrêter entraînant la disparition du champ magnétique global.

Il peut exister un champ magnétique rémanent : les roches peuvent acquérir une aimantation. Incluses dans des marériaux en voie de refroidissement, des particules magnétiques s'orientent selon les lignes du champ magnétique du moment et en se solidifiant fossilisent ses caractéristiques. Cette magnétisation de la croûte planétaire constitue un champ magnétique rémanent. Cette aimantation peut disparaître si les roches sont réchauffées au delà du point de Curie (point de démagnétisation dont la température est variable selon les minéraux).

**Magnétosphère**

Le milieu interplanétaire est baigné par le vent solaire. Il s'agit d'un flux de particules chargées soufflé en permanence par le Soleil qui atteint des vitesses supersoniques (de l'ordre de 400 à 800 km/s au niveau de la Terre). C'est un vent de plasma, c'est-à-dire composé de particules chargées -électrons et ions-, et bien qu'extrêmement dilué (sa densité est de quelques particules par $cm^3$ ) il est extrêmement énergétique. En effet dans ces milieux très légers les forces de gravitation sont négligeables mais comme ils sont composés de particules chargées, ce sont les forces électromagnétiques qui s'exercent et elles sont très puissantes. De plus la température est de l'ordre du million de degré Kelvin, dans ces milieux si ténus la notion de température n'a plus rien à voir avec celle que nous en avons dans notre expérience quotidienne, mais elle traduit l'agitation particulièrement élevée de ces particules. Ce vent est dévié le long des lignes du champ magnétique planétaire, et l'interaction du vent solaire avec le champ magnétique produit une vaste région de l'espace appelée *magnétosphère*. Elle est constituée d'un plasma composé de particules d'origine solaire et cosmique seules, ou avec une participation de la planète ou d'un satellite (Io par exemple).

La magnétosphère agit donc comme un bouclier protecteur en empêchant le vent solaire de "décaper" les atmosphères planétaires. Le champ magnétique est un facteur très important à prendre en compte pour comprendre l'histoire et l'évolution d'une planète. Un champ magnétique global protège la surface de toute une foule de particules énergétiques impropres à la vie (vent solaire, rayons cosmiques). Lorsque les planètes ne possèdent pas ou plus de champ magnétique global, mais possèdent une ionosphère, le vent solaire pénètre à l'intérieur de celle-ci et génère des champs magnétiques complexes.

**Les atmosphères**

Certaines planètes possèdent une atmosphère, d'autres pas. Un chapitre spécial leur est consacré.

De nombreux facteurs interviennent :

**La création de l'atmosphère**

Lorsque les planètes se sont formées, elles étaient constituées des matériaux disponibles dans la nébuleuse primitive qui entourait le Soleil naissant (étoile T Tauri). A la même époque, le Soleil a commencé à briller par libération de son énergie gravitationnelle. La nébuleuse qui l'entourait était froide et homogène. Les premiers matériaux à condenser sont les plus réfractaires, les métaux et les silicates. Ils sont constitués de poussières, qui se sont agglutinées en grains, puis en cailloux… pour donner finalement des planétésimaux et enfin les noyaux des planètes. Ceux-ci se sont formés assez rapidement, en moins d'un million d'années. Pendant ce temps, le rayonnement intense du jeune Soleil, ainsi que le vent stellaire qu'il éjectait, faisait le ménage dans son voisinage. Assez rapidement, tous les éléments volatils qui se trouvaient dans les environs ont été chassés au loin. Lorsque les noyaux des futures planètes telluriques ont été assez gros, il ne restait plus assez de matière dans la nébuleuse circumsolaire pour leur permettre de se constituer une atmosphère. D'ailleurs, leur petite taille leur conférait une gravité trop faible pour capturer les gaz.

Par contre, dans la région de Jupiter, la nébuleuse était toujours présente lorsque le noyau a atteint une masse lui permettant d'accréter les gaz. Donc, Jupiter s'est conduit comme un aspirateur pour capturer tous les gaz qui circulaient dans les parages de son orbite. Ainsi, cette planète a pu capturer une énorme masse de gaz, qui ont constitué son enveloppe. Cette phase a duré un million d'années.

Le cas de Saturne est assez semblable, mais cette phase y a été un peu plus lente, le noyau s'est constitué dans un temps un peu plus long (disons deux millions d'années), et lorsque ce fut fait, il restait un peu moins de gaz à capturer. Aussi, la proportion de gaz est un peu plus faible dans Saturne, et cette planète est restée un peu plus petite et moins massive que Jupiter.

Quand on arrive aux deux dernières planètes géantes, le temps d'accrétion du noyau a été encore plus long, de l'ordre de la dizaine de millions d'années, et lorsque sa masse fut suffisante pour accréter la nébuleuse, celle-ci avait presque disparu. Ces deux dernières planètes se sont donc contentées des restes, et n'ont pu grossir beaucoup.

Ce scénario explique que les planètes gazeuses aient des atmosphères très importantes, d'autant plus qu'elles sont plus proches du Soleil, et donne des indications sur leur composition (voir plus loin).

Dans le cas des planètes telluriques, cette atmosphère primaire par capture n'a pratiquement pu se former, et donc elles n'avaient pas d'atmosphère. Mais ceci n'a pas duré. En effet, la désintégration des matériaux radioactifs à courte période (aluminium 26 en particulier) contenus en leur sein a produit de la chaleur ; les chocs des météorites qui tombaient sur leur sol ont déposé énormément d'énergie sous forme de chaleur ; enfin, la contraction gravitationnelle des planètes elle-mêmes a contribué. Ces mécanismes se sont conjugués pour élever la température assez haut pour que tout fonde. Alors, dans la planète en fusion, les matériaux lourds sont tombés vers le centre, les matériaux légers (silicate d'aluminium) ont flotté à la surface. Ce phénomène est la différenciation des planètes. Mais considérons maintenant les matériaux volatils qui se trouvent dans la masse de la planète : l'eau, le gaz carbonique, cerrtains composés souffrés. Etant parmis les plus légers, ils vont rapidement monter vers la surface et s'échapper dans l'espace. Si la gravité de la planète est suffisante, ils ne pourront s'échapper et vont peu à peu constituer une atmosphère. Celle-ci sera donc formée de vapeur d'eau, de gaz carbonique, de composés souffrés, et de quelques gaz rares (argon, xenon).

On peut calculer la composition des atmosphères d'origine d'une autre façon : calculer, en fonction des conditions physiques (température, pression…) quelles molécules étaient les plus probables. Cette méthode permet de prévoir ce qu'on pourrait trouver dans les atmosphères des objets loins du Soleil, à partir de Jupiter par exemple. Ceci permet de guider les expériences à faire sur ces atmosphères.

Dans le cas des planètes telluriques, on pense que les matériaux constitutifs contenaient des gaz, qui se sont trouvés piégés à l'intérieur, et sont remontés en surface à mesure que la pression augmentait. Par gravité donc, les éléments se sont trouvés triés, les lourds constituant le globe de la planète, et les légers, gazeux se retrouvant dans l'atmosphère primitive.

Pour les planètes géantes, les gaz étaient également présents mais comme constituants essentiels de la planète. Planète et atmosphère sont relativement confondues.

**La conservation de l'atmosphère**

Le Soleil émet en permanence un vent solaire, formé de particules accélérées par son fort champ magnétique. Peu après la formation du Soleil, il devait être beaucoup plus intense. Par chocs, ces particules sont capables de communiquer de l'énergie aux molécules de l'atmosphère, qui acquièrent de la vitesse. Si la gravité de la planète est faible, cette vitesse peut être supérieure à la vitesse d'évasion. Bien sûr, les molécules les plus légères prennent la plus grande vitesse, et donc sont les plus susceptibles de quitter la planète. On parle d'*évasion des atmosphères*.

Les planètes les plus petites n'ont pas une masse suffisante pour retenir une atmosphère significative. Mercure, très proche du Soleil et petite, n'a pas d'atmosphère permanente. Des gaz sont arrachés à son sol et constituent une atmosphère infime ; mais le vent solaire les en arrache très rapidement. Aussi cette atmosphère est constamment renouvellée.

Vénus, la Terre, et Mars, retiennent une atmosphère plus ou moins épaisse, formée par dégazage, et ayant subi une évolution différente pour chacune.

Les planètes géantes possèdent des atmosphères bien plus importantes, qui atteignent 70 % de la masse de la planète.

**L'évolution des atmosphères**

Une atmosphère s'étant créée, et les conditions pour son maintient étant réalisées, elle peut encore évoluer, dans des proportions importantes. Après la formation des planètes, la chaleur interne a augmenté par compression d'abord (la masse de la planète augmentant), puis par

désintégration radioactive de certains éléments à longue période (uranium 238 de période 4,5 milliards d'années, Thorium 232 de période 14 milliards d'années, potassium 40 de période 1,25 milliards d'années) ensuite. La chaleur s'accroissant, entraîne un volcanisme par lequel se produit un dégazage, amenant en surface de nouveaux matériaux. Ainsi, du soufre (fusible et léger) a été remonté sur de nombreuses planètes ou satellites (Vénus, la Terre, Io…). D'autre part, la température des atmosphères décroît après leur formation. Il s'ensuit une condensation de certains composés, l'eau par exemple, qui va modifier les propriétés physico-chimiques de l'atmosphère. Cette nouvelle chimie modifie la composition à la fois du sol et de l'air (exemple : une planète dont l'atmosphère contient beaucoup de gaz carbonique et de la vapeur d'eau, ayant du fer métallique en surface. Lorsque la vapeur se condense, elle dissout du gaz carbonique et forme de l'acide carbonique, qui donne une pluie acide. Au contact du fer, il va se former du carbonate de fer solide qui reste au sol, tandis que le gaz carbonique s'appauvrit dans l'air).

L'effet de serre dû à certains gaz, la pression initiale, vont faire évoluer l'atmosphère dans un sens ou un autre selon la quantité de rayonnement reçue du Soleil. Nous verrons que les atmosphères de Vénus, la Terre et Mars, assez semblables à l'origine, ont considérablement divergé.

L'atmosphère de Vénus est 100 fois plus dense que la notre, celle de Mars 100 fois moins.

Les planètes géantes étant gazeuses, il n'y a pas de sol au sens habituel (toutefois, on pense qu'il existe un noyau solide, mais il doit être petit, près du centre, et noyé au fond d'un immense océan de gaz liquides. On définit la surface de ces planètes comme étant le niveau où la pression atteint 1 bar (à peu près la pression au sol sur Terre). Au-dessus de ce niveau se trouve ce que l'on appelle l'atmosphère, au-dessous, c'est l'intérieur de la planète (même si une partie importante est encore gazeuse).

Avec cette définition, l'atmosphère des planètes géantes occupe de 20 à 30 % de leur rayon.

**Examen détaillé des planètes**

Depuis les années 1950, les connaissances sur les planètes ont fait un bond extraordinaire. Le meilleur télescope disponible au milieu du XX$^{e}$ siècle était celui du Mont Palomar, avec ses 5 mètres de diamètre. Malgré un miroir de très bonne qualité, il ne disposait d'aucun des perfectionnements modernes, et son principe était rigoureusement le même que celui du premier télescope de verre de Foucault.

Situé sur le mont Palomar, petite montagne des Etats Unis, il était particulièrement affecté par la turbulence atmosphérique. Le pouvoir séparateur réel (seeing) n'était donc pas meilleur que pour les autres télescopes. Par contre, la quantité de lumière captée était nettement supérieure, lui donnant une magnitude limite bien plus poussée. Il a donc permis de découvrir le ciel en profondeur, mais les images planétaires obtenues n'étaient jamais de bonne qualité. Les meilleures images dans ce domaine ont été produites par le télescope de 2 mètres du Pic du Midi, en grande partie grâce à la qualité du ciel en altitude.

Depuis les années 1960, les techniques d'optique active, optique adaptative, interférométrie, ont été mises au point et sont maintenant utilisables sur tous les instruments récents. De plus, les observatoires actuels sont installés dans les deux meilleurs sites mondiaux, dans la Cordillière des Andes au Chili, et sur les volcans d'Hawaï.

Mais les résultats les plus significatifs en planétologie sont venus des sondes spatiales, qui sont allées sur place prendre des photos, et faire des mesures de divers paramètres physiques. Sur quelques objets, des sondes se sont posées, et nous disposons maintenant d'images du sol allant jusqu'à une résolution submillimétrique. Les roches constituant le sol de quelques planètes ont été anaysées sur place (et en laboratoire sur Terre pour ce qui concerne la Lune, et probablement Mars). Toutes ces données constituent une masse énorme, mais il reste bien sûr de nombreux trous dans notre documentation (seule une vision très globale est disponible sur l'ensemble de la planète, avec des renseignements très précis sur les rares points explorés par des sondes au sol).

L'importance (relative…) des informations disponibles sur chaque planète oblige à les traiter séparément, ce qui est fait dans les chapitres suivants.

- Groupe des planètes telluriques
  - Mercure
  - Vénus
  - La Terre et *La Lune*
  - Mars
- Ceinture des astéroïdes
  - Vesta
- Groupe des planètes géantes
  - Jupiter
  - Saturne
  - Uranus
  - Neptune
- Pluton et la Ceinture de Kuiper
- Nuage de Oort
- Les comètes

**Où est la limite du système solaire ?**

Ce n'est pas un problème simple. Une première réponse consiste à placer la limite là où l'influence gravitationnelle du Soleil devient plus faible que celle des autres étoiles. Un corps placé là sans vitesse initiale tomberait sur une autre étoile.

Mais si on considère l'existence d'un milieu interstellaire, il faut lui laisser une petite place ! Donc la limite du système solaire doit être moins lointaine. Dans cette perspective, il faut définir l'endroit où le milieu change, par sa composition ou tout autre paramètre physique. Cette limite existe. Il faut considérer le vent solaire, flot de particules rapides accélérées par notre étoile, et projetées dans l'espace. Dans le milieu

interstellaire, il y a aussi des particules, qui n'ont pas une grande vitesse. On définit donc la limite du système solaire, qu'on appelle *héliopause*, comme étant la surface où le vent solaire se heurte au milieu interstellaire. On peut dire aussi que c'est l'endoit où le vent solaire voit sa vitesse passer d'un régime supersonique à un régime subsonique (par suite des chocs).

**Les curiosités du système solaire**

Sur Mercure, le Soleil s'arrête dans sa course journalière à travers le ciel, puis repart en arrière, s'arrête à nouveau et repart enfin pour poursuivre sa course normale. A certains endroits de la planète, il est midi trois fois par jour ! Le mythe biblique de Josué, qui paraît-il arrêta le Soleil, est là-bas une réalité quotidienne !

Sur Uranus, on observe le Soleil de minuit aux pôles, mais aussi à l'équateur ! Et aux pôles, on a parfois le Soleil au zénith.

Il en est de même sur Pluton. Mais en plus, on y a le satellite Charon toujours au même endroit dans le ciel.

---=OO=---




## *Généralités*

Atmosphère vient du grec *atmos* = vapeur, et *sphaira* = ballon.

Une atmosphère est une enveloppe de gaz compressibles, retenue par la gravitation d'une planète.

On trouve des atmosphères autour des planètes suffisamment massives, Vénus, la Terre, Mars, et les planètes géantes. Seuls deux satellites ont une atmosphère conséquente : Titan autour de Saturne, et Triton autour de Neptune. Les petites planètes, et *a fortiori* la plupart des satellites, ne peuvent pas en retenir.

### Formation des planètes

Toute théorie de formation des planètes doit expliquer les régularités suivantes :

- Elles orbitent toutes :
  - dans le même plan ;
  - dans le même sens
- Le Soleil tourne sur lui-même dans le même sens ;
- Les 4 premières planètes sont rocheuses ;
- Les 4 dernières sont gazeuses.

Sur un plan plus technique, il faudra également expliquer que les planètes emportent 99 % du moment cinétique du système solaire (le moment cinétique traduit l'énergie qu'il faudrait dégager pour arrêter la rotation du Soleil sur lui-même d'une part, des planètes autour de lui d'autre part ; cette seconde énergie serait 100 fois plus grande que la première).

La première théorie scientifique sur la formation des planètes est due à Laplace, au XVII$^{e}$ siècle. Il considérait un nuage de gaz et de poussières qui tournait autour du Soleil. Dans ce nuage se produisaient des tourbillons, qui frottaient les uns contre les autres, et dont les dimensions étaient d'autant plus grandes qu'ils étaient plus éloignés du Soleil. A la limite entre deux tourbillons, se formait une planète.

La théorie actuelle considère que les planètes se sont formées à partir d'un nuage contenant essentiellement de l'hydrogène (75 % en masse), et de l'hélium (24 %). Le reste, quelques poussières (silicates), était constitué de tous les éléments chimiques, en proportions variables. Les éléments sont classés en *volatils* et *réfractaires*, selon leur température de fusion.

Le nuage était en rotation, et les forces de viscosité (frottement des particules les unes sur les autres) ont provoqué son aplatissement. Dans cette transformation, le centre devient de plus en plus dense, et s'échauffe (loi des gaz parfaits). Il finit par briller par son énergie gravitationnelle (phase T Tauri). Puis, la température centrale continuant d'augmenter, bien que plus lentement, les réactions de fusion de l'hydrogène finissent par s'allumer.

Le Soleil, dans sa phase T Tauri, émettait un vent solaire très intense, qui a chassé les volatils jusqu'à la distance de Jupiter. Il a ainsi rapidement creusé une cavité dépourvue de matériaux volatils autour de lui. Les 4 planètes telluriques se sont donc formées dans des conditions très semblables, à partir des mêmes matériaux, mais avec très peu de gaz. Les 4 planètes géantes aussi se sont formées dans une même autre région du système solaire, ce qui explique leurs ressemblances. Mais dans leur région, il y avait beaucoup de gaz (d'origine et apporté par le Soleil). Les réfractaires, par contre, sont tous restés là où ils étaient au début. De ce fait, les planètes telluriques n'ont eu, pour se former, que les matériaux réfractaires, alors que les géantes ont eu tous les matériaux de la nébuleuse primitive, avec enrichissement en volatils.

Les planètes géantes possèdent sans doute un noyau rocheux, autour duquel les gaz se sont accrétés. Pour cela, il fallait que la gravité du noyau soit importante, donc qu'il soit construit. Or la densité du disque protoplanétaire diminue avec l'éloignement croissant au Soleil, son maximum étant à la distance de Jupiter à peu près. Donc, dans la région de Jupiter, il y avait beaucoup de matériaux, et le noyau s'est constitué très rapidement, dans un temps de l'ordre du million d'années. Le noyau de Jupiter, une fois constitué, a commencé à récupérer les gaz de la nébuleuse. Plus il en capturait, plus sa masse, donc aussi sa gravité, augmentait. Il a donc rapidement fait le ménage dans sa région. L'atmosphère de Jupiter représente 97 % de sa masse totale. Ceci justifie pleinement l'appellation de planète gazeuse.

A la distance de Saturne, la densité un peu plus faible a nécessité 2 millions d'années pour agglutiner toutes les poussières et former le noyau. Il restait moins de matériaux, parce qu'il y en avait moins au départ (densité plus faible) et parce que Jupiter avait eu le temps d'en prélever. L'atmosphère représente 90 % de la masse.

Pour Uranus et Neptune, le temps a été encore plus long, de l'ordre de 10 millions d'années, dans une nébuleuse encore moins riche. L'atmosphère ne représente plus que 40 à 30 % de la masse.

Ce scénario explique :

- que les planètes internes soient rocheuses, avec éventuellement une atmosphère très légère et non primitive ;
- que les géantes aient une atmosphère extrêmement lourde, d'autant plus qu'elles sont moins éloignées du Soleil, et de composition analogue à celle de la nébuleuse ;
- que ces atmosphères aient une composition proche de celle de la nébuleuse qui a donné naissance au système solaire.

**Formation des atmosphères**

Les atmosphères planétaires se forment par divers mécanismes :

- la capture gravitationnelle des gaz de la nébuleuse (valables pour les géantes) ;
- les impacts météoritiques ou cométaires (géantes et telluriques) ;
- le dégazage volcanique (telluriques, négligeable pour les géantes) ;
- *sputtering* (telluriques sans atmosphère stable).

Ces mécanismes n'ont pas la même importance selon les planètes, et dépendent du temps.

La capture gravitationnelle ne peut être efficace que si le noyau rocheux, constitué par accrétion des poussières, est suffisamment massif pour exercer une force importante, et s'il reste beaucoup de gaz dans la nébuleuse. Pour les planètes telluriques, la masse est un peu faible, mais surtout il n'y a pas de volatils à accréter. Donc elles n'ont pas pu se constituer une atmosphère de cette façon.

Les 4 planètes géantes satisfont ces 2 conditions, et peuvent capturer le reste de la nébuleuse : rapidement pour Jupiter dont le noyau s'est constitué très vite, et possède une grande masse, un peu moins vite pour Saturne dont le noyau est un peu moins massif, et qui s'est formée dans une nébuleuse un peu moins dense, encore moins pour les deux dernière planètes géantes.

Les impacts météoritiques apportent des éléments volatils, surtout lorsque l'impacteur est une comète (cas fréquent dans les débuts du système solaire). Mais là encore, il faut que le noyau ait déjà une masse assez importante pour conserver ces éléments. Toutefois, ils sont livrés à domicile, il suffit de les garder, et non pas d'aller les chercher comme dans le cas précédent ; aussi, les planètes telluriques ont été assez massives pour les conserver.

Le sputtering (anglais *to sputter*, piétiner) est l'altération superficielle des roches par l'impact des micrométéorites et par les atomes du vent solaire. Ces chocs arrachent des atomes aux roches, atomes qui vont constituer une atmosphère si la gravité les retient.

Nous verrons le dégazage après avoir considéré le chauffage des planètes.

**Bilan de chaleur d'une planète**

Une planète gagne, perd ou conserve de la chaleur par divers mécanismes.

Les gains proviennent :

- des chocs des impacteurs,
- de la radioactivité,
- et de la contraction gravitationnelle.

Les impacts sont fréquents pendant la formation du système solaire. Les poussières se sont agglomérées en petits cailloux, qui se sont ensuite collés pour en former de plus gros. Au fil du temps, les corps augmentent de taille et de masse. Les plus massifs, ceux qui ont réussi à se former le plus vite, ont une masse plus grande que les autres, et attirent davantage les petits objets qu'ils croisent. Lors d'un impact, le choc dégage l'énergie cinétique correspondant à la vitesse de l'objet impacteur par rapport à l'objet impacté. Cette énergie est énorme (elle est proportionnelle au carré de la vitesse), et entraîne un chauffage rapide des objets les plus gros.

La radioactivité est la désintégration d'un noyau lourd en noyaux plus légers. Cette brisure s'accompagne d'un violent dégagement de chaleur, qui est exploité dans nos centrales nucléaires. La chaleur ainsi produite à l'intérieur d'une planète s'y trouve piégée assez durablement. La température de la planète augmente donc par accumulation de chaleur. En particulier, le nuage contenait de l'aluminium 26, de période 716.000 ans, qui libère rapidement beaucoup de chaleur. L'uranium, présent aussi, a une période beaucoup plus longue, et entretient la chaleur centrale, sans trop participer au chauffage initial.

La contraction gravitationnelle est de même nature que l'énergie dégagée par les impacts, elle est gravitationnelle. Mais la différence est que dans la contraction il n'y a pas de choc, mais un lent rétrécissement de l'astre. C'est ce mécanisme qui explique le rayonnement des étoiles T Tauri.

Les impacts, la radioactivité et la contraction gravitationnelle produisent de la chaleur dans la masse de la planète, donc la chaleur accumulée est proportionnelle au volume :

*la production de chaleur est proportionnelle au cube du rayon* $R^3$

Les pertes de chaleur se produisent par rayonnement dans l'espace, éventuellement limité par effet de serre s'il y a une atmosphère. Donc, ces pertes sont proportionnelles à la surface de la planète :

*la perte de chaleur est proportionnelle à* $R^2$

L'échauffement est proportionnel au rapport des gains sur les pertes :

échauffement proportionnel à *gains / pertes* proportionnel à $R^3 / R^2 = R$

L'échauffement est donc proportionnel au rayon. La conclusion est que plus un planétésimal est gros, plus il s'échauffe. On comprend que

l'activité géologique, entretenue par la chaleur, est donc possible pour des corps de masse (donc de diamètre) suffisante. De même, la forme ronde est favorisée par la phase liquide.

**Différenciation**

Le chauffage ainsi obtenu a porté les planètes telluriques à une température de l'ordre de 1.200 . Les silicates et métaux qui les constituent sont liquides dans ces conditions. Aussi, les métaux (essentiellement fer et nickel), éléments les plus lourds, tombent vers le centre où ils vont constituer le noyau. Les éléments les plus légers (silicates d'aluminium et volatils), montent vers la surface, sous la poussée d'Archimède. C'est la *différenciation*. C'est ainsi que se constitue la croûte de la planète. Les silicates de magnésium, de densité intermédiaire, sont restés entre les deux, et ont constitué le manteau.

Les météorites attestent ce scénario d'évolution des planètes. On trouve divers types de météorites :

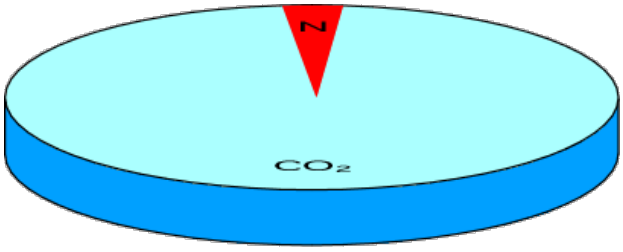
- les sidérites, constituées de fer presque pur, avec un peu de nickel ; elles proviennent du noyau d'une planète différenciée détruite par un impact géant.
- les sidérolithes, formées d'un mélange de fer-nickel pris dans une matrice de silicates ; elles proviennent du manteau.
- enfin, les achondrites sont des cailloux, provenant de la croûte d'une planète détruite.

Après leur formation et leur différenciation, les planètes ont commencé à se refroidir. Tout naturellement, c'est la surface qui se refroidit en premier, et se solidifie. En dessous, la matière reste liquide, et continue d'être affectée par des mouvements de convection. La lave qui monte ainsi sous la croûte la réchauffe et parvient à la percer. C'est un volcan qui se forme. La lave qui émerge entraîne des gaz, qui se dégagent et forment une atmosphère. Pour cela, il faut un volcanisme très intense, mais cette condition est évidemment remplie juste après la formation de la planète, puisque tous les éléments étaient bien mélangés dans la nébuleuse. La phase de différenciation fait le tri, et une grande partie des éléments légers doit être ainsi émise. Il y a largement de quoi constituer une atmosphère épaisse, dont la pression atteint 100 bars, 100 fois la pression atmosphérique actuelle de la Terre.

La composition de cette atmosphère est très différente de celle de la nébuleuse. Le constituant majeur est le dioxyde de carbone $CO_2$, suivi par la vapeur d'eau, l'azote et certains composés soufrés.

Les 4 planètes telluriques ayant une composition et des conditions physiques (température) semblables, se sont constitué des atmosphères très proches en composition et de pression du même ordre. Leur situation actuelle dépend d'autres paramètres.

En particulier, la proportion du gaz carbonique par rapport à l'azote était de 96 pour 3 :




Cette proportion initiale est un marqueur d'évolution qui sera très utile par la suite. Elle s'explique par la formation des 4 planètes telluriques dans la même nébuleuse.

La différenciation se produit pour tous les noyaux planétaires, autant pour les géantes que pour les telluriques. Mais près du Soleil, il ne reste plus de volatils à capturer, alors qu'au loin (dans la région de Jupiter et au-delà), hydrogène et hélium sont présents en masse. Les jeunes planètes rocheuses qui circulent dans ce milieu ont une masse suffisante pour attirer et conserver même les éléments les plus légers. Nous verrons des explications sur ce sujet un peu plus loin. Les 4 géantes ont fait le ménage autour d'elles, et toute la nébuleuse se retrouve dans leurs atmosphères. Les volatils provenant du dégazage ne représentent qu'une toute petite fraction de cette atmosphère, dont la composition est donc très proche de celle de la nébuleuse primitive :

75 % d'hydrogène
24 % d'hélium

Tout le reste est à l'état de traces :

oxygène : $5\ 10^{-4}$ %
carbone : $3\ 10^{-4}$ %
azote : $10^{-4}$ %
gaz rares : argon, néon, xénon…

**Stabilité d'une atmosphère**

Les planètes à peine formées ont donc une atmosphère. Vont-elles la conserver ? C'est le problème de la stabilité d'une atmosphère, qu'il est facile de résoudre en considérant deux arguments : la chaleur et la gravité.

**Chaleur**. La température d'une atmosphère planétaire est déterminée par le bilan de la chaleur solaire absorbée, de la chaleur propre de la planète

éventuellement, de l'effet de serre, et du rayonnement dans l'espace. Chaque planète présente ses caractéristiques propres, qu'il faut étudier particulièrement. Considérons ici la température résultante.

*Plus l'atmosphère est chaude, plus la vitesse des atomes qui la composent est grande.*

On définit une vitesse thermique $v_t$, qui est la vitesse **moyenne** d'agitation des atomes dans un gaz chaud.

L'énergie thermique des particules ($E_t$ = 3/2 kT) provient de la chaleur (mesurée par la température T). Elle se transforme en énergie cinétique ($E_c$ = 1/2 $mv^2$), communiquant à la particule la vitesse v. L'égalité de ces énergies ($E_t = E_c$) permet de calculer la vitesse thermique des particules :

$$\frac{1}{2}mv_t^2 = \frac{3}{2}kT \Rightarrow v_t = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

k est la constante de Boltzman, m la masse de la particule, T la température absolue du gaz.

On remarque que plus la température est élevée, plus la vitesse moyenne des particules augmente. Si la température est multipliée par 4, la vitesse moyenne des particules est multipliée par 2. Par contre, plus la masse d'une particule est élevée, plus faible sera sa vitesse (à température égale) ; la masse produit une inertie qui s'oppose à l'accélération de la particule. Donc, les gaz légers (hydrogène d'abord, hélium ensuite), se déplaceront à une vitesse importante, les gaz lourds iront nettement moins vite.

**Gravité**. La gravité dépend essentiellement de la masse de la planète. Elle est aussi fonction de son rayon, mais ce facteur est secondaire. C'est elle qui retient un atome, l'empêchant de s'évader dans l'espace. On nomme *vitesse de libération* la vitesse minimale qu'il faut donner à un objet par rapport à une planète pour qu'il puisse lui échapper totalement. Une fusée qui atteint 11,2 km/s quitte la Terre. C'est cette vitesse qu'il faut absolument atteindre lorsqu'on veut envoyer une sonde dans le système solaire.

*Plus la gravité est forte, plus la vitesse de libération est grande.*

Un atome est lié à sa planète tant que sa vitesse est inférieure à la vitesse de libération $v_l$ :

$$v_l = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

G est la constante de la Gravitation universelle ; M et R sont la masse et le rayon de la planète.

> Pour l'établir, il suffit de considérer l'énergie cinétique de la particule : $E_c$ = 1/2 m $v^2$. Une particule de masse m animée d'une vitesse v, possède une énergie $E_c$. Pour quitter la planète, il lui faut une énergie égale à celle qu'elle obtiendrait en tombant sur la planète : c'est l'énergie potentielle $E_p$ = G M m / R. Elle peut s'échapper si son énergie cinétique est au moins égale à son énergie potentielle. La vitesse la plus petite qui le permet est la vitesse de libération $v_l$ qui satisfait donc :
>
> $E_c = E_p$ = 1/2 m $v_l^2$ = G M m / R
>
> d'où : $v_l^2$ = 2 G M / R et par suite la formule encadrée plus haut.

**Evasion**

Un atome de l'atmosphère est accéléré par la chaleur, et retenu par la gravité. Si la vitesse que la chaleur lui communique est supérieure à la vitesse de libération, il pourra quitter définitivement la planète. Encore faut-il pour cela qu'il ne subisse pas de collisions qui lui retireraient son énergie. Ce phénomène ne se passe donc que dans la haute atmosphère d'une planète, là où la densité est de toutes façons très faible.

Il suffit d'écrire que cette condition $v_t > v_l$ est vérifiée pour savoir si une atmosphère est stable, et pour quels atomes ou molécules :

$$V_t > V_l \Rightarrow \sqrt{\frac{3kT}{m}} > \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

De l'inégalité de droite on tire la contrainte sur T pour une masse donnée :

$$T > \frac{2GmM}{3kR}$$

Pour une planète donnée, le terme 2 G M / 3 k R = α est une constante. La condition d'évasion s'écrit donc $T > T_e = \alpha$ m. La température d'évasion $T_e$ est donc proportionnelle à la masse de la molécule : les plus légères ont la température d'évasion la plus basse, et sont les plus susceptibles de quitter la planète.

Ce phénomène est nommé *évasion de l'atmosphère.*

Dans la formule précédente, M et R caractérisent la planète. La température T dépend essentiellement de sa distance au Soleil. De la relation, on peut tirer la masse d'une particule susceptible de s'évader, selon la planète et sa distance au Soleil :

$$m < \frac{3kRT}{2GM}$$

Les particules dont la masse est plus petite que cette valeur s'échappent.

Le tableau ci-dessous montre la masse des particules pour les huit planètes :

| | Mercure | Vénus | Terre | Mars | Jupiter | Saturne | Uranus | Neptune |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **R/M** | 7,388 $10^{-18}$ | 1,243 $10^{-18}$ | 1,068 $10^{-18}$ | 5,292 $10^{-18}$ | 3,7 65 $10^{-20}$ | 1,06 $10^{-19}$ | 2,942 $10^{-19}$ | 2,196 $10^{-19}$ |
| **m** | 1,04 $10^{-27}$ | 2,91 $10^{-28}$ | 9,56 $10^{-29}$ | 3,46 $10^{-28}$ | 1,78 $10^{-30}$ | 4,88 $10^{-30}$ | 7,35 $10^{-30}$ | 5,48 $10^{-30}$ |
| **m/mp** | 0,6 | 0,18 | 0,06 | 0,21 | 0,001 | 0,002 | 0,004 | 0,003 |

m est la masse minimale d'une particule, en kilogrammes, pour qu'elle reste liée à la planète. Les particules de masse plus petite s'échappent.

Cette valeur n'ayant pas de sens pratique, rapportons-la à la masse du proton (mp = 1,672623 $10^{-27}$ kg) ; c'est le résultat donné dans la troisième ligne. Si la valeur est inférieure à 1, la particule est plus légère que le proton. Mais aucun noyau atomique n'est plus léger, puisque l'hydrogène comporte un unique proton. Pour tous les atomes, le rapport est plus grand que 1.

Le calcul ainsi fait montre qu'aucun atome ne peut s'échapper des planètes ! Mais il faut interpréter le résultat correctement. Nous avons fait le calcul avec la **vitesse moyenne** d'agitation des particules. Or la théorie cinétique des gaz montre qu'effectivement, la température moyenne des particules est celle indiquée. Mais dans un gaz, elle ne se déplacent pas toutes à la même vitesse. Certaines vont bien moins vite, d'autres beaucoup plus.

Si on considère les particules se déplaçant dix fois plus vite que la moyenne, elles seront moins nombreuses. Mais il y en a. Une vitesse 10 fois supérieure induit une masse minimale 10 fois plus élevée, donc multiplie également le rapport par 10. Pour Mercure, on obtient 6 fois la masse du proton, montrant que les atomes légers ont donc tout à fait la vitesse suffisante pour s'échapper. Bien sûr, le raisonnement fait ici est qualitatif. Une analyse précise permet de connaître la proportion d'atomes ayant une vitesse 10 fois supérieure à la vitesse moyenne, et d'en déduire le temps d'évasion de l'atmosphère.

Pour la Terre, 10 fois plus rapide ne suffit pas. Seuls les noyaux d'hydrogène 17 fois plus rapides s'échappent. Comme ils sont rares, il s'en échappe peu à chaque seconde, et le temps d'évasion est très élevé.

Mercure et la Lune n'ont pas d'atmosphère permanente. La température d'une éventuelle atmosphère est plus élevée que la température d'évasion, même pour des gaz lourds.

Vénus est assez massive pour retenir la quasi-totalité de son atmosphère primitive.

L'atmosphère de Mars est très légère, elle s'est presque totalement évadée.

Les satellites n'en ont pas non plus, sauf Titan, Triton et à une moindre mesure Io.

Par contre, les atmosphères des planètes géantes sont très stables, celles-ci étant capable de retenir même l'hydrogène. Pour cela, leur grande masse s'allie à une température très basse…

**Divisions de l'atmosphère**

On distingue différentes couches dans une atmosphère, depuis le sol jusqu'à l'espace. Mais pour les séparer, il faut un critère. Or il en existe plusieurs. Les deux principaux sont la composition chimique et la température. Pour la Terre, on distingue :

- **par composition** : les gaz constituant une atmosphère se mélangent par convection, jusqu'à une altitude où les molécules sont trop peu nombreuses pour s'influencer. La couche basse est nommée *homosphère*, la haute *hétérosphère*. La limite entre les deux est la *turbopause*, ou *homopause*. Sa base se trouve vers 80 km, et son épaisseur est de 15 à 20 km. Dans la turbopause, la convection qui mélange les gaz est décroissante, et devient nulle dans sa partie supérieure. Dans l'hétérosphère, il n'y a plus de mélange parce que les atomes ou molécules n'ont qu'une probabilité très faible d'en heurter un(une) autre, ce qui assurerait un mélange. Les atomes se séparent donc par poids décroissant avec l'altitude. On trouve $N_2$ (azote moléculaire) dans la partie basse de l'hétérosphère, puis O (l'oxygène atomique, les molécules $O_2$ ayant été brisées par photoionisation), puis He et enfin H. La base de l'hétérosphère se situe vers 100 ou 80 km, selon qu'on lui inclut la turbopause ou non.
- **par température** : les variations de température avec l'altitude sont complexes. Au niveau du sol, le chauffage est assuré par la surface, elle-même chauffée par le soleil (absorption du visible, émission d'IR). Donc, plus on s'élève, plus la température baisse. Cette couche basse se nomme *troposphère*. Plus haut, le rayonnement solaire est absorbé en partie par certains constituants de l'atmosphère (l'ozone, par exemple, absorbe de 200 à 300 nm), qu'il chauffe. L'ozone y est produit en permanence par la photodissociation de l'oxygène par le rayonnement solaire. La température recommence à croître. C'est la *stratosphère*. La zone de transition entre troposphère et stratosphère se nomme *tropopause*. Plus haut encore (au-dessus de la stratosphère), ces constituants se raréfient, et l'absorption diminue, entraînant une nouvelle baisse de la température.
  C'est la *mésosphère*, séparée de la stratosphère par la *stratopause* (50 km d'altitude). Enfin, à haute altitude, de nouveaux composants (oxygène et azote) absorbent l'UV lointain, produisant un chauffage très efficace sur un air raréfié. Cette couche est la *thermosphère* qui commence à la *mésopause* (vers 90 km d'altitude). Les rayonnements UV étant énergétiques, les atomes sont ionisés et réfléchissent les ondes radio (*ionosphère*).

**Stratification de l'atmosphère terrestre**

| Stratification par température | | | | | | | Stratification par composition |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **couche** | **altitudes** | **composition** | **température** | **pression** | **transfert d'énergie** | **chauffage** | |
| **Troposphère** | 0 - (7, 12, 18) km | vapeur d'eau | T ↓ 10° à -56° | 1000 à 300 mb | convection | par le sol | **Homosphère** |
| *Tropopause* | | | | | | | |
| **Stratosphère** | 12 - 50 km | sèche, ozone | T ↑ -56° à 0° | 300 mb à 1 mb | circulation horizontale, rayonnement | absorption UV, IR | |
| *Stratopause* | | | | | | | |
| **Mésosphère** | 50 - 90 km | | T ↓ 0° à -90° | 1 mb à 10 µb | | | |
| *Mésopause* | | | | | | | *Homopause* |
| **Thermosphère** | > 90 km | | T ↑ -90° à 700° | 10 µb à ≈ 0 | | | **Hétérosphère** |

La troposphère est convective, la stratosphère radiative.

La pression atmosphérique moyenne sur Terre est de 1.013 mb. Elle varie entre 950 et 1.050 mb.

## *Evolution*

L'évolution des atmosphères est très complexe, et dépend de nombreux paramètres. Rapellons d'abord que le jeune Soleil au moment de la formation des atmosphères planétaires, était à peu près 20 % moins brillant qu'aujourd'hui. Depuis, sa brillance n'a cessé d'augmenter, bien que très lentement, et donc aussi la chaleur dispensée aux planètes.

### Mécanismes d'évolution

On connait quelques mécanismes d'évolution des atmosphères planétaires. On les classe en deux catégories, selon que la nature chimique du gaz concerné influe sur son sort ou pas. Si l'évolution dépend de l'élément chimique considéré, on parlera d'évolution chimique, sinon il s'agira d'une évolution physique.

- échappement gravitationnel (mesuré par le rapport D/H) ;
- mécanismes dynamiques (flux solaire) ;
- changements de phase (vapeur, eau, glace) ;
- interactions avec l'extérieur ;
- interactions avec l'intérieur.

L'échappement gravitationnel est un mécanisme d'évolution radical de l'atmosphère : il conduit à sa perte.

### Evolution des atmosphères telluriques

Aujourd'hui, les atmosphères des planètes telluriques sont très différentes de ce qu'elles étaient à l'origine, mais aussi très différentes entre elles. Elles ont donc évolué, mais pas de la même manière. Voilà ce qu'il faut expliquer maintenant.

**Mercure** est très proche du Soleil - donc très chaude, et petite - donc de faible gravité. Pour retenir une atmosphère, il faut une forte gravité, et/ou une température basse (faible agitation thermique). Mercure a perdu très rapidement l'atmosphère qu'elle s'était constituée par dégazage. Elle possède une très faible atmosphère, formée par sputtering. Cette atmosphère est dite *transitoire* car les atomes qui la constituent ne peuvent pas être liés durablement à la planète : le vent solaire les entraîne si l'agitation thermique ne les a pas déjà expédiés au loin. Mais les micrométéorites et le vent solaire arrachent en permanence de nouveaux atomes à la surface, qui renouvellent donc cette faible atmosphère. La pression n'est que de l'ordre du millionième de bar…

Mercure étant passée, il reste les trois autres planètes telluriques, pour lesquelles on va d'abord considérer deux paramètres dans leurs valeurs actuelles : la proportion de gaz carbonique et d'azote, et la pression. Le tabeau ci-dessous les donne :

| **Vénus** | **la Terre** | **Mars** |
|---|---|---|
| 90 bars<br>93 / 3 | 1 bar<br>0 / 3 | 0,01 bar<br>96 / 3 |
| pas d'évolution | évolution chimique | évolution physique |

Nous avons dit plus haut que la pression initiale était de l'ordre de 100 bars. On voit donc d'abord que Vénus a conservé la quantité de gaz qu'elle a eu au départ, alors que la Terre n'en a gardé que le centième, et Mars le millionième. Ces deux dernières planètes ont perdu l'essentiel

de leur atmosphère, mais par quel mécanisme ?

Le second paramètre donne la proportion gaz carbonique/azote. Elle était initialement de 96/3, donc là encore rien n'a changé pour Vénus, mais pas davantage pour Mars. C'est la Terre qui se distingue. Mais on remarque que pour la Terre, sur 99 parties de gaz (96 + 3), donnant une pression initiale de l'ordre de 100 bars, la pression partielle d'azote était de 3/96 ≈ 3 % ; c'est de l'ordre de la pression que nous avons aujourd'hui. Le $CO_2$ a donc disparu, et les 3 parts d'azote qu'il reste expliquent en grande partie la pression actuelle. Donc, l'azote est resté, le gaz carbonique a disparu. Il s'agit d'une évolution chimique, qui distingue les gaz selon leurs propriétés chimiques. Par contre, sur Mars la proportion est conservée, donc azote et gaz carbonique ont été éliminés également. Le mécanisme qui en est responsable ne distingue pas selon les propriétés chimiques, c'est un mécanisme physique.

**Vénus** est assez massive, et assez loin du Soleil, pour retenir son atmosphère. Celle-ci contenait aussi de la vapeur d'eau. Mais la température de Vénus n'a jamais été assez basse pour que l'eau condense, et Vénus n'a jamais eu d'océans. De ce fait, le gaz carbonique et la vapeur d'eau ont persisté dans l'atmosphère. La température y était déterminée par l'effet de serre, produit par ces deux gaz. Et le Soleil augmentant sa brillance, l'effet de serre s'est emballé, atteignant les températures actuelles. La vapeur d'eau, dans la haute atmosphère, a été dissociée par les rayons UV du Soleil, et l'hydrogène, trop léger, s'est échappé de manière irréversible. Ceci explique l'assèchement de Vénus, et ses conditions physiques actuelles. Si Vénus avait été un peu moins chaude, son destin aurait été sans doute très différent !

**La Terre** a la même masse que Vénus (légèrement plus), et se trouve encore un peu plus loin du Soleil. Sa température est donc un peu plus basse, et la stabilité de l'atmosphère est garantie un peu mieux que pour Vénus. Où est passé le gaz carbonique ? La température de la Terre était suffisamment basse au début de son histoire pour que l'eau finisse par se condenser et forme des océans. L'eau provenait du dégazage, et des comètes : or le rapport HDO / $H_2O$ (eau lourde / eau ordinaire) est moitié de celui observé dans les comètes, donc au plus la moitié de l'eau terrestre peut venir de cette source. Dans ces océans, le gaz carbonique a pu se dissoudre, et la vie est apparue, environ un milliard d'années après la formation de la Terre. Cette vie primitive était constituée d'algues, dites *algues bleues*, ou *cyanophycées*, à cause de leur couleur, qui était donnée par un pigment assurant la photosynthèse. On les nomme aussi *cyanobactéries*, ce qui montre que leur simplicité pose un problème pour les rattacher au règne animal ou végétal. Absorbant le gaz carbonique, dont elle détruisaient la molécule, elles retenaient le carbone pour produire des sucres, et une sorte de squelette calcaire, et rejettaient l'oxygène. Elles ont produit les *stromatolithes* (calcaire). Elles ont ainsi progressivement détruit le gaz carbonique pour former les carbonates de nos collines (qui sont l'atmosphère primitive fossile), et rejeté de l'oxygène, qui a peu à peu pollué l'atmosphère. Dans la stratosphère, l'oxygène a donné de l'ozone, qui a arrêté les UV solaires, permettant à la vie de sortir de l'eau. L'atmosphère est aujourd'hui constituée de 77 % d'azote et de 21 % d'oxygène. Sur Terre, ce n'est pas l'azote qui est apparu, c'est le gaz carbonique présent avec lui qui a disparu, piégé dans les carbonates. Si on calcinait les carbonates, on retrouverait une masse de $CO_2$ suffisante pour reconstituer les proportions 96 / 3. La disparition progressive du $CO_2$ (baisse de l'effet de serre), et l'accroîssement tout aussi progressif de l'éclat du Soleil (augmentant la chaleur disponible), ont assuré à la Terre des conditions climatiques étonnament stables sur une période de 3 milliards d'années, qui ont permi le maintien de la vie.

**Mars**, encore un peu plus loin, mais surtout plus petite, n'a pas pu retenir une atmosphère importante. La vitesse de libération est à peine plus élevée que sur Mercure : 4,25 km/s pour cette dernière, 5,02 pour Mars. C'est l'éloignement au Soleil qui a permi à Mars de conserver encore un peu de gaz. L'eau y a été présente, et la température assez élevée grâce à l'effet de serre pour qu'elle soit liquide. Il y a peut-être eu des lacs, des mers, voire des océans sur Mars. Mais à mesure que l'éclat du Soleil augmentait, la quantité de gaz carbonique étant constante, l'effet de serre augmentait aussi et provoquait une élévation de la température. C'est sans doute ce qui a provoqué l'évasion de l'atmosphère. La pression diminuant, l'eau ne pouvait plus se trouver sous forme liquide. Seules la vapeur et la glace étaient stables. Et ainsi, une grande partie de l'eau présente dans l'atmosphère a progressivement rejoint le sol sous forme de glace, constituant un pergélisol. Le reste s'est probablement photodissociée dans la haute atmosphère (perte de l'hydrogène, trop léger). Les recherches actuelles faites par les sondes Mars Express ou Phoenix ont trouvé de la glace dans le sous-sol (Mars Express), ou directement aux abords de la calotte polaire nord (Phoenix). La vapeur d'eau présente à l'origine dans l'atmosphère s'est trouvée piégée sous forme de glace dans le sol. Le piégeage, dans ce cas, s'est fait par changement de phase. La composition de l'atmosphère est assez semblable à celle de Vénus, bien que la pression soit 10.000 fois moins forte : 96 % de $CO_2$ pour 3 % $N_2$.

Les conditions actuelles de température et de pression permettent au gaz carbonique d'être à l'état gazeux en général. Mais près des pôles, lorsque vient l'hiver, la température tombe assez pour que la glace carbonique soit stable. On ignore encore si le gaz carbonique se gèle au contact du sol froid, ou s'il tombe de la neige carbonique. Mais il est sûr qu'une fraction importante (20 %) du gaz atmosphérique se condense sur la calotte polaire qui se trouve en hiver. Une telle mobilisation de gaz entraîne obligatoirement une baisse significative de la pression atmosphérique. Lorsque le printemps revient, la glace carbonique se sublime, la pression augmente au-dessus du pôle concerné. Ceci produit des vents violents qui vont équilibrer les pressions, en propageant ce gaz vers le pôle opposé. Ces vents pourraient être à l'origine des grandes tempêtes de poussières régionales ou même globales, qu'on observe certaines années au printemps sur Mars. La sonde Phoenix, qui s'est posée près de la calotte polaire nord, à l'automne, a observé des flocons de neige, qui tombaient sans toutefois atteindre le sol : ils se sublimaient avant d'y parvenir. Peut-être atteignent-ils le sol lorsque la température est plus basse au cœur de l'hiver.

**Compléments sur la Terre**

C'est bien sûr la mieux connues de toutes les planètes !

Lorsque la Vie a commencé à détruire le gaz carbonique et à produire de l'oxygène libre, dans les océans (la Vie ne pouvait pas exister au sec à cause du rayonnement UV du Soleil qui l'aurait détruit), l'oxygène était en solution dans l'eau.

Or celle-ci contenait des ions fer en abondance, car le fer est un élément très courant dans la nature. Le fer s'est donc oxydé, et a fixé l'oxygène produit. Tant qu'il y a eu du fer en solution, la production d'oxygène a été neutralisée. Le résultat se voit aujourd'hui dans les gisements de fer rubanné qui servent à la sidérurgie.

Lorsqu'enfin le fer a été épuisé, l'oxygène a saturé l'eau des océans, puis s'est dégagé dans l'atmosphère. On peut dire ainsi que c'était un polluant, puisqu'il venait modifier la constitution de l'atmosphère. Tant que sa concentration est restée faible, il ne s'est rien passé de particulier, les changements n'étaient que secondaires. Mais petit à petit, les UV du Soleil ont commencé à dissocier les molécules de dioxygène. Or un atome d'oxygène ne peut guère rester isolé, car il est très réactif. Il se combine donc avec une molécule $O_2$ pour former une molécule $O_3$, l'ozone. Et l'ozone commence à absorber les UV du Soleil, qui se trouvent arrêtés avant d'arriver au sol. A partir de ce moment, la Vie a pu

quitter les océans pour coloniser la terre ferme. Et la photosynthèse a eu davantage de possibilités pour produire de l'oxygène. La Vie a donc modifié de façon durable notre atmosphère. Mais la Vie du début était évidemment anaérobie, puisqu'elle s'est installé dans un milieu sans oxygène, réducteur. Maintenant, les bactéries anaérobies sont obligées de se cantonner dans quelques milieux protégés de l'oxygène.

Outre la présence d'oxygène, la Terre a une particularité importante, qui ne se rencontre pas partout. La température moyenne est telle, que l'eau peut y exister sous trois phases différentes, solide (glace), liquide, et vapeur.

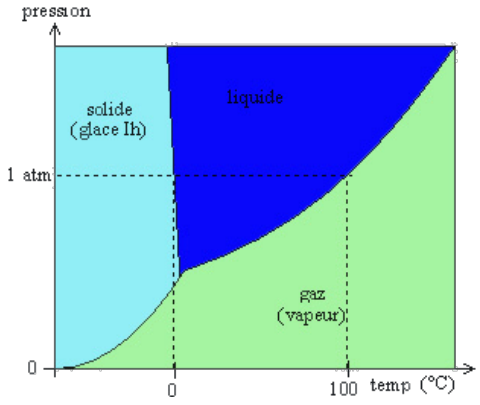


Lac Blanc, Chamonix photo J. Gispert

Cette photo montre le Lac Blanc au-dessus de Chamonix. On voit le lac lui-même constitué d'eau liquide ; on voit autour de la neige, constituée de cristaux de glace ; et enfin on voit des nuages formés de goutelletees d'eau en suspension dans l'atmosphère. Bien sûr, le brouillard n'est pas de la vapeur d'eau, car celle-ci ne se voit pas. Mais c'est parce que la vapeur sature l'air que les goutellettes peuvent se condenser pour former brouillard et nuages. On a donc sur cette photo les trois phases de l'eau simultanément.

On dit pour cela que la Terre se trouve au point triple de l'eau. Cette caractéristique était unique il y a quelques années encore, jusqu'à ce qu'on découvre un autre corps du système solaire qui est au point triple, mais d'un autre élément. Ceci est une autre histoire, dont on discutera plus tard.

La loi des gaz parfaits, qui s'applique à l'atmosphère terrestre, indique sous quelle phase se trouve la molécule d'eau selon la température et la pression :




Ce diagramme a été établi pour de l'eau pure. Or l'eau que l'on trouve sur Terre ne l'est pas, elle contient toujours des sels en solution. Ce qui change un peu ses propriétés. Mais on voit sur le schéma que les trois phases, solide, liquide et vapeur, coexistent vers 0° C sous une pression un peu plus faible que la pression normale.

**Stabilité thermique**

Après sa formation, le Soleil était un peu moins brillant qu'aujourd'hui, de quelques 30 %. Or l'atmosphère primitive de la Terre contenait énormément de gaz carbonique, produisant un monstreux effet de serre. En fait, c'est grâce à lui que l'eau a été liquide sur Terre ; sinon, elle aurait été entièrement gelée, et la Vie n'aurait pas pu apparaître…

Puis, le gaz carbonique a commencé à disparaître de l'atmosphère, éliminé par la Vie ; l'effet de serre diminuait. En même temps, l'éclat du Soleil augmentait, et il chauffait la Terre de plus en plus. L'un compensant l'autre, la température à la surface de la Terre est restée remarquablement constante au cours des 4 derniers milliards d'années. Ce qui était particulièrement favorable pour le maintient de la Vie… Curieusement, la Vie a créé les conditions qui lui ont permi de perdurer !

Résumé de l'évolution pour les 4 planètes telluriques :

| | | |
|---|---|---|
| **Mercure** | très petite, très proche (chaude) | perte par évaporation |
| **Vénus** | grosse, plus lointaine, assez chaude | peu d'évolution |
| **la Terre** | grosse, assez lointaine, tiède | évolution chimique liée à la vie |
| **Mars** | petite, chaude au début | évolution physique |

## *Atmosphères des géantes*

La composition des atmosphères des planètes géantes a été obtenue par analyse spectrale. Dans le cas de Jupiter, un petit module a été expédié dans l'atmosphère à des fins d'analyse chimique et thermique, mais par malheur, ou par chance, il est tombé juste dans une zone chaude… Par malheur, parce que cette zone n'est pas représentative de l'ensemble de l'atmosphère, mais par chance parce que s'il avait fallu viser ce point, on n'y serait sans doute pas parvenu…

**Jupiter** s'est constitué une atmosphère primitive par capture de la nébuleuse solaire. Donc avec la composition de celle-ci : 75 % hydrogène, 24 % hélium. Tout le reste étant à l'état de traces : oxygène ($5\ 10^{-4}$), carbone ($3\ 10^{-4}$), azote ($10^{-4}$), gaz rares (Ar, Ne, Xe).

Des réactions d'équilibre se produisent :

$$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3\ H_2$$

et

$$2\ NH_3 \leftrightarrow N_2 + 3\ H_2$$

$CH_4$, $H_2O$ et $NH_3$ (en rouge) se forment préférentiellement à faible température ou à forte pression, conditions qui correspondent bien à l'atmosphère de Jupiter.

A température plus élevée, une autre réaction d'équilibre se produit : $CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$.

On s'attend à trouver le carbone et l'azote sous la forme **méthane** et **ammoniac**, comme le confirme l'observation. L'ammoniac condense en nuages à la température de -123 . Ces données s'appliquent aux trois autres planètes géantes. Les atmosphères des géantes sont donc chimiquement réductrices. Jupiter possède une **troposphère** (température décroissante, convective) à laquelle succède une **stratosphère** (la température remonte, radiative).

Ce sera le cas des trois autres géantes. La tropopause se trouve à la pression de 0,1 bar pour toutes les géantes, pression déterminée par la composition identique. L'augmentation de température stratosphèrique est due au chauffage du méthane par le Soleil. La température de la tropopause est de -163 pour Jupiter. Elle est plus basse pour les autres. La température de la tropopause (minimum) bloque les éléments situés en-dessous, qui ne peuvent la franchir (ils gèlent).

Jupiter est brun-rouge, avec bandes et zones. La complexité de ces apparences vient du fait qu'il existe sur les planètes géantes plusieurs molécules différentes qui constituent des nuages en se condensant, contrairement à notre Terre où seule l'eau joue ce rôle. Ainsi, les planètes montrent en général plusieurs niveaux de nuages de colorations diverses. Les molécules concernées sont l'ammoniac $NH_3$ au plus haut niveau, $NH_4SH$ (hydrosulfide d'amonium) plus bas, et l'eau $H_2O$ plus bas encore. L'anydride sulfureux $H_2S$, le méthane $CH_4$, la phosphine $PH_3$… sont des constituants mineurs. Les nuages visibles sur Jupiter sont donc essentiellement formés d'ammoniac.

La rotation très rapide de Jupiter (10 heures) induit la structure en bandes. La force de Coriolis produit, avec les ascendances, des cellules de Hadley, responsables des bandes à leur sommet (zones ascendantes, bandes descendantes). Les gaz ascendants se refroidissent, et certaines molécules condensent alors ($H_2O$ et $NH_3$). Ceci change la coloration : les zones sont nuageuses, les bandes représentent les gaz débarrassés des molécules condensées (sèches), et donc plus claires.

La Grande Tache Rouge est un anticyclone (région de hautes pressions) permanent depuis sa découverte (4 siècles). On pense que c'est une colonne de gaz qui s'élève 200 km au-dessus des nuages environnants. Fort heureusement, aucun cyclone terrestre n'a la vie aussi dure ! Des taches ovales blanches (*WOS*, *White Oval Spots*) sont également visibles, mais non permanentes ; il est arrivé récemment d'observer la fusion de deux telles taches.

Enfin, depuis peu, une seconde tache rouge a fait son apparition sur Jupiter. Plus petite et plus pâle, on guette son évolution. Et une troisième encore s'est formée, plus petite et à la même latitude que la Grande Tache Rouge. Le 7 juillet 2008, cette petite tache a été absorbée par la Grande. Il se passe donc beaucoup de choses dans l'atmosphère de Jupiter. Depuis la première observation télescopique, une seule tache rouge était connue. La coloration venant de diverses substances chimiques dont la formation dépend des conditions de température, de pression, et de la convection résultante, ces phénomènes sont des marqueurs de l'activité de l'atmosphère.

Jupiter possède une magnétosphère très importante, car son champ magnétique est très fort (10 fois le champ terrestre, produit par le noyau d'hydrogène métallique en rotation rapide). Elle a été détectée dans le domaine radio (rayonnement synchrotron des électrons solaires). Io est baigné dans cette magnétosphère. Le vent solaire produit, sur cette magnétosphère, des aurores polaires comme sur Terre.

**Saturne**

De l'ammoniac est sans doute présent, mais condense à une profondeur trop grande pour être observé. La température de la tropopause est de -180 . Saturne présente la même structure en bandes et zones que Jupiter, mais bien plus pâle, sur un fond jaunâtre. La composition de l'atmosphère est semblable.

**Titan**

Impossible d'oublier Titan, gros satellite de Saturne, qui est maintenant assez bien connu. Titan possède une atmosphère très épaisse, la pression au sol atteignant 1,5 bars, plus élevée que sur Terre. Cette atmosphère est de plus contituée essentiellement d'azote ! Cette caractéristique a fait dire parfois que Titan est une jeune Terre mise au congélateur. Et on y place des espoirs pour comprendre comment la chimie prébiotique pourrait se mettre en place.

Titan a été exploré en détails par deux sondes :

Cassini en orbite autour de Saturne, qui passe périodiquement près de Titan et qui en profite pour faire de études rapprochées. La sonde possède un radar permettant de percer les nuages de Titan pour analyser le sol. Cette analyse a montré des zones lisses, dont la réflectivité radar indique que ce sont des lacs d'hydrocarbure, essentiellement du méthane. Les conditions physiques qui règnent à la surface permettent au méthane de se trouver sous les trois phases solide, liquide et gazeuse : Titan est au point triple du méthane comme la Terre est au point triple de l'eau.

Le module de descente européen Huygens, transporté par Cassini, a pénétré dans l'atmosphère de Titan et s'est posé en douceur sur le sol. On possède maintenant de nombreuses photos du sol du satellite, montrant des montagnes, des rivières, et une plaine très plate (où s'est posé Huygens), qui ressemble au fond d'un lac asséché. Il doit pleuvoir du méthane sur Titan, et il est possible qu'il ait plu la veille de l'arrivée de la sonde.

**Uranus**

Comme pour les deux précédentes, les composants essentiels sont l'hydrogène et l'hélium. De l'ammoniac est sans doute présent, mais condense à une profondeur trop grande pour être observé. La température de la tropopause est de -220 . Uranus est de couleur uniforme, bleue sur les photos des sondes. Cette coloration est due au méthane qui se trouve en quantités assez importantes. L'axe de rotation d'Uranus est presque dans le plan de son orbite. Il arrive que le soleil soit au zénith… au pôle nord ! C'est le cas actuellement. Les alternances d'éclairement et de nuit (48 ans pour chaque) perturbent l'atmosphère. Mais l'inertie thermique est telle, que la température est pratiquement uniforme sur toute la surface. L'axe magnétique de la planète est incliné de 60° par rapport à son axe de rotation !

**Neptune**

L'ammoniac doit être présent, mais innobservable comme sur Uranus. La température de la tropopause est de -220 . Neptune est d'un bleu magnifique, avec des cirrus blancs. Le bleu profond de la planète vient du méthane très abondant dans l'atmosphère. Lors du passage de Voyager 2, une Grande Tache Sombre était visible à la surface. Mais un peu plus de six ans après, le télescope spatial ne l'a pas retrouvée. Elle n'avait donc pas la permanence de la Grande Tache Rouge de Jupiter, ce qui accroît encore un peu le mystère de cette dernière. L'axe magnétique de la planète est incliné de 50° par rapport à son axe de rotation !

**Evolution des atmosphères des géantes**

Les 4 planètes géantes sont plus actives que ce qu'on imaginait il y a quelques années encore. Mais ceci reste bien modeste quand même, si on en juge par la permanence de la Grande Tache Rouge. Ces planètes sont loin du Soleil, dont elles reçoivent peu d'énergie (Jupiter à 5 UA reçoit 25 fois moins d'énergie que la Terre, et Neptune à 30 UA en reçoit 900 fois moins). Elles sont donc froides, et la chimie y est timide. Toutefois, ces planètes produisent de l'énergie interne, dont on ne connaît pas précisément encore l'origine. Elle pourrait être gravitationnelle, produite par une très faible contraction résiduelle de la planète.

Dans ces conditions, leurs atmosphères n'ont pratiquement pas évolué depuis leur formation.

## *Météorologie planétaire*

Si on devait fournir un bulletin météo pour chacune des planètes, il pourrait ressembler à ceci :

| | |
|---|---|
| **Mercure** | Pas d'orages magnétiques prévus ; Soleil calme. |
| **Vénus** | Prévision pour les prochains millénaires : température 500 ; hautes pressions (90 atmosphères) ; ciel très couvert ; pluies acides ; vent léger. |
| **Terre** | Temps très variable, consultez votre chaîne de télévision favorite au jour le jour. |
| **Mars** | Beau temps ; quelques cirrus incapables de voiler le soleil ; on prévoit une température douce de -50 ; givre le matin ; le vent restera faible, mais une tempête de poussières est possible. |
| **Jupiter** | Pour les prochaines décennies, temps couvert ; les nuages seront portés par un vent violent ; la température restera autour de -150 , un peu plus élevée dans les zones claires. |
| **Saturne** | Bulletin météo permanent : toujours couvert, toujours froid (-170 ), toujours venteux… |

| | |
|---|---|
| **Titan** | Ciel couvert, masquant le soleil ; vent faible ; **Bulletin d'alerte** : pluie de méthane dans la soirée, les rivières de méthane pourraient sortir de leurs lits ! |
| **Uranus et Neptune** | Toujours couvert, toujours très froid, toujours très venteux… |

**Quelques hydrocarbures**

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| acétylène | $C_2H_2$ | éthylène | $C_2H_4$ | éthane | $C_2H_6$ | méthyl acétylène | $C_3H_4$ | propane | $C_3H_8$ |
| acide cyanhydrique | HCH | cyanoacétylène | $HC_3N$ | cyanogène | $C_2N_2$ | monoxyde de carbone | CO | dioxyde de carbone | $CO_2$ |

**Composition**

| | H | He | $CO_2$ | $N_2$ | CO | $O_2$ | $H_2O$ | $SO_2$ | $CH_4$ | $NH_3$ | Ar | autres | pression | temp. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Vénus** | - | - | 96,5 % | 3,5 % | 0,1 % à 100 km | - | 50 ppm | devenu $H_2SO_4$ | - | - | - | | 90 | 450 |
| **Terre** | - | - | 0,35 % | 77 % | 10 ppm à 90 km | 21 % | < 4 % | non permanent | 1 ppm | - | 1 % | $O_3$ | 1 | 10 |
| **Mars** | - | - | 95 % | 2,7 % | 0,07 % | 0,13 % | 0,03 % | - | - | - | 1,6 % | | 0,006 | - 55 |
| | | | | | | | | | | | | | | |
| **Jupiter** | 75 % | 25 % | $3\ 10^{-10}$ | - | $1,5\ 10^{-9}$ | - | $1,4\ 10^{-5}$ | - | $2,1\ 10^{-3}$ | $2\ 10^{-4}$ | - | $C_2H_6$, $C_2H_4$, $C_3H_8$ $PH_3$, $GeH_4$, $AsH_3$, $H_2S$ en profondeur | - | |
| *Io* | | | | | | | | 90 % | | | | SO 10 % | $10^{-9}$ | - 130 à - 170 |
| **Saturne** | 75 % | 25 % | $3\ 10^{-10}$ | - | $2\ 10^{-9}$ | - | $2\ 10^{-7}$ | - | $4,4\ 10^{-3}$ | $3\ 10^{-4}$ | - | $C_2H_2$, $C_2H_6$, $CH_3C_2H$, $C_4H_2$,$C_6H_6$, $CH_3$, $PH_3$, $GeH_4$, $AsH_3$ | - | |
| *Titan* | - | - | x | 96 % | x | - | - | - | 3,4 % | - | - | $C_2H_2$, $C_2H_4$, $C_2H_6$, $C_3H_4$, $C_3H_8$, HCH, $HC_3N$, $C_2N_2$ probablement adénine | 1,6 | - 180 |
| **Uranus** | 75 % | 25 % | - | - | $2\ 10^{-9}$ | - | $10^{-8}$ | - | $2\ 10^{-2}$ | - | - | $C_2H_2$ | - | |
| **Neptune** | 75 % | 25 % | $5\ 10^{-10}$ | - | $10^{-6}$ | - | $10^{-9}$ | - | $4\ 10^{-2}$ | - | - | $C_2H_2$, $C_2H_6$, $CH_3$, $C_2H_4$ | - | |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Triton* | | | | ≈ 100 % | | | | | 0,01 % | | | | $16\ 10^{-6}$ | -235 |
| Pluton | | | | x | | | | | x | | | | $10\ 10^{-6}$ | |

Pour les planètes telluriques, les valeurs sont les pourcentages en masse de chaque molécule.

Pour les géantes, ce sont les rapports à l'hydrogène. De plus, certaines molécules ont une abondance variable avec l'altitude considérée ; une moyenne est donnée ici. Les hydrocarbures sont produits par photodissociation du méthane.

L'abondance de CO sur Neptune est une surprise ! Elle est mille fois supérieure à ce que prévoient les modèles, d'où, sans doute, une origine interne.

La présence de vapeur d'eau dans les stratosphères des géantes est surprenante aussi. Il y a de l'eau plus bas, mais elle ne peut franchir la barrière du froid de la tropopause. Son origine est à rechercher dans les satellites glacés, ou des météorites mixtes (glaces et silicates).

Le volcanisme de Io a éliminé les glaces $H_2O$ et $CO_2$ densité plus forte que les autres satellites galliléens ($3{,}4\ g\ cm^{-3}$ contre 1,9 pour Ganymède et Callisto)..

Les particules chargées de la magnétosphère jovienne arrachent des atomes de Na, S, O, H, K… à la surface. Ces atomes forment un tore qui entoure l'orbite de Io.

**Titan**

Le méthane de Titan est photodissocié en permanence ; comment peut-il en rester ? Existe-t-il un cycle du méthane analogue du cycle de l'eau sur Terre ? L'atmosphère de Titan présente une troposphère, une stratosphère et une thermosphère. L'évolution de la température en fonction de l'altitude est semblable à celle de la Terre. Le chauffage stratosphérique est dû aux rayons UV absorbés par le méthane et les aérosols. L'azote **pourrait** provenir de la photochimie de $NH_2$.

L'atmosphère de Titan est au point triple du méthane,
comme l'atmosphère de la Terre est au point triple de l'eau.

**Triton**

Triton circule sur une orbite rétrograde, ce qui suggère une capture par Neptune. Son atmosphère ne comprend pas de stratosphère, on passe directement de la troposphère à la thermosphère. L'absence de stratosphère s'explique par la faible abondance du méthane, qui ne peut absorber l'énergie solaire. La surface montre $N_2$, $CH_4$, $CO_2$, CO. Saisons fortement marquées,donnant des phénomènes atmosphériques semblables à ceux de Mars, en remplaçant les rôles de CO et $CO_2$ par $N_2$ et $CH_4$.

**Pluton**

Pluton circule sur une orbite très excentrique, qui entraîne des variations de flux solaire de 30 %. A l'aphélie, l'atmosphère gèle. Elle n'est présente qu'au voisinage du périhélie.

L'échelle de hauteur est la distance verticale sur laquelle la pression est divisée par 2,7. Plus l'échelle de hauteur est petite, plus l'atmosphère est tassée près du sol. Sur Terre, elle est de 8 km. Au niveau de la mer, la pression est de l'ordre de 1.000 mbars. A 8.000 m d'altitude (altitude de l'Everest) la pression n'est plus que de 330 mb, et à 16.000 m, elle est de 137 mb. A 24.000 m elle vaut 50 mb seulement. La pression baisse de 1 mb tous les 10 m au niveau de la mer, de 1 mb tous les 30 m à 10.000 m d'altitude.

---=OO=---




Une planète se caractérise, entre autre, par ses durées de révolution autour du Soleil (**année**), et de rotation sur elle-même (**jour**).

L'une et l'autre sont mesurées par rapport à un repère réputé fixe : les étoiles. Le jour ainsi défini se nomme *jour sidéral*.

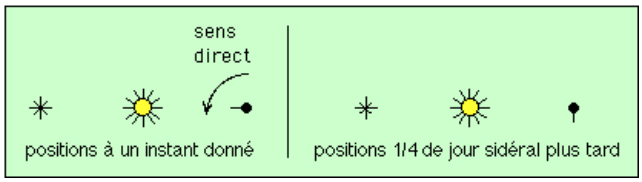
Le *jour solaire* est la durée qui ramène le Soleil deux fois successives au méridien. Mais nous verrons que cette définition, qui nous semble très claire en bons terriens que nous sommes, ne le serait pas forcément si nous vivions sur une autre planète ! De plus, même sur Terre, cette durée est variable au cours de l'année ; on l'appelle alors *jour solaire vrai*. Pour des raisons de commodité, on définit le *jour solaire moyen*. Celui-ci est donc invariable ; c'est lui qu'on utilise en disant que l'année tropique terrestre dure 365,2422 jours (solaires moyens). Une durée exprimée en ces termes est immédiatement convertible en secondes, la seconde étant l'unité de temps définie par des moyens optiques, indépendants des mouvements de la Terre. Le jour solaire vrai étant variable, sa durée ne correspond pas toujours au même nombre de secondes au cours de l'année.

> Nous allons voir les relations qui existent entre **le jour sidéral**, **l'année** et **le jour solaire moyen**, pour n'importe quelle planète, puis nous illustrerons ceci en détail dans une animation.

Sur les schémas ci-dessous, la planète est représentée par un disque noir. Le petit trait indique la direction du zénith pour un observateur particulier (le point du ciel au-dessus de sa tête). De plus, on représente l'ensemble vu du côté nord de l'orbite (on observe les pôles nord de la planète et du Soleil). Le mouvement orbital et la rotation de la planète sur elle-même se feront tous dans le même sens direct.

**Première situation**

- Pour simplifier, considérons d'abord le cas d'une planète qui ne tournerait pas autour du Soleil, et donc resterait toujours à la même place par rapport aux étoiles (bien sûr, une planète réelle dans cette situation ne pourrait que tomber sur le Soleil…). Le mouvement du Soleil dans le ciel serait alors dû exclusivement à la rotation de la planète sur elle-même ; or en un jour sidéral, elle tourne de 360°. par rapport aux étoiles. Puisqu'elle ne bouge pas par rapport au Soleil, elle accomplira aussi 360°. par rapport au Soleil. Donc elle accomplira un jour solaire exactement. Par conséquent, dans une telle situation, **jour solaire = jour sidéral**. Bien sûr, le Soleil, fixe par rapport aux étoiles, semble tourner dans le même sens et à la même vitesse qu'elles.

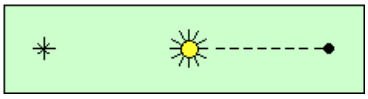



Dans le schéma de gauche, le Soleil et l'étoile sont au zénith pour cet observateur ; à droite, le Soleil et l'étoile sont à l'horizon et se couchent. On voit donc qu'il s'est écoulé un 1/4 de jour sidéral, et aussi 1/4 de jour solaire. Les deux durées sont égales.

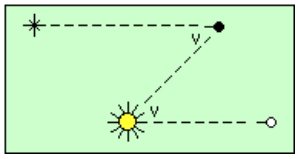
Attention, **le Soleil semble tourner dans le sens inverse !** Donc si la planète tourne d'un angle j (j est la rotation sidérale de la planète), le Soleil tourne dans le ciel d'un angle -r. Si la planète tourne dans le sens direct, le Soleil montre un **mouvement apparent rétrograde** dans le ciel.

**Deuxième situation**

- Considérons maintenant une seconde situation hypothétique dans laquelle la planète tourne autour du Soleil d'un mouvement circulaire uniforme (excentricité de l'orbite nulle). Supposons encore que cette planète **ne tourne pas** sur elle-même par rapport aux étoiles (rotation sidérale nulle). Le mouvement du Soleil dans le ciel serait dû exclusivement au déplacement de la planète sur son orbite. Lorsque la planète aura tourné d'un angle v autour du Soleil (v est l'anomalie vraie), celui-ci se sera déplacé d'une même quantité dans le ciel. On voit aussi que **le Soleil tourne apparemment dans le sens direct**.



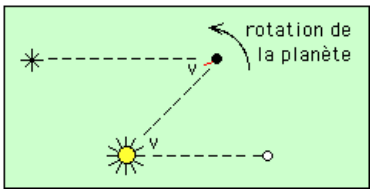
Le Soleil et l'étoile sont au zénith.




La planète a tourné d'un angle v autour du Soleil ;
elle n'a pas tourné par rapport à l'étoile.
Le Soleil a tourné d'un angle v dans le ciel.

**Troisième situation**

- Considérons maintenant le cas réel d'une planète qui tourne autour du Soleil **et** sur elle-même. Les deux mouvements vont se combiner pour donner le mouvement réel apparent du Soleil dans le ciel. Or le mouvement dû à la rotation de la planète sur elle-même se fait dans le sens rétrograde, alors que celui dû au mouvement orbital se fait dans le sens direct.




Par rapport à la situation précédente, on remarque que la planète a tourné sur elle-même d'un angle j, ce qui fait que le Soleil ne s'est déplacé dans le ciel que de l'angle v - j.

**Conséquences**

On voit immédiatement que si la planète tourne sur elle-même à la même vitesse qu'autour du Soleil, on a v = j, donc v - j = 0 ; le Soleil reste toujours à la même place dans le ciel. C'est le cas particulier où les forces de marée ont asservi la planète à tourner dans le même temps sur elle-même et autour du soleil. Ce cas ne se présente pas pour les planètes du système solaire, mais il y a de telles résonnances dans les systèmes de satellites. C'est d'ailleurs le cas de la Lune qui tourne toujours la même face vers la Terre (mais son orbite excentrique complique un peu les choses). Vue de la Lune, la Terre est toujours à peu près au même endroit dans le ciel.

D'autre part, si v > j, alors v - j est positif ; donc le mouvement moyen du Soleil se fera dans le sens direct. Par contre, si v < j, le mouvement apparent du Soleil sera dans le sens rétrograde.

Nous pouvons maintenant calculer la durée du jour solaire en fonction de celles du jour sidéral et de l'année, en supposant l'orbite circulaire.

**Formule**

Soit :

- v = 2 π t / T, où **T** est la durée de l'année. L'angle ainsi défini est *l'anomalie moyenne*. (la planète fait un tour complet, c'est-à-dire 2 π, autour du Soleil en un an = T jours ; donc en 1 jour, elle tourne T fois moins, soit 2 π / T ; et en t jours, t fois plus soit 2 π t / T).
- $j = 2 \pi t / j_S$, où $\mathbf{j_s}$ est la durée du jour sidéral, et t est mesuré en jours (solaires moyens terrestres).

En remplaçant v et j par les formules ci-dessus, on obtient : $v - j = 2 \pi t / T - 2 \pi t / j_S$

v - j est l'angle **apparent** dont a tourné le Soleil pendant le temps t. Si **S** est la durée du jour solaire moyen, v - j = 2 π t / S

Donc : $v - j = 2 \pi t / T - 2 \pi t / j_S = 2 \pi t / S$

En simplifiant par 2 π t, il vient : $1 / T - 1 / j_S = 1 / S$

d'où :

$$\mathbf{1 / S = 1 / T - 1 / j_S}$$

L'inverse du jour solaire s'obtient donc en retranchant l'inverse du jour sidéral à l'inverse de l'année de la planète.

**Exemples**

Nous allons faire le calcul pour Mercure, Vénus et la Terre. Nous connaissons la durée de l'année et celle du jour sidéral ; nous en déduirons la durée du jour solaire moyen à l'aide de la formule : $1 / S = 1 / T - 1 / j_S$.

**Mercure** : T = 87,969 j $j_S$ = 58,6462 j

1 / S = 1 / 87,969 - 1 / 58,6462 = 0,0113676409 - 0,0170514032 = - 0,005683762

**S = -175,9398 j**

Le signe est négatif, donc le sens apparent du Soleil est rétrograde. Le Soleil se lève à l'est.

**Attention !** La formule utilise la **vitesse constante** d'une planète ayant même durée de l'année mais une orbite circulaire. On peut donc dire que pour Mercure le Soleil se lève à l'est (comme sur Terre), en première approximation. A certains instants, le Soleil peut cependant se déplacer en sens inverse, nous le verrons dans l'animation présentée plus bas.

Remarquez de plus que 3 × 58,6462 = 2 × 87,969 = 175,938.

D'où la relation : 3 js = 2 T = - S

Sur Mercure, **1 jour solaire = 2 ans = 3 jours sidéraux** (au signe près).

Cette contrainte a été imposée par les forces de marée produites par le Soleil sur la jeune planète encore chaude. Des calculs ont été faits pour déterminer le temps nécessaire au développement de la contrainte : il apparaît que ce temps est de l'ordre du milliard d'années, si Mercure tournait sur elle-même rapidement au départ, en 8 heures seulement. Mais ce calcul, qui montre que ce que nous observons est possible ( ! ), a un autre intérêt, il permet de calculer la chaleur dégagée par ces marées. Elle est très importante, puisque la température de Mercure a été augmentée de 100 par les frottements produits. Ce résultat est à rapprocher des effets de marée actuels qui se produisent sur Io, satellite de Jupiter.

**Vénus** : T = 224,7 j $j_s$ = -243 j

T / $j_s$ = 224,7 / -243 = 0,924691358 n'est pas un rapport simple. Il n'y a pas d'asservissement par les marées comme sur Mercure.

1 / S = 1 / 224,7 - 1 / ( - 243) = 0,004450378 + 0,004115226337 = 0,0085656049.

**S = + 116,75 j**

Sur Vénus, le signe est positif, donc le sens est direct, et le Soleil se lève à l'ouest.

Malheureusement, les nuages qui couvrent Vénus en permanence empêchent de le voir ! De toutes façons, étant données les conditions infernales qui règnent sur Vénus, qui souhaiterait y contempler un coucher de Soleil ?

**La Terre** : T = 365,2422 j $j_s$ = 23 h 56 mn = 1.436 mn = 0,9972 j.

1 / S = 1 / 365,2422 - 1 / 0,9972 = 0,0027379 - 1,00280786 = - 1,0000699.

**S = - 1,0000699 j**

On retrouve donc que le jour solaire moyen sur Terre est égal à 1… jour solaire moyen terrestre !

De plus, le signe - indique une rotation rétrograde, donc le Soleil se lève à l'est…

C'est toujours encourageant de vérifier que les formules obtenues donnent bien le résultat attendu !

**Variations de vitesse**

La majorité des planètes du système solaire ont des orbites très proches de cercles. Mais Mercure, Mars et Pluton font exception, avec des excentricités notables. Il s'ensuit des variations de vitesse importantes entre le périhélie et l'aphélie. Prenons le cas de Mercure. Nous avons vu, sur les valeurs moyennes, que le jour solaire y était égal à deux années, ou trois jours sidéraux. Prenons maintenant en compte les variations de vitesse.

La vitesse d'une planète sur son orbite est donnée par la formule :

$$v^2 = GM (2/r - 1/a)$$

où r est la distance au Soleil, et a le demi-grand axe de l'orbite. On peut définir les deux cas particuliers correspondant au périhélie et à l'aphélie. Au périhélie, r = a (1 - e) et à l'aphélie r = a (1 + e). En substituant on obtient :

| **périhélie** | **aphélie** |
|---|---|
| r = a (1 - e) | r = a (1 + e) |
| $v_p^2$ = GM (2/(a (1 - e)) - 1/a) | $v_a^2$ = GM (2/(a (1 + e)) - 1/a) |
| $v_p^2$ = GM (1 + e) / (1 - e) | $v_a^2$ = GM (1 - e) / (1 + e) |

Au périhélie, la vitesse de Mercure sur son orbite est de 58,98 km/s.

Animation montrant le jour solaire

---=OO=---




Choir n'est pas déchoir !
*Raymond Devos*

Tout d'abord, ce que l'on observe…

**Les étoiles filantes**

Les étoiles filantes ne sont pas des étoiles ! Ce sont de minuscules grains de poussières cosmiques, souvent de moins d'un gramme, qui tournent autour du Soleil sur des orbites semblables à celles des planètes, souvent orientées différemment. Alors, il arrive que la Terre rencontre une de ces poussières, qui tombe dans son atmosphère et s'y consume en produisant le phénomène lumineux que nous observons. La brièveté du phénomène est déterminée par la très grande vitesse à laquelle la météorite se précipite dans notre atmosphère.

Les poussières sont souvent groupées en essaims, et lorsque la Terre rencontre un tel essaim, on assiste à la chute d'un grand nombre d'étoiles filantes en peu de temps ; c'est ce qu'on appelle une *pluie d'étoiles filantes*. Ces pluies se reproduisent chaque année à date fixe, lorsque l'orbite de la Terre croise l'essaim.

Quand on observe une pluie, on a l'impression que toutes les étoiles filantes viennent de la même région du ciel. Ceci est un effet de perspective, exactement comme les deux rails d'une voie de chemin de fer semblent se rapprocher au loin, et provenir d'un même point. Vous avez aussi cette impression lorsque vous roulez en voiture sous une chute de neige : les flocons semblent venir du centre du pare-brise.

Le point du ciel d'où semblent provenir les étoiles filantes se nomme le *radian*, et il se trouve forcément dans une constellation (puisque celles-ci couvrent tout le ciel). On donne alors un nom à la pluie d'après la constellation dans laquelle se trouve le radian. Les plus spectaculaires sont les Perséides (constellation de Persée) en été, et les Léonides (dans le Lion) à l'automne.

Les corps plus gros, d'une fraction de gramme à quelques centaines de grammes, brûlent pareillement, mais produisent parfois une traînée persistante dans le ciel. Ils donnent de beaux spectacles, mais sont détruits dans leur chute.

Les corps de taille supérieure parviennent jusqu'au sol, plus ou moins transformés. On peut les retrouver : ce sont les météorites.

Dans l'imaginaire ancien, la Terre était le seul corps solide, de nature fondamentalement différente. Il ne pouvait pas y avoir de pierres dans le ciel, aussi toute observation de chute était forcément fausse. La première chute **reconnue** s'est produite à Ensisheim, en Alsace. Elle a été observée par un trop grand nombre de personnes pour la nier.

**Vocabulaire**

- *étoile filante* : phénomène lumineux, produit par une poussière qui tombe. Ce n'est pas l'incandescence de la poussière que l'on voit, mais l'ionisation de l'air induite par la chute. L'énergie dégagée par l'impact sur la haute atmosphère arrache des électrons aux atomes rencontrés, et les ionise ; lorsqu'un atome ionisé rencontre un électron libre (ce qui se produit très vite) ils se recombinent en émettant une raie particulière.
- *bolide* : objet plus gros, qui se brise dans son choc sur l'atmosphère. Il laisse une traînée persistante parce que l'énergie dégagée est bien plus importante.
- *météorite* : les météorites sont les objets tombés au sol. Ils sont forcément assez gros pour ne pas se détruire lors de la traversée de l'atmosphère. Pendant sa chute, la météorite se manifeste comme un bolide.
- *météore* : un météore est un phénomène atmosphérique **quelconque** : la pluie, le vent, sont des météores. Il ne faut donc pas confondre météorite et météore ! Mais la lumière émise par la chute d'une météorite est un météore, puisque c'est un phénomène lumineux atmosphérique.
- *micrométéorite* : à l'opposé des météorites de taille suffisante pour franchir l'atmosphère, les micrométéorites sont des poussières trop petites pour se consumer. Leur légèreté leur confère une énergie très faible, même si leur vitesse est grande. Elles arrivent à ralentir sur les hautes couches de l'atmosphère, puis tombent très lentement jusqu'au sol. Il en tombe en permanence partout sur Terre, mais la difficulté de distinguer ces poussières extraterrestres des autres est très grande. Il existe une source importante de micrométéorites dans les lacs de l'Arctique (Groënland) ou dans l'Antarctique. Les micrométéorites tombent sur la neige, sont entraînées vers la bas par la fusion, et finissent dans les creux où l'on peut les recueillir.

Si vous n'êtes pas convaincu qu'un météore n'est qu'un simple phénomène atmosphérique, pensez à la météorologie ! Comme son nom l'indique, c'est bien l'étude des météores…

On parle de *chute* lorsqu'on observe l'arrivée de la météorite. On en connait donc la date. Mais pour beaucoup de météorites (la plupart), on n'a pas observé la chute, et on trouve l'objet par hasard, ou dans quelques cas à la suite d'une recherche systématique. On parle alors de *trouvaille*.

Les trouvailles se font aisément dans le cas où le terrain est dénudé, et où une météorite se voit aisément. C'est la cas des déserts chauds (Sahara

ou autre), ou froid comme l'Antarctique. Dans ce dernier cas, on profite d'une situation exceptionnelle. Les météorites tombent sur la glace qui, comme les glaciers des Alpes, coule dans le sens de la pente. La météorite est donc entraînée dans ce mouvement, qui va s'arrêter parfois contre un *nunatak*. On nomme ainsi un sommet de montagne qui émerge seul de la glace. Les météorites se concentrent dans ces lieux, et il ne reste vraiment qu'à les ramasser… Il existe ainsi une ligne de collines dans l'Antarctique, nommée Allan Hills, où l'on a trouvé de nombreuses météorites (nommées ALH pour Allan Hill).

**Les météorites**

Les objets dont la taille est comprise entre quelques mètres et quelques dizaines de kilomètres apportent une énergie cinétique considérable (proportionnelle à la masse, et au carré de la vitesse). En percutant une planète (la Terre, la Lune ou autre), ils y creusent des cratères parfois immenses. Tous les cratères que l'on voit sur la Lune, même avec de simples jumelles, ont été produits par de tels impacts. Même les mers lunaires, ces bassins atteignant les 300 km de diamètre, ont été produites par des impacts ; l'énergie colossale mise en jeu a complètement fondu la croûte lunaire dans la zone du choc, et les roches fondues se sont répandues comme une véritable mer. Ensuite, rapidement, elles se sont refroidies et donc durcies. Ces chocs s'étant produits après l'intense bombardement météoritique des débuts du système solaire, il n'y avait plus beaucoup de météorites pour creuser de nouveaux cratères. C'est pourquoi le fond des mers lunaires apparaît relativement lisse.

**Conditions de chute**

La rentrée dans l'atmosphère, depuis l'espace jusqu'au sol, est très rapide car les météorites arrivent à grande vitesse. La durée de la chute est de quelques secondes (100 km à parcourir, à une vitesse de l'ordre de 15 km/s, voir plus loin). Outre la vitesse, l'angle d'arrivée est important. On a noté le cas d'une météorite qui est arrivée dans l'atmosphère sous un angle bien trop faible, et qui a ricoché : elle est repartie dans l'espace. Elle a eu chaud, mais elle ne perdait rien pour attendre. Après un petit tour autour du Soleil, elle a été attirée par la Terre, sur laquelle elle est retombée après un peu moins d'une orbite autour du Soleil !

- Freinage aérodynamique - La pression de l'air exercée sur la météorite, produit une force de freinage, suffisante pour arrêter les micrométéorites, qui tombent ensuite en vol plané. Pour les objets assez gros, cette pression peut devenir supérieure à la force de cohésion de la météorite, qui éclate. Ceci se produit bien plus facilement pour les météorites pierreuses (chondrites et achondrites), que pour les ferreuses (sidérites) dont la cohésion est plus importante.
- Echauffement - Dans l'espace, la température du cœur d'une météorite avoisine 30 K (-243° C). Au moment de son entrée dans l'atmosphère, elle est fortement chauffée : sa température de surface atteint très brutalement plusieurs milliers de degrés. Deux cas se présentent :
  - si la météorite est pierreuse, la conductibilité thermique est faible, et la chaleur n'aura pas le temps de gagner le cœur. Les silicates constituants sont réfractaires, et résistent à la chaleur.
  - si elle est métallique, le métal fond en surface, et s'évapore. L'évaporation produit un refroidissement, qui compense le chauffage de friction. Ainsi, la température s'élève moins que celle d'un aérolithe.

La chaleur n'ayant pas le temps de se répartir, le gradient de température produit des tensions mécaniques énormes, qui amènent souvent l'éclatement de la météorite (en plus de la pression). Mais elles ne sont pas toutes égales devant ce phénomène : les pierres conduisent moins bien la chaleur que les objets métalliques, et leur cohésion est plus faible. Aussi, les pierres explosent entre 30 km et 10 km d'altitude, alors que la fragmentation des météorites métalliques est plus rare, et si elle se produit, ce sera en général à basse altitude.

Les pierres peuvent arriver au sol froides, et lentement. On a noté l'exemple de la météorite de Pultusk en Pologne, qui est tombée sur la surface gelée d'un lac, sans casser ni fondre la glace !

Après la chute, la météorite est toujours aussi froide à l'intérieur, et se refroidit très vite en surface. Il peut arriver que de la glace se forme dessus, par condensation de la vapeur d'eau atmosphérique. Même si ceci n'est pas le cas, il faut prendre des précautions avant de toucher une météorite qui vient de tomber : on risque de se geler les doigts. Si une météorite tombe à vos pieds, ne vous précipitez pas pour la ramasser…

Dans leur traversée de l'atmosphère, les météorites perdent des plumes : on nomme *ablation* la perte de masse par la surface. On l'estime à 1 à 4 mm d'épaisseur par seconde de chute.

**Origine des poussières et météorites**

Les étoiles filantes, en particulier les pluies d'étoiles filantes (les poussières qui les produisent) proviennent en général des comètes (qui mélangent glaces et silicates). En se sublimant, la glace des comètes libère les poussières qu'elle contient, et ces poussières s'échappent car les comètes sont incapables de les retenir gravitationnellement. Elles constituent la queue de poussières. Elles continuent de tourner autour du Soleil, sur des orbites proches de celle de la comète. Lorsque la Terre vient traverser cette orbite, elle reçoit ces poussières sous la forme d'une pluie d'étoiles filantes.

Les météorites ne sont pas en général des débris de comètes. Pour comprendre d'où elles viennent, il faut considérer la formation du système solaire, il y a 5 milliards d'années. Un chapitre lui est consacré, auquel vous pouvez vous référer pour de plus amples détails.

Le processus d'accrétion, qui a formé les planètes à partir des poussières et des gaz du nuage primordial, n'a pas épuisé tous les petits corps qui circulaient autour du Soleil. En particulier, au-delà de l'orbite de Mars, l'attraction de Jupiter était trop forte pour permettre à une grosse planète de se former, mais pas assez pour attirer à elle tous les blocs qui y circulaient. Il est alors resté, entre Mars et Jupiter, des millions si ce n'est des milliards de blocs de tailles diverses, et dont les orbites étaient de même nature que celle des planètes : toutes à peu près dans le plan de l'écliptique, proches d'un cercle, et tournant dans le même sens que toutes les planètes. Ce sont les *astéroïdes* (du grec *aster*, astre, et *eidos*, forme). On les a parfois nommés *petites planètes*L'ensemble de ces objets situés entre Mars et Jupiter est nommé *ceinture des astéroïdes*.

Au fil des milliards d'années, les astéroïdes subissent des collisions, qui les fragmentent parfois. Les météorites sont, en général, soit des débris d'astéroïdes, soit de petits objets qui n'ont jamais atteint une taille importante. Quelques unes, en particulier les micrométéorites, pourraient provenir de comètes. D'autres, nous le verrons plus loin, proviennent d'objets plus importants.

**Chute d'une météorite**

Pourquoi un cailloux circulant entre Mars et Jupiter aurait-il la fantaisie soudaine de venir faire un tour sur Terre ?

On peut faire des calculs de mécanique céleste pour déterminer au bout de combien de temps les perturbations vont décrocher l'objet de son orbite calme, pour l'expédier chez nous. Le résultat est sans appel : bien plus longtemps que l'âge du système solaire. Conclusion : à part une ou deux exceptions, il est impossible de recevoir des cailloux de l'espace. Et pourtant…

La solution réside là encore dans le jeu des résonnances : on ne peut rien construire si on n'agit jamais deux fois de la même manière. Mais si un petit corps se retrouve toujours à peu près dans la même position lorsque Jupiter arrive dans les parages, la grosse planète la poussera toujours dans le même sens. Et l'accumulation des poussées au fil des orbites, peut déformer la trajectoire au point d'expédier l'objet sous d'autres cieux.

C'est le principe de Quasimodo qui pousse la cloche lorsque celle-ci s'apprête à repartir dans l'autre sens. C'est ainsi également que l'on pousse une balançoire… La poussée est en résonnance avec la fréquence propre de la cloche, ou de la balançoire.

On a montré que le temps caractéristique pour une telle perturbation est de l'ordre de 10 millions d'années, ce qui est tout à fait compatible avec le taux de chute observé.

**Pour résumer**, on pense aujourd'hui que les météorites proviennent des comètes (micrométéorites essentiellement), des astéroïdes pour la plupart, de la Lune, Mars, ou Vesta pour un petit nombre d'entre elles.

Nous verrons plus loin qu'elles nous renseignent très probablement sur la constitution interne d'une planète.

## *Types de météorites*

Les météorites sont donc des cailloux (mot que nous préciserons plus loin) qui viennent d'une région du système solaire où une planète n'a pas pu se former. Mais cependant, des astéroïdes de toutes tailles se sont constitués, par accrétion de plus petits, pour former finalement les planètes. Certains ne sont pas parvenus à ce stade. Les moins importants, de petite masse, n'ont pu accumuler beaucoup de chaleur, et ont conservé leur structure originelle. Directement pour les plus petits, après fragmentation due à un choc pour les autres, ils ont produit des météorites qui viennent tomber sur la Terre.

Certaines de ces météorites sont des pierres (au sens usuel du terme), simplement recouvertes d'une couche noirâtre et vitreuse produite par la fusion superficielle en traversant l'atmosphère de la Terre. Elles sont nommées *aérolithes* (nom masculin, du grec *aero* air, et *lithos* pierre).

Dans les objets plus massifs, il y a eu *différenciation* par chauffage. La différenciation est la séparation gravitationnelle des matériaux dans un liquide, les plus lourds tombant au fond (vers le centre de la planète), les plus légers surnageant à la surface. C'est ainsi que les gaz, et plus généralement tous les volatils, s'échappent de la surface de la planète et ont produit dans le passé les atmosphères. Aujourd'hui encore, ce dégazage se manifeste dans les volcans et les zones alentours.

On distingue donc tout d'abord les météorites différenciées et les météorites non différenciées. Attention, le mot aérolithe est attaché à la provenance céleste de la pierre, mais ne préjuge pas de sa constitution. Bien pratique, il est trompeur car on trouve des aérolithes de deux natures vraiment différentes.

**Météorites non différenciées : chondrites**

Certains aérolithes sont **les objets les plus primitifs que l'on connaisse**. A l'examen, ils montrent de petits globules millimétriques clairs, nommés *chondres* (nom masculin, du grec *chondrion*, qui signifie grain). On les appelle donc *chondrites* (nom féminin). On pense que ces globules se trouvaient dans le nuage au moment de la formation du système solaire, et qu'ils viennent de très loin : ils auraient été produits par l'explosion d'une supernova.

Les chondrites se sont formées à basse température, assez loin du Soleil, dans un corps parent trop peu massif pour s'échauffer et se transformer. La chimie est peu active à cause du froid qui règne dans ces régions, et ils n'ont donc pas évolué depuis leur formation. Leur composition est très proche de celle de l'atmosphère du Soleil (donc de la nébuleuse primitive), sauf pour les éléments les plus volatils qui y sont moins abondants. Ce sont des témoins de la naissance du système solaire.

Leur constitution se présente ainsi :

- Chondres : globules millimétriques (0,1 à 2 mm, rarement plus gros), grossièrement sphériques, d'aspect vitreux, probablement formés par des gouttelettes refroidies. On n'en trouve dans aucun des matériaux terrestres, et ils sont une signature pour certaines météorites. Ce sont des minéraux ignés, qui ont subi une forte élévation de température (paradoxe, on les trouve dans des objets qui n'ont pas été chauffés…). Leurs propriétés minéralogiques impliquent qu'ils se sont refroidis très rapidement, passant de 1.500 ou même 1.900 K à la température de l'espace en une dizaine de minutes, au plus quelques heures (ceci est confirmé par des expériences de laboratoire). Les chondres constituent jusqu'à 80 % d'une chondrite.
- Matrice : les chondres sont agglutinés par un ciment sombre à grain fin, la matrice, constituée de minuscules grains d'olivine, de pyroxène, de sulfures, d'oxydes, de feldspathoïdes et de graphite. On y trouve des poussières interstellaires. Après formation, la matrice a été légèrement refondue, probablement par chauffage lié à la désintégration de l'aluminium 26. Ceci a produit une sorte de métamorphisme des chondrites.
- Inclusions réfractaires : ce sont d'autres inclusions figurant dans la matrice des chondrites. On les nomme poétiquement CAI (Ca Al Inclusions), car elles sont constituées de grains clairs très riches en calcium et aluminium. On les trouve presque exclusivement dans la sous-classe de chondrites que l'on appelle chondrites carbonées.

Les chondrites carbonées sont des chondrites contenant 5 % de matière organique riche en carbone. Certains minéraux des chondrites carbonées sont anormaux (par rapport aux minéraux semblables sur Terre) : ils ont des atomes de magnésium 26 à la place de l'aluminium. Or l'aluminium

26 est instable, et décroît en magnésium 26 avec une période de 720.000 ans. Si on considère que ces minéraux se sont formés normalement, avec Al et non Mg, il faut envisager qu'il y avait à l'époque de leur formation assez de $^{26}$Al présent. Puisque sa période est très courte, il venait de se former (bien moins que 5 millions d'années, puisqu'après 5 millions d'années il n'en reste pratiquement plus). Comment se forme-t-il ? Bien sûr par des réactions nucléaires, soit à l'intérieur des étoiles, soit dans l'explosion d'une supernova. S'il s'est formé dans une étoile, il y est resté assez longtemps pour se transformer en $^{26}$Mg. Il ne reste donc que l'hypothèse de la supernova qui aurait explosé non loin du nuage d'hydrogène et d'hélium protosolaire. Elle a rejetté dans l'espace de l'aluminium $^{26}$Al, qui a constitué des minéraux puis des grains. L'enveloppe de la supernova est venue à grande vitesse percuter le nuage, en le contaminant et en produisant une onde de choc. Il est probable que cette onde de choc ait amorcé l'effondrement gravitationnel du nuage à l'origine du système solaire.

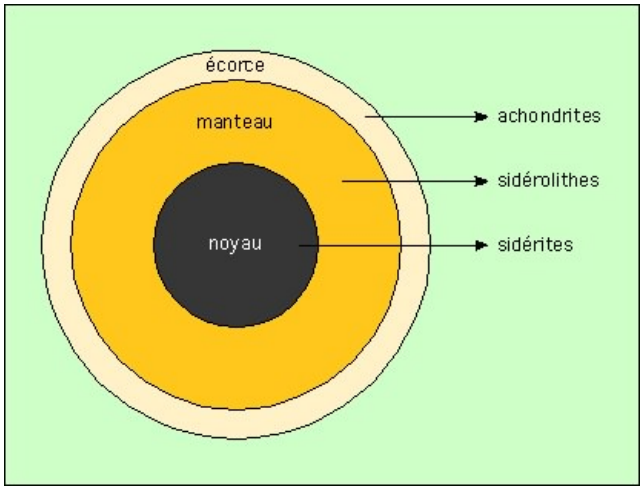
**Différenciation**

Revenons sur la supernova évoquée plus haut. Les éléments lourds synthétisés dans son explosion (par des réactions nucléaires différentes de celles qui se produisent dans les étoiles), sont projetés au loin. A une distance suffisante de l'explosion, la température est assez basse pour que les atomes puissent se combiner en molécules, puis ces molécules en grains. Ces grains, après un voyage spatial assez long, sont arrivés dans le nuage qui allait se contracter pour former notre système solaire. Lorsque les planétésimaux se sont formés, ils ont aggloméré ces grains. Ce sont les chondres qu'on trouve dans certaines météorites.

Les plus gros astéroïdes ont été suffisamment massifs pour atteindre la température de fusion (par accrétion et radioactivité). Le processus de différenciation s'est alors déroulé, amenant les éléments lourds, fer et nickel, au centre, les silicates en surface. Dans la zone intermédiaire, un mélange des deux a subsisté. Puis, l'objet s'est refroidi et solidifié. Si un objet de cette taille est tombé sur la Terre, il a dû produire un cataclysme extraordinaire. Mais la Terre n'en a pas gardé la trace, à cause de l'érosion sous toutes ses formes (la Lune provient probablement d'un tel impact gigantesque). Certains de ces astéroïdes ont dû eux aussi subir des chocs. Supposons que deux astéroïdes d'une centaine de kilomètres de diamètre (donc différenciés) se soient heurtés. Le choc a été assez violent pour les briser. Des fragments provenant de chaque partie ont été projetés dans l'espace, sur de nouvelles orbites. Les morceaux provenant du noyau sont donc constitués d'un alliage de fer et de nickel pratiquement pur. Ceux provenant de la zone intermédiaire contiennent à la fois du fer-nickel et des silicates (mélange dans la zone la plus profonde, silicates purs plus haut). Enfin, ceux provenant de la croûte de l'astéroïde ne contiennent que des silicates.

On trouve effectivement toutes ces sortes de météorites :

- celles qui ne contiennent pas de silicates (fer-nickel pur) provenant du noyau sont nommées *sidérites* (nom féminin, grec *sideros* = fer) ;
- les mixtes provenant du manteau sont appellées *sidérolithes* (nom féminin, du grec *sideros* = fer + *lithos* = pierre).
- celles provenant de la surface ressemblent un peu aux chondrites, mais ne contiennent pas de chondres : s'il y en avait, ils ont été détruits par la chaleur. Ces météorites sont nommées *achondrites* (nom féminin, grec *a* = privatif).



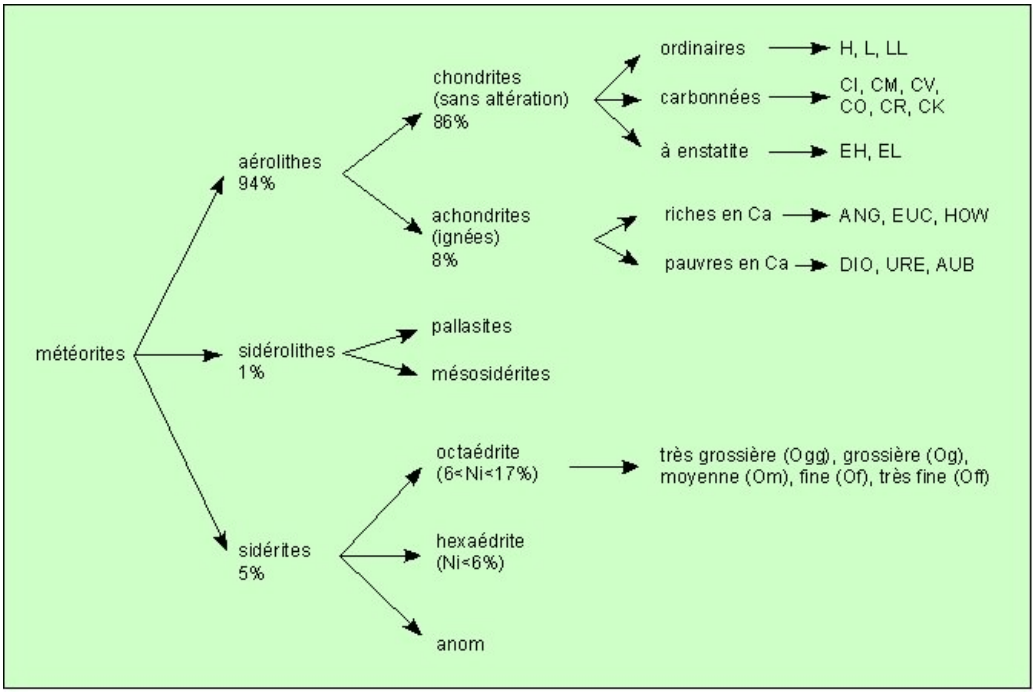

| *météorite* | *non générique* | *composition* | *type* | *provenance* |
|---|---|---|---|---|
| différenciées | - | métalliques | sidérites | noyau |
| | - | mixtes | sidérolithes | manteau profond |
| | aérolithes | pierreuses | achondrites | manteau sup. et écorce |
| non différenciées | | | chondrites | petits corps |

Les météorites sont donc une source de renseignements irremplaçable pour la connaissance des conditions qui prévalaient dans notre système lors de sa formation, et même sur la physique des explosions d'étoiles (par les matériaux radioactifs désintégrés).

Après cette description globale, nous allons examiner en détail chaque type de météorites, et ses caractéristiques.

## *Classement*

Le tableau ci-dessous donne un classement simplifié des météorites. Les termes qui y apparaissent seront définis plus bas.




## *Chondrites*

**Age**

Les chondrites sont classées selon des critères minéralogiques. On distingue tout d'abord les clans, qui regroupent les objets ayant des compositions minéralogiques proches, donc probablement issus de la même zone dans le système solaire. Ensuite, dans chaque clan, on distingue les objets ayant des propriétés vraiment semblables, à tel point que les membres d'un groupe doivent provenir d'un même corps parent. Les clans n'ont pas tous la même importance, celui des chondrites ordinaires est de loin le plus nombreux, et sont nom vient de là. La liste ci-dessous donne les clans, et les groupes à l'intérieur de chaque clan :

- *chondrite ordinaire* : le clan des plus courantes. On les subdivise selon leur teneur en fer par rapport à leur teneur en silicium, et on les désigne à l'aide d'une lettre :
  - **H** : (High) contenant beaucoup de fer oxydé ;
  - **L** : (Low) contenant peu de fer oxydé ;
  - **LL** : (Low Low) très peu de fer oxydé.
- *chondrite carbonée* : le clan des plus riches en éléments volatils, et contenant quelques pour cent de carbone. Leur composition est la plus proche de celle du Soleil ;
  - **CI** : ne contiennent pas de chondres ! Nommé d'après Ivuna en Tanzanie, où a eu lieu la chute représentative du groupe ;
  - **CM** : pour Mighei, Ukraine ;
  - **CO** : pour Ornans, France ;
  - **CR** : pour Renazzo, en Italie ;
  - **CK** : pour Karoonda en Australie ;
  - **CV** : celles contenant le plus de CAIs, CV pour Vigarano en Italie.
- *chondrite à enstatite* : clan des météorites contenant ce minéral ($MgSiO_3$) :
  - **EH** : (High) chondrite à enstatite, à fort taux de fer ;
  - **EL** : (Low) idem, contenant peu de fer ;
- *chondrite Rumuruti* : clan ne comprenant qu'un seul groupe, car toutes les météorites lui appartenant ont la même composition ; elles proviennent de Rumuruti ;
- *chondrite Kakangari*, même chose que pour le clan précédent, la provenance étant Kakangari.

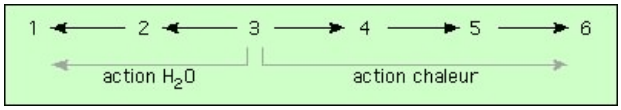
Les chondrites ont parfois été tranformées dans un corps parent trop petit pour être différencié (sinon ce ne serait plus des chondrites). Les modifications peuvent venir de divers mécanismes :

- métamorphisme, si la chaleur a été suffisante (la masse du corps parent assez élevée, mais pas pour fondre totalement) ;
- choc entre des planétésimaux ;
- formation de brèches (brisure de l'objet par choc, puis réassemblage gravitationnel de l'objet) ;
- réactions chimiques, le plus souvent en présence d'eau.

Les chondrites forment une famille dans laquelle la taille du corps parent a décidé de la constitution. Les plus petits donnent les météorites les plus primitives, car ils ont évacué très vite toute chaleur, et la température n'a pas pu monter. Leur compostion est restée quasi-solaire (très proche de celle de la chromosphère). Les plus gros corps parents ont rendu possible une évolution, essentiellement par la présence d'eau. Certains ont subi une transformation thermique (métamorphisme) sans arriver à la fusion. Aussi trouve-t-on toute une gamme de chondrites, les plus évoluées étant dépourvues de chondres. Cette diversité est traduite par la classification.

Les chondrites sont aussi numérotées, de 1 (beaucoup de volatils) à 6 (bien mélangées). Les chondrites 3 sont les mieux conservées et les plus représentatives de l'état de nébuleuse primitive. De 3 à 1, elles sont de plus en plus transformées par l'eau. Les types 1 ne présentent pas de chondres : soit il n'y en avait pas à la formation, soit ils ont été détruits par l'eau. De 3 à 6, les chondrites sont de plus en plus métamorphisées

(elles ont subi une élévation de température de plus en plus forte).






Fragment d'une chondrite du Maroc, montrant sa croûte de fusion photo J. Gispert



La même chondrite, vue de la face coupée et polie, laissant apparaître les chondres photo J. Gispert

Le fragment de cette météorite a été coupé, de manière à mettre en évidence sa constitution interne. Sur cette photo, on voit les chondres, qui sont les petits globules ronds de couleur claire. D'autres inclusions claires, mais de forme irrégulière, sont les CAI (Calcium Aluminium Inclusions). Quelques petites zones grises sont des inclusions de fer-nickel, qui seront bien plus apparentes sur la photo ci-dessous, faite avec un éclairage différent :



Inclusions de Ni-Fe dans la même chondrite photo J. Gispert

## *Météorites différenciées*

**Sidérites**

Elles participent pour 6 % de la totalité des chutes. Elles sont constituée majoritairement de fer, avec un petit pourcentage de nickel, et des traces d'autres éléments (iridium, chrome, gallium, germanium, carbone, phosphore…). Elles sont subdivisées en treize groupes, qui représentent 75 % d'entre elles. Mais il en reste 25 % qui ne peuvent être classées dans ces groupes, et qui sont joliment nommées *iranom*, pour *iron anomalous*.

Le pourcentage de nickel est supérieur à 5 % dans toutes les sidérites. Dans la majorité d'entre elles, il est compris entre 6 et 10 %. Les sidérites contenant davantage de nickel sont très rares.

Selon le pourcentage de nickel, on distingue trois alliages différents des deux métaux, qui présentent des structures cristallines différentes :

- la *kamacite*, à structure cristalline cubique centrée, contenant de 4 à 7,5 % de nickel ;
- la *taénite*, à structure cristalline cubique à faces centrées ;
- la *tétraénite*, à structure tétraédrique, qui contient plus de 50 % de nickel.

La tétraénite est rare, et les sidérites normales sont des mélanges de kamacite et de taénite. La cristallisation de ces deux alliages étant différente, et se produisant à des températures différentes, il existe dans la sidérite un entrelac de cristaux de chaque espèce. Pour les mettre en évidence, on pratique de la manière suivante :

on coupe une tranche de la sidérite ; on la polit ; on l'attaque par un mélange acide (opération dangereuse sans grandes précautions) qui attaque plus fortement l'une des deux formes cristallines. Cette opération met en évidence les deux sortes de critallisations, en produisant un dessin caractéristique nommé *figures de Widmanstäten*, du nom de la personne qui les a découvertes :



Sidérite de Gibéon (octaédrite IV A), montrant les figures de Widmanstäten photo J. Gispert

Les bandes sont formées de taénite, et elles englobent des plages de kamacite.

Cette météorite fait partie de la plus importante chute connue, découverte en 1836 en Namibie. Les objets recouvrent une surface elliptique de 275 × 100 km, centrée sur Brukkaros, et la plus grande densité de météorites se trouve à Gibéon. Elle provient très probablement d'un objet de 4 x 4 x 1,5 mètres, arrivant très incliné par rapport au sol, et qui s'est fragmenté à haute altitude. Les fragments ont ainsi eu le temps de fondre en surface par frottement sur l'air, et de se recouvrir eux-même d'une croûte de fusion.

Cette météorite est constituée presque exclusivement de taénite et de kamacite. Outre le fer qui est de loin le constituant principal, elle contient 8 % de nickel, 0,5 % de cobalt, 0,04 % de phosphore, et des traces de quelques autres éléments.



Sidérite de Sikhote-Alin (Sibérie) tombée le 12/02/1947 photo J. Gispert

Cet échantillon montre la surface d'abrasion. La traînée laissée par la chute de cette météorite a été plus brillante que le Soleil pendant plusieurs minutes. Le plus gros fragment est exposé à Moscou, il pèse 1.745 kg, et a creusé un cratère de 26 m de diamètre. La météorite s'est fragmentée

à 10.000 m d'altitude. La masse totale récupérée dépasse les vingt tonnes.

Les sidérites sont classées selon :

- les hexaédrites : leur teneur en nickel est comprise entre 5 et 6 %. La maille cristalline élémentaire est cubique (hexahèdre).
- les octaédrites : les plus nombreuses, elles sont caractérisées par une faible teneur en nickel, de 7 à 15 %.
- les ataxites : leur teneur en nickel est très forte, dépassant les 16 %, et allant exceptionnellement jusqu'à 60 %. Les cristaux sont beaucoup plus petits, et les figures de Widmanstätten ne sont plus visibles qu'au microscope.

**Sidérolithes**

Les sidérolithes contribuent pour 1 % de toutes les chutes de météorites. Elles sont donc relativement rares. Leur nom (grec *sidéros* = fer, *lithos* = pierre) donne une très bonne indication sur leur composition.

On les subdivise en deux sous-classes bien distinctes :

- les *pallasites* (proches des sidérites) : matrice de ferro-nickel enchassant de beaux critaux d'olivine, millimétriques à centimétriques, jaunes à verts. Elles sont nommées d'après Pallas, naturaliste allemand, qui a étudié en 1775 une météorite tombée à Krasnojarsk en Russie.
- les *mésosidérites* (proches des achondrites) : mélanges de ferro-nickel et de silicates en parties égales, semblables aux eucrites. Les silicates se partagent en pyroxène et plagioclase. Les proportions de fer-nickel et de silicates font qu'ici le métal constitue des inclusions dans les silicates, à l'inverse des pallasites.

Leur formation nécessite la présence d'un alliage de ferro-nickel, et d'olivine, les deux fondus. Ceci se trouve réalisé à l'interface entre le noyau et le manteau d'un corps différencié. La proportion de métaux et de silicates varie avec la profondeur, les pallasites s'étant formées plus profondément que les mésosidérites.



Tranche de la pallasite *Brahin*, près de Gomel, Biélorussie trouvée en 1810 photo J. Gispert

Cette météorite est une sidérolithe, variété pallasite. Elle montre des cristaux d'olivine jaune-verte, pris dans une matrice métallique constituée de fer et de nickel. Elle provient du manteau inférieur d'un astéroïde déjà différencié, qui a dû être brisé par un choc très violent, lors de la rencontre avec un autre astéroïde.



La même tranche vue en transparence photo J. Gispert



Fragment de la météorite Imilac photo J. Gispert

La météorite Imilac est une autre pallasite, provenant du désert d'Atacama au Chili. Le fragment présenté ici n'est pas coupé, et montre sa croûte. Il faut toutefois remarquer que la chute est ancienne, et la surface bien érodée.

Les fragments de cette météorite ont été trouvés en 1822, et le poids total est évalué à 920 kg. Elle a creusé un petit cratère.

**Achondrites**

*Achondrite* est formé à partir du préfixe grec *a* privatif, et sa signification est "sans chondres". Ce sont donc des météorites pierreuses, essentiellement constituées de silicates, et ne montrant pas de chondres. Ceux-ci étant relativement sensibles à la chaleur, on en déduit que ces roches ont été chauffées, ce qui explique leur disparition. Ceci est attesté aussi par la texture de la météorite, et pas sa composition minéralogique qui sont proches de celles des magmas terrestres.

Les chondrites apparaisent comme des météorites primitives, non altérées, alors que les achondrites ont subi des transformations physico-chimiques. Ce nom a été donné par Brezina à Vienne en 1895.

Les achondrites sont pauvres en métal, fer et nickel, et plus riches en éléments volatils. Or elles ont été constituées à partir des mêmes matériaux que les chondrites. Pour expliquer ces caractéristiques -chauffage, élimination des éléments lourds-, on invoque la différenciation qui se produit

dans une planète en formation, chauffée par énergie gravitationnelle et radioactivité. Les achondrites sont donc les fragments de l'écorce, ne contenant guère que des silicates, d'une petite planète déjà différenciée. Les sidérolithes et les sidérites leurs sont associées pour la formation : elles proviennent des autres parties d'une planète différenciée et brisée.

On distingue les :

- *achondrites riches en calcium*, qui contiennent plus de 5 % de calcium sous forme d'oxyde. Le minéral dominant est le plagioclase calcique. Elles comprennent trois clans :
  - les *angrites* ANG riches en pyroxène calcique ;
  - les *eucrites* EUC ;
  - les *howardites* HOW ;
- *achondrites pauvres en calcium*, contenant moins de 3 % de calcium :
  - les *diogénites* DIO ;
  - les *ureilites* URE ;
  - les *aubrites* AUB.

Certaines achondrites montrent une provenance particulière, hors de la ceinture des astéroïdes et des comètes :

- les météorites lunaires ;
- les météorites martiennes (groupe *SNC*) ;
- les météorites de Vesta (groupe *HED* pour Howardites, Eucrites, Diogénites).

Les eucrites sont nommées à partir du grec *eukritos*, signifiant *facile à distinguer*. Ce sont des basaltes provenant de la croûte de leur corps-parent Vesta. Certaines sont des brèches, c'est-à-dire des fragments ressoudés. La fragmentation est due à de nombreux impacts relativement doux, alors que le collage s'est produit à la suite d'un impact plus violent qui a fondu partiellement ces roches.

Les diogénites tirent leur nom de Diogène (5$^{e}$ siècle avant JC, celui du tonneau…), qui a été le premier, dans l'Antiquité, à comprendre que les météorites sont des pierres tombées du ciel. Dommage qu'on ait colporté le contraire pendant deux mille ans après pour lui ! Les diogénites sont, comme les eucrites, des roches magmatiques, mais le grain grossier (gros cristaux) qu'elles présentent montre un temps de refroidissement bien plus long. Elles se sont donc formées dans les chambres magmatiques, sous la croûte de Vesta. La plus représentative est la météorite de Tatahouine.

Les howardites enfin, sont un peu le mélange des deux précédents groupes. Ce sont des brèches *polymictes* (plusieurs origines). Elles se sont formées à la suite d'un impact assez violent pour mélanger des fragments de la croûte à des morceaux provenant d'une chambre magmatique profonde. La chaleur dégagée par l'impact a ensuite produit de la lave qui a ressoudé ces morceaux. Ces météorites sont rares.

Ces achondrites ont été arrachées par un impact violent à la croûte d'une planète déjà différenciée. La faible vitesse de libération des planètes concernées, et la vitesse à laquelle un astéroïde a pu les heurter, permettent tout à fait d'expédier dans l'espace proche des cailloux arrachés à la croûte. Le scénario est le suivant : la petite planète s'est différenciée après sa formation, constituant un noyau, un manteau et une croûte. Puis un impact violent a arraché une partie de la croûte, qui a atteint la vitesse de libération de la petite planète, et s'est donc mis en orbite autour du Soleil. Par la suite, les perturbations planétaires ont modifié l'orbite de ces fragments, les amenant finalement à rencontrer la Terre.

Les météorites lunaires ont été trouvées dans l'Antarctique (faciles à voir sur la glace, et profitant des mouvements de cette glace pour se concentrer contre des collines). On en possède une trentaine. Pour celles-là, nous avons la possibilité de comparer avec les roches lunaires ramenées par les missions Apollo, et de vérifier une proximité minéralogique très serrée. Certaines sont constituées de brèches basaltiques. En particulier, la météorite Dhofar 461 est une brèche d'impact formée à la suite d'un impact violent sur la Lune, dont les débris se sont consolidés au fil du temps. Plus tard, un second impact l'a projetée dans l'espace, avant qu'elle finisse par tomber sur la Terre. Son origine se trouve très probablement dans les terres hautes de la Lune, qui sont très anciennes et ont donc subi de très nombreux impacts. D'autres météorites lunaires ont une composition basaltique, et proviennent des mers.

Les météorites martiennes proviennent essentiellement de trois chutes, Shergotty, Nakkla, et Chassigny (noms des régions où sont tombées ces météorites). Pour cette raison, on les désigne par le sigle *SNC*. Ce sont des pierres, mais par rapport aux météorites banales (!), elles sont plus jeunes, n'ayant que 1,3 milliards d'années (âge déterminé par l'analyse des cristaux). On a déterminé par ailleurs qu'elles ont subi un choc violent il y a 200 millions d'années.

Il n'est pas possible de déterminer d'où elles viennent par la ballistique. Aussi, c'est l'analyse de ce qu'elles contiennent qui permet de trancher. Dans leurs cristaux, on trouve de minuscules bulles de gaz, dont l'analyse montre une très grande ressemblance chimique et isotopique avec l'atmosphère de Mars, qui a été analysée par des sondes sur place. En particulier, le point essentiel concerne les gaz rares, qui sont dans les mêmes proportions sur Mars et dans les SNC.

Signalons la SNC nommée ALH84001, qui a défrayé la chronique il y a quelques années. Elle a été trouvée en Antarctique, où elle a séjourné pendant quelques milliers d'années. Des examens microscopiques ont montré à l'intérieur des structures allongées, qui ressemblent à des bactéries terrestres, mais de petite taille (dix fois plus petites). Ces structures pourraient être minérales, ou bien biologiques. Dans le second cas, les bactéries pourraient être terrestres, ayant contaminé la roche pendant son séjour depuis la chute. La preuve d'une vie martienne reste à faire…

Les diogénites enfin, sont supposées provenir de la petite planète Vesta. Pour s'en convaincre, on a étudié en détail le spectre de cette petite planète, et celui des météorites. La ressemblance frappante entre les deux ne laisse guère de doutes sur l'origine. Des études fines ont même déterminé un emplacement probable, à la surface de Vesta, pour l'origine de ces météorites.



Fragment de la météorite Tatahouine (Tunisie) ; achondrite, variété diogénite, constituée principalement d'orthopyroxène.
Elle provient probablement de l'astéroïde 4 Vesta.

photo J. Gispert

Ces météorites sont évidemment très rares…

**Répartition et biais observationnel**

On peut donner une répartition des météorites connues, mais elle ne reflète pas la réalité des objets dont l'orbite croise celle de la Terre. Si on considère les chutes (météorites que l'on a récoltées après les avoir vu tomber), alors les chondrites sont les plus abondantes.

Si on recherche les météorites en Antarctique, il est facile de les distinguer sur la glace, car toute pierre qu'on y trouve ne peut provenir que du ciel ! Là, les sidérites plus denses s'enfoncent plus facilement dans la glace que les météorites pierreuses…

Si on recherche ailleurs, il est évident qu'il sera très difficile de distinguer une chondrite ou une achondrite d'un vulgaire caillou bien terrestre… Aussi, les sidérites seront bien plus facilement reconnues, et donc leur abondance apparente sera fortement augmentée.

**Ages et durée de formation**

Les âges des météorites sont déterminés par des analyses isotopiques portant sur des éléments à très longue période, car elles sont toutes très anciennes, et contemporaines de la formation du système solaire. Ces longues périodes permettent d'atteindre les âges nécessaires, mais en contrepartie, ne donnent qu'une faible précision. On a montré ainsi que toutes les météorites se sont formées aux alentours de 4,3 à 4,7 milliards d'années.

La précision des éléments à longue période est insuffisante pour différencier les âges de deux météorites particulières. On se tourne alors vers des éléments à bien plus courte période. La période étant courte, les isotopes radioactifs qui étaient présents lors de la formation des météorites se sont totalement désintégrés. Un exemple important est le suivant :

L'isotope 129 de l'iode (élément 53), présent en faibles quantités lors de la formation du système solaire, se désintègre en xénon 129 (élément 54) par radioactivité β. La période est de 17 millions d'années. Par contre, l'isotope 127 est stable. On mesure la quantité de $^{129}$Xe dans une météorite. On lui retranche la quantité de $^{129}$Xe qui se trouvait dans l'échantillon lors de la formation du système solaire. L'excès observé indique combien d'iode radioactif (129) il y avait dans l'échantillon. Le rapport $^{129}$Xe / $^{127}$I ne varie que du simple au double dans toutes les météorites primitives analysées (les chondrites, non différenciées). Ceci implique qu'elles se sont toutes formées dans un intervalle de temps d'une seule période de l'iode, donc de l'ordre de 17 millions d'années.

Les météorites différenciées s'étant formées à partir des mêmes éléments, leur durée de formation doit être la même. Tous ces corps se sont donc formés en une vingtaine de millions d'années, ce qui est une durée astronomiquement courte.

D'autres méthodes voisines montrent de plus que la différenciation a été également très rapide.

**Age d'exposition**

Une météorite s'est d'abord formée dans la ceinture des astéroïdes (pour la plupart). Ensuite, il a fallu qu'elle change d'orbite pour arriver chez nous. Pour cela, on doit considérer deux possibilités : soit le corps parent était petit, et un choc léger a suffit pour le briser (c'est le cas des chondrites), soit il était gros (objets différenciés) et un choc très violent a été nécessaire pour produire des éclats. Dans ce dernier cas, on doit retrouver des traces de choc. Ces traces sont effectivement trouvées dans certains cristaux faisant partie des météorites.

A partir du moment où l'objet a été brisé, les débris qui constitueront nos météorites se trouvent exposés à l'espace, et surtout aux rayons cosmiques qui le traversent. Lorsqu'une particule du rayonnement cosmique, de haute énergie, heurte un débris, elle y pénètre plus ou moins profondément selon la résistance du corps et l'énergie de la particule. Les cristaux qui composent la future météorite enregistrent ces chocs, sous la forme de traces que l'on peut déceler assez aisément. La densité de traces donne une mesure du temps que le débris a passé dans l'espace après le choc qui l'a produit, puisqu'avant il était protégé par les couches qui le recouvraient. Ainsi, on peut déterminer combien de temps une météorite a passé dans l'espace, avant d'atterrir chez nous. On nomme ce temps *temps d'exposition*, ou *temps de vol*.

Les particules énergétiques du rayonnement cosmique, en heurtant les atomes de la météorite, provoquent des réactions de spallation : des protons, des neutrons, sont arrachés, conduisant à la formation de nouveaux atomes. Plus longue est l'exposition, plus nombreux sont ces atomes, si l'on ignore que certains sont radioactifs…

**Age terrestre**

Enfin, lorsqu'on observe une chute, on sait exactement la date d'arrivée sur Terre. Mais pour les trouvailles, il est plus difficile de savoir à quel moment elles sont arrivées. On peut pourtant y parvenir.

Certains atomes créés par les réactions de spallation sont radioactifs, avec des périodes diverses. Si on trouve une météorite tombée dont on n'a pas observé la chute, on peut analyser les éléments radioactifs qui s'y trouvent, et les doser. Les éléments formés par spallation, à longue période, n'ont pas eu beaucoup de temps pour se désintégrer. Ils restent donc dans les proportions pratiquement initiales. Par contre, les éléments à courte période se sont en grande partie désintégrés. Si on établi des rapports entre divers éléments en fonction de leurs périodes, on peut ainsi déterminer depuis combien de temps les réactions de spallation ont cessé, c'est-à-dire depuis combien de temps la météorite est protégée du rayonnement cosmique par l'atmosphère terrestre.

Ainsi, une météorite passe successivement par trois états :

- lorsqu'elle est à l'intérieur de son corps parent, elle est protégée des rayons cosmiques par la croûte de l'objet ;
- après fragmentation, elle est exposée au rayonnement cosmique spatial ;
- lorsqu'elle arrive sur Terre, elle se trouve protégée par l'atmosphère.

**Quantité**

La Terre reçoit chaque année de 10.000 à 100.000 tonnes de matériel météoritique, principalement sous forme de micrométéorites de 100 micromètres de diamètre. Mais les gros objets, heureusement rares, amènent une masse individuelle très importante, et donc la masse moyennée sur une grande durée est bien plus élevée.

**Origine**

Les météorites sont des débris de la formation du système solaire, primordiaux ou évolués. Les objets plus primitifs que les planètes sont les comètes et les astéroïdes. Les chondrites pourraient êtres des fragments de comètes, ayant perdu leurs éléments volatils. Mais les autres ont subi une fusion qui exclu les comètes. De ce fait, les météorites nous renseignent sur les astéroïdes.

**Cratères observables à la surface de la Terre**

La Terre, peu après sa formation, a subi le bombardement météoritique comme les autres corps du système solaire. Mais son atmosphère, qui produit l'érosion, et la tectonique des plaques, qui renouvelle l'écorce terrestre à une échelle de temps de l'ordre de la centaine de millions d'années, ont effacé les traces de ce bombardement. On trouve toutefois quelques cratères d'impact, mais qui sont forcément assez récents. Même parmi les cratères récents, ceux de moins de 100 m de diamètre sont totalement effacés en un million d'années par l'érosion. Les traces de ces cratères visibles sur la Terre sont nommées *astroblèmes*, du grec *aster*, astre et *blema*, blessure.

Voici une liste de quelques cratères météoritiques visibles aujourd'hui sur la Terre :

| cratère | localisation | diamètre actuel | prof | âge | diamètre de la météorite | angle de chute | vitesse |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Chicxulub | Yucatan | 200 km | | | 10 km | | |
| Sudbury | Canada | 200 km (50 × 20 actuellement) | | 2.000 MA | 50 km | | |
| Vredefort | Afrique Sud | 200 km | | | | | |
| Popigaï | Yakoutie | 100 km | | 30 MA | | | |
| structure Montagnais | sous-marin au large de la Nouvelle Ecosse | 60 km | | 50 MA | | | |
| Ries | Stuttgart | 24 km | | 14,7 MA | | | 20 km/s |
| Clearwater Lakes | | 27 et 32 km | | 300 MA | | | |
| Rochechouart | France | 10 km | | 150 à 200 MA | | | 20 km/s |
| Meteor Crater | Arizona | 1,4 km | 190 m | 50 MA | | 45° | 15 km/s |
| Cubrerolles | Hérault | 220 m | 50 m | | | | |
| Tougouska | Sibérie | pas de cratère | | | | | 30 km/s |
| Manicouagan | Canada | 65 km | | | | | |

Le premier de la liste, celui de Chicxulub, est accusé aujourd'hui de la disparition des dinosaures (mais celle-ci nous a bien profité…).

**Vitesse des météorites**

Un corps qui tourne autour du soleil ne peut pas se déplacer, au voisinage de la Terre, à plus de 42 km/s, sans quoi la gravité du Soleil ne pourrait plus le retenir, et il le quitterait définitivement (c'est la vitesse de libération du Soleil à la distance de la Terre). Par conséquent, ces objets viennent frapper la Terre avec une vitesse propre inférieure à 42 km/s. Mais la Terre elle-même se déplace sur son orbite à 30 km/s. Si la particule lui vient en face, elles se heurteront donc avec une vitesse de 42 + 30 = 72 km/s ; si au contraire elle vont dans le même sens que la Terre, la vitesse relative maximum n'est que de 42 - 30 = 12 km/s, ce qui n'est déjà pas si mal !

La vitesse caractéristique d'une météorite est de l'ordre de 15 km/s si elle provient de la ceinture des astéroïdes, et de l'ordre de 30 km/s si elle provient d'une comète. Cette vitesse plus élevée est dues à l'excentricité plus forte de l'ellipse.

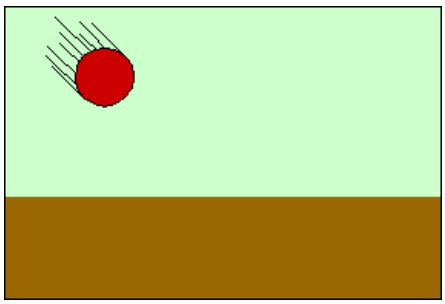
A ces vitesses-là, lorsque la particule frappe les hautes couches de l'atmosphère, elle est instantanément freinée, et son énergie cinétique est transformée en chaleur. Les atomes de la haute atmosphère sont ionisés sur la trajectoire (ils perdent un électron) ; les ions formés vont très rapidement rencontrer un électron libre et le capturer. Cette capture s'accompagne de l'émission d'un photon (voir le paragraphe sur la spectroscopie). Ce qu'on voit briller, ce n'est donc pas la poussière, bien trop petite pour être visible à des distances de quelques dizaines de kilomètres, mais l'air qu'elle a ionisé sur son passage. La lumière émise par les étoiles filantes est ainsi expliquée.

**Comment se forme un cratère ?**

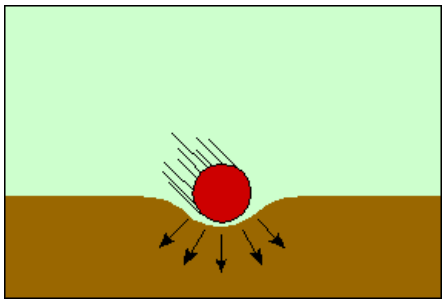
Contrairement à ce que l'on pourrait penser, ce n'est pas l'objet impacteur lui-même qui creuse le cratère, mais un phénomène complexe de rebond.

Lorsque un objet massif arrive au sol à très grande vitesse (de plus de 10 km/s), son énergie cinétique est énorme ($E = 1/2\ m\ v^2$, où m est la

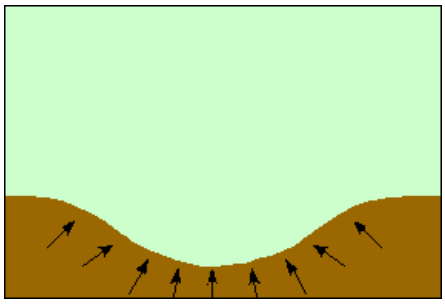
masse et v la vitesse).



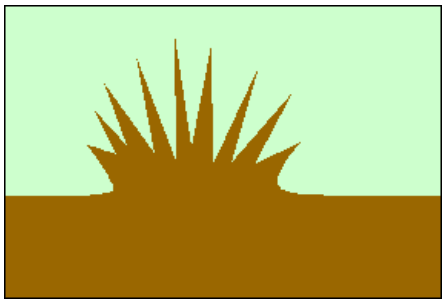
Cette énergie est dissipée instantanément dans le sol, qui est chauffé à très haute température et fond. De plus, une onde de compression se propage en profondeur à partir du point d'impact :



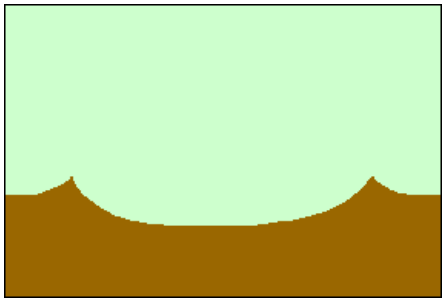
Les qualités élastiques du sol amortissent cette onde progressivement. Au bout de quelques secondes, les terrains extrêmement comprimés, n'ayant plus rien pour les retenir, vont se détendre très violemment, en expulsant les matériaux superficiels :



C'est cette décompression qui creuse le cratère, et non le choc initial. Une grande partie des matériaux est projetée au loin :



Le cratère est produit par la décompression.



C'est pour cette raison que le cratère est bien plus grand que l'objet qui l'a produit.

Une règle simple, approximative bien entendu, nous donne le diamètre du cratère en fonction de celui de la météorite :

| le diamètre du cratère est de l'ordre de 20 fois le diamètre de la météorite |
|---|

Pour les très grand cratères, il y a un rebond au centre, qui construit un piton central (comme la goutte d'eau qui tombe dans un bol, vue au ralenti).

**Types de cratères**

Les météorites qui arrivent sur terre, à cause de leur grande vitesse, s'enfoncent dans le sol et produisent un cratère dont l'importance dépend de la masse et de la vitesse de l'impacteur. Les météorites de diamètre compris entre 10 m et 200 m produisent un cratère simple, sans structure centrale. Les plus grosses construisent un cratère plus compliqué.

La taille du cratère est bien sûr d'autant plus grande que l'objet qui le creuse est plus gros, plus massif. Lorsque le diamètre du cratère est supérieur à 2.000 mètres, l'énergie est telle que la météorite est complètement vaporisée. Il n'en reste aucune trace, si ce n'est des métaux (Ir, Fe…) mélangés à la brèche.

Le Meteor Crater se trouve en Arizona, aux Etats Unis, dans une plaine triassique de 200 MA. Le plus gros bloc trouvé au fond est la Holsinger-meteorite. Il pèse 700 kg, et sa composition est de 92 % Fe, 7 % Ni, Co, Pt, Ir… L'objet qui a creusé ce cratère a été évalué à 1 million de tonnes. Dans les débris, on a mis en évidence deux nouveaux minéraux : des quartz nommés *Coésite* et *Stishovite* formés à la pression de 20.000 atmosphères (quartz choqués). Les droits d'exploitation minière ont été achetés par Baringer, qui était persuadé que le cratère cachait une énorme météorite de fer, exploitable. Après avoir fait des forages profonds, il n'a rien trouvé de commercialisable, mais il a pu démontrer pour la première fois qu'un tel cratère avait été creusé par un objet extraterrestre.

Le cratère de Rochechouart en France a été creusé par un objet de 6 milliards de tonnes.

Un événement extraordinaire s'est produit en Sibérie le 30 juin 1908 à 7 h 17 près de la rivière Toungouska (à 800 km au nord du lac Baïkal). Une explosion très puissante a été entendue à 1.000 km ! Un objet est tombé dans cette région, en se signalant par un phénomène lumineux, aussi brillant que le Soleil.

Les conséquences de cette explosion ont été très importantes :

- les nuits qui ont suivi ont été claires et lumineuses ;
- les arbres ont été couchés et brûlés dans un rayon de 30 km, la cime à l'opposé du point de chute.

Malheureusement, du fait des conditions politiques, et de la difficulté d'accès dans cette partie de la Sibérie, il n'a pas été possible d'organiser une expédition rapidement pour voir sur place les résultats de la chute. La première expédition scientifique n'a pu se rendre sur le site qu'en 1921, treize ans plus tard, et bien sûr l'érosion avait déjà fait son œuvre. On n'a rien retrouvé de la météorite qui a produit l'explosion. Elle s'est donc totalement détruite dans l'atmosphère lors de la chute. L'explosion qui a été entendue a dû se produire entre 5 et 10 km d'altitude.

La vitesse d'impact de l'objet a été évaluée à 30 km/s. Cette vitesse est sans doute trop élevée pour que l'objet soit un des cailloux qui orbitent entre Mars et Jupiter. Son orbite probable fait donc penser à un objet circulant sur une orbite beaucoup plus excentrique, et sans doute inclinée sur l'écliptique. Ce sont les caractéristiques des orbites cométaires.

On a donc pensé que la Terre avait été percutée par un noyau cométaire, constitué de glace d'eau et de glace carbonique. Un tel objet, volatil, pouvait parfaitement se désintégrer totalement dans l'atmosphère bien avant de toucher le sol, et donc sans creuser de cratère.

Toutefois, certains astronomes pensent qu'une comète est tellement volatile, qu'elle se serait détruite à plus haute altitude, vers 30 km. Si c'était le cas, il s'agirait alors d'une chondrite carbonée de faible cohésion, et de faible densité, d'une soixantaine de mètres de diamètre. La région, couverte de pergélisol, est très peu propice à la récupération de matériel.

## *Ce qu'elles nous apprennent*

**Abondance des éléments**

Le cratère de Sudbury au Canada constitue aujourd'hui un gisement de nickel constituant les 2/3 des ressources mondiales ! Il contient aussi du platine, du cobalt et de l'or… Le cratère Vredefort contient du chrome en abondance, et constitue la plus grande réserve de platine au monde ! Le cratère Popigaï en Yakoutie contient pour sa part des métaux stratégiques, donc sa composition reste inconnue… Le cratère de Ries contient de la coésite.

**Les tectites**

Les *tectites* (du grec *têktos*, fondu) sont de petits globules de verre naturel, souvent en forme de coupe ou de goutte, de quelques millimètres à quelques centimètres. Elles contiennent de 70 à 80 % de silice, 3 à 16 % d'alumine.

On les a longtemps considérées comme des météorites, et on s'est interrogé sur leur origine. Ce problème a été résolu récemment, en partie grâce à leur répartition géographique : elles se répartissent à la surface de la Terre dans des zones de forme elliptique. Ces zones sont associées à des cratères d'impact, et leur âge est le même que celui du cratère.

Ce ne sont donc pas des météorites, mais des matériaux terrestres fondus. Lors de l'impact d'une météorite assez importante, la chaleur produite par le choc a fondu le sol terrestre, qui s'est vitrifié et a été projeté sous forme de gouttes. Ces gouttes sont retombées plus loin sur une surface elliptique à l'opposé de la direction d'arrivée de la météorite. Certaines sont projetées tellement fort, qu'elle sortent de l'atmosphère, pour aller retomber des milliers de kilomètres plus loin. En retombant dans l'atmosphère, ces tectites fondent à nouveau, et garderont les traces de cette double fusion.

On connaît 4 champs de tectites dans le monde :

| nom | localisation | âge | cratère associé |
|---|---|---|---|
| *moldavites* | Bohème, Moravie | 15 MA | Ries Krater, 30 km, Bavière |
| *ivoirites* | Côte d'Ivoire | 1,3 MA | Bosmtwi, Ghana |
| - | Georgie, Texas | 35 MA | golfe du Saint Laurent ? |
| *australites* | Australie, Indochine, Malaisie, Océan Indien | 700 000 ans | Antarctique ? |



Tectite de Thailande photo J. Gispert

**Les impactites**

Longtemps confondues avec les météorites, les impactites sont constituées de matériaux terrestres, mais arrachés à la croûte par un impact, et projetés à distance parfois importante. Elles sont associées à des cratères d'impact.

**Verre lybique**

Le *verre lybique* a été décrit pour la première fois en 1933, mais il était connu bien avant. Il s'agit d'un verre naturel de couleur jaune à vert clair, en général transparent et de bel aspect. On le trouve dans la *Grande Mer de Sable*, en bordure d'un plateau gréseux. On trouve des fragments de diverses tailles : les plus petits sont centimétriques, et sont posés sur le sol entre les dunes. Les plus gros fragments sont en partie ou totalement enterrés. Le plus gros trouvé pesait 26 kg, mais il s'est cassé en deux parties.



Verre lybique photo J. Gispert

Les parties exposées à l'air sont brillantes et polies par le sable transporté par le vent. Les formes arrondies indiquent un transport par l'eau. Les parties enterrées sont plus anguleuses, ayant été bien plus protégées.

L'âge de ces verres est assez difficile à déterminer, et deux mesures différentes ont donné des résultats contradictoires. Il semble qu'ils soient âgés de 29 millions d'années.

Il est tout aussi difficile de déterminer la quantité de verre existant. Certains sondages ont montré sa présence jusqu'à deux mètres de profondeur. La densité de verre en surface, l'extension du gisement, l'estimation des quantités enfouies, la proportion de matériaux détruits par l'érosion, tous ces paramètres assez flous permettent d'arriver à une estimation de $10^7$ tonnes.

L'analyse minéralogique des verres montre par ailleurs qu'ils ont été portés à très haute température : plus de mille degrés en tous cas. Il faut donc expliquer la formation d'une masse de cent mille tonnes de verre fondu…

**Comment reconnaître une météorite ?**

Tout d'abord, comment reconnaître un cratère produit par une météorite ? Les trous plus ou moins ronds à la surface de la Terre peuvent être des cratères volcaniques, des effondrements du sous-sol miné par les eaux (surtout dans les zones sédimentaires), des plissements naturels, des trous de bombes !

Mais les cratères météoritiques mettent en jeu des énergies énormes qui modifient les roches et sont la signature du choc. Les cristaux de quartz, qui sont présents dans tous les granites, voient leur structure cristalline modifiée par un choc très violent. Ils montrent alors des images microscopiques caractéristiques, qui indiquent avec certitude que le cristal a subi un choc violent. On les appelle *quartz choqués*. Aucun choc naturel à la surface de la Terre ne peut justifier de pressions suffisantes pour provoquer ces images ; donc un quartz choqué a forcément subi le choc d'une météorite (la seule exception, d'origine artificielle, est produite par des explosions nucléaires).

Dans certains cas, il se forme des structures macroscopiques nommées *cônes de dépression* (*shatter cones*) ; ce sont des roches de forme conique particulière, provenant d'une brisure, d'angle au sommet de 75° à 90°, qui se forment sur des roches à grain fin telles les calcaires et les quartzites, à des pressions de 50.000 à 100.000 atmosphères.

En l'absence de quartz choqués, il y a un autre moyen de déterminer qu'une roche est une météorite : c'est que la composition des roches terrestres n'est pas quelconque. La Terre s'est formée à partir de matériaux de la nébuleuse primitive (qui a donné également le Soleil), qui contenait les divers éléments chimiques dans certaines proportions. Après sa formation, la différenciation a opéré un tri de ces matériaux, les plus lourds tombant au centre de la Terre où ils ont constitué un noyau de fer et de nickel, et les plus légers remontant à la surface pour former une croûte de silice et d'aluminium (essentiellement). La géologie nous indique quelles sont les proportions des différents éléments chimiques que l'on trouve dans l'écorce terrestre. Si une roche présente des proportions très différentes, elle ne peut pas être originaire de la Terre. Ainsi, dans les météorites, le nickel, le platine et l'iridium se trouvent dans des proportions 20 à 100 fois supérieures à celles des roches terrestres. Cette composition est donc une signature attestant de leur origine extraterrestre.



**Une fausse météorite** ! Il s'agit sans doute d'un résidu de haut fourneau, mais l'aspect extérieur (à gauche) est assez trompeur. Toutefois, la densité de l'objet est plus faible que celle d'une sidérite à laquelle elle ferait penser. Le sciage (à droite) montre que l'objet, bien que constitué de fer, n'est pas compact, mais présente dans toute sa masse des vides que ne montre pas une sidérite (elle a été formée à haute pression). Photo J. Gispert

Enfin, pour les météorites métalliques, il existe une façon spectaculaire de les déterminer. Elles proviennent du manteau d'une petite planète (plus de 100 km de diamètre), qui a plus tard été détruite par un choc. Elles sont constituées essentiellement de fer, avec une proportion assez forte de nickel (de 5 à 15 %, quelquefois plus). Le fer et le nickel donnent des minéraux différents selon leurs proportions, en particulier la *kamacite* (de 4 à 7,5 % de Ni) et la *taénite* (de 7,5 à 15 % de Ni). Leurs cristaux sont différents, et leurs proptiétés physiques aussi. Les météorites métalliques sont en général constituées d'un mélange des deux.

Lorsqu'on coupe une météorite métallique, qu'on polit la surface, puis qu'on l'attaque avec de l'acide nitrique, la kamacite est plus facilement attaquée, et en étant détruite par l'acide laisse voir la forme des critaux de taénite, plus résistants. On appelle l'image obtenue *figure de Widmanstäten*. Aucun échantillon métallique terrestre (provenant de la croûte) ne présente ces figures ; donc elles permettent, lorsqu'elles sont présentes, de déterminer la nature extraterrestre de l'échantillon.

**Quelles météorites arrivent au sol ?**

Les météorites de petite taille sont freinées par l'atmosphère, et arrivent au sol intactes ou fragmentées. Les météorites plus grandes, de diamètre supérieur à 10 m, sont peu ralenties, et leur vitesse est de plusieurs dizaines de km par seconde. Trop petites, elles brûlent dans l'atmosphère ; trop grosses, elles se volatilisent complètement. Seules les météorites intermédiaires arrivent au sol.

100.000 tonnes de météorites arrivent chaque année sur la Terre. 90 % sont des poussières de moins d'un gramme ; 70 % sont de moins de 10 grammes ; 500 d'entre elles font plus de 200 grammes. Sur ces dernières, on en retrouve une vingtaine par an, soit 8 %.

La surface des océans étant très supérieure à celle des continents, une part importante des météorites tombe à la mer. Dans les continents, certaines zones sont très peuplées, mais il y a aussi des déserts. Dans les zones équatoriales et tropicales, la végétation et l'humidité ont vite fait disparaître la météorite. Mais dans les déserts comme le Sahara ou bien l'Antarctique, les météorites, non seulement se conservent bien, mais encore sont facilement visibles sur un sol dénudé. C'est ainsi que l'on recherche volontier les échantillons dans ces zones. Mieux encore : dans les zones glaciales, la neige qui tombe retient les météorites, se transforme en glace, et coule vers les points bas. Là, la glace fond, et libère les cailloux qu'elle contenait. Des chercheurs se sont rendus dans ces zones et ont récupéré ainsi une belle moisson de météorites au fond des lacs glacières.

**D'où viennent-elles ?**

Les météorites, avant de tomber sur la Terre, tournent autour du Soleil. Ce sont sont des cailloux, de tailles diverses et variées, qui circulent comme les planètes dans notre système solaire. Comme les planètes, elles ont été formées il y a plus de 4 milliards d'années à partir des mêmes matériaux. Leur mécanisme de formation est le même, et on peut dire qu'une planète est une très grosse météorite.

Lors de la formation du système solaire, de petits matériaux se sont agglomérés pour former des cailloux, puis de gros blocs, et quelquefois donner une planète. Autour du Soleil circulaient donc des milliards d'objets de toutes tailles. Par le jeu des perturbations, les gros (les planètes) ont modifié les orbites des petits, les ont attirés. Les petits, très nombreux alors, sont massivement tombés sur les planètes. On appelle cela le bombardement météoritique. Il a été très très intense au tout début du système solaire. Mais à force de tomber sur les planètes, les cailloux ont fini par disparaître, ou presque. Et donc, les chutes de météorites ont très vite diminué.

Actuellement, les chutes de météorites sont rares, puisqu'il ne reste plus guère de matériaux dans l'espace. Cependant, la Terre reçoit toujours quelques tonnes de météorites, presque toutes des poussières, chaque jour. Le gros objets se font très rares, ce qui est plutôt rassurant pour la vie de tous les jours (c'est pas demain la veille que nous recevrons le ciel sur la tête).

probabilités de chute en fonction de la taille.

**Quelques chutes importantes**

**Sikhote-Alin** - (Sibérie) le 12/02/47. Traînée lumineuse qui a parut plus brillante que le soleil. Explosion à 10 km, pluie de fer sur presque 10 $km^2$. 20 tonnes récupérées, le plus gros bloc de 1,7 tonne, cratère de 26 m.

**Rochechouart** - Difficile de ne pas voir un signe dans le nom de cette localité !

**Toungouska** - Cette chute est importante parce qu'elle a permis d'analyser les dégats produits par un impact récent. Mais comme nous l'avons vu plus haut, elle n'a laissé aucune trace.

**Allende** - C'est une chondrite carbonée, la plus grosse connue.

**Que nous apportent les météorites ?**

L'analyse des météorites dans toute leur diversité nous donne des indications extrêmement précieuses sur la composition, l'âge, la durée de formation, les conditions de température etc. des matériaux qui ont constitué les planètes. Elles montrent en particulier que ces matériaux proviennent pour partie de nuages moléculaires proches, mais différents de celui qui a directement donné naissance au Soleil et ses planètes.

Les météorites nous indiquent que :

- la formation du système solaire s'est faite en une vingtaine de millions d'années ;
- l'âge du système solaire est de 4,563 milliards d'années (à 4 millions d'années près) ;
- les météorites différenciées sont légèrement plus jeunes ;
- presque toutes les météorites sont plus vieilles que les roches lunaires (3 à 4,45 milliards d'années) ;
- les grains contenus dans les chondrites proviennent de nuages moléculaires (rapport D/H et $^{15}N/^{14}N$) ;
- certains de leurs éléments chimiques ont été formés par le processus r de nucléosynthèse, produit par une supernova ;

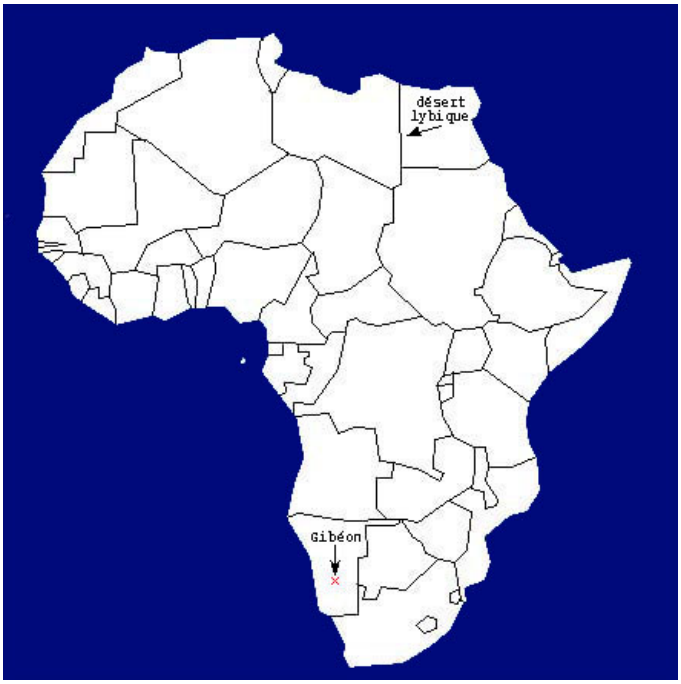
Elles nous apportent des renseignements précieux sur l'intérieur d'une planète, inaccessible autrement !

---

Localisation des météorites




Imilac se trouve au Chili, non loin d'Antofagasta, en direction de la frontière Argentine.




Le désert lybique se trouve à la frontière entre l'Egypte et la Lybie, à une latitude intermédiaire entre Karnak et Assouan.

Gibéon est en Namibie, anciennement Afrique du Sud-Ouest.

**Hoba**

La météorite de Hoba est tombé en Namibie, près de la ville de ce nom. C'est la plus grosse météorite connue sur Terre. Elle a été évaluée à près de 70 tonnes à son arrivée sur Terre. Mais depuis, l'érosion l'a attaquée, elle a été victime des scientifiques, qui en ont prélevé des morceaux pour étude (pour la bonne cause) ; mais elle a subi aussi les assauts des vandales, qui en ont prélevé des fragments. Aujourd'hui, elle ne doit plus faire que 60 tonnes…



Météorite Hoba, Namibie, Photo Patrick GIRAUD

Elle reste cependant la plus grosse météorite jamais trouvée sur Terre.

---=OO=---

# Disparition des dinosaures



**Les faits**

Les dinosaures ont régné en maîtres tout au long de l'ère Secondaire, c'est-à-dire pendant 160 millions d'années. Bien sûr, au cours de cette période, ils ont évolué. Mais ils sont restés les espèces dominantes sur Terre. A la fin de leur règne, les mammifères existaient déjà, mais c'étaient seulement de petites bêtes guère plus grosses qu'un chat actuel. En fait, les dinosaures, tant herbivores que carnivores, occupaient l'espace. La place restante pour les mammifères (niche écologique) était très réduite, et ils ne pouvaient se développer vraiment.

Puis, brusquement, il y a 65 millions d'années, les dinosaures ont tous disparu de la surface de la Terre. Cette extinction brutale (à l'échelle géologique, car on ne sait pas si elle a duré quelques jours ou quelques millénaires…) nous pose un problème important, qui consiste à comprendre pourquoi les maîtres de la Terre ont dû céder la place. Les ammonites, céphalopodes marins, ont disparu au même moment. Un grand nombre d'espèces vivantes ont été décimées.

La disparition des dinosaures et autres espèces marque le début de l'ère Tertiaire, aussi dit-on qu'elle s'est produite à la limite Crétacé-Tertiaire (le Crétacée, période de la craie, est la dernière étape du Secondaire). En français, on parle de la limite CT, plus généralement on la nomme KT, du nom allemand du Crétacé (de *Kreide* : craie ; *kretazeisch* : crétacé = ère de la craie qui termine l'ère secondaire). Les terrains au-dessous de cette limite présentent des fossiles de dinosaures, alors qu'ils sont totalement absents des terrains placés au-dessus



Intérieur d'une coquille d'œuf de dinosaure, montagne de Ste Victoire, Aix-en-Provence photo J. Gispert



Contour (en blanc, au centre de l'image) d'une coquille dont le dessus a été enlevé par l'érosion photo J. Gispert

**Les théories**

De multiples théories ont été échafaudées pour expliquer cette catastrophe, mais rares sont celles qui résistent à une analyse sérieuse. Parmi celles-ci, on compte des théories biologiques, et des théories géologiques ou astronomiques.

Les premières envisagent des attaques virales ou bactériennes, qui auraient tué tous les dinosaures. Mais ce genre d'explication paraît douteux, car il existait une grande diversité de dinosaures : très grands ou tout petits, tropicaux ou polaires, carnivores ou herbivores… Il est difficile d'admettre qu'un même agent pathogène puisse détruire ces différentes espèces. *A fortiori* on ne comprend pas qu'il s'attaque aussi à des animaux marins.

D'autre part, les grandes épidémies tuent une partie conséquente d'une population, mais il y a toujours quelques individus protégés, par le hasard de leur patrimoine génétique. Et ces derniers suffisent à faire repartir la croissance de la population, car celle-ci est évidemment immunisée puisque tous ses ancêtres le sont.

Un géologue, Walter Alvarez, a trouvé juste à la limite KT, une mince couche (quelques millimètres à quelques centimètres) d'argile noire contenant un fort excès d'iridium. L'iridium est un métal proche du platine, et très rare dans la croûte terrestre. Fine, cette couche s'est donc déposée rapidement. On l'observe à Gubbio en Italie, Stevns Klint au Danemark, Bidart en France, Caravaca en Espagne, El Kef en Tunisie, en Nouvelle-Zélande… En France, elle est coincée entre des couches calcaires, qui ont été produites par le plancton marin. Si elle ne contient pas de calcaire, c'est que le plancton était presque inexistant pendant son dépot.

Ce métal se trouve dans le système solaire dans une certaine proportion par rapport à l'hydrogène ou à l'oxygène. Il se trouve dans cette même proportion dans la Terre, prise globalement. Mais la Terre s'est différenciée au cours de sa formation, en fondant, et en précipitant les matériaux lourds vers le centre, tandis que les matériaux légers surnageaient et formaient la croûte. On comprend alors que l'iridium, assez lourd, soit pratiquement absent de la croûte. Ainsi, aucun des minéraux ou des roches que nous trouvons autour de nous n'en contient une proportion significative.

Dans ces conditions, d'où vient l'iridium qui se trouve dans la fameuse limite KT ?

L'iridium n'a pu être concentré que par la différenciation d'une planète, soit la Terre, soit une autre. Deux solutions se présentent alors, et elles vont donner deux théories concurentes : si c'est la Terre, l'iridium est tombé dans le manteau, et c'est le volcanisme qui peut l'en extraire ; sinon, il doit provenir d'une météorite assez grosse, fragment du manteau d'une planète différenciée, qui aura frappé la Terre à ce moment-là.

La première de ces théories, présentée par Vincent Courtillot, est basée sur l'observation d'un phénomène géologique qui s'est produit justement lors de la disparition des dinosaures ; il s'agit d'un épisode cataclismique d'éruptions volcaniques, de type point chaud, dans le Deccan (province de l'Inde). En peu de temps (à l'échelle géologique), plusieurs kilomètres d'épaisseur de lave se sont répandus à la surface de la Terre. Lors des éruptions, il est possible qu'une quantité importante de matériaux provenant du manteau de la Terre, donc riches en iridium, aient été projetées dans la stratosphère, puis soient retombées plus tard en recouvrant toute la surface de la planète. Une telle explication est à rapprocher des phénomènes observés en 1908 lors de l'éruption du Cracatoa, dont les cendres ont obscurci la Terre pendant deux ans, provoquant une diminution des températures, ou plus récemment de l'éruption du Pinatubo, moins violente, mais aux conséquences sensibles. Si de nombreuses éruptions semblables se produisent dans un temps bref, l'accumulation des poussières dans la stratosphère peut limiter le rayonnement solaire au sol, faire baisser la température, et limiter la photosynthèse. De pareilles conditions pourraient être très néfastes pour beaucoup d'animaux, quelle que soit leur espèce.

Il semble cependant que cette théorie n'explique qu'une partie de l'iridium observé à la limite KT. Mais les datations des laves du Deccan donnent une époque qui correspond à la disparition des dinosaures.

La seconde hypothèse est due à Luis Alvarez et son fils, et date de 1980. Elle met en scène la provenance extraterrestre de l'iridium, au cours de la chute d'une météorite géante. La quantité d'iridium qu'on observe dans certaines météorites trouvées de nos jours correspond bien à celle de la limite KT. Cette théorie ne souffre donc pas du problème de la première. L'impact aurait fondu 20.000 $km^3$ de roches…

De plus, ces chercheurs ont réussi à trouver des indices géologiques prouvant qu'un impact violent s'est produit à l'époque concernée. Ils ont réussi à localiser un cratère, presque effacé par l'érosion, qui se trouve dans le golfe du Mexique, exactement dans la presqu'ile du Yucatan à Chicxulub. Ce cratère correspond à la chute d'une météorite de 10 km de diamètre. Lors de l'impact, un raz-de-marée a dû se produire, qui est allé ravager les côtes du golfe. Or justement, on retrouve sur son pourtour des rochers charriés par l'eau.

On a trouvé aussi des quartz choqués, caractéristiques d'un violent impact. Les cristaux de quartz (cristal de roche) sont l'un des constituants du granite, et sont très abondants à la surface de la Terre. Des expériences de laboratoire ont montré qu'un cristal de quartz soumis à un choc très violent montre des stries caractéristiques, provoquées par une recristallisation partielle. Seul un choc très violent peut produire cet aspect. Leur présence est donc la signature d'un impact.

Peut-être les éruptions volcaniques du Deccan avaient-elles déjà affaibli les dinosaures, et la chute de la météorite a-t-elle achevé le travail de destruction ? Toujours est-il que le volcanisme seul ne semble plus expliquer cette extinction, et que la météorite a pu être la cause principale.

Le scénario de cet événement est impressionant. Une météorite de 1.000 milliards de tonnes a dû arriver à une vitesse de l'ordre de 30 km/s (Mach 10). Elle a traversé toute l'atmosphère de la Terre en 2 secondes. A son arrivée au sol, sa vitesse était encore de plusieurs km/s. Elle a traversé l'océan, s'est enfoncée dans le fond océanique, où elle a créé une onde de compression, portant la roche à 18.000 . Quelques secondes plus tard, l'onde de décompression a produit le cratère (rebond), et le raz-de-marée. Une quantité phénoménale de matériaux terrestres et météoritiques (contenant de l'iridium) a été projetée dans la stratosphère sous forme de poussières. Ces poussières ont rapidement fait le tour de la planète, qu'elles ont recouverte d'un manteau opaque. Les rayonnements solaires, réfléchis par ces poussières, ne pouvaient plus arriver au sol, interdisant toute photosynthèse par les plantes. Les plantes mourrant, les herbivores n'avaient plus de nourriture, donc mourraient à leur tour. Enfin, ce fut le tour des carnivores de manquer d'alimentation.

D'autre part, la chute de la météorite a pu déclencher des incendies de forêts, car au moment de l'impact, la température de l'atmosphère est montée à 2.000°. Ces incendies auraient consommé l'oxygène et dégagé de grandes quantités de gaz carbonique et d'oxyde de carbone, de nature à asphyxier les rescapés de l'impact, du raz de marée, et de l'incendie. Ce fait est rendu plausible par la découverte d'une couche d'argile très riche en charbon et en suies, témoignant de gigantesques incendies ayant ravagé la planète à la même époque.

On comprend donc, dans un tel scenario, que les animaux les plus gros, ayant besoin de beaucoup de nourriture, ont été les plus touchés. Ils ont donc disparu les premiers. Les mammifères, petits à l'époque, donc pouvant facilement trouver un abri et peu exigeants pour leur nourriture, ont pu traverser la crise. Lorsque les conditions sont redevenues bonnes, la phtotosynthèse a recommencé, des plantes ont recolonisé la Terre ; les mammifères herbivores ont trouvé ce dont ils avaient besoin, et ils n'avaient plus de concurents, puisque les dinosaures avaient disparu. Ils ont dû se développer très rapidement. Alors, les mammifères carnivores ont pu à leur tour se développer.

Incendies, asphyxie, et froid, cela fait beaucoup de causes qui expliqueraient que les dinosaures aient disparu rapidement. La catastrophe astronomique est-elle la bonne explication ?

**Alternative**

L'explication précédente semble bien expliquer les faits d'observation. Il faut cependant mentionner une autre observation qui date de 1874. Gould a remarqué dans le ciel à cette époque un anneau nébuleux immense, car il mesure 1.000 parsecs de diamètre ! Rien à voir avec une nébuleuse planétaire, qui atteint à peine les 50 parsecs.

Nous sommes à 200 parsecs du centre de l'anneau de Gould. C'est-à-dire que nous sommes à l'intérieur. Cet anneau provient d'une explosion titanesque, qui s'est produite donc à peu de distance de la Terre… il y a 65 millions d'années. Cette explosion pourrait être provoquée par une supernova éclatant au sein d'un amas d'étoiles massives. L'onde de choc qu'elle produit déstabilise les autres étoiles, en provoquant une forte surpression et une élévation brutale de température, qui pourrait entraîner des réactions nucléaires explosives dans leur enveloppe. D'où des explosions de supernovæ en chaîne.

Décidément, les pauvres dinosaures étaient condamnés : entre les virus, les supernovæ, la météorite géante et le volcanisme, ils n'avaient aucune chance de s'en sortir !

---=OO=---




Oh Soleil ! Toi sans qui les choses ne seraient que ce qu'elles sont !

*Edmond Rostand, Chantecler*

Le Soleil est un objet très particulier pour nous, à qui il apporte la vie. Il joue un rôle primordial dans notre existence, et lorsqu'il se cache derrière des nuages, nous en sommes affectés…

Une opposition forte entre le Soleil et les étoiles saute aux yeux : l'un symbolise le jour, les autres la nuit ; lumière éblouissante d'un côté, faible clarté de l'autre ; une grosse boule de feu, de petits points lumineux…

Rien de commun !

Et pourtant, assez récemment, les astronomes ont compris que le Soleil est une étoile, ou que les étoiles sont des soleils…

Toutes les différences que l'on note à l'œil nu ne proviennent que de leurs distances très différentes : la première étoile après le soleil est 300.000 fois plus éloignée que lui. Ils nous apparaissent donc comme deux phares identiques placés, l'un à 1 km, l'autre sur la Lune !

L'intérêt du Soleil en astronomie est donc très grand : il est primordial de comprendre comment fonctionne notre source de vie ; mais puisque ce n'est qu'une étoile parmi tant d'autres, il doit être quelque peu représentatif de toutes les étoiles. Or sa proximité nous permet de l'étudier en grand détail, et donc, après avoir compris comment il fonctionne, nous pourrons extrapoler ces connaissances pour avoir une idée très correcte du fonctionnement des étoiles. Mais finalement, celles-ci s'avéreront extrêmement variées…

**Le Soleil historique**

Pour les Anciens, le Soleil appartient au monde supralunaire, donc il doit être parfait. Effectivement, sa surface est à première vue immaculée, bien que dans quelques circonstances, vu à travers la brume, on peut y distinguer des taches lorsqu'elles sont particulièrement développées.

Or en 1610, lorsque Galilée tournera sa lunette vers le Soleil (ce que nous ne ferons pas par prudence !), il découvrira des taches à sa surface, rendant caduc le dogme du monde supralunaire parfait… A partir de là, tout deviendra possible en matière d'idées.

Dans ces conditions, la distinction stricte entre les deux mondes disparaît, et rien ne s'oppose plus à ce que le Soleil soit fait de matière semblable à celle de la Terre.

**Les relations avec la Terre**

En 1722, on a découvert que l'orientation de la boussole n'est pas rigoureusement fixe, mais varie un peu au cours du temps. En 1741, le lien de ces variations avec les aurores boréales était fait, montrant que le Soleil était pour quelque chose dans ces magnifiques phénomènes.

En 1850, on découvre un cycle d'un peu plus de 10 ans pour les variations du pôle magnétique, et en 1851 on met en évidence le cycle solaire de 11 ans. Le lien entre les deux est établi tout de suite ; il montre l'interaction entre le Soleil et le magnétisme terrestre (géomagnétisme).

En 1859, une éruption solaire est observée, et 18 heures plus tard un violent orage magnétique éclate. Le lien entre les deux sera définitivement établi dans les décennies qui suivent.

On sait maintenant que la vie sur Terre dépend étroitement du Soleil ; 1 % de variation de sa luminosité serait pour nous catastrophique…

**L'observation du Soleil**

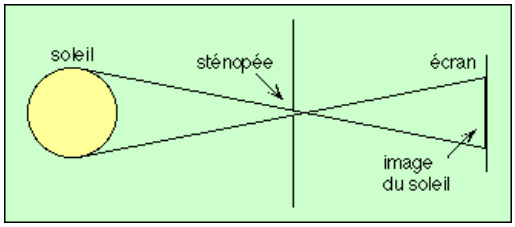
Disons tout d'abord qu'il ne faut JAMAIS observer le Soleil avec un quelconque instrument d'optique, jumelles, lunette ou télescope. A l'oeil nu déjà, il provoque des brûlures de la rétine ; avec un instrument, elles seraient très graves et irréversibles.

Bien sûr, les astronomes ont développé des méthodes pour observer le Soleil malgré ces difficultés, et même les amateurs disposent de moyens pour cela. Mais il faut être très bien documenté et très soigneux pour se permettre ce genre d'observation.

Il existe toutefois des moyens simples pour voir la surface du Soleil : tout le monde a déjà vu le disque solaire à travers la brume. Celle-ci diffuse la lumière dans toutes les directions, et, si elle est suffisamment dense (mais pas trop…) elle laisse voir un Soleil très atténué, qui ne fait pas mal aux yeux. C'est dans de telles conditions que les anciens ont découvert les taches solaires. Remarquons toutefois qu'au Moyen-Age on n'en croyait pas ses yeux, puisqu'on considérait que le Soleil était la perfection, sans taches…

En l'absence de brume, prenez un tube de carton, servant à emballer des posters par exemple. Il possède deux couvercles. Perçez le premier d'un petit trou bien centré à l'aide d'une épingle ; remplacez le second par un morceau de papier calque fixé autour à l'aide de Scotch.

Dirigez le trou vers le Soleil, et observez le papier calque. Vous y verrez une petite image ronde du Soleil. Si vous dirigez le trou vers un paysage, vous pourrez voir une image à l'envers de ce paysage, mais attention ! Le petit trou ne laisse passer que très peu de lumière, et si vous êtes en plein jour, vous ne verrez rien. Il faut vous placer dans une pièce sombre pour arriver à distinguer l'image. Imaginez maintenant que vous remplaciez le papier calque par un morceau de pellicule photographique : vous aurez obtenu une chambre noire.




Le petit trou s'appelle un *sténopée* ; il ne laisse passer qu'un tout petit faisceau de lumière du Soleil, ce qui a pour premier effet de réduire la luminosité trop abondante. Ensuite, on peut voir sur un dessin que ce trou donne, sans optique, une image correcte d'un objet. L'image est d'autant plus nette que le trou est plus petit, mais la luminosité diminue d'autant.

**Instruments**

Pour faire des observations plus fines, on utilise deux types d'instruments.

Le premier est un télescope (ou une lunette) équipé d'un filtre, placé AVANT l'entrée du tube. De cette façon, la lumière du Soleil est atténuée AVANT d'être concentrée par l'optique. L'inconvénient est qu'il faut construire un filtre de très bonne qualité optique, aussi bonne que celle du miroir ou de l'objectif. Bien entendu, la couronne, déjà invisible sans filtre, est totalement effacée de l'image. Cet instrument est donc spécialisé dans l'observation du disque photosphérique, des taches, filaments et grains de riz.

Notons ici une précaution à prendre, pour les personnes qui souhaiteraient acheter un télescope dans le commerce. On propose parfois deux types de filtres pour observer le Soleil : soit de grand diamètre à placer DEVANT le télescope, soit de petit diamètre, à mettre au niveau de l'oculaire. Disons simplement que les petits filtres, beaucoup moins chers, sont à proscrire pour la sécurité : ils sont placés à un endroit où les rayons du Soleil ont été condensés par le télescope, et donc où la chaleur est très élevée. A cause de cette chaleur, il arrive que le filtre éclate pendant l'observation ! L'œil de l'observateur est perdu dans ces conditions… probablement pas par des éclats, mais par la lumière du Soleil qui parvient brutalement jusqu'à la rétine.

Le second instrument est complémentaire, il sert à voir la couronne, et pour cela s'appelle *coronographe*. C'est un instrument très difficile à construire : il faut supprimer toute trace de lumière provenant de la photosphère, car un millionième de celle-ci serait aussi brillant que la faible couronne. Pour cela, le principe est naturellement de placer un disque noir dans le tube de l'instrument, devant l'image de la photosphère, exactement comme la Lune se place devant le Soleil lors des éclipses totales. Mais ce principe ne s'applique pas simplement. Une éclipse se passe en dehors de l'atmosphère, dans des conditions idéales. Le disque de la Lune est très loin, il est aussi très gros. Lorsqu'on fabrique un tout petit disque pour le placer devant l'image du Soleil dans un télescope, on est bien vite déçu…

De très nombreuses difficultés se présentent à l'opticien téméraire, et pour cette raison il a fallu attendre Bernard Lyot au début du siècle pour parvenir au succès. L'instrument nécessite des verres de qualité parfaite (sinon ils diffusent assez de lumière pour faire disparaître la faible couronne), un diaphragme, des pièges à lumière…

Les amateurs peuvent construire un coronographe simplifié, mais celui-ci donnera une image de la chromosphère, encore assez brillante, et des protubérances. Mais il ne faut pas espérer voir la couronne.

**Instruments spécialisés**

Les difficultés d'observation pour le Soleil sont à l'opposé de celles des étoiles : il y a trop de lumière ! Au niveau de la Terre, nous recevons 1.365 Watts par $m^2$. Un télescope de 1,12 m de diamètre présente une telle surface, et recueille donc cette énorme énergie. Dans le tube, elle produit le même effet que sur une route surchauffée en plein été. L'air y danse une folle farandole, et les images en subissent toutes les conséquences.

Dans un télescope d'amateur, la turbulence est relativement limitée par la faible ouverture, mais le pouvoir séparateur aussi. Les professionels ont donc mis au point et construit quelques instruments d'observation spécialisés pour l'étude fine du Soleil. Tout d'abord, on place le tube verticalement, afin que l'air chaud puisse monter régulièrement, avec un minimum de turbulence.

Il existe des tours solaires importantes à Meudon en France, et à Kitt Peak aux Etats Unis. La tour solaire McMath-Pierce de Kitt Peak est haute de 40 m. Au sommet se trouve un héliostat à 3 miroirs de 2,10 m. La lumière est acheminée dans un tunnel long de 150 m, en partie enterré. La tour est refroidie par des canalisations remplies d'un liquide de refroidissement. Les premières mesures de champ magnétique dans les tâches ont été faites avec cet instrument.

Une autre technique a été développée pour supprimer la turbulence : faire le vide ! Plus d'air, plus d'agitation… Des instruments ont été construits dans lesquels la partie optique chaude est placée sous vide. Il existe un tel instrument à côté de la tour solaire de Kitt Peak. Sa tour mesure 25 mètres de hauteur. Les images y sont très stables.

De nouveaux instruments sont en cours de construction :

- *Advanced Technology Solar Telescope* (*ATST*) est un télescope de nouvelle génération qui devait être achevé en 2010, 2012. Mais en mars 2012, le polissage du miroir n'était pas encore commencé ! Ce miroir de 4 m devrait permettre de mesurer très précisément le champ magnétique du Soleil.
- La Chine prépare un télescope solaire spatial, qui devait être lancé en 2008, afin d'étudier le maximum d'activité de 2009. Il devrait deux télescopes d'un mètre de diamètre, et être placé en orbite héliosynchrone.

Ces instruments permettent de voir la granulation solaire à petite échelle, avec un pouvoir séparateur réel meilleur que 1.000 km à la surface du Soleil.

Des instruments spatiaux ont été lancés. Les plus importants sont *SOHO* (*Solar and Heliospheric Observatory*), et *Ulysse*. La particularité d'Ulysse est dans son orbite. Lancé en direction de Jupiter, il a atteint la planète par en-dessus. La forte perturbation gravitationnelle l'a alors expédiée vers le pôle sud du Soleil. C'est la première sonde qui quitte ainsi le plan de l'écliptique, et ses observations ont été très importantes pour la connaissance du Soleil.

SOHO, qui est le fruit d'une coopération entre la NASA et l'ESA, a été placé au point de Lagrange de la Terre, du côté du Soleil. Il est donc en permanence en vision directe de l'astre à observer. Il comporte 11 intruments différents, qui permettent d'observer le Soleil dans une gamme très complète de longueurs d'onde.

**Apparence du Soleil**

On note que le Soleil est un disque parfait, aux bords très nets. Ceci semble curieux si on garde présente en mémoire sa nature gazeuse : une boule de gaz doit se diluer progressivement dans l'espace, et ne pas avoir de bord précis. Il devrait avoir un aspect cotonneux. Pourtant…

Ce que nous voyons du Soleil est une enveloppe qu'on nomme *photosphère* (du grec *photos* = lumière) car c'est elle qui nous envoie toute la lumière. Elle est très mince, c'est pourquoi le bord du Soleil paraît net. On donnera une explication plus précise plus loin.

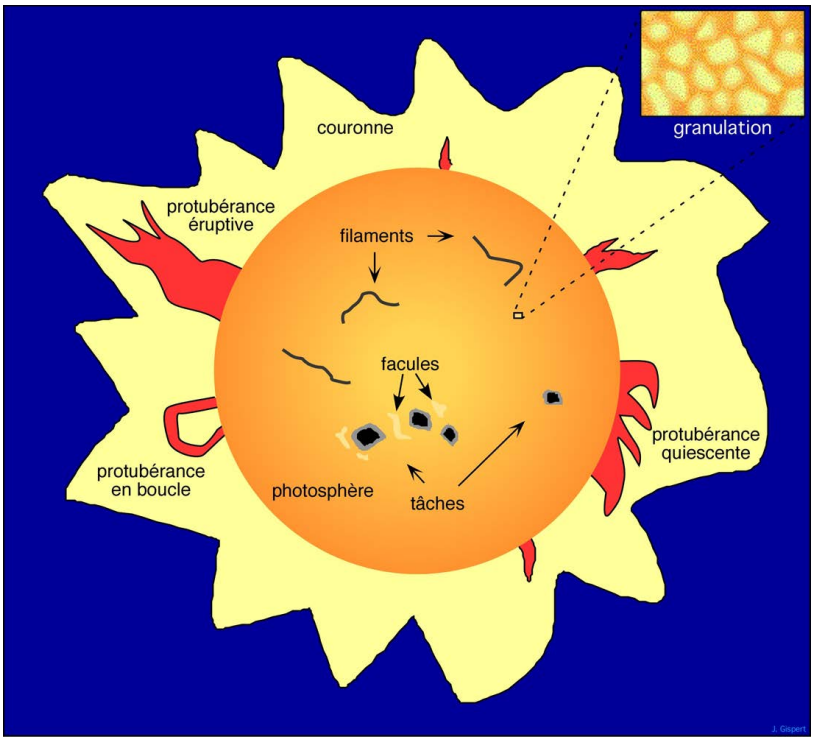



Schéma du Soleil en lumière visible

Ce schéma montre le Soleil tel qu'on ne le voit jamais !

Il regroupe le disque lui-même et l'atmosphère ; le disque étant 1 million de fois plus lumineux que la couronne, il nous empêche de la voir dans les conditions normales. Si on regarde le Soleil simplement à travers un filtre, on verra donc le disque figuré sur le schéma. Tout ce qui se trouve à l'extérieur du disque (couronne, protubérances) reste invisible.

On verra tout de suite que le disque est très brillant, mais en faisant attention on s'apercevra qu'il s'assombrit au bord (ce qui est figuré sur le schéma). Le Soleil ayant une symétrie sphérique, il est évident que la position de l'observateur joue un rôle clé dans cette apparence. Il nous faudra l'expliquer.

Enfin, une observation élémentaire nous permet souvent de voir des taches noires sur la surface. Ces taches sont parfois groupées ; on en voit également d'isolées. Si elles sont noires, c'est par contraste avec la surface très brillante de la photosphère, car en réalité elles sont elles aussi très brillantes, seulement moins que le reste du Soleil (le centre des taches est beaucoup plus lumineux que le filament d'une ampoule électrique… mais le filtre qu'on utilise pour se protéger les yeux arrête presque toute la lumière émise par la tache).

Si on fait très attention, on distinguera sur la périphérie des taches une zone de pénombre. De plus, les taches qui se profilent vers le bord du Soleil montrent une pénombre déformée, le côté le plus près du bord solaire est plus large que celui proche du centre. Ceci s'explique par la forme de la tache, qui est une dépression à la surface du Soleil. Ainsi, le bord proche de nous est écrasé par la perspective, alors que l'autre est

vu presque de face. Pour visualiser cela, prenez une assiette à soupe, et regardez-là un peu de côté ; vous verrez que le bord le plus proche de vous, placé sous un angle plus fermé, paraît plus étroit. Les taches sont souvent groupées.

On distinguera ensuite, avec beaucoup d'attention, des *filament*s plus sombres. Leur nature semble mystérieuse tant qu'on se contente de ce genre d'observation ; on comprendra plus tard que ce sont des protubérances vues de dessus.

Enfin, avec un fort grossissement, on découvre que la surface du Soleil n'est pas uniforme, mais parsemée de petites zones brillantes ou sombres, dont l'apparence a donné le nom : les *grains de riz*, ou la *granulation*. La taille d'un grain de riz est de l'ordre de 1.000 km, et sa durée de vie de quelques minutes seulement. Les anciens grains de riz se refroidissent (s'assombrissent) et disparaissent, tandis qu'à côté de nouveaux se forment. L'impression générale que donne cette agitation est assez évocatrice de la surface de l'eau qui bout. C'est d'ailleurs le même mécanisme de convection qui produit les deux.

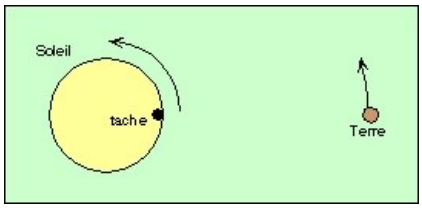
Toutes ces structures que l'on vient de décrire trahissent l'activité du Soleil ; il nous faudra définir un modèle du Soleil pour les comprendre, mais il a fallu les interpréter pour construire le modèle… c'est un aller-retour entre l'observation et la théorie !

**Symbole du Soleil**

Pour noter rapidement certains paramètres du Soleil, les astronomes ont convenu de le représenter par un cercle avec un point au centre : . Ainsi, la masse du Soleil est représentée par M , son rayon par R etc.

**Le Soleil tourne-t-il ?**

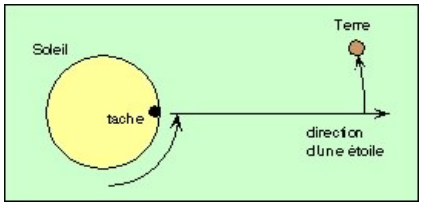
En suivant le Soleil de jour en jour, on voit très vite que les taches se déplacent, allant de l'ouest vers l'est. Ceci nous montre que le Soleil tourne sur lui-même. Il n'y a pas de raison pour qu'il ne tourne pas ! La rotation autour d'un axe est la règle générale pour les corps célestes. Le Soleil suit cette règle. Son axe de rotation est incliné de 7° 15' sur le plan de l'écliptique.




Dans ce schéma, on voit le Soleil qui présente une tache exactement en face de la Terre. Le Soleil tourne sur lui-même dans le sens indiqué par la flèche, et la Terre lui tourne autour.

A peu près un mois plus tard, la tache se retrouve exactement dans la même position par rapport aux étoiles.

Mais pendant que le Soleil effectuait une rotation complète par rapport aux étoiles, la Terre a avancé sur son orbite, et vu de chez nous, la tache n'est pas encore arrivée en face. Donc pour nous, la rotation n'est pas complète. Il s'ensuit qu'une rotation du Soleil vue de la Terre a une période plus longue que la rotation sidérale.




La rotation déterminée par rapport à la Terre se nomme *rotation synodique*. Elle est de 27,25 jours, alors que la *rotation sidérale* (par rapport aux étoiles) est de 25,35 jours en moyenne. A l'équateur, la vitesse de rotation est de l'ordre de 2 km/s.

Mais la grande surprise, c'est que la vitesse de rotation n'est pas la même à diverses latitudes : plus les taches sont proches de l'équateur, plus elles tournent vite ! On parle alors de *rotation différentielle*.

Nous avons d'autres exemples de rotation différentielle dans le système solaire : la partie visible des atmosphères des planètes géantes, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune, montre une telle rotation fonction de la latitude. Même sur Terre, l'atmosphère ne tourne pas en bloc, et les vents alizés sont une manifestation de cette fantaisie de la rotation.

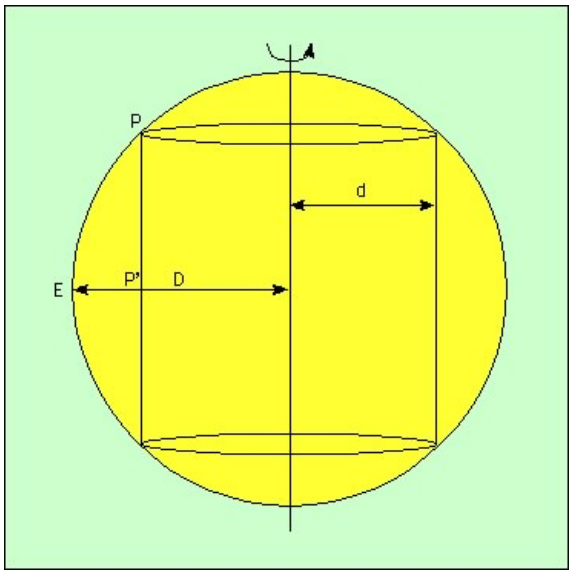
Si on considère toujours le Soleil comme un corps solide, ceci semble impossible. Mais si on se rappelle que ce n'est qu'une grosse boule de gaz, sans rigidité, on comprend que c'est tout à fait envisageable. Il faut aussi se souvenir que ce que nous voyons n'est que la surface visible du Soleil, la photosphère ; en profondeur, les choses pourraient se passer différemment.

Les vitesses de rotation sidérale sont les suivantes :

| latitude | période | latitude | période |
|---|---|---|---|
| 0° | 24,9 | 30° | 25,9 |
| 5° | 24,9 | 40° | 27,5 |
| 10° | 25,0 | 60° | 31,0 |
| 15° | 25,1 | 75° | 33,1 |
| 20° | 25,3 | 85° | 34,0 |
| 25° | 25,6 | / | / |

Pour être bref, la période de rotation varie de 25 jours à l'équateur à 35 jours aux pôles. L'axe de rotation est incliné de 82° 48' 30" sur l'écliptique.

D'où vient la rotation différentielle ? L'explication définitive n'est peut-être pas encore connue, mais des travaux déjà anciens ont montré que dans un corps en rotation où les couches d'égale densité coïncident avec les couches d'égale pression (le champ de pesanteur leur est orthogonal), la vitesse d'un point est proportionnelle au carré de sa distance à l'axe de rotation. La conséquence est que tous les points à la même distance de l'axe tournent à la même vitesse. Ils définissent un cylindre dont l'axe est confondu avec l'axe de rotation.




Ce schéma montre le Soleil en rotation. Tous les points à la surface du cylindre de rayon d dessiné, sont à la même distance de l'axe, et donc tournent à la même vitesse. On voit donc qu'un point de la surface, tel que P, situé à haute latitude, tourne à la même vitesse qu'un point de l'équateur situé assez profondément, tel que P'. Le point E, situé à la surface sur l'équateur, est à la distance D > d ; donc il tourne plus vite. Ceci explique que les zones équatoriales tournent plus vite que les zones proches des pôles.

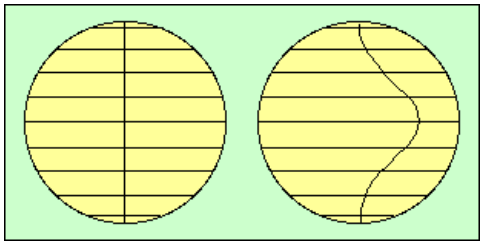
Un modèle du même genre est utilisé aujourd'hui pour représenter les intérieurs des planètes géantes, qui présentent également une rotation différentielle.

Une conséquence de la rotation différentielle est la déformation des méridiens :

Ci-contre, on voit le Soleil à deux moments différents. Sur le premier dessin, on peint un méridien arbitrairement (il s'agit d'une expérience de pensée…). Il est bien droit.

Avec la rotation différentielle, la partie de ce méridien proche de l'équateur est entraînée plus vite que les autres ; elle prend de l'avance, et donc le méridien se déforme.

Retenez bien ce phénomène, on le reverra pour expliquer les taches et le cycle solaire.



Enfin, la rotation différentielle ne concerne que les couches supérieures du Soleil, l'intérieur tournant à la manière d'un solide. La transition entre ces deux zones se trouve à 216.000 km de profondeur.

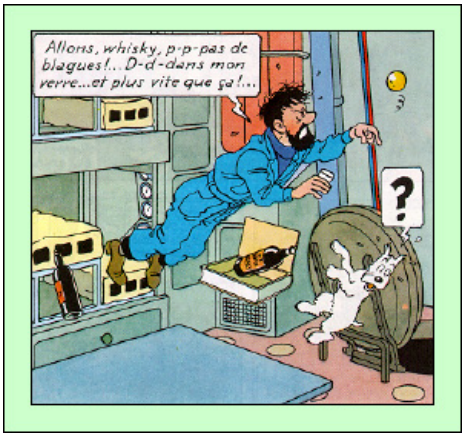
**Pourquoi le Soleil est-il rond ?**

Parce qu'il est gros, donc contient beaucoup de matière. Sa gravitation est forte, et tout a tendance à tomber vers le centre. Mais la matière est arrêtée dans sa chute par les couches au-dessous, comme nous-mêmes sommes arrêtés dans notre chute vers le centre de la Terre par les roches sur lesquelles nous marchons.

Un tas de sable s'éboule si sa pente est trop forte : le frottement des grains l'un sur l'autre ne suffit pas à contrebalancer le poids. On ne peut pas faire un tas d'eau : elle s'écoule jusqu'à ce que sa pente soit nulle. Pour l'eau, les frottement entre les molécules sont trop faibles pour permettre une pente quelconque. Cette simple expérience quotidienne nous montre que le Soleil doit être assez fluide pour prendre cette forme ronde.

Lorsqu'une force interne agit seule sur un corps, par exemple la gravité pour une planète, ou bien la tension superficielle pour un liquide, ce corps a tendance à équilibrer l'action de la force sur toutes ses parties. La sphère est la forme qui atteint cet équilibre.

Dans l'illustration bien connue ci-contre, le liquide préféré du capitaine est libéré de la gravitation, et donc la seule force qui agit sur lui est sa tension superficielle.




C'est une force assez faible qui lie les molécules les unes aux autres. On peut en observer les effets dans un verre d'eau : sans elle, la surface du liquide serait parfaitement plate. Mais il est facile de voir qu'en réalité elle est déprimée au bord, près du verre. Cet effet est encore plus net avec du mercure, mais c'est plus difficile à se procurer…

Toutefois, on sait que la Terre est ronde elle aussi, pour la même raison. Est-elle fluide ? Oui, car en profondeur les roches sont chaudes, et donc pâteuses ou liquides. Seule la croûte est rigide, mais sur des dimensions de milliers de kilomètres, elle est assez souple pour épouser la courbure de la Terre (comme une poutre rigide très longue peut plier).

De ce fait, tout corps d'une centaine de kilomètres au moins est rond. Ce fait a été vérifié pour toutes les planètes, et pour les gros astéroïdes (justement de plus de 100 km de diamètre) ; par contre, les petits astéroïdes comme Gaspra et Ida, dont nous avons maintenant des photos, ne sont pas sphériques, leur masse, d'où leur gravité, étant trop faible pour les arrondir. Dans ces objets, la gravité trop faible ne peut arriver à fragmenter les montagnes pour les faire tomber dans les vallées. Ce même raisonnement permet de comprendre que les montagnes sont d'autant plus hautes que l'astre qui les porte est plus petit ! C'est une partie de l'explication de la taille d'Olympus Mons sur Mars.

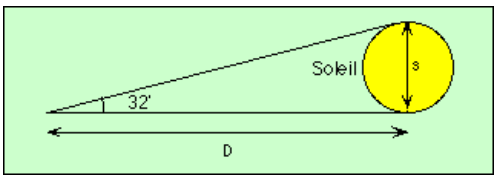
**Le Soleil est-il très loin ?**

Ce problème a été très difficile à traiter, et au cours des siècles le Soleil s'est progressivement éloigné (dans l'esprit des astronomes) de la Terre ! Sa distance est maintenant déterminée par radar. Elle vaut en moyenne 150 millions de kilomètres. Elle définit l'Unité Astronomique (UA).

Mais les mesures anciennes ne pouvaient pas rattacher la distance Terre-Soleil à une unité de mesure terrestre. Ce qui veut dire qu'on ne pouvait pas dire à combien de stades, ou de pieds, ou de mètres… se trouvait le Soleil. Il a fallu attendre des mesures de parallaxe, faites lors des passages de Mercure et surtout Vénus devant le Soleil pour aboutir à une valeur.

**Est-il-gros ?**

Les éclipses nous montrent que le Soleil et la Lune sont de même taille angulaire, vus de la Terre. Elles nous montrent également qu'il est plus loin, puisqu'il passe derrière. Il est donc plus gros, mais c'est tout ce qu'on savait. Maintenant que nous connaissons sa distance à la Terre (150 millions de km), il est facile de calculer son diamètre : il suffit d'appliquer la méthode d'Aristarque de Samos (définie pour la Lune) :




s est le diamètre du Soleil, et D la distance Soleil-Terre.

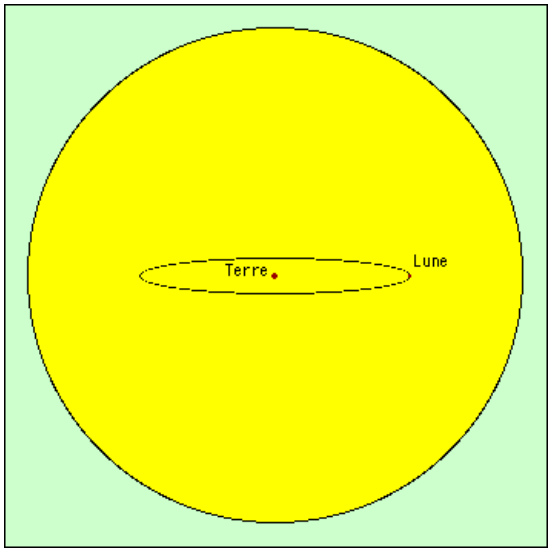
On voit le Soleil sous un angle de 32' à peu près ; on a donc :
tg 32' = s / D

d'où : 0,0093 = s / 150.000.000

et : s = 0,0093 × 150.000.000 = 1,395 million de km

**s = 1.395.000 km**

Pour fixer les idées, comparons le diamètre du Soleil à l'orbite de la Lune : celle-ci a un demi grand axe de 384.000 km. Son grand axe est par conséquent de 768.000 km. Représentons la Terre, la Lune et son orbite devant le disque du Soleil :




Ce dessin à l'échelle relativise pas mal de choses, non ?

Et pourtant, le Soleil est une étoile naine…

Diamètre du Soleil : 1.391.000 km ; orbite de la Lune : 384.000 km.

**Quel âge a-t-il ?**

Personne n'a assisté à sa naissance pour nous le dire. Mais puisque la Terre tourne autour, il doit être plus vieux qu'elle. Si on détermine l'âge de la Terre, on aura donc un âge minimum pour le Soleil.

Le Soleil a donc au moins 4,6 milliards d'années. Il n'est pas possible d'obtenir une valeur maximum par cette méthode, car nous ne connaissons pas d'objets qui soient certainement plus vieux que le Soleil. C'est alors vers la théorie que nous allons nous tourner, en construisant un modèle du Soleil, et en étudiant son fonctionnement. Nous verrons alors que la mesure de la quantité de carburant disponible dans le Soleil au départ, de la quantité restante, et de la consommation, nous permettront de déterminer depuis combien de temps il roule ! Et ces modèles nous donnent une valeur de l'ordre de 5 milliards d'années, en bon accord avec la valeur trouvée plus haut.

Le Soleil n'est guère plus vieux que la Terre.

**De quoi est-il fait ?**

Lorsqu'on a commencé à regarder le Soleil avec un peu d'esprit scientifique, on s'est demandé de quoi il était fait, et d'où il tirait son énergie. Avec les idées et les connaissances de l'époque, on l'a imaginé solide, et supposé qu'il brûlait un combustible ; tout naturellement pour l'époque, ce devait être du charbon. Connaissant sa masse, et l'énergie dégagée par la combustion du charbon, il est facile de calculer que le Soleil ne pouvait briller plus de 5.000 ans avec cette source d'énergie.

Mais puisqu'il y avait des êtres vivants sur Terre il y a très longtemps, c'est que le Soleil chauffait déjà. Il a donc produit énormément d'énergie, des milliers de fois plus que ce que la combustion du charbon aurait permis. Toute réaction chimique produit bien trop peu d'énergie pour faire briller le Soleil pendant des milliards d'années. Il fallait trouver une autre source d'énergie.

La première qui a été considérée est l'énergie gravitationnelle, que nous verrons en parlant de la formation des étoiles et de leur évolution. Mais cette source a été rapidement écartée elle aussi, car elle ne permettrait au Soleil de briller comme actuellement que pendant une trentaine de millions d'années. Et ce nombre est beaucoup trop faible, comparé à l'âge estimé de la Terre à la fin du 19$^{e}$ siècle. La Terre ne pouvait tout de même pas être plus vieille que le Soleil, puisqu'elle tourne autour de lui…

La solution de ce problème n'est venue qu'au début du 20$^{e}$ siècle, lorsqu'on a découvert les réactions de fusion thermonucléaire, qui seules peuvent expliquer la durée de vie du Soleil. Des explications sur ces réactions, basées sur la Relativité, se trouvent dans le chapitre sur les étoiles.

On voit donc que le secret de sa composition est en relation avec la source de l'énergie qu'il dépense.

Le philosophe Auguste Comte pensait que certaines connaissances sont innaccessibles à nos recherches, et citait comme exemple la composition du Soleil, car il est impossible d'aller y chercher un échantillon de matière. Mais peu de temps après, Bunsen et Kirchhoff jettaient les bases de la spectroscopie, qui nous a donné la composition du Soleil, qualitative et quantitative. Il est tout à fait possible qu'Auguste Comte ait eu raison sur le fond, mais son exemple s'est avéré mal choisi…

**Quelle est sa masse ?**

Pour déterminer la masse d'un corps, il n'y a pas beaucoup de méthodes directes. La mécanique céleste nous donne la solution, en observant le mouvement d'un autre corps, influencé plus ou moins par celui qu'on souhaite mesurer. L'idéal est d'observer un objet en orbite autour. La gravitation universelle de Newton nous indique que les paramètres de l'orbite dépendent de la masse du corps central. Donc, si on connait les paramètres de l'orbite par l'observation, on pourra en déduire la masse centrale ! Le principe est simple : la planète subit deux forces, la gravité

de l'astre central, et la force centrifuge. Cette dernière est une expression de l'inertie, qui tend à faire aller la planète en ligne droite, donc à s'éloigne de l'astre central. Puisque la planète tourne toujours sur la même orbite, c'est que les deux forces s'équilibrent.

Prenons le cas le plus simple d'une orbite circulaire (approximation acceptable pour les planètes, à l'exception de Mercure et Pluton).

La force centrifuge exercée sur un corps de masse m à la distance r du centre de rotation (provenant de l'inertie) est : $f_c = - m \omega^2 r$

$\omega$ est la vitesse angulaire : angle dont tourne la planète par unité de temps.

La force de gravitation produite par un corps de masse M sur un corps de masse m à la distance r : $f_g = - G M m / r^2$ où G est la constante de la gravitation universelle, qui vaut $6,61\ 10^{-11}$ dans le système d'unités international.

L'équilibre entre les deux impose : $- m \omega^2 r = - G M m / r^2$

On en déduit immédiatement : $\omega^2 r^3 = G M$

Si T est la période (durée de l'année), alors $\omega = 2\pi / T$ (car l'orbite est circulaire).

Alors : $( 2 \pi / T)^2 r^3 = G M$

D'où :

$$M = \frac{4 \pi^2 r^3}{G T^2}$$

Cette expression permet de calculer la masse centrale M, dès l'instant où l'on connait le rayon r de l'orbite, et la période T d'un corps en orbite. Cette méthode s'applique facilement dans le système solaire, où les distances sont directement mesurables. Elle nous donne la masse du Soleil, en considérant une planète tournant autour, mais aussi les masses des planètes, pourvu que celles-ci possèdent un satellite. Elle n'est pas applicable à Mercure et Vénus, qui n'en ont pas (on a évalué leurs masses par calcul de perturbations, en particulier sur la Terre ; depuis que des sondes spatiales sont allé explorer ces planètes, la méthode a été appliquée aux sondes elles-mêmes, avec une précision bien plus grande).

**Remarque** : on peut exprimer $r^3 / T^2$ en fonction des autres éléments : $r^3 / T^2 = G M / 4 \pi^2$. On voit que c'est une constante. On reconnait la 3e loi de Kepler.

**Application** : La terre tourne autour du Soleil en T = 365,25 j. Le rayon de son orbite est r = 150.000.000 km. Pour que la masse soit obtenue en kilos, il faut que la période soit exprimée en secondes et le rayon en mètres. Donc $T = 365,25 \times 60 \times 60 \times 24 = 31.557.600$ s.

$M = 4 \times 9,8696 \times (150\ 10^9)^3 / (6,61\ 10^{-11} \times 31.557.600^2) = 4 \times 9,8696 \times 3,375\ 10^{33} / (6,61\ 10^{-11} \times 9,9588\ 10^{14})$

$M = 1,3324\ 10^{35} / 6,5828\ 10^4 = 2,02\ 10^{30}$ kg.

La valeur admise aujourd'hui est :

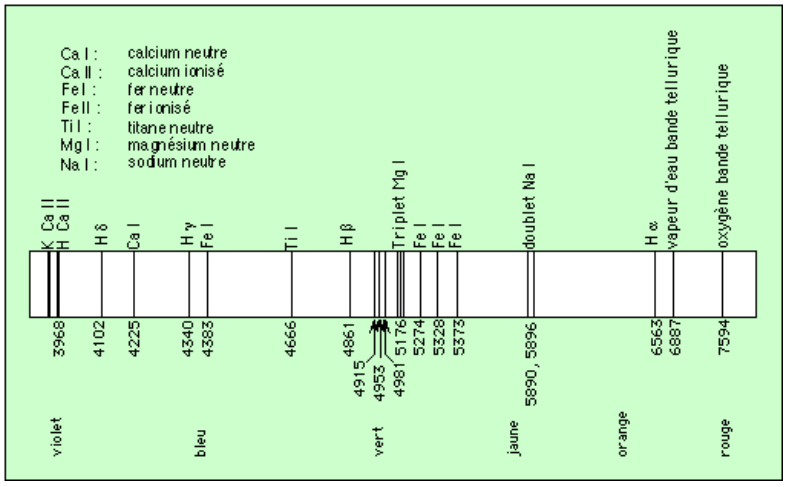
$$M = 1,989\ 10^{30} \text{ kg}$$

On peut retenir $2\ 10^{30}$ kg sans faire d'erreur significative.

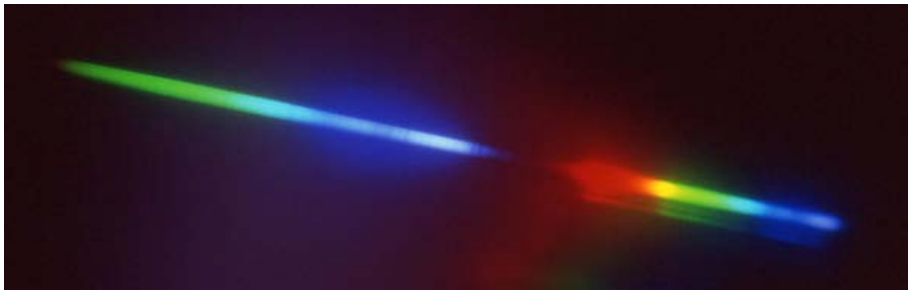
**Comment connaît-on la composition chimique du Soleil ?**

Bunsen et Kirchhoff ont découvert que les corps chauds émettent de la lumière (c'est l'origine de la lumière du Soleil), et qu'un gaz interposé devant absorbe certaines couleurs qui le caractérisent (c'est le cas de l'atmosphère du Soleil).

Alors, en analysant la lumière du Soleil et en la comparant à de la lumière émise au laboratoire par certains corps, dans des conditions connues, on peut accéder à la composition du Soleil. C'est le but de la spectroscopie.



spectre schématique du Soleil



spectre du Soleil, télescope Maksutov 100/1000 mm, réseau 1000 traits/mm photo J. Gispert

On voit sur cette image un premier spectre à droite, celui d'ordre 1. La dispertion est assez faible, et la quantité de lumière importante a surexposé la pellicule. Sur la partie gauche, on voit le spectre d'ordre 2, plus dispersé et moins brillant. On y distingue nettement de nombreuses raies dans le bleu. La partie jaune-rouge est en dehors de la photo.

On y a ainsi détecté de l'hydrogène, du calcium, de l'oxygène, du carbone, du sodium, etc.



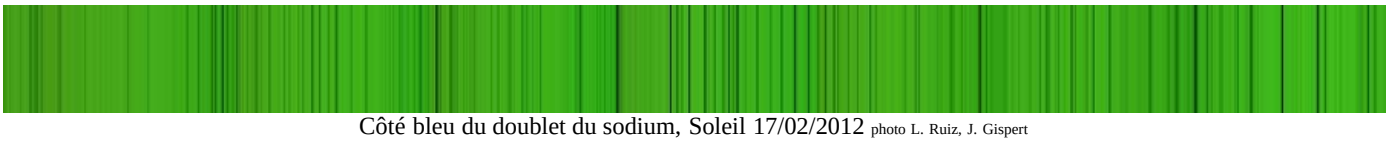
Raie telluriques de l'oxygène, Soleil 17/02/2012 photo L. Ruiz, J. Gispert



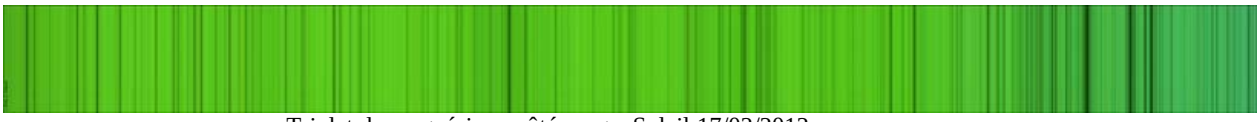
Raie Hα, Soleil 17/02/2012 photo L. Ruiz, J. Gispert



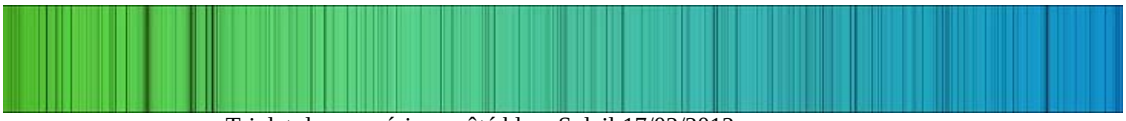
Doublet du sodium, Soleil 17/02/2012 photo L. Ruiz, J. Gispert



Côté bleu du doublet du sodium, Soleil 17/02/2012 photo L. Ruiz, J. Gispert



Triplet du magnésium, côté rouge, Soleil 17/02/2012 photo L. Ruiz, J. Gispert



Triplet du magnésium, côté bleu, Soleil 17/02/2012 photo L. Ruiz, J. Gispert

Le spectre ci-dessus est une petite partie du spectre solaire. Les fragments sont rangés dans l'ordre du rouge vers le violet. Le premier montre des raies telluriques (produites par l'atmosphère de la Terre) de la molécule $O_2$. Le second représente la raie Hα de l'hydrogène. On a ensuite le célèbre doublet du sodium, puis le triplet du magnésium dans les deux spectres suivants. On remarque que dans la région rouge, les raies sont plus rares. C'est aussi la raison pour laquelle le spectre complet n'est pas donné ici. A l'opposé, la région bleue est très riche, et présente en particulier de très nombreuses raies du fer.

Les raies des divers éléments chimiques dans le spectre du Soleil prouvent leur présence dans son atmosphère. L'intensité de la raie (qu'on observe par leur aspect plus ou moins noir) permet également d'en mesurer l'abondance. Les spectres sont présentés en réduction, pour des raisons d'espace dans la page. Vous pouvez cliquer sur l'un d'eux pour l'obtenir en pleine résolution (4 fois plus larges).

Remarquez enfin que le spectre du Soleil ne se réduit pas à sa partie visible, seule considérée ici. Bien des raies sont présentes dans les parties infrarouge et UV du spectre. En particulier, toute la série de Lyman de l'hydrogène est située dans l'ultraviolet (série très énergétique), alors que les séries de Paschen, Bracket et Pfund sont dans l'infrarouge.

On a aussi trouvé des raies qui ne correspondaient à aucun élément connu ! Un anglais a supposé qu'il existait dans le Soleil un élément chimique inconnu sur Terre, et a proposé de l'appeler **hélium** (du grec *hélios* = Soleil). Deux ans plus tard, ce gaz était découvert sur Terre, et présentait bien les raies spectrales détectées dans le Soleil.

Pour la petite histoire, quelques années plus tard on a découvert dans les nébuleuses des raies spectrales inconnues sur Terre ; on les a tout naturellement attribuées à un nouvel élément, qu'on a nommé **nébulium** ! Puis on s'est aperçu qu'elles étaient en fait produites par l'oxygène,

dans des conditions de pression si faible qu'on ne peut les atteindre au laboratoire (raies interdites), et donc qu'on n'avait jamais observées sur Terre. L'histoire bégaie, mais ne se renouvelle pas !

La spectroscopie nous donne la composition suivante exprimée en masse :

| | |
|---|---|
| Hydrogène | 75 % |
| Hélium | 23 % |
| Carbone, Oxygène, Azote | 1,5 % |
| le reste | 0,5 % |

Les éléments plus lourds que l'hélium -donc tout sauf l'hydrogène et l'hélium- sont nommés *métaux* par les astronomes. La raison de cette appellation choquante pour le chimiste, tient sans doute dans le fait que les raies spectrales importantes des éléments autres que l'hydrogène (l'hélium ne présente pas de raies dans une étoile standard) sont dues à des métaux (des vrais).

Le devenir des étoiles varie en fonction de la proportion de ces éléments. On appelle *métallicité* la proportion des métaux, ainsi définis, par rapport à la masse totale.

Comme on le voit sur le tableau ci-dessus, la métallicité du Soleil est de 2 %. Elle a une très grande importance car elle influe sur le transfert d'énergie dans le Soleil. Les premières étoiles qui se sont formées avaient une métallicité nulle. Plus une étoile est jeune, plus elle est métallique.

**Constante solaire**

On appelle *constante solaire* la quantité d'énergie reçue par la Terre, hors de l'atmosphère, par $m^2$. C'est elle qui détermine la chaleur reçue par la Terre, elle est donc pour nous d'une importance capitale. C'est une valeur difficile à mesurer depuis le sol, aussi elle a longtemps été mal connue. Maintenant, les satellites artificiels évoluant au-dehors de l'atmosphère peuvent effectuer des mesures directes. La valeur de la constante solaire est de 1.365 Watts par $m^2$. La Terre reçoit donc du Soleil énormément d'énergie.

Pourquoi parle-t-on de constante solaire pour désigner cette valeur ? Parce que sa valeur justement ne change pas au cours du temps. Mais dans quelles limites ? On peut calculer que la variation de la température moyenne sur Terre est le quart de la variation de la constante solaire. Il s'ensuit qu'une variation de seulement 1 % de cette constante entraînerait une variation de 1° sur Terre. S'il s'agissait d'une baisse, ce serait une mini ère glacière.

La constante solaire n'est constante que sur une période assez courte, car au cours de son évolution, le Soleil devient de plus en plus brillant. Mais sur les 5 milliards d'années passées (depuis sa formation donc), elle n'a augmenté que de l'ordre de 30 %. Elle augmentera encore progressivement jusqu'à ce que le Soleil, ayant épuisé ses réserves utilisables d'hydrogène, devienne une géante rouge dans 5 milliards d'années.

---

## *Structure du Soleil*

Avant de passer à l'étude de la structure solaire, vous devez connaître quelques propriétés physiques concernant les transferts d'énergie. L'énergie du Soleil est produite dans le cœur, et doit être évacuée, sinon le Soleil exploserait très vite. Un chapitre spécial est consacré à ces mécanismes.

Nous allons étudier la structure du Soleil, depuis le centre jusqu'à l'espace environnant. Nous la divisons tout d'abord en deux, l'intérieur et l'atmosphère.

## *L'intérieur*

La recette du Picon-Citron-Curaçao

```
- "Tu ne connais pas ton métier ! non, tu ne le connais pas ton métier…
 Tu ne sais pas encore doser un verre de Mousse de Cassis ou un Mandarin-Citron.
 Quand au Picon-Citron-Curaçao de la Maison, ça n'en parlons pas !
 Hier, le père Cougourde est venu et s'est plaint à moi.
 C'est pourtant pas difficile, voyons ! tiens, regarde !
 Tu mets un tiers de Curaçao - fais attention ! -, un tout petit tiers
 un tiers de Citron - tu vois ! -
 un bon tiers de Picon - tu vois ! -
 et alors, un grand tiers d'eau ! voilà… "
- "et ça fait quatre tiers ! "
- "et alors ? "
- "et bé, dans un verre, il n'y a que trois tiers ! "
- "mais, imbécile, ça dépend de la grosseur des tiers ! "
- "et non ça dépend pas ! "
- "pourquoi ça dépend pas ? "
- "c'est de l'arithmétique, ça ! "
- "ouais, ne cherches pas l'arithmétique,
 ne cherche pas à détourner la conversation, n'est-ce pas ?
 et la goutte sur le goulot de la bouteille, c'est de l'arithmétique, ça ? "
```

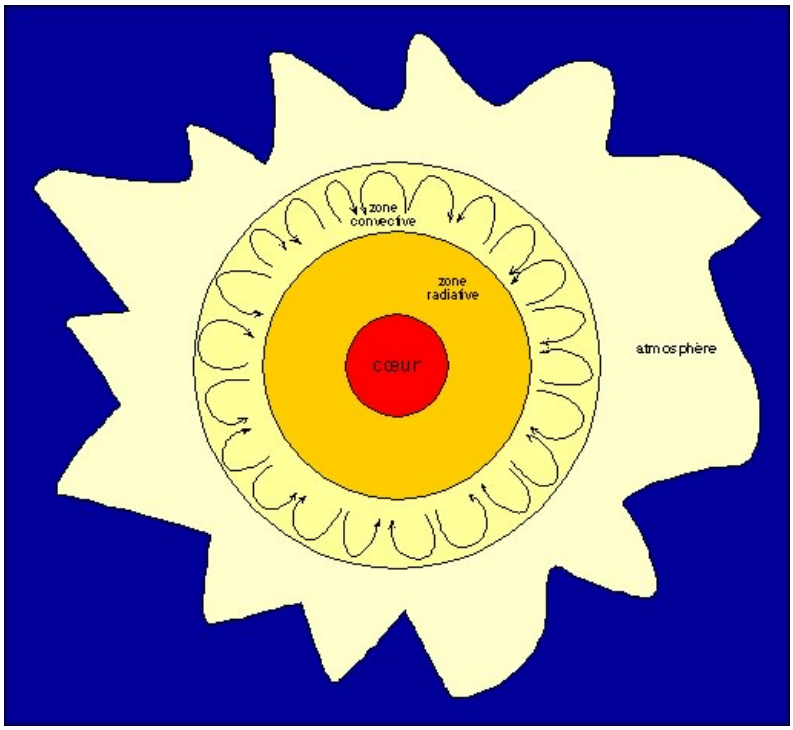
Inutile de dire de quelle œuvre c'est tiré, n'est-ce pas ?

**La recette du Soleil**

La recette du Soleil est très semblable à celle du Picon-Citron-Curaçao :

```
vous mettez un petit tiers de cœur,
un tiers de zone radiative,
un tiers de zone convective,
et un grand tiers d'atmosphère !
```

Les trois premiers *tiers* sont à l'intérieur de la partie du Soleil visible chaque jour (le disque). Le quatrième *tiers* s'étend très loin, il n'est visible que pendant les éclipses totales de Soleil. C'est l'atmosphère, elle-même composée de plusieurs parties, très différentes en épaisseur : la photosphère, la chromosphère et la couronne.




Ce schéma n'est pas à l'échelle : l'atmosphère s'étend beaucoup trop loin pour la représenter correctement. Il n'est pas non plus détaillé : la photosphère et la chromosphère ne sont pas représentées, car trop petites pour être discernables à cette échelle.

L'opacité d'un gaz est fonction de sa température. Au centre du Soleil, les atomes sont totalement ionisés, et les photons passent sans encombre. La matière est transparente. Le transfert d'énergie se fait par ce mécanisme. En s'éloignant du centre du Soleil, la température décroît ; certains électrons sont capturés par les atomes ; il s'ensuit une forte augmentation de l'opacité. Le transfert ne peut plus se faire de cette manière. C'est alors la zone convective à partir de 0,86 rayon solaire, soit r = 504.000 km à partir du centre. La température de la limite, à cette profondeur, est de 2 millions de K.

La zone convective a une épaisseur de 200.000 km.

Considérons chaque zone successivement :

**Le cœur**

C'est la partie centrale du Soleil. Son rayon est 0,3 R , donc de l'ordre de 175.000 km. Son volume est seulement 2,7 % du volume total du Soleil (0,3 à la puissance 3 donne 0,027). Sa densité est très forte (160 g $cm^{-3}$ = 160 fois celle de l'eau au centre, 10 g $cm^{-3}$ à la périphérie…), ce qui fait que le cœur contient 40 % de la masse du Soleil… La température au centre est voisine de 15 millions de degrés, assez pour déclencher les réactions nucléaires de fusion de l'hydrogène. C'est dans le cœur, et dans le cœur seulement, qu'est produite l'énergie du Soleil. Cette énergie traverse le cœur par diffusion radiative pour atteindre la seconde zone. Les réactions qui se produisent modifient la composition chimique du cœur : l'hydrogène est transformé en hélium, donc il y a de moins en moins d'hydrogène et de plus en plus d'hélium.

Lors de la formation du Soleil, la composition chimique de l'astre était la même en tout point. Elle était celle de la nébuleuse qui lui a donné naissance. Depuis, l'hydrogène central seul s'est transformé en hélium, et donc la composition chimique du centre a évolué, alors que dans les autres parties elle est restée inchangée.

**Fusion nucléaire**

Nous avons vu plus haut que l'énergie qui alimente le Soleil doit être d'origine nucléaire. Cette constatation faite, il a fallu expliquer les détails de ce mécanisme, ce qui n'a pas été facile. En effet, la température centrale du Soleil, de l'ordre de 15 millions de K, n'est pas suffisante pour produire assez de réactions, pour expliquer l'éclat du Soleil. C'est un effet de mécanique quantique, l'*effet tunnel*, qui a donné la solution.

D'autre part, l'équation bien connue d'Einstein $e = m\ c^2$, nous indique la quantité d'énergie produite. Un atome d'hélium est moins massif que la somme des 4 atomes d'hydrogène qui l'ont constitué. La différence de masse a été convertie en énergie de liaison, selon l'équation ci-dessus. Un calcul simple indique que l'énergie débitée par le Soleil à chaque seconde, dans toutes les directions de l'espace, correspond à une perte de masse de 4 millions de tonnes ! 600 millions de tonnes d'hydrogène se transforment **chaque seconde** en 596 millions de tonnes d'hélium, les 4 millions de tonnes perdus étant convertis en énergie.

Le Soleil transforme ainsi à **chaque seconde 4 millions de tonnes de sa masse**, en énergie rayonnée dans l'espace. Ce nombre peut sembler énorme, mais comparé à la masse du Soleil, il est à peu près négligeable, même sur une très grande durée. Faisons un calcul simple : il perd 4 $10^6$ tonnes par secondes. Il y a 31,5 millions de secondes dans une année. Donc le Soleil perd 4 $10^6$ tonnes × 31,5 $10^6$ s = 126 $10^{12}$ tonnes par an, c'est-à-dire 126.000 milliards de tonnes par an. Par milliard d'années ($10^9$ années), il perd donc : 126 $10^{12}$ tonnes $an^{-1}$ × $10^9$ ans = 126 $10^{21}$ tonnes par milliard d'années. Enfin, depuis la naissance du Soleil, c'est à dire en 4,6 milliards d'années, la perte a été de 4,6 × 126 $10^{21}$ = **5,8 $10^{23}$ tonnes**.

La masse du Soleil étant de 2 $10^{30}$ kg, ou bien de 2 $10^{27}$ tonnes, la perte relative est de : 5,8 $10^{23}$ / 2 $10^{27}$ = 2,9 $10^{-4}$ = 0,00029. La perte est donc de 3 dix-millièmes de la masse solaire initiale. C'est à peu près négligeable… On peut pourtant comparer cette perte à une autre masse : la masse de la Terre est de 6 $10^{21}$ tonnes. La perte subie par le Soleil par rapport à la masse de la Terre est donc : 5,8 $10^{23}$ / 6 $10^{21}$ = $10^2$ = 100. Depuis sa formation, le Soleil a perdu 100 fois la masse de notre petite Terre !! Mais ce n'est que le dixième de la masse de Jupiter…

Les réactions nucléaires produisent directement des photons, mais ce sont des photons gamma, de très haute énergie. Si ces photons sortaient du Soleil, ce dernier serait invisible à l'œil nu, mais de toutes façons il n'y aurait pas d'œil pour l'observer, car toute vie est impossible sous les rayons gamma.

La répartition des paramètres physiques à l'intérieur du Soleil est donnée ci-dessous :

| distance au centre R | masse M | production d'énergie % | pression atm. | densité kg $m^{-3}$ | température $10^6$ K |
|---|---|---|---|---|---|
| 0,2 | 0,1 | 0,5 | $10^{11}$ | $10^5$ | 12 |
| 0,3 | 0,5 | 1 | $10^{10}$ | $10^5$ | 8 |
| 0,4 | 0,8 | - | $10^9$ | $10^4$ | 8 |
| 0,5 | 0,9 | - | $10^8$ | $10^3$ | 4 |
| 0,6 | 0,96 | - | $10^8$ | $10^3$ | 4 |
| 0,7 | 0,99 | - | $10^7$ | $10^2$ | 2 |
| 0,8 | 1 | - | $10^5$ | $10^2$ | 1 |
| 0,9 | 1 | - | $10^4$ | $10^1$ | 0,5 |

**Le problème des neutrinos**

L'ensemble des réactions nucléaires qui produisent l'énergie du Soleil, avec les équations décrivant la température, la pression à chaque niveau, constituent le *modèle standard du Soleil*. Celui-ci est très précis, et donne des résultats vraiment excellents, à moins d'une centième près. Mais il y a un problème…

Les réactions nucléaires de fusion de l'hydrogène en hélium produisent des neutrinos. Ce sont des particules très légères, qui comme leur nom l'indique sont neutres, et de plus insensibles aux interactions forte et électromagnétique. De ce fait, les neutrinos interagissent très peu avec la matière ordinaire : pour arrêter à coup sûr un neutrino, il faut un mur de plomb d'une épaisseur… d'une année-lumière ! Pour un neutrino, le Soleil est tout à fait transparent. Donc, tous ceux qui sont produits dans le cœur du Soleil le traversent presque à la vitesse de la lumière, et ceux qui sont dirigés vers nous arrivent sur terre en 8 minutes. Au niveau de l'orbite terrestre, ce flux est énorme : **10 milliards de neutrinos par centimètre carré et par seconde**. Ils nous traversent sans arrêt sans que nous nous en doutions.

Il est très difficile de les détecter, mais on y parvient cependant. Et les expériences qui ont été faites dans ce sens ont réservé une belle surprise : on en voit passer un tiers de ce qu'on avait prévu. Soit la théorie du Soleil est fausse, soit c'est celle des neutrinos. Ce débat s'est ouvert il y a quelques années, et il a été tranché sans doute en 2000.

Il faut dire ici qu'il existe trois sortes de neutrinos, associés aux trois particules de type électron : l'électron lui-même, le muon et le tau qui sont des électrons lourds. Il existe donc un neutrino électronique, un neutrino muonique et un neutrino tauique. Leurs masses sont extrêmement faibles, peut-être nulle. Si elle ne sont pas nulles, ils peuvent se désintégrer. Or les détecteurs qu'on utilise aujourd'hui ne peuvent capter que les neutrinos électroniques. Si, dans le temps de parcours entre le Soleil et la Terre, les neutrinos électroniques peuvent se désintégrer en neutrinos muoniques ou tauiques (c'est ce qu'on appelle *l'oscillation du neutrino*), alors on ne les verra pas passer. Ce qui résoudrait notre problème.

De récentes expériences faites au Japon prouvent que le neutrino possède effectivement une masse, donc que l'oscillation est possible, et donc expliquent le déficit en neutrinos solaires en préservant le modèle standard. Ces expériences ont été confirmées entre le CERN à Genève, qui a émis un flux connu de neutrinos, et le détecteur du Gran Sasso en Italie, qui a observé une diminution des neutrinos électroniques de même ampleur que celle que l'on constate dans le cas du Soleil.

**La zone radiative**

La seconde partie du Soleil, à partir du centre, est trop froide pour produire des réactions nucléaires ; sa température est définie par sa pression d'abord, puis par le chauffage qu'elle subit en provenance du cœur. Elle descend de 7 millions de degrés à la base, à 1 million à la périphérie. A ces températures, la matière qui s'y trouve est fortement ionisée. Les électrons étant libres, les atomes n'absorbent pas beaucoup la lumière qui traverse la zone. Celle-ci est donc relativement transparente. Il s'ensuit que le transport radiatif est efficace. La matière est traversée par l'énergie, sans se chauffer. Il n'y a donc pas beaucoup de mouvements de matière, et par conséquent l'hélium produit dans le cœur y reste. Il n'y a pas de mélange entre le cœur et la zone radiative qui lui succède. Celle-ci conserve sa composition initiale d'à peu près un quart d'hélium et 3 quarts d'hydrogène (là, le compte des quarts est bon !).

La zone radiative s'étend depuis le cœur, de 0,3 R , jusqu'à 0,65 R , c'est-à-dire aux deux-tiers du rayon. Sa densité chute de 10 g $cm^{-3}$ à 1 g $cm^{-3}$.

Les photons gamma émis par le cœur sont absorbés, puis réémis, absorbés de nouveau… Un photon gamma étant de très grande énergie, l'absorption produit l'ionisation de l'atome. Lorsque celui-ci se recombine avec un électron libre, il peut le capturer sur divers niveaux d'énergie. Et en se désexcitant, l'atome va émettre des photons de longueurs d'onde diverses, bien évidemment plus petites que la longueur d'onde du photon excitateur (car l'énergie totale des photons émis doit être égale à celle du photon absorbé). Si l'électron ne retombe pas directement au niveau le plus bas, l'atome sera toujours excité, et se désexcitera en émettant un nouveau photon (cascade). Un unique photon absorbé peut ainsi donner plusieurs photons émis. Dans ce mécanisme, il y a donc baisse progressive de l'énergie moyenne d'un photon, mais multiplication de leur nombre. Les photons qui sortent enfin du Soleil sont, pour à peu près la moitié, des photons visibles.

Pour un photon gamma émis par le cœur, environ un millier de photons visibles sortent du Soleil. L'ensemble des photons émis (visibles, IR, et UV) emporte naturellement la même énergie que les photons gamma qui leur ont donné naissance.

**La zone convective**

Troisième partie du Soleil à partir du centre, c'est donc la dernière zone du Soleil lui-même (atmosphère exclue). Elle s'étend de 0,65 R à 0,999 R . Sa température baisse de 1 million de degrés à seulement 15.000 K, et sa densité varie de 1 g $cm^{-3}$ à 3 $10^{-6}$ g $cm^{-3}$.

Etant convective, le mélange y est violent, mais l'hélium reste cependant dans le cœur puisqu'il est isolé de cette zone par la précédente, où le mélange ne se fait pas. Ce transport d'énergie est très efficace ; il se fait essentiellement par deux types de cellules, grandes et petites. Ces cellules brassent la matière, remontent la matière chaude, qui en arrivant en surface, se refroidit. Cette matière se contracte alors, augmentant sa densité. Trop lourde maintenant, elle retombe à l'intérieur du Soleil, et redescend pour se chauffer à nouveau à la limite de la zone radiative.

La température de la surface du Soleil (photosphère) est la même partout, sauf dans les taches, où des champs magnétiques bloquent la convection, et provoquent un refroidissement local plus intense. De même, les petites cellules de convection expliquent la granulation.

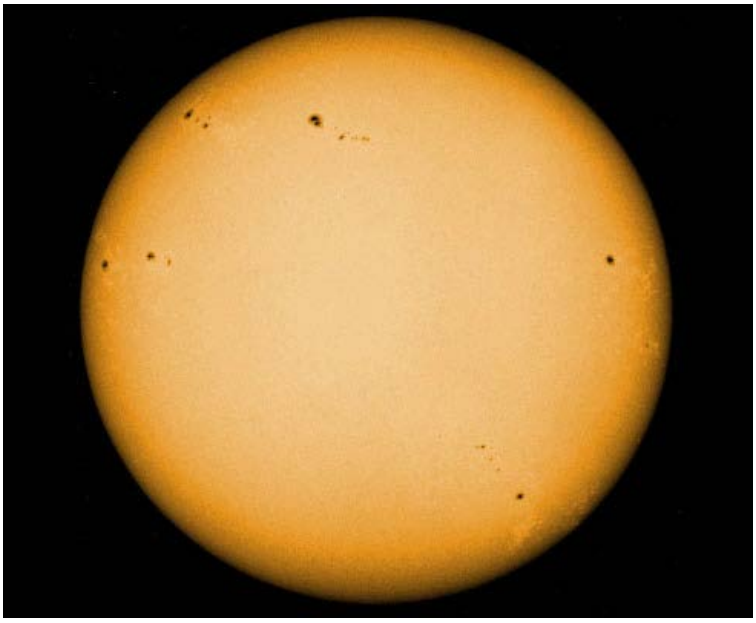
Pour étudier l'intérieur du Soleil, on utilise aujourd'hui une méthode dérivée de celle utilisée pour sonder l'intérieur de la Terre. Ici, la méthode s'appelle *sismologie*, puisqu'à l'origine, elle était basée sur l'étude directe des séismes.

Le Soleil, contrairement à la Terre, n'est pas un corps solide ; cependant, il constitue une sphère de gaz limitée, et une onde sonore s'y propage de manière analogue à ce qui se passe dans la Terre. Et les ondes se réfléchissent à la limite de la sphère. Ces phénomènes étant complexes, un chapitre à part leur est consacré.

**Photosphère**

Etymologiquement, ceci signifie : sphère de lumière. C'est elle qui rayonne la presque totalité de la lumière solaire : 46 % dans le domaine visible, et 46 % dans l'infrarouge. Au-dessous de la photosphère, la matière est trop dense, et par conséquent opaque ; au-dessus, elle est trop ténue pour émettre beaucoup de lumière.

Quand on dit que la densité est trop forte, il faut se donner une image pour saisir en quel sens : la densité au bas de la photosphère n'est que de 3 $10^{-6}$ g/$cm^3$ (3 millionièmes de gramme par $cm^3$), et elle chute à $10^{-7}$ g/$cm^3$.



La photosphère ; lunette 155 mm f/d 14 4 juillet 1999 pose 1/60$^{e}$ photo J.P. Bousquet

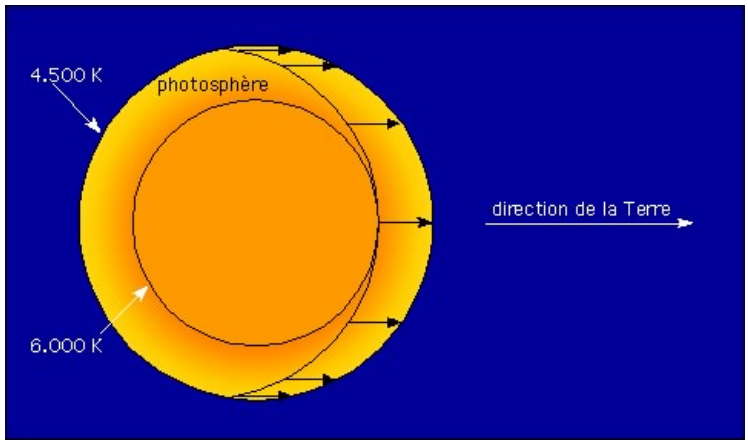
L'épaisseur de la photosphère est de quelques 350 kilomètres seulement. A sa base, sa température atteint les 8.000 K, alors qu'au sommet elle tombe à 4.500 K seulement.

**L'assombrissement au bord**

La luminosité du Soleil est affaiblie au bord (tout le tour). Lorsqu'on regarde le disque du Soleil dans un instrument approprié, on voit nettement que les bords du disque sont moins brillants que le centre. Cet assombrissement est bien visible sur la photo ci-dessus.

La lumière qui nous parvient du centre du disque solaire (le disque apparent) a traversé perpendiculairement 300 km de photosphère, et elle a été légèrement affaiblie au passage. Par contre, la lumière qui nous arrive du bord a traversé la photosphère tangentiellement, en travers. A cause de l'absorption, on ne peut pas voir aussi profondément qu'au centre (voir la seconde flèche à partir du centre). On voit donc une couche d'altitude plus élevée dans le Soleil. Or la température diminue (dans la phostosphère) très rapidement avec l'altitude : de 6.000 K à la base à 4.500 au sommet. On voit donc une couche moins chaude. Plus on s'éloigne du centre, plus froide est la couche observée.

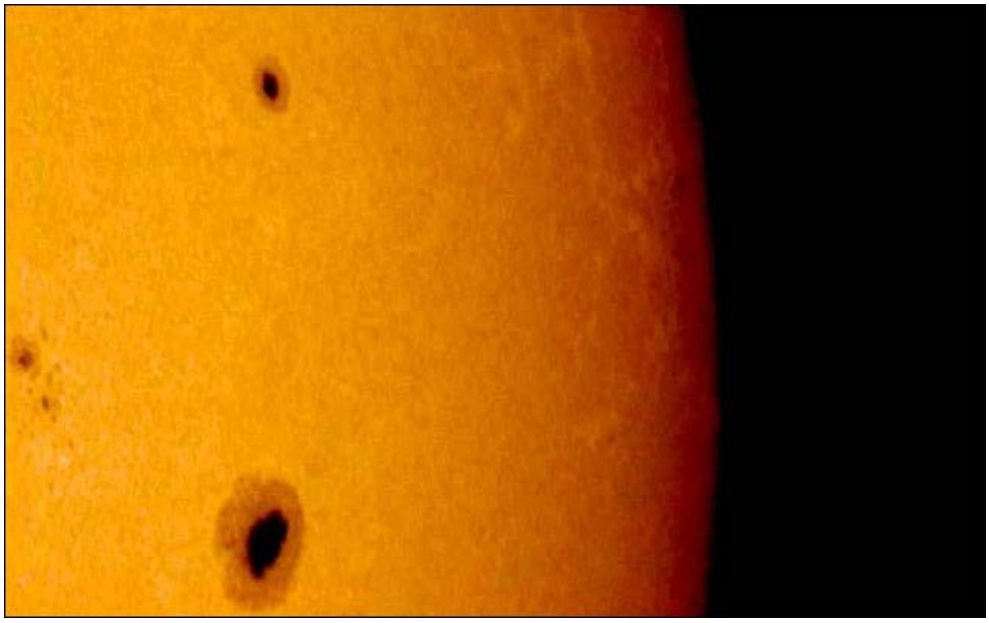
La couche la plus chaude (centrale) rayonne beaucoup plus dans le domaine sensible de l'œil, et par conséquent le centre nous semble plus lumineux.




Sur ce schéma, l'épaisseur de la photosphère a été infiniment exagérée, pour la lisibilité. 300 km d'épaisseur réelle par rapport aux 700.000 km de rayon du Soleil, sont pratiquement négligeables, et seraient invisibles à l'échelle du dessin.

**Les taches**

Les taches sont des régions de la photosphère qui apparaissent noires à l'observation visuelle. En fait, elles sont très brillantes et ne semblent sombres que par contraste (le filtre utilisé absorbe presque toute la lumière produite par les taches, laissant passer la quantité de lumière juste suffisante -1 / 100.000$^{e}$- pour une observation confortable de la photosphère).



Taches, facules, granulation tél. C8 webcam Philips 27/05/01 photo J. Ardissone

**Les zones royales**

Les *zones royales* sont les parties tropicales du Soleil (ceci dit par analogie avec la Terre) : elles s'étendent de 5° à 30° au nord et au sud de l'équateur. Les taches ne se forment que dans ces régions, il est exceptionnel d'en observer à des latitudes plus élevées, quelquefois jusqu'à 45°. Le maximum de taches se situe entre 10 et 15°.

**Mécanisme des taches**

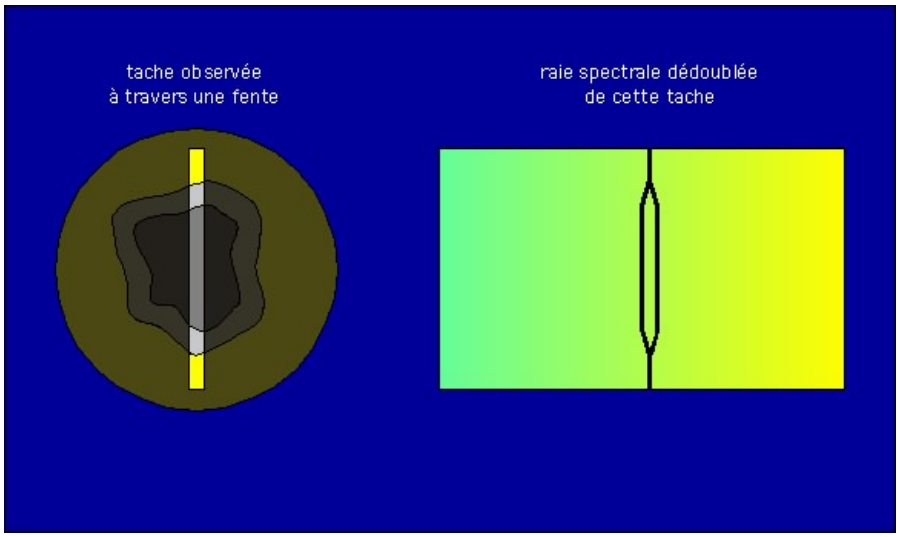
La matière photosphérique que nous voyons est à une température constante de 5.770 K, car elle est en permanence renouvellée par la convection. Si on bloquait la convection, en empêchant la matière de se renouveller en surface, la température baisserait par rayonnement dans l'espace, et la région s'assombrirait. C'est ce qui se passe dans les taches, sièges d'un puissant champ magnétique. Le champ est d'autant plus fort que la tache est plus étendue, et sa valeur est comprise entre 100 gauss pour les plus petites, et plusieurs milliers pour les plus grandes.

La matière photosphérique montante est ionisée, et donc chargée électriquement. Toute particule chargée est sensible à un champ magnétique. Les atomes sont donc freinés par le magnétisme, et ils ont le temps de se refroidir, et donc de s'assombrir : c'est l'ombre de la tache. Le bord de la tache (pénombre), est en contact avec la zone non freinée. Il se produit un brassage avec le gaz qui remonte dans la photosphère alentour. Le réchauffement est donc partiel, et le rayonnement plus intense que dans l'ombre : la pénombre est moins sombre.

Les taches ne sont qu'à 4.000 K (de 3.700 à 4.200 K ; pour mémoire, le filament d'une ampoule électrique, insoutenable au regard, est à seulement 2.000 K ! Les taches sont plus brillantes que l'arc électrique…).

**Le champ magnétique**

L'observation des champs magnétiques se fait par l'étude spectroscopique des taches. On dirige la fente d'un spectrographe le long d'une tache, de telle manière que la fente recoupe une partie de la photosphère de part et d'autre de la tache. On obtient ainsi un spectre dont le centre provient de l'ombre de la tache, les parties médianes de la pénombre, et les bords de la photosphère. On centre ce spectre sur une raie d'absorption intense (par exemple l'une des raies du calcium ionisé, H ou K).




On voit cette expérience sur le schéma ci-dessus. A gauche, la fente qui recoupe la tache (le cache autour de la fente est représenté légèrement

transparent) ; à droite la partie du spectre correspondant à une seule raie. La raie observée est dédoublée : dans l'ombre de la tache, le dédoublement est maximum, et il diminue à mesure qu'on s'approche, dans la pénombre, de la photosphère. Sur la photosphère, il est nul.

Il s'agit là de l'*effet Zeeman*, qui est produit par un champ magnétique. La lumière étant une onde électromagnétique, il est naturel de penser qu'elle sera influencée par un champ magnétique. Celui-ci agit sur les niveaux électroniques d'énergie des atomes, en les dédoublant. C'est pourquoi on observe deux raies au lieu d'une (il arrive qu'on en observe même trois, la troisième non décalée). L'écartement des raies est proportionnel à l'intensité du champ magnétique, et sa mesure nous donne directement une mesure du champ perturbateur. C'est ainsi qu'on met en évidence, et qu'on mesure, les champs magnétiques à la surface du Soleil.

Le champ statique normal de la photosphère est de l'ordre de 0,01 Tessla = 10 m T. Pour comparaison, le champ de la Terre est de l'ordre de 0,32 m T à l'équateur, 0,48 m T en France, 0,6 m T au niveau des pôles. Le champ moyen du Soleil est donc 20 fois plus important.

Le champ à l'intérieur des taches est encore beaucoup plus fort : de 0,25 à 0,30 T, c'est-à-dire de 250 à 300 m T. C'est 25 à 30 fois plus fort que dans la photosphère, et donc 600 fois plus fort que le champ terrestre.

Nous reviendrons sur le champ magnétique des taches plus loin, pour expliquer le mécanisme de leur formation.

**Dimensions**

Les dimensions des taches sont fort variables, mais généralement comprises entre 5.000 et 50.000 km (diamètre de la Terre : 12.700 km). Ces valeurs correspondent à des dimensions angulaires de 10" à 1 minute d'arc. Aussi, les plus grosses de ces taches sont à la limite de la visibilité à l'œil nu (sans lentilles, mais avec filtre !…). Parfois, il apparaît des taches plus grandes, parfaitement visibles à travers un simple filtre.

**Durée de vie**

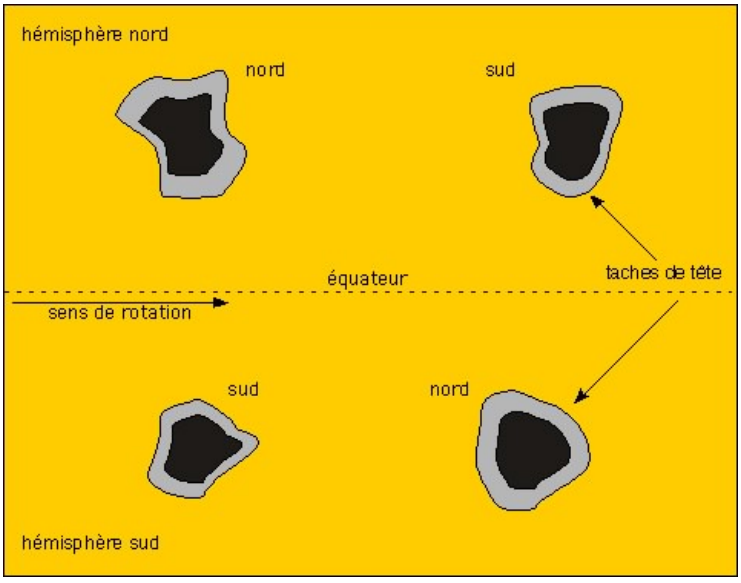
Les taches ne sont pas des phénomènes permanents. Une tache apparaît sous la forme d'un pore (comme un petit trou noir dans la photosphère), se développe, reste stable une certain temps. Puis la pénombre apparaît striée par des filaments brillants radiaux. Rares au début, puis de plus en plus nombreux, ils finissent par envahir la tache et la faire disparaître. Les filaments constituent un écoulement de matière du centre vers le bord, à une vitesse de l'ordre de 2 km/s. Ils matérialisent des lignes de champ magnétique radiales.

La durée de vie d'une tache est de l'ordre de quelques jours à quelques dizaines de jours. La moitié des groupes durent moins de 2 jours, et 10 % seulement durent plus de 11 jours. Les taches qu'on retrouve d'une rotation sur l'autre sont donc assez rares.

Nous avons dit plus haut que les taches sont des dépressions à la surface du Soleil (puisque la matière qui les constitue est freinée dans son ascension par le champ magnétique). Le Soleil n'ayant pas de surface solide, ceci signifie que le regard porte plus profondément dans l'ombre que dans la photosphère. Le rayonnement du centre de la tache provient d'une zone 700 km plus profonde que la photosphère.

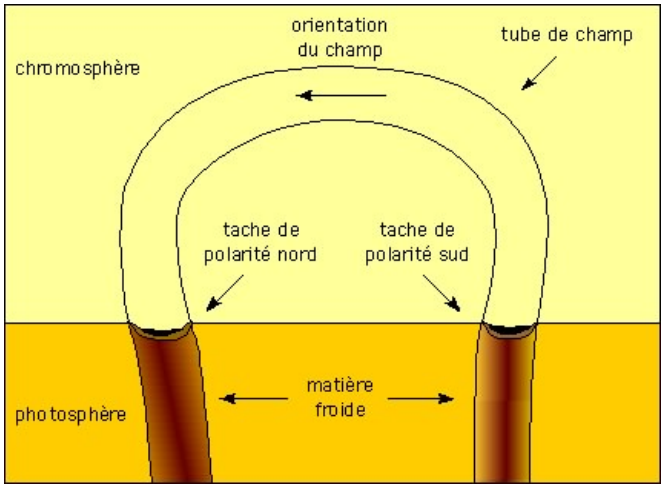
**Explication des taches**

Nous avons vu comment les taches se forment ; il faut maintenant expliquer pourquoi. Commençons par un autre fait observationel :




Les taches se forment très souvent par paire (schéma ci-dessus) : l'une devant l'autre (parallèlement à l'équateur), elles présentent des polarités opposées (la première nord, la seconde sud, ou l'inverse).

Ceci montre que le champ magnétique forme une boucle au-dessus de la surface solaire, la traversant, avec un pôle nord d'un côté, et sud de l'autre, exactement comme un barreau aimanté possède un pôle nord et un pôle sud :



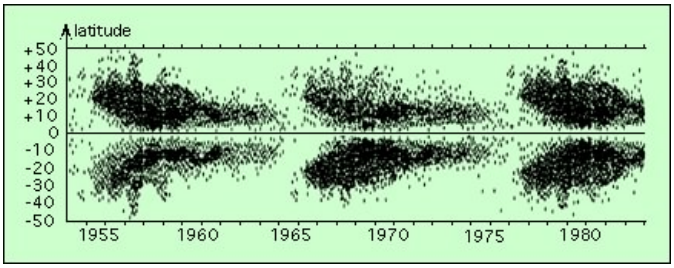

On observe de plus que, lorsque la tache de tête est de type nord dans un hémisphère, la tache de tête est de type sud dans l'autre.

Pour expliquer comment se forment ces tubes de champ magnétique, il faut étudier d'abord le cycle solaire.

**Le cycle solaire**

Observons maintenant le Soleil sur une grande échelle de temps. Ceci est fait depuis Galilée, on dispose donc d'une très importante masse de données qui permettent d'étudier son comportement dans le temps.

Considérons l'ensemble des taches. On remarque qu'à certaines périodes, le Soleil en est dépourvu. Puis, un beau jour, une tache apparaît, puis une autre… on note précisément la position en latitude et la date de l'apparition, puis de la disparition de chaque tache quelques jours ou semaines après. On s'aperçoit alors que les première taches se présentent dans une zone du Soleil située vers 30° de latitude nord ou sud. Puis les suivantes se forment un peu plus près de l'équateur, etc. Les dernières (puisque de temps en temps il n'y en a pas du tout, c'est qu'elles disparaissent toutes) se forment près de l'équateur. On résume cette évolution sur un graphique qui a l'aspect suivant :




Ce schéma ne vous évoque rien ?

On a l'impression de voir des ailes de papillons. Les scientifiques, étant en général tout aussi fainéants que le reste de la population (…), n'ont pas cherché plus loin : ils l'ont nommé *diagramme papillon* !

On voit en bas les dates, et à gauche les latitudes sur le Soleil. Chaque point noir du diagramme est une tache. On voit bien que les premières (à gauche des ailes) sont situées aux hautes latitudes, et qu'à mesure elles se forment de plus en plus bas.

On voit facilement aussi qu'un cycle se dessine : début en 55, puis en 66, puis en 77… d'où le cycle solaire de 11 ans (11,2 ans plus précisément, mais ce n'est qu'une moyenne avec des écarts très importants autour). Il faudra que le modèle du Soleil explique les taches, leur formation, leur disparition et le cycle de 11 ans. Ce cycle de 11 ans a été découvert par Heinrich Schwabe en 1843.

De 1650 à 1700, on n'a pratiquement pas observé de taches à la surface du Soleil. C'est ce qu'on connaît sous le nom de *Minimum de Maunder*.

Cette période correspond au règne de Louis XIV, pendant lequel les hivers ont été particulièrement rigoureux. On a d'ailleurs nommé cette période le *Petit Age Glaciaire*.

Par contre, entre 1100 et 1250, on a noté une intense activité solaire, avec de très belles aurores boréales.

D'autres minima ont été notés :

- Minimum de Wolf de 1281 à 1347 ;
- Minimum de Spörer de 1411 à 1524 ;
- Minimum de Dalton de 1795 à 1830.

Et des maxima également :

- Optimum de l'Holocène (8.000 à 5.000 BP) ;
- Petit Optimum Médiéval (de 900 à 1300).

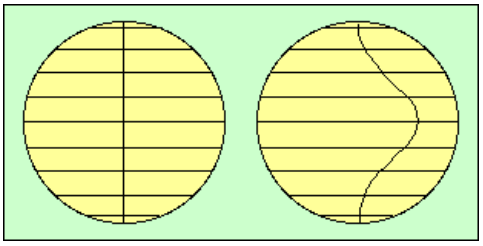
| |
|---|
| Peu avant 1890, Gustav Spörer et Walter Maunder ont analysé l'évolution des taches solaires, et trouvé que l'absence de taches était corrélée avec un refroidissement du climat. |

Ces observations ont été reprises en 1976 par John Eddy, qui a montré de plus une corrélation avec la proportion de carbone 14 dans l'atmosphère : dans les périodes où le Soleil présente peu de taches, la quantité de carbone 14 accumulée dans les cernes d'accroissement des arbres augmente. L'explication en est simple. Le carbone 14 est produit à partir du carbone 12, dans la haute atmosphère, par les rayons cosmiques. Or ceux-ci sont déviés par le champ magnétique produit par le vent solaire. Donc :

taches plus nombreuses  vent solaire plus abondant  rayons cosmiques davantage déviés  moins de C14

**Explication du cycle**

Au cours du cycle de 11 ans, les lignes de champ magnétique sont tout d'abord droites, d'un pôle à l'autre, puis elles se déforment par la rotation différentielle :

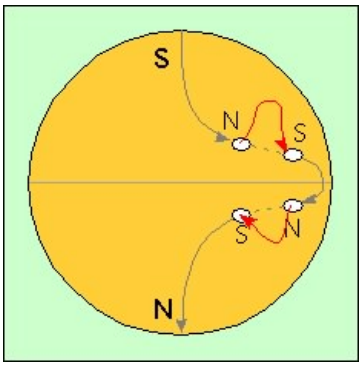


La déformation entraîne un rapprochement des lignes au voisinage de l'équateur, d'où un accroissement de l'intensité du champ. Admettons qu'il y ait un pôle magnétique sud au pôle nord du Soleil.

Si vous suivez une ligne de champ tordue par la rotation différentielle, en partant du pôle nord, vous allez rencontrer deux taches dans l'hémisphère nord, puis deux autres dans l'hémisphère sud (ceci n'est pas obligatoirement sur la même ligne de champ).

La ligne de champ sud-nord peut être considérée comme un ensemble de segments bout à bout. Puisque la ligne globale va du sud au nord, il en sera de même de chaque segment. Ainsi, le segment le plus haut doit avoir une extrémité sud et une extrémité nord. Puisque c'est un pôle magnétique sud en haut, la première tache doit être de polarité nord par rapport.

Le deuxième segment, entre les deux taches du haut, doit voir aussi une alternance, et ainsi de suite. Les taches sur une même ligne sont toujours alternés :




Ceci explique que les taches de tête soient de polarité différente dans les deux hémisphères.

A la fin du cycle, les lignes se rapprochent tellement au voisinage de l'équateur que leurs champs se mélangent et s'annulent. Dans les régions polaires par contre, c'est une tache nord qui se dirige vers le pôle nord géographique, et qui va annuler le champ existant. De sud, il va devenir nord. Il se passe exactement l'inverse dans l'hémisphère sud. C'est ainsi que le champ s'inverse. On se retrouve dans la situation de début du cycle précédent, mais avec les polarités inversées. Alors, la polarité des taches s'inverse aussi, la première d'un couple étant maintenant nord et la seconde sud (dans l'hémisphère nord).

Bien évidemment, 11 ans plus tard, il y aura une nouvelle inversion, et les taches se retrouveront comme au début.

Le cycle du Soleil complet est donc plutôt un cycle de 22 ans, si l'on tient compte de l'inversion.

Ce modèle de l'activité solaire est dû à Babcock, qui l'a proposé au début des années 60.

Il explique pas mal le cycle solaire, sauf une chose : dans les régions polaires, apparaissent des régions actives et des facules brillantes 3 à 4 ans avant la fin d'un cycle. Et par leur polarité, ces facules appartiennent déjà au cycle suivant, car elles sont inversées. Elles migrent vers les régions de plus basse latitude, et rejoignent la zone où se forment les premières taches du nouveau cycle.

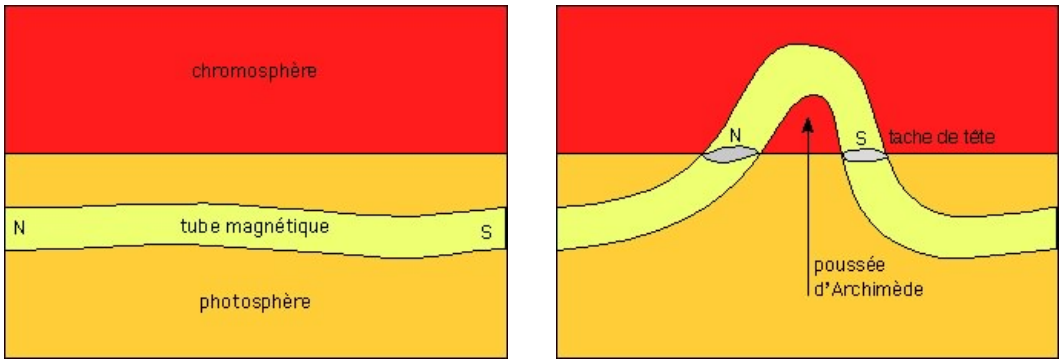
Ce phénomène nous indique que le cycle solaire est plus complexe, et qu'on n'en maîtrise pas encore les subtilités.

Il existe d'autres modèles, plus complexes et mettant en jeu un transport du flux magnétique. Ces modèles représentent toujours la surface seule, sans tenir compte des phénomènes internes au Soleil, qui ont été mis en évidence par héliosismologie. D'une manière générale, le magnétisme du Soleil est encore mal connu.

**Formation des taches**

La matière sous la photosphère est ionisée, donc conductrice de l'électricité. Dans le tube magnétique, à certains endroits, le champ diminue la densité en forçant les atomes à s'éloigner les uns des autres (le long des lignes). La matière s'en trouve allégée, et la poussée d'Archimède la fait monter. Sous cette force, le tube va atteindre la surface, où il apportera de la matière plus chaude qu'aux alentours. En effet, sa montée étant plus rapide que celle de la matière environnante, elle se refroidit moins dans son ascension. Arrivée à la photosphère, elle va briller davantage que le reste, et forme une facule.

Plus tard, le tube sort de la photosphère et forme deux taches, aux endroits où il coupe la photosphère.




Les zones royales sont les parties de la photosphère où les lignes de champ magnétique sont le plus tordues par la rotation différentielle.

**Les facules**

Près des taches, on distingue souvent des plages légèrement plus brillantes que la photosphère. Ce sont les facules, régions plus chaudes que la moyenne. Leur température est de l'ordre de 1.000 K supérieure à celle de la photosphère.

Les facules apparaissent à 65° de latitude au début d'un cycle solaire. Leur formation s'explique par le même mécanisme que les taches, mais la matière y est plus condensée, donc plus chaude.

**Les granules**

On les appelle aussi *grains de riz*. Ils pavent la surface du Soleil, alternativement clairs et sombres. Vus depuis la Terre, leur dimension ne dépasse pas 1 à 2 secondes d'arc. Ils sont difficiles à voir avec un instrument non spécialisé, à cause de la turbulence produite par l'échauffement à l'intérieur même du télescope, qui limite le pouvoir séparateur. En dimensions linéaires, ils atteignent 600 à 1.000 kilomètres. Les granules ont une durée de vie très brève, de quelques minutes seulement. La surface du Soleil, filmée en accéléré, montre un bouillonement intense.

La différence de brillance traduit une différence de température : les clairs sont plus chauds de 100 à 200 K que les foncés.

Enfin, l'analyse montre un décalage spectral vers le bleu pour les grains clairs, et vers le rouge pour les sombres. Ce décalage traduit une différence de vitesse par rapport à la chomosphère moyenne, de 1 à 2 km/s en plus ou en moins. Ceci nous prouve que les grains clairs sont des structures montantes (qui s'approchent de nous), et les sombres des structures descendantes.

Ce sont donc les sommets des petites cellules de convection, qui transportent l'énergie vers la surface du Soleil. Les grains clairs nous montrent la matière chaude provenant de l'intérieur du Soleil, qui se refroidit rapidement. Le refroidissement entraîne l'arrêt de la force ascentionnelle. Comme la matière chaude continue d'arriver de dessous et la pousse, la matière froide s'écoule vers les côtés. Etant plus dense, donc plus lourde, elle plonge vers le centre du Soleil, et forme les cellules descendantes froides et sombres.

Les granules se groupent en super-granules, atteignant 30.000 km de diamètre. Tout ceci témoigne d'une trubulence intense due à la convection.

**La couche renversante et le spectre éclair**

Nous arrivons à la limite supérieure de la photosphère. C'est une petite couche dont la pression est mille fois plus faible que dans l'atmosphère terrestre. Elle est donc transparente, et chaude. Lors d'une éclipse totale de Soleil, à l'instant où la Lune cache totalement la photosphère, et pas encore la chromosphère, on voit apparaître les raies spectrales en émission au lieu de les voir en absorption. Elles sont produites tout simplement par la recombinaison des atomes après ionisation par le rayonnement de la photosphère.

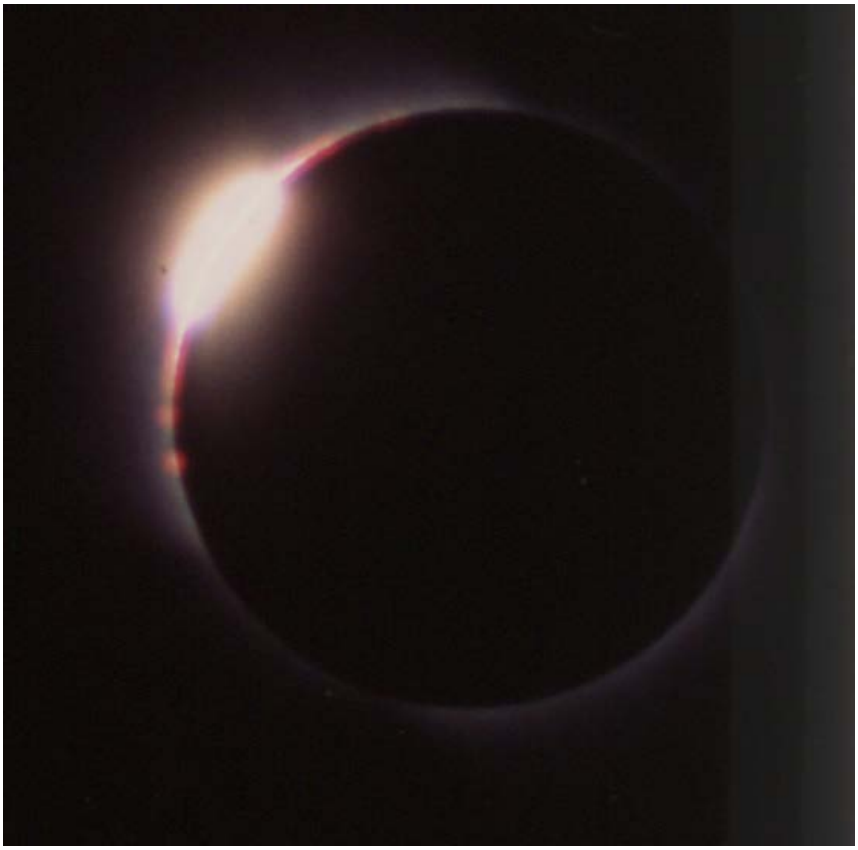
On appelle ce spectre le *spectre éclair*, car il dure le temps que la Lune couvre la chromosphère, de l'ordre d'une seconde. On le photographie tout simplement avec un réseau sans fente (la couche renversante étant très fine), il suffit de déclencher au bon moment ! Les raies spectrales épousent la forme ronde du Soleil.

La couche renversante est un artefact provoqué par le brusque changement des conditions d'observation (masquage du disque par la Lune). Elle ne possède pas de propriétés physiques particulières, et n'a donc pas d'identité propre. Elle marque simplement la transition entre la photosphère et la chromosphère.

**Les grains de Bailly**

Les grains de Bailly ne sont qu'une apparence fugace qui se produit juste avant la totalité d'une éclipse de Soleil. Lorsque la Lune couvre presque entièrement le disque solaire, les montagnes lunaires cachent déjà la photosphère bien ronde, alors que les plaines basses la laissent

encore entrevoir. On voit un disque noir, avec quelques points extrêmement brillants. Ces quelques points suffisent largement à cacher la couronne. Tant qu'il reste au moins un grain de Bailly, l'éclipse n'est donc pas encore totale, au sens ou il est encore impossible d'admirer la couronne.



Diamant, produit par un grain de Bailly au début d'une éclipse totale photo J. Ardissone

**Chromosphère**

La chromosphère est la couche solaire qui se place juste au-dessus de la photosphère. Alors que la photosphère est relativement tranquille, tout ce qui se trouve au-dessus, de la chromosphère jusqu'à la couronne externe, est l'interface entre le Soleil lui-même et l'espace. Toute l'énergie produite au centre doit passer par là pour s'échapper dans l'espace. La dispersion de cette énergie produit une très forte turbulence, et ces zones sont beaucoup plus agitées que celles de dessous (la faible densité permet cette agitation). Leur modélisation physique est nettement plus complexe, car les approximations acceptables jusque-là ne le sont plus au-dessus.

Chromosphère signifie littéralement : *sphère de couleur*. L'essentiel de la lumière qu'elle émet est produite par la raie Hα de l'hydrogène, qui est rouge. On peut la voir en utilisant un filtre qui ne laisse passer que cette couleur : le Soleil apparaît alors tout rouge.

La densité de matière est évidemment décroissante quand on s'élève dans la chromosphère, de $10^{-7}$ à $10^{-13}$ g $cm^{-3}$. A cette baisse devrait logiquement être associée une baisse de la température. Ce n'est pas le cas ! La température augmente avec l'altitude dans la chromosphère jusqu'à atteindre 7.000 K sur la plus grande partie de sa hauteur, 20.000 au sommet.

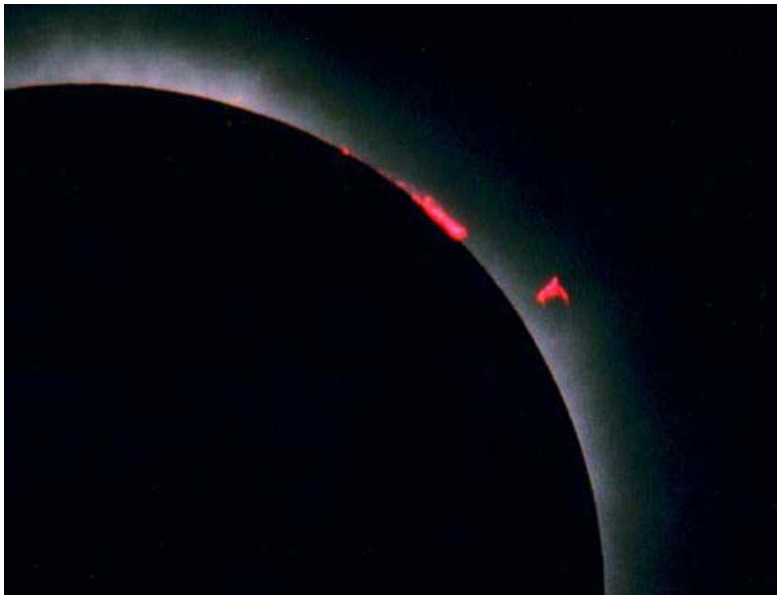
La limite supérieure de la chromosphère est l'altitude à laquelle la température est trop élevée pour que l'hydrogène rayonne encore : c'est lui qui donne sa coloration et son nom à la chromosphère.

Son épaisseur est de l'ordre de 6.000 kilomètres (ce qui est peu par rapport au rayon du Soleil, de 750.000 km).

**Les spicules**

Les spicules sont de petits jets de gaz (petits à l'échelle du Soleil). Ils sont produits par des lignes de champ perpendiculaires à la surface.

**Les protubérances**



Eclipse totale de Soleil du 11 août 1999, quart nord-ouest du Soleil photo Jean-Pierre Bousquet

Cette photo montre, pendant la totalité de l'éclipse, la basse couronne du Soleil, et des protubérances. Remarquez la couleur rouge des protubérances. Elle est due à la raie Hα de l'hydrogène, qui est la principale source de lumière de la basse atmosphère du Soleil.



Protubérance, coronographe du Centre d'Astronomie Briançonnais pose 1/125$^{e}$ photo J.P. Bousquet

Les protubérances peuvente atteindre des dimensions extraordinaires, de l'ordre du rayon solaire. Le satellite SOHO (SOlar and Heliospheric Observatory), placé en orbite autour du Soleil au point de Lagrange de la Terre, observe 24 h / 24, et ne manque pas une protubérance. Il observe dans de nombreux domaines de longueur d'onde, permettant une comparaison des phénomènes.

Le satellite SOHO filme en permanence l'activité solaire dans de nombreuses gammes de longueur d'onde. Voici une vidéo -SOHO (ESA, NASA)- qui montre la super-granulation en Hα, et l'évolution d'une belle protubérance sur la gauche. Remarquez comment le gaz retombe vers la photosphère, en suivant les lignes de champ.

## *L'atmosphère*

Sous ce nom, on désigne des structures complexes, dont la densité est très faible. En fait, il n'y a pas de limite précise dans le Soleil entre les différentes parties, et c'est surtout par commodité qu'on les distingue. Par définition, l'atmosphère du Soleil commence là où le gaz devient assez transparent pour laisser passer les rayons lumineux. Ce qui est au-dessous est opaque, par contre l'atmosphère est transparente et nous laisse voir une limite qu'on appelle justement la photosphère.

Les atmosphères stellaires sont des enveloppes de faible densité dans lesquelles le transfert d'énergie est presque totalement radiatif, car les autres modes sont inefficaces.

L'atmosphère est principalement divisée en trois parties d'inégales épaisseurs : la *photosphère*, qui ne fait que 350 km d'épaisseur, la *chromosphère*, plus vaste avec 3.000 km, et enfin la *couronne* qui s'étend très loin, jusqu'à des millions de km.

Ce que nous voyons du Soleil est la photosphère, donc la partie la plus basse de son atmosphère. Elle est un million de fois plus lumineuse que la couronne, ce qui explique que cette dernière soit invisible. Pour l'admirer, il faut la circonstance exceptionnelle d'une éclipse totale de Soleil, au cours de laquelle la Lune vient cacher totalement la photosphère. Ce spectacle magnifique s'est produit en France les 15 février 1961 et 11 août 1999.

Le profil de température de l'atmosphère du Soleil est assez complexe. A 500 km au-dessus de la photosphère, la température est descendue à

4.100 K. Puis elle remonte à 6.000 K, température atteinte à 1.000 km. Elle reste stable jusqu'à la couronne, vers 2.100 km, et là elle remonte extrêmement vite à 2.000.000 de K. Cette température règne sur plusieurs rayons solaires, ensuite elle diminue lentement.

**L'observation**

Le Soleil a toujours été observé dans le visible, pour cause. Mais depuis peu, depuis qu'on dispose de satellites précisément, on peut l'observer aussi dans d'autres gammes de longueur d'onde. Il est bon de réfléchir un peu à ce sujet.

Le visible correspond aux longueurs d'onde entre 0,4 et 0,8 micromètres. Si vous considérez un corps noir qui émet dans le visible, sa température est telle que le maximum d'énergie est dissipé entre ces deux valeurs. Disons que la température peut aller de 1.000 à 20.000 K. Ce sont les températures de surface des étoiles.

Que se passe-t-il si la température est plus basse, ou plus haute ? Le maximum d'énergie sera émis à des longueures d'onde différentes, plus longues (température plus basse, vers l'infrarouge), ou plus courtes (températures plus hautes, vers l'ultraviolet). Dans une étoile, on ne rencontre pas de températures plus basses que 1.000 K. C'est donc vers les hautes énergies, ou courtes longueurs d'ondes, qu'il faut chercher.

Dans l'atmosphère de la Terre, la température n'est pas partout la même. Elle varie en fonction de l'altitude. Dans l'atmosphère d'une étoile aussi, mais dans des proportions très importantes. De quelques milliers de degrés au niveau de la photosphère, à quelques millions de degrés dans la couronne. Ceci signifie que, selon l'altitude, la rayonnement sera plus intense dans telle ou telle longueur d'onde.

Pour le Soleil par exemple, si on observe dans la raie Hα, on verra la chromosphère. Si on choisit une autre raie, on observera la partie basse de la couronne. Enfin, en rayons X, on verra le centre de la couronne, dont la température atteint les 2 millions de degrés.

Le choix de la longueur d'onde est donc très important selon ce qu'on veut analyser. Et la mise en correspondance de toutes les observations permet d'obtenir une vue d'ensemble de ce qui se passe dans l'atmosphère du Soleil, depuis la chromosphère jusqu'au vent solaire.

Il y a beaucoup d'hydrogène dans l'atmosphère du Soleil, et beaucoup moins de calcium. La lumière Hα qui provient de la photosphère est donc beaucoup plus vite absorbée, *i.e.* à plus basse altitude.

Si dans la raie d'absorption Hα, il reste un peu de lumière, elle a été produite à une altitude assez élevée pour ne pas être absorbée. Une image Hα du Soleil, montre la chromosphère à 800 km au-dessus de la photosphère. Quand on regarde le Soleil dans une raie du calcium, on voit plus bas, vers la photosphère.

Les rayons X très énergétiques sont émis par un gaz à très haute température. C'est le cas dans la couronne. Plus bas, photosphère et chromosphère n'en émettent pas, leur température étant bien trop basse pour ça. Une observation du Soleil en rayons X montre donc la couronne seule. Les X étant absorbés par l'atmosphère de la Terre, il faut observer depuis l'espace (*Yokkoh*, satellite japonais), et on n'a pas besoin d'éclipse pour cela.

**La couronne**

La couronne est la partie externe de l'atmosphère du Soleil. C'est une région très curieuse, dont les propriétés ne sont pas encore bien comprises.

Elle s'étend au-dessus de la chromosphère, et se dilue progressivement dans l'espace entourant le Soleil. Elle ne possède donc pas de limite supérieure précise, mais elle est détectable jusqu'à des distances atteignant plusieurs dizaines de rayons solaires, soit plusieurs millions de kilomètres.



La couronne pendant une éclipse totale photo J. Ardissone

On distingue deux parties dans la couronne :

- la couronne K, interne ;
- la couronne F, externe.

La couronne K est la partie basse, dont la matière émet de la lumière dans un spectre de raies. Ces raies sont détectables à une distance

relativement faible du Soleil, de l'ordre d'un demi-rayon solaire au-dessus de la photosphère.

En plus des raies d'émission, elle présente un spectre continu, qui est dû à la diffusion de la lumière photosphérique par les électrons libres de la basse couronne. Cette lumière est polarisée à 100 %. C'est le continu qui donne son nom à cette partie de la couronne : K pour continuum.

La forme de la couronne K est relativement sphérique, mais elle projete des jets, nommés *jets coronnaux*, à grande distance et proches du plan équatorial du Soleil. Les jets coronaux sont visibles jusqu'à plusieurs dizaines de rayons solaires.

La video ci-dessous a été faite par la sonde SOHO, qui est en orbite au point de Lagrange de la Terre, en direction du Soleil. Elle est prise dans le visible. Elle est intéressante à plus d'un titre :

- on y voit des éjections coronales : de la matière est expulsée violemment par les champs magnétiques ;
- les étoiles défilent derrière le Soleil ; c'est la meilleure illustration possible du mouvement de la Terre autour de notre étoile ; en particulier, on comprend comment le Soleil entre dans une constellation et en sort ;
- enfin, juste à la fin, on voit apparaître à gauche un astre très brillant. Il s'agit de Vénus, qui allait à la rencontre du Soleil devant lequel elle devait passer le 8 juin suivant.

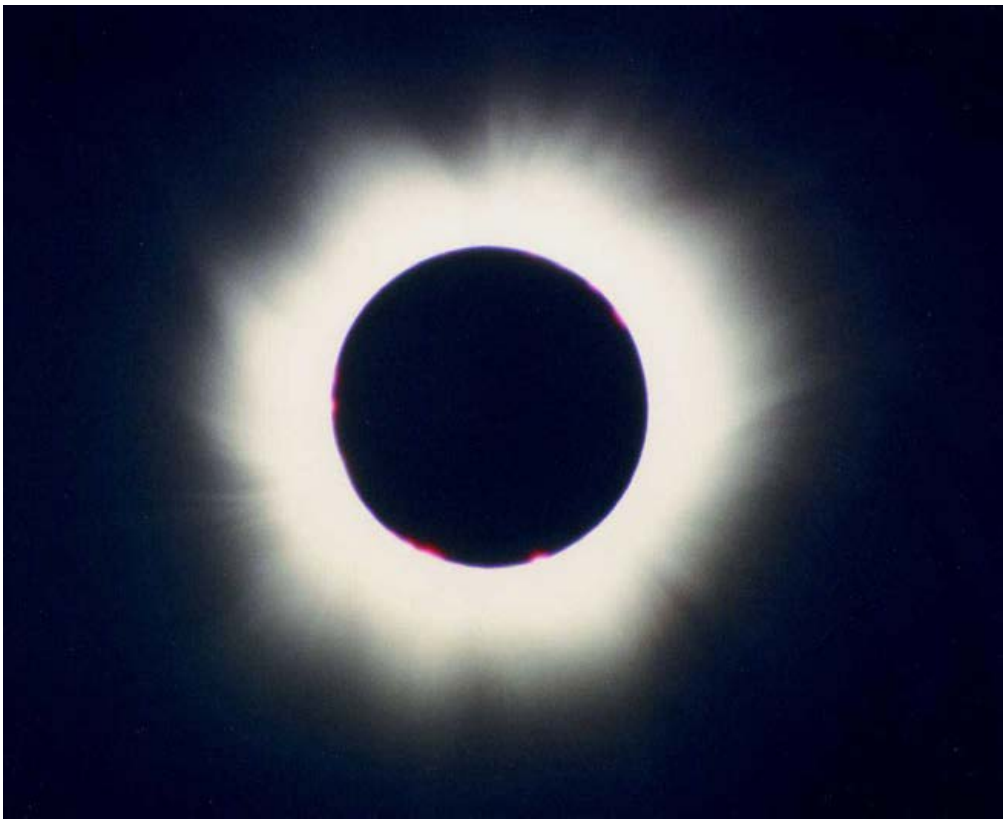
video SOHO (ESA, NASA).

La température de la couronne pose un problème majeur de la physique solaire. Sa température très élevée est difficilement explicable par des moyens simples. Il faut invoquer un chauffage par des champs magnétiques très intenses, mais on n'a pas encore de théorie détaillée satisfaisante. Les tubes de champ s'élèvent dans la chromosphère, et les lignes s'écartent. Lorsqu'elles se séparent, l'accumulation de l'énergie magnétique est brusquement libérée, ce qui élève la température du plasma. Dans le détail, ce mécanisme est très complexe.

Température : 2 à 5 millions de degrés.

**Les éruptions**

Les éruptions solaires se manifestent sous des formes très diverses. Ce sont toujours des débordements d'énergie SOHO (ESA, NASA).



Couronne du Soleil, pendant l'éclipse totale du 11 août 1999 photo JP Bousquet

**Eruption et pluie de comètes**

L'instrument LASCO C2 -SOHO (ESA, NASA)- a produit une video très instructive les 1 et 2 juin 1998. On y voit une éruption coronale importante, mais juste avant, deux comètes s'approchent du Soleil, sur une trajectoire de collision. Elle n'en ressortiront pas. Ces événements ne sont pas les seuls. Les comètes qui tombent sur le Soleil sont assez fréquentes.

Ce film a été tourné à Noël 1996 par la sonde SOHO (ESA, NASA), instrument LASCO C2. On y voit une comète finir son périple dans notre étoile, ainsi qu'une violente éjection de matière.

**Trous coronaux**

Les trous coronaux ont été découverts lorsqu'on a commencé à observer le Soleil à de très courtes longueurs d'onde, caractéristiques de rayonnements très énergétiques. La photosphère n'émet pas dans cette gamme, la chromosphère non plus. La zone de production se situe dans la couronne, beaucoup plus chaude. Ainsi, le choix de la longueur d'onde équivaut au choix de la couche à observer.

Les images du Soleil à ces longueurs d'onde sont beaucoup plus cahotiques que dans le visible : il n'y a pas de surface équivalente à la photosphère. On voit de grandes différences de brillance, et tout particulièrement des zones très sombres. Ce sont les trous coronaux. L'énergie y est faible par rapport aux plages environnantes. Quelle est l'explication ?

La production d'énergie est liée à la présence de forts champs magnétiques, qui canalisent le plasma et lui permettent d'atteindre les températures correspondantes. Dans les trous coronaux, la température est plus faible, l'énergie plus basse. On a montré que les lignes de champ y sont ouvertes vers l'espace.

Dans ces zones, l'accélération des noyaux d'hydrogène les expédie vers l'extérieur, alors que dans les autres zones, les boucles de champ les projettent les uns contre les autres. Les noyaux atteignent 400 km/s dans les boucles, et 700 dans les trous coronaux. Ces derniers sont donc les sources d'une grande partie du vent solaire.

On peut voir de telles structures sur cette video.

**La lumière zodiacale**

La lumière zodiacale est une lueur très ténue, visible dans un ciel parfaitement noir (loin des humains, de leurs pollutions diverses, en l'absence de la Lune…). Elle s'étend de l'horizon et monte dans le ciel en suivant l'écliptique. Elle présente une forme elliptique (visible en bas de cette photo).

C'est un reflet du Soleil sur les poussières du milieu interplanétaire. Ces poussières sont en plus grande abondance dans le plan équatorial du Soleil. La densité des poussières étant faible, la lumière reflétée est faible aussi.



La lumière zodiacale (en bas de l'image, sous la Voie Lactée) photo Lionel Ruiz

Quelquefois, dans des conditions encore meilleures peut-être, on arrive à distinguer une autre lueur à l'opposé. Il s'agit du *gegenshein*, de même nature que la lumière zodiacle, mais par réflexion.

Il est malheureusement extrêmement difficile de les voir maintenant, l'activité humaine ayant considérablement dégradé l'atmosphère.

**Vent solaire**

L'observation d'une comète montre que la queue est toujours opposée au Soleil, quelle que soit la trajectoire de la comète. On a vite compris que les gaz qui la composent sont repoussés au loin par de la matière provenant du Soleil. Cette matière est très ténue, invisible en général, mais elle doit être suffisamment énergétique pour chasser les gaz de la comète.

C'est ainsi qu'on a mis en évidence le vent solaire, qui est maintenant très bien connu grâce, en particulier, aux satellites artificiels. Il est constitué principalement de protons et d'électrons qui se sont échappés de la couronne à cause de sa haute température (donc de la grande vitesse de ces particules).

Le vent solaire, bien calme de nos jours, a été très violent dans la jeunesse de notre étoile, au cours de sa phase T Tauri. A l'heure actuelle, la masse perdue est du même ordre de grandeur que la masse perdue par les réactions nucléaires.

**Champ magnétique**

Le champ magnétique du Soleil provient d'une couche épaisse de 61.000 km localisée à 216.000 km de profondeur (mesures d'ondes héliosismologiques réalisées par Soho). C'est la zone de "cisaillement" où le Soleil passe d'un mode de rotation solide interne à une rotation différentielle dans laquelle les régions équatoriales tournent plus vite que les régions polaires.

Le champ magnétique moyen du Soleil est de l'ordre de 1 gauss. A l'intérieur des taches, il va de 100 à quelques milliers de gauss.

**Paramètres du Soleil**

| zone | dimension /rayon Soleil | température | densité eau = 1 |
|---|---|---|---|
| cœur | 0,3 | 15 millions K | 160 |
| zone radiative | 0,3 à 0,7 | 7 à 1 millions K | 10 à 1 |
| zone convective | 0,7 à 1 | 1 million à 15.000 K> | 1 à 3 millionièmes |

Le Soleil contient 99,85 % de la masse du système solaire, l'ensemble des planètes ne représente que 0,14 % de cette masse, et l'ensemble des satellites, des astéroïdes, des comètes et du milieu interplanétaire ne représente que 0,01 % …

---

**Soleil X**

Les zones claires sont celles qui émettent des X, dans la couronne. Les zones sombres sont des trous qui laissent voir la photosphère, obscure dans cette gamme d'ondes. On les appelle trous coronaux. D'autres zones sont de brillance intermédiaire montrant que la couronne est tout sauf homogène.

Les différentes zones de la couronne sont produites par le champ magnétique. Les trous coronaux sont les endroits où le champ s'ouvre vers l'espace. La matière au contraire se concentre dans les régions où le champ forme des boucles.

Le vent solaire est produit par l'agitation thermique de l'hydrogène qui atteint la vitesse de libération. Une vitesse normale est de l'ordre de 400 km/s, mais dans les trous coronaux il atteint 700 km/s. Car ils sont accélérés par le champ magnétique.

Les champs étant fortement variables, la couronne l'est aussi.

Le champ magnétique est produit par des mouvements de matière fortement ionisée. Les colonnes de matière en mouvement constituent des tubes de champ, qui s'entrecroisent. Les oppositions de champ amènent à la rupture des tubes. Cette rupture libère brusquement une grande quantité d'énergie, qui se transforme en chaleur en entraînant des ions. C'est ce qui chauffe la couronne.

Le détail n'est pas encore connu.

La rotation sidérale des taches est de 25,1 jours à l'équateur, et de 27 jours vers 40° de latitude.

Un humain rayonne 300 $W/m^2$.

**Le Soleil en détail**

<table>
<tr><th>distance au centre</th><th>pression</th><th>masse volumique</th><th>température</th><th>masse</th><th>énergie</th><th>ionisation</th></tr>
<tr><td>0,9 à 1</td><td>$10^5$ atm.</td><td>$10^{-2}$ g/cm$^3$</td><td>$10^6$ K</td><td rowspan="3">0,99</td><td rowspan="3">transport convectif</td><td rowspan="3">ionisation faible<br>forte opacité</td></tr>
<tr><td>0,8 à 09</td><td rowspan="2">$10^7$ atm.</td><td rowspan="2">$10^{-1}$ g/cm$^3$</td><td rowspan="2">2 $10^6$ K</td></tr>
<tr><td>0,7 à 0,8</td></tr>
<tr><td>0,6 à 0,7</td><td rowspan="3">$10^9$ atm.</td><td rowspan="2">1 g/cm$^3$</td><td rowspan="3">4 $10^6$ K</td><td>0,95</td><td rowspan="3">transport radiatif</td><td rowspan="5">ionisation forte<br>grande transparence</td></tr>
<tr><td>0,5 à 0,6</td><td>0,9</td></tr>
<tr><td>0,4 à 0,5</td><td rowspan="3">10 g/cm$^3$</td><td>0,8</td></tr>
<tr><td>0,3 à 0,4</td><td rowspan="2">$10^{11}$ atm.</td><td rowspan="2">8 $10^6$ K</td><td>0,5</td></tr>
<tr><td>0,2 à 0,3</td><td>0,1</td><td>100 %</td></tr>
</table>

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,1 à 0,2 | | 100 g/cm$^3$ | 12 $10^6$ K | | 50 % | |
| 0 à 0,1 | | 160 g/cm$^3$ | 15 $10^6$ K | | | |

La masse volumique croît rapidement dans les régions centrales. 90 % de la masse sont concentrés dans la première moitié du Soleil.

La colonne *énergie* montre que toute l'énergie est produite par le Soleil dans le premier tiers du rayon. Au-dessus, la production est nulle, et on a noté le transport de cette énergie, d'abord radiatif dans la zone où le Soleil est relativement transparent aux rayonnements (parce que l'ionisation est forte, donc les atomes ne peuvent absorber les photons), puis dans la zone convective (où l'ionisation étant beaucoup plus faible, il y a davantage d'électrons autour des atomes qui absorbent les photons). Dans ces conditions, le transport radiatif devient inefficace, et fait place à un transport convectif.

---=OO=---




La cosmogonie est l'étude du système solaire, de sa formation et de son évolution future.

Tous les peuples se sont posé ce problème philosophique de nos origines, donc de celles de la Terre et de tout ce qui l'entoure. Chacun y a répondu à sa façon, dont certaines sont assez savoureuses. Mais aucune n'a de bases scientifiques, et ne peut de ce fait prétendre à expliquer quoi que ce soit.

La première théorie de nature scientifique est celle de Descartes, publiée en 1664 sous le titre *"le Monde, ou traité de la lumière"*. Il y explique que tous les astres mobiles (connus, donc Soleil, Terre et planètes) se sont formés à partir d'un chaos de particules tourbillonaire. Si cet aspect est déjà moderne, en revanche les particules qu'il considère proviennent directement des vues antiques : ce sont l'air, la terre, l'eau et le feu, les éléments d'Aristote. Mais il leur applique des principes de conservation du mouvement, ce qui est très moderne. Malgré sa conception antique de la matière, Descartes fait une œuvre scientifique en tentant d'expliquer par des principes simples tout ce qui existe. Cette même démarche nous guide encore aujourd'hui.

On ne peut pas supposer que le Soleil a toujours existé, tout au moins sous cette forme rayonnante, car il aurait dépensé une énergie infinie, ce qui est impossible. Donc, il faut expliquer comment il s'est formé.

Sous la forme condensée qu'il a à l'heure actuelle, les conditions de température et de pression sont telles que des réactions nucléaires de fusion de l'hydrogène se produisent obligatoirement, donnant de l'énergie. Il ne peut avoir produit cette énergie pendant plus de 5 milliards d'années ; or l'Univers est beaucoup plus âgé que cela. Donc le Soleil a été dans le passé moins condensé que maintenant. Nous allons voir quel est le scénario de formation le mieux accepté aujourd'hui (celui qui explique le mieux les faits d'observation).

La discipline qui étudie la formation du soleil et de ses planètes se nomme *cosmogonie*. Plus généralement, elle étudie la formation de l'ensemble du système solaire (comprenant, outre le Soleil et les planètes principales, les petites planètes ou astéroïdes, les comètes, le milieu interplanétaire et le vent solaire). Il ne faut pas confondre la *cosmogonie* avec la *cosmologie*, qui étudie la formation et l'évolution de l'Univers dans son ensemble. La connaissance des galaxies, des amas de galaxies, de l'Univers dans son ensemble est très récente ; il y a peu de temps, la cosmogonie était l'étude de l'Univers **connu** dans son ensemble…

**Modèles évolutionnistes et modèles catastrophistes**

Dès Laplace, des modèles simples ont été proposés. Mais il faut d'abord savoir que deux grands types philosophiquement différents s'opposent : les *modèles évolutionnistes*, dans lesquels le Soleil et les planètes résultent de changements progressifs, et les *modèles catastrophistes*, qui expliqueraient la formation du Soleil et des planètes à la suite d'un accident.

L'opposition philosophique entre ces deux classes de modèles est claire :

- si le système solaire, et nous avec, résulte d'un accident, celui-ci possède un caractère exceptionnel ; il ne faudrait pas s'attendre alors à trouver beaucoup de systèmes planétaires autour d'autres étoiles. Avec une forte probabilité, nous serions alors les seuls êtres pensants dans l'Univers ;
- si par contre la formation de notre système procède d'une évolution, à partir de conditions initiales raisonnables, alors partout dans l'Univers où de telles conditions étaient réunies, la même évolution a pu se produire. Des planètes, abritant des êtres plus ou moins semblables à nous, devraient donc exister ailleurs dans l'Univers…

Les modèles catastrophistes qui ont été proposés supposent que le Soleil existait déjà, et qu'une autre étoile est passée à proximité. Sous l'effet des violentes forces de marée qu'elle a provoquées, une partie de la masse du Soleil a été arrachée, entraînée par l'étoile. Mais la gravité du Soleil a tout de même été la plus forte, et cette matière s'est mise en orbite autour de lui. Ensuite, elle s'est agglutinée pour former les planètes.

Les modèles catastrophistes sont abandonnés maintenant pour plusieurs raisons :

- l'existence préalable du Soleil repousse un peu plus loin le problème de sa formation sans le résoudre ;
- des simulations numériques sur ordinateur ont montré depuis que la matière éventuellement arrachée au Soleil ne pourrait pas se rassembler en un disque autour de lui, susceptible de former des planètes ; elle s'évaporerait bien trop vite dans le vide ;
- de nombreuses planètes ont été observées depuis 1995 autour d'étoiles proches de nous.

On remarque toutefois que toute cette matière tournerait autour du Soleil dans le même sens, et de ce fait le modèle expliquerait le sens de rotation de toutes les planètes. Par contre, le passage de l'étoile perturbatrice se serait fait sous un angle quelconque, et le filament de matière arraché n'aurait aucune raison de se trouver dans le plan équatorial du Soleil. Or le Soleil tourne sur lui-même dans le même sens que les planètes autour de lui, et le plan orbital commun à toutes les planètes est pratiquement confondu avec le plan équatorial solaire. Une catastrophe n'explique pas cette régularité.

Les modèles évolutionnistes, de leur côté, prétendent que le Soleil et les planètes se sont formés à peu près dans le même temps, à partir d'un même nuage de matière qui s'est condensé. Ils expliquent correctement les propriétés vues plus haut, et c'est le modèle standard actuel que nous

allons étudier.

En 1995, on a découvert la première planète autour d'une autre étoile. Depuis, plus de 200 ont été recensées. Bien qu'elle soient beaucoup plus massives que la Terre (même plus que Jupiter), elle prouvent que des planètes se sont formées ailleurs. Il est facile de penser que des planètes plus petites, semblables à la Terre, existent également. Il semble donc bien que les théories catastrophistes soient à abandonner.

**Modèle standard**

Tout a commencé il y a quelques 5 milliards d'années… Mais voyons d'abord ce qu'on peut observer actuellement autour de nous dans l'Univers, pour se faire une idée de ce qui existait alors.

On observe dans le ciel de grands nuages d'hydrogène qui sont stables par leur propre gravité. La grande nébuleuse d'Orion en donne un bel exemple. Elle est constituée essentiellement d'hydrogène, et possède une masse de 200.000 masses solaires. Elle contient donc de quoi fabriquer 200.000 soleils ! Dans certains nuages, on voit des condensations beaucoup plus petites et denses, qui prennent une forme approximativement sphérique. On les nomme globules de Bock. De récentes observations en infrarouge ont montré que ces globules étaient chauds. On pense actuellement qu'ils donneront bientôt des étoiles, en poursuivant leur contraction gravitationnelle. Le décor est planté.

Pour définir comment le système solaire s'est formé, il nous faut construire un modèle satisfaisant aux propriétés que nous avons constatées pour les planètes et le Soleil lui-même. Ces propriétés sont les suivantes :

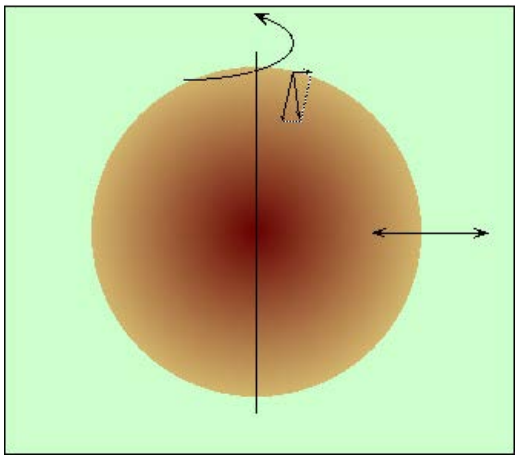
- presque toute la masse du système solaire est concentrée dans le Soleil (99%) ;
- le Soleil possède une fraction très faible du moment cinétique de rotation du système (3 %) ; ceci signifie qu'il faudrait 33 fois moins d'énergie pour arrêter sa rotation que pour stopper toutes les planètes sur leurs orbites ;
- les orbites des planètes sont presque circulaires ; leurs excentricités sont très faibles, sauf dans le cas de Pluton qui, nous le verrons plus loin, est à part ;
- elles tournent autour de lui toutes dans le même sens ;
- elles tournent dans le même sens que le Soleil tourne sur lui-même ;
- elle tournent dans le plan équatorial du Soleil ;
- leur composition dépend de leur distance au Soleil : près de lui, 4 petites planètes dense (telluriques, rocheuses) ; loin de lui, 4 planètes géantes gazeuses ;
- de petites planètes rocheuses ou astéroïdes complètent la série des planètes telluriques, et des comètes occupent les régions plus lointaines.

Un modèle de constitution du système solaire qui aboutirait à un état en violation avec ces faits ne représenterait pas correctement l'évolution réelle, soit parce que les conditions initiales auraient été mal choisies, soit parce que l'évolution elle-même serait mal comprise (au pire, les deux…).

Nous pouvons maintenant réfléchir à la formation du système solaire. L'idée essentielle est qu'il s'est formé à partir d'un immense nuage constitué d'hydrogène principalement, d'hélium et de poussières. Nous le supposerons grossièrement sphérique : c'est la forme d'équilibre où les forces de gravité se compensent naturellement.

Ce nuage froid se contracte sous l'effet de sa propre gravité. En se contractant, il se réchauffe, car les molécules qui le composent ont moins de place pour se déplacer, et donc les chocs sont plus fréquents. La température augmentant, il commence à rayonner de l'infrarouge. Ce nuage tournait lentement, et en se contractant, il tourne plus vite (comme la patineuse qui amorce sa rotation les bras écartés, puis qui les ramène le long du corps) ; d'autre part, la gravité du centre augmente, et la force centrifuge vers les pôles est faible ; donc les particules qui s'y trouvent ont tendance à tomber vers le centre, et le nuage s'aplatit ; il devient un immense disque de matière en rotation, avec une forte condensation centrale. La température de cette condensation augmente beaucoup, du fait de la contraction gravitationnelle, et l'énergie potentielle libérée par les atomes dans leur chute vers le centre se transforme en chaleur. L'objet central devient une étoile, mais les réactions nucléaires ne sont pas encore enclenchées.

**Explication de l'aplatissement**



La gravité à la surface est la même en tous les points de la sphère, puisque c'est la quantité de matière située au-dessous (plus près du centre) qui seule compte.

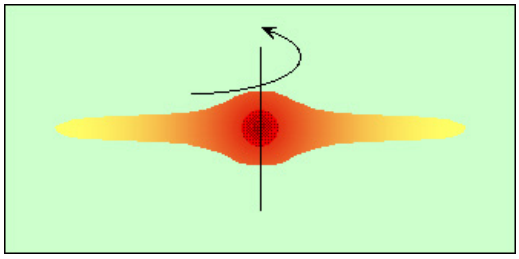
Par contre, la force centrifuge varie en fonction de la distance à l'axe de rotation, nulle sur l'axe, maximale à l'équateur.

La force subie par une particule est la résultante de ces deux forces : la particule aurait tendance à tomber vers le centre du disque, mais la force centrifuge l'en écarte un peu vers l'extérieur.

Au bout du compte, la particule va se diriger en spirale vers le disque équatorial. Les régions polaires seront peu à peu désertées, et le disque grossit. Bien sûr, la densité au centre du disque sera très forte, et c'est là que se formera le Soleil.

Au centre du nuage, une condensation importante s'accroît aux dépends du reste du disque. Sa température monte, et avec elle le rayonnement débute : comme un morceau de fer chauffé à blanc, le bulbe chaud brille.

Une étoile, observée depuis longtemps, possède les caractéristiques d'un tel objet : il s'agit de l'étoile T dans la constellation du



Taureau. Par extension, toutes les étoiles présentant le même genre de spectre sont dites de *type T Tauri*. Le Soleil a commencé sa vie par cette phase.

On a maintenant observé de tels disques autour d'autres étoiles, le plus célèbre étant celui de *Béta Pictoris*.

Si la masse du nuage était suffisante, la gravité l'est aussi, et la température atteint les 10 millions de degrés. C'est ce qu'il faut pour que des réactions nucléaires se produisent, et c'est le début de la vie de l'étoile au sens strict.

On a donc un disque de matière avec une étoile au centre. La matière du disque proche de l'étoile est fortement chauffée, donc ses molécules s'agitent ; leur vitesse leur permet de s'échapper de cette zone et d'aller vers l'extérieur du disque. Mais toute la matière ne réagit pas de la même manière : les atomes d'hydrogène, très légers, s'échappent très loin ; par contre les poussières, constituées de silicates, de fer… sont lourdes et restent proches. Le Soleil qui vient de naître est donc en train de faire le tri entre les matériaux qui l'entourent : il expédie les gaz légers au loin, et garde près de lui les poussières lourdes.

Ce tri étant fait, et la température baissant avec le temps, les matériaux vont se condenser, c'est-à-dire s'agglutiner pour former de plus gros corps. Mais les matériaux disponible ne vont pas tous se condenser en même temps, c'est-à-dire à la même température. Toute une séquence de condensation va se produite, qui trouve une excellente illustration dans les météorites.

Les poussières grossissent ; puis elles deviennent cailloux… Il se forme progressivement ainsi ce que l'on appelle des planétoïdes : ces cailloux de toutes tailles, allant jusqu'à quelques dizaines de mètres. La température a bien baisé, et les corps formés maintenant sont assez froids. Lorsqu'un planétoïde en percute un autre, ils dégagent beaucoup d'énergie, ce qui les chauffe. Comme il y a beaucoup de planétoïdes, ils n'ont pas le temps de refroidir avant d'en percuter un autre, et leur température augmente progressivement. Cette énergie est d'origine gravitationnelle.

Il faut penser aussi que tout ceci est réglé par la gravitation ; un gros planétoïde est plus attirant qu'un petit ! Il aura donc tendance à en récupérer d'autres, et à grossir encore. C'est ainsi que petit à petit se sont formées les planètes. Mais puisque le Soleil avait trié les matériaux avant, les planètes proches seront pratiquement dépourvues d'éléments volatils, et donc constituées de roches provenant de poussières silicatées et de métaux. Elles seront aussi relativement légères.

Plus loin, il existait aussi des silicates et des métaux, et ceux-ci se sont condensés en noyaux lourds. Mais tous les gaz présents dès le départ, auxquels s'ajoutent ceux qui ont été chassés ici par le Soleil, sont attirés par les noyaux, et viennent constituer des atmosphères très épaisses. Ces planètes lointaines seront essentiellement gazeuses, contenant une grande proportion d'hydrogène, un peu d'hélium, et très peu de tout le reste. Ceci explique donc les deux groupes de planètes que nous avons constatés.

Les planètes étaient chaudes au moment de leur formation, pour deux raisons :

- les chocs des planétoïdes qui les ont construites ont apporté de l'énergie cinétique, convertie en chaleur ;
- au début du système solaire, il y avait des matériaux radioactifs de courte période (aluminium 26, fer 60…) qui en se désintégrant ont apporté beaucoup de chaleur.

Elles se sont refroidies lorsque le bombardement par les planétoïdes a cessé (par manque de combattants…), et que les éléments à courte période ont été désintégrés. Mercure, la plus proche du Soleil et la plus petite, n'est pas assez grosse pour retenir une atmosphère (sa gravité est trop faible). Il n'y a donc pas d'eau, pas de vent, donc pas d'érosion sur cette planète. Tous les cratères qui ont été creusés lors du bombardement météoritique du premier milliard d'années sont restés visibles actuellement. Il en est de même pour la Lune.

La Terre après sa formation était très différente de ce que nous connaissons aujourd'hui : il n'y avait pas encore de roches sédimentaires, il n'y avait pas d'eau liquide, l'atmosphère n'avait rien à voir avec celle que nous connaissons aujourd'hui.

A cause de la chaleur interne importante de la jeune planète, un volcanisme important a lieu, qui amène en surface des éléments légers, en particulier des gaz. C'est ainsi que la vapeur d'eau, le gaz cabonique, l'azote, des composés de soufre, viennent constituer une atmosphère primitive. Avec le refroidissement, la vapeur d'eau s'est condensée en pluies violentes, qui ont lessivé les sols et constitué des océans primitifs.

Ensuite, sur Terre est apparue la vie, qui a eu besoin de carbone pour construire ses molécules. Le réservoir de carbone le plus accessible est le gaz carbonique de l'atmosphère. La molécule n'est pas très difficile à casser, et l'organisme en conserve le carbone et rejette l'oxygène. Le résultat est un appauvrissement de l'atmosphère en gaz carbonique, et un enrichissement en oxygène libre. Ce sont des organismes tels que les *cyanophycées* (intermédiaires entre bactéries et algues, communément appellées *algues bleues*), ou les *stromatolithes* (du grec *strôma*, tapis et *lithos*, pierre) qui ont dégagé l'oxygène que nous respirons. On trouve des gisements de stromatolithes fossiles : il y en a un au bord de l'étang de Berre, près de Marseille. Dans certaines régions du monde, par exemple en Australie, des stromatolithes vivent encore de nos jours.



Stromatolithe fossile de l'Etang de Berre, près de Marseille photo J. Gispert

La Terre est la seule planète, dans notre système, qui présente de l'oxygène libre dans son atmosphère, et qui abrite de la vie. A tel point qu'on envisage de rechercher l'oxygène dans les atmosphères des planètes extra-solaires qu'on vient de découvrir. Sa présence serait une indication sur la présence de vie telle que nous la connaissons.

**Scénario simplifié**

Résumons ce que nous venons de voir (la formation d'une étoile).

Un nuage constitué à près de 3/4 d'hydrogène et 1/4 d'hélium, et de l'ordre de 1 % de poussières (silicates) stabilisé par sa gravité, se contracte lentement.

En se contractant, sa gravité augmente, ce qui accélère la contraction. La pression monte (les atomes ayant moins de place pour bouger). Cette pression va éventuellement arrêter la contraction, dans un état d'équilibre ; nous verrons plus loin dans quelles conditions.

Lorsqu'un gaz se contracte, sa température augmente (bouchez une pompe à vélo, et poussez sur le piston ; vous sentirez le corps de pompe chauffer). C'est dû au fait que pour contracter le gaz, il faut lui fournir de l'énergie. Cette énergie est convertie en chaleur (les moteurs thermiques -machine à vapeur, moteurs à explosion- font la conversion inverse de chaleur en énergie mécanique).

Il est facile de comprendre qu'une augmentation de la température rend plus facile le rapprochement des protons, donc les réactions nucléaires. Celles-ci sont donc d'autant plus intenses que la température est plus élevée, car le nombre d'atomes qui se rapprochent suffisamment est plus important.

La température d'un gaz est due à l'agitation des molécules ou atomes qui le composent. Plus leur vitesse est grande, plus la température est élevée. Dans un gaz peu dense, les atomes ont énormément de place pour se déplacer sans en rencontrer d'autres. Mais si la densité augmente, les chocs se font plus nombreux et la température augmente aussi. L'énergie due à la chute des atomes vers le centre du nuage est convertie en énergie cinétique, donc en vitesse des atomes. Donc la température est plus élevée.

Sur une voie de circulation, il existe en général une limitation de vitesse. La plupart des automobilistes la respectent à peu près ; mais quelques personnes roulent beaucoup plus lentement, et quelques imprudents beaucoup plus vite !

Dans une étoile, les atomes sont un peu comme les automobilistes, et respectent plus ou moins la réglementation (la température). La plupart des atomes se déplacent à peu près à la vitesse définie par la température ; quelques uns vont beaucoup plus vite ou beaucoup plus lentement. La loi qui relie la vitesse des atomes à la température est donc une loi statistique : elle définit la vitesse moyenne des atomes en fonction de la température.

Dans le petit monde des atomes, il y a des fous encore plus impressionnants que sur nos routes (heureusement pour nos routes) : leurs excès de vitesse vont jusqu'à multiplier la vitesse raisonnable par plusieurs dizaines… malgré cela, et à la température de 15 millions de degrés qui règne au centre du Soleil, la vitesse moyenne des atomes d'hydrogène (protons) n'est que de 2.000 km par seconde… C'est beaucoup trop peu pour franchir la barrière électrostatique et fusionner. Même les plus rapides (100.000 km/s) n'y parviennent pas. Alors, d'où vient l'énergie du Soleil ?

C'est le problème que l'on se posait dans les années 20, et qui fut résolu en 1928. Avec la Relativité, on pensait tenir l'explication de l'énergie des étoiles, et voilà que le calcul fait, ça ne marchait pas ! Pour une simple question de vitesse.

Il a fallu alors prendre en compte l'autre grande théorie physique du 20$^{e}$ siècle, la Mécanique Quantique. Le Principe d'Incertitude d'Heisenberg nous dit qu'on ne peut pas mesurer deux paramètres physiques simultanément avec toute la précision voulue. Si on connaît parfaitement la position d'un atome, on ne connaîtra pas bien sa vitesse ; si on connaît bien sa vitesse, c'est sa position qui sera imprécise.

La Mécanique Quantique vient de l'effet photoélectrique : la lumière est capable d'arracher des électrons aux atomes, ce qui produit un courant électrique ; c'est l'effet photoélectrique qu'Einstein a étudié au début du siècle. D'autre part, l'énergie produite par cet effet est libérée par paquets : elle ne varie par de manière continue. Pour l'expliquer, il faut supposer que la lumière est constituée d'unités discrètes, les grains de lumière qu'on a appelés photons. Mais on savait depuis longtemps que la lumière produit des interférences, et ceci s'explique au contraire par des ondes (lumineuses). On avait donc deux théories contradictoires, qui donnaient deux interprétations différentes d'une même réalité.

C'est Louis de Broglie qui a résolu cette contradiction en supposant que la lumière était à la fois corpusculaire et ondulatoire ; le corpuscule est le photon, mais il possède une onde associée par laquelle se produisent les interférences. Par la suite, il a généralisé cette description à tout

corpuscule ; c'est ainsi que les électrons, les protons etc. possèdent donc une onde associée. Cette théorie a été validée lorsqu'on a réussi à produire des interférences avec des électrons. Depuis, la Mécanique Quantique a été largement vérifiée, et nous verrons plus loin qu'elle explique en particulier les naines blanches.

En terme de Mécanique Quantique, une particule est donc constituée d'un corpuscule et d'une onde. Cette onde représente d'une certaine manière la probabilité de trouver le corpuscule à un endroit donné. Elle est d'amplitude maximum là où le corpuscule a le plus de chance d'être, et va en diminuant à mesure qu'on s'éloigne de ce point. Mais elle ne devient nulle qu'à l'infini ! Ce qui signifie qu'on peut en réalité trouver le corpuscule partout… bien sûr, on le trouvera presque toujours là où l'amplitude de l'onde est maximum, et donc ce point définit la position normale du corpuscule. Mais de temps en temps, on peut le trouver beaucoup plus loin. C'est le principe de l'effet tunnel : deux protons animés de vitesses trop faibles, comme on l'a vu plus haut, ne peuvent se rapprocher pour fusionner. Mais les vitesses portent sur la position normale du corpuscule, associée au maximum d'amplitude de l'onde. Si au moment où les deux maxima d'amplitude des deux protons sont les plus proches, le proton se trouve dans une zone moins probable de position, il pourra s'approcher suffisamment de l'autre pour fusionner avec. On a l'impression que le proton a franchi la barrière de potentiel, comme s'il était passé par un tunnel percé en son sein.

C'est comme ça que deux protons arrivent à fusionner dans le Soleil. On imagine donc que cet événement est peu probable. Ouf ! C'est justement ce qui empêche le Soleil d'exploser. En effet, si les protons avaient une vitesse suffisante pour fusionner facilement, il se produirait tant de réactions que l'énergie produite ne pourrait pas s'échapper, et ne servirait qu'à chauffer davantage encore les autres protons… qui de ce fait fusionneraient encore plus facilement, et ce serait l'explosion du Soleil en une fraction de secondes.

Revenons à notre masse de gaz en contraction. L'arrêt de la contraction dépend de la masse du nuage : plus il est massif plus la gravité est forte, et donc plus grande sera la pression interne capable de l'arrêter. La température finale dépend donc de cette pression, et par suite de la masse. Or pour que des réactions nucléaires s'allument, il faut que la température atteigne au minimum 10 millions de degrés. Ceci fixe une masse minimum pour qu'un nuage se transforme en étoile.

Au-dessous, il formera une sphère chaude, dont la chaleur provient de la contraction ; cette chaleur lui permettra de briller faiblement, en se refroidissant peu à peu, pour cesser totalement. Ces objets sont nommés *naines brunes* ; naines par leur petite taille, et brune par la couleur de leur rayonnement, qui serait plutôt rouge sombre (froid). Les naines brunes ont été prédites par la théorie de formation des étoiles, mais il est très difficile de les observer, à cause de leur faible éclat. Les premières observations de naines brunes à peu près sûres datent seulement de 1994 (Gliese 229 B). La masse critique est de 0,008 masses solaires (80 masses de Jupiter). Si on regarde plus en détail les réactions nucléaires de fusion de l'hydrogène, la difficile à produire est la première d'une chaîne qui conduit à l'hélium. Elle produit du deutérium (hydrogène lourd). Les réactions suivantes sont beaucoup plus faciles, et beaucoup plus rapides. Or le nuage initial contient un peu de deutérium. Par conséquent, dans une naine brune, le deutérium présent dans le nuage qui lui a donné naissance peut fusionner pour donner de l'hélium, mais ceci ne donne que peu d'énergie. Dans une planète, même ces réactions ne peuvent se produire (en deça de 13 masses de Jupiter).

Jupiter, la plus grosse de nos planètes, ne fait que 0,001 masses solaires, c'est donc bien une planète.

Si la masse du nuage dépasse la masse critique, la température centrale atteindra les 10 millions de degrés, et les réactions thermonucléaires de fusion de l'hydrogène se déclencheront. Elles produiront de l'énergie, qui va augmenter la température centrale, et donc la pression.

On appelle Séquence Principale l'ensemble des étoiles qui sont en train de fusionner l'hydrogène en hélium. C'est le cas du soleil.

Sur la Séquence Principale, la luminosité est une fonction croissante de la masse. Elle augmente plus vite que la masse, donc la durée de vie diminue avec la masse.

## *L'évolution future du Soleil*

**Géante rouge**

Nous venons de voir qu'après la contraction initiale à partir d'un nuage de gaz, le Soleil avait atteint un équilibre entre la pression gazeuse et la pression de radiation d'une part, et la gravitation d'autre part. Cet équilibre est donc entretenu par les réactions thermonucléaires qui se produisent dans le coeur, par transformation d'hydrogène en hélium. Que se passera-t-il lorsque tout l'hydrogène du coeur aura été transformé en hélium ?

La pression de radiation au cœur diminue, puisque la quantité d'énergie qui l'entretient diminue. Donc l'équilibre avec la gravité est rompu, et le poids l'emporte. Le cœur du Soleil va donc se contracter, ce qui va le réchauffer ; de l'énergie gravitationnelle va se dégager, par la chute des atomes vers le centre.

Cette contraction va se poursuivre, à mesure que les réactions diminuent dans le cœur, jusqu'à ce que la température centrale atteigne les 100 millions de degrés. A ce moment là, la fusion de l'hélium devient possible, et va se déclencher. Elle va même démarrer par une courte phase explosive, que l'on nomme la flash de l'hélium. Très rapidement, un nouvel équilibre se réalise, et le Soleil va continuer à briller à partir de cette nouvelle source d'énergie.

Le cœur s'étant contracté, les couches situées juste au-dessus de lui se sont contractées aussi ; et leur température a augmenté assez pour atteindre les 10 millions de degrés fatidiques pour la fusion de l'hydrogène !

Alors que cette couche entourant le cœur ne produisait pas d'énergie dans la première phase, maintenant elle participe aussi aux réactions. On a donc un cœur qui brûle de l'hélium, entouré d'une zone qui brûle de l'hydrogène.

Et les couches au-dessus ? Analysons d'abord le nouvel équilibre : le cœur étant beaucoup plus condensé, sa gravité est beaucoup plus forte, et il faut beaucoup plus d'énergie qu'avant pour le maintenir en équilibre. Ce torrent d'énergie doit s'échapper dans l'espace, et traverser les couches supérieures. La pression de radiation est donc beaucoup plus forte que dans la phase précédente, et elle va pousser très fort les couches supérieures et l'atmosphère : celle-ci va se dilater énormément, et donc le Soleil va grossir pour devenir une géante !

Le volume augmentant très fortement, à masse constante, la densité diminue tout autant. L'enveloppe d'une géante rouge est constituée d'un gaz

dont la densité est bien plus faible que celle des meilleurs vides que l'on puisse produire en laboratoire ! Si on voit cependant cette enveloppe, c'est parce qu'elle produit de la lumière, en fonction de sa température (dans le rouge).

En se dilatant, les couches externes vont se refroidir, et donc leur couleur va virer vers le rouge. C'est pourquoi on dit que **le Soleil va devenir une géante rouge**.

Combien de temps cette phase va-t-elle durer ? Pour répondre à cette question, il faut voir deux phénomènes :

- tout d'abord, la fusion de l'hélium produit moins d'énergie pour chaque réaction, que celle de l'hydrogène ; pour produire une même quantité d'énergie, il faut donc un plus grand nombre de réactions ;

- ensuite, la quantité d'énergie nécessaire pour établir l'équilibre est beaucoup plus importante qu'avant.

Ces deux phénomènes jouant dans le même sens, le nombre de réactions par seconde est considérablement augmenté par rapport à celui de la combustion de l'hydrogène. On peut dire que le moteur s'emballe. Pour cette raison, l'hélium sera brûlé en totalité assez rapidement. Alors que la phase de fusion de l'hydrogène dure pour le Soleil 10 milliards d'années, celle de l'hélium ne durera que 20 millions d'années.

Et après ? quand tout l'hélium sera brûlé, l'équilibre sera à nouveau rompu, et le cœur va donc une nouvelle fois se contracter. Jusqu'où ? est-ce qu'une nouvelle réaction va prendre la suite ?

On pourrait envisager une telle éventualité, mais la réaction suivante devrait utiliser comme combustible ce que la fusion de l'hélium a laissé comme déchets, c'est-à-dire du carbonne (produit par la réaction triple alpha).

Or cette réaction nécessite une température centrale de 600 millions de degrés. La question est donc de savoir si, en se contractant de nouveau, le cœur du Soleil va atteindre cette température. La réponse est non, car un autre phénomène l'en empêchera. Le soleil deviendra une naine blanche, c'est-à-dire une étoile morte maintenue en équilibre par un phénomène quantique. Ces étoiles seront étudiées dans le chapitre consacré aux étoiles.

---=OO=---




# *Le cinéma des ours blancs*

"Le cinéma des ours blancs"
appelation due à Eve Christian

## *Les aurores polaires*

Les *aurores boréales* ont été nommées ainsi parce qu'elles étaient connues au nord, l'hémisphère sud étant pratiquement inconnu pour les grecs et les latins.

> C'est le navigateur portuguais Bartolomeu Dias qui a découvert le Cap de Bonne Espérance en 1488, soit 4 ans avant la découverte de l'Amérique par Christophe Colomb. Il venait d'ouvrir la véritable route des Indes, celle que Colomb recherchait à tort vers l'ouest. Avant cela, les portuguais avaient petit à petit exploré les côtes africaines, de plus en plus vers le sud. Bien sûr, Afrique du sud et Amériques étaient déjà peuplées, et le terme de *découverte* s'applique évidemment pour les populations du bloc occidental.

Les aurores boréales sont les aurores polaires qui se produisent dans le nord, les *aurores australes* étant leurs correspondantes au sud.

**Historique**

Les deux premières mentions connues sont dues à Anaximène de Milet, et à Xénophane de Collophon, au VI$^{e}$ siècle avant JC. Une tablette d'argile babylonienne datée de 567 avant JC les décrit aussi. Il a fallu attendre 1773 pour avoir une description des aurores australes par le capitaine Cook. Mais le plus intéressant est que les chroniques chinoises ont également noté des aurore boréales à la même date ! C'est ainsi que le premier lien a été établi entre les aurores polaires nord et sud.

En 1883, à 18 ans, Zeeman a publié dans la revue Nature une magnifique description des aurores boréales. Il a eu pour cela les félicitations de l'éditeur de la revue.

**Nature**

Ce sont des phénomènes de luminescence qui se produisent dans la haute atmosphère, entre 80 et 1.000 km d'altitude. Les particules chargées du vent solaire (protons, électrons, noyaux d'hélium), issues des trous coronaux, arrivent à une vitesse de 200 à 1.000 km/s, selon l'activité solaire. Cette vitesse élevée leur confère une énergie cinétique importante, qui leur permet, par chocs, d'exciter ou d'ioniser les atomes de la haute atmosphère. Les électrons libérés se recombinent rapidement avec les noyaux. Tous les électrons retombent en cascade sur les niveaux d'énergie basse. Ils produisent ainsi des raies d'émission bien précises.

Les aurores ne se produisent pas n'importe où. C'est pourquoi on les qualifie de *polaires*. La Terre possède un champ magnétique qui est, en première approximation, bipolaire (comme un barreau aimanté, ou dipôle). Il présente un pôle nord et un pôle sud. Attention, le pôle magnétique qui se trouve dans l'hémisphère nord est actuellement un pôle sud…

Ce dipôle produit des lignes de champ qui devraient normalement se rejoindre d'un pôle à l'autre. C'est effectivement le cas du côté jour de la Terre, mais du côté nuit, le vent solaire, formé de particules chargées et qui possèdent donc un champ magnétique, ouvre les lignes du champ terrestre vers l'opposé du Soleil.

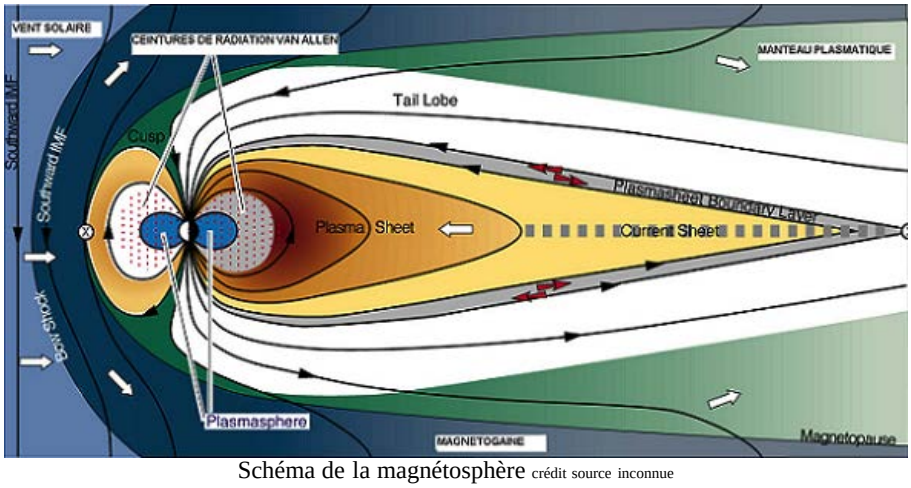



Schéma de la magnétosphère crédit source inconnue

Lorsque les particules chargées du vent solaire approchent de la Terre, elles se trouvent piégées par les lignes du champ terrestre, et canalisées vers les pôles magnétiques. Les pôles magnétiques ne correspondant pas aux pôles géographiques, les aurores sont décalées par rapport à l'axe de rotation de la Terre.

Les interactions entre ces particules et le champ terrestre sont complexes, et définissent des *anneaux auroraux*, qui entourent les pôles, et où les aurores se produisent essentiellement. Mais l'énergie des particules du vent solaire influe beaucoup sur la dimension de ces anneaux. Lorsqu'il est faible (vitesse en-dessous de 400 km/s), l'anneau auroral est de petit diamètre, et donc les aurores se produisent près des pôles magnétiques. Lorsque l'énergie des particules est plus importante, les anneaux s'agrandissent, et descendent vers les latitudes plus basses. C'est pourquoi, en période (rare) d'activité très intense du Soleil, des aurores sont visibles en France jusqu'à Marseille.

De plus, le pôle se déplaçant d'année en année, l'anneau auroral le suit :




Trajet approximatif du pôle magnétique depuis 1903 (en rouge)

Ainsi, le pôle magnétique situé dans l'hémisphère nord s'est déplacé depuis 104 ans de 1.000 km. Sa vitesse est variable ; actuellement, il se déplace rapidement, de plus de 50 km / an en direction de la Sibérie.

**Observations scientifiques**

La beauté des aurores motive bien des personnes pour se rendre dans un lieu propice et prendre photos et films. Mais l'origine électromagnétique des aurores présente aussi des conséquences fâcheuses, car l'énergie qui est à leur origine perturbe tous les équipements électroniques :

- distribution du courant électrique. Une panne générale d'électricité affectant tout le Québec a été provoquée par une surtension due à une éruption solaire, qui a fait sauter les disjoncteurs haute tension ;
- perturbations du GPS ;
- perturbations radio affectant le transport aérien ;
- destruction de satellites de télécommunication ;
- et évidemment risque pour les astronautes qui se trouveraient dans le secteur…

La prévision, si ce n'est des aurores, tout au moins de leurs causes, est donc un problème intéressant qui justifie ce genre d'études.

**Mission Thémis**

La mission Thémis (*Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms*) comprend 5 satellites, et une vingtaine de petites stations au sol en Amérique du nord. Ces dernières comprennent des caméras fisheye premettant d'avoir une couverture premanente des zones aurorales.

Les 5 satellites Thémis ont été lancés le 17 février 2007. Ils ont été placés sur des orbites terrestres elliptiques, les amenant à l'aphélie dans la queue magnétique de la Terre. Les excentricités, et donc les périodes, ont été déterminées de telle manière que les 5 satellites soient en même temps à leur aphélie, tous les 4 jours, de manière à effectuer des mesures simultanées de la magnétosphère. Evidemment, celui dont l'apogée est le plus proche de la Terre effectue plusieurs orbites pendant que celui dont l'apogée est le plus lointain en effectue une seule.

**Mécanisme des aurores**

Les aurores boréales terrestres sont bien produites par le vent solaire, mais après interaction complexe avec la magnétosphère terrestre. Elles infléchissent les lignes du champ terrestre, et produisent la magnétosphère, ou queue magnétique de la Terre. Les particules du vent solaire se précipitent donc dans cette queue, où elles accumulent une colossale énergie. Etant chargées, de forts champs magnétiques se produisent là. Les lignes de champ voisines, présentant des polarités différentes, s'attirent et finissent par fusionner. C'est ce qu'on appelle la reconexion magnétique, qui est également à l'œuvre dans la couronne solaire, et qui est sans doute responsable de son chauffage.

Ces phénomènes de reconnexion dans la magnétosphère sont appelés *sous-orages magnétosphériques*. Ils ont pour effet de dissioper beaucoup d'énergie, qui est en partie communiquée aux particules du vent solaire, en les accélérant fortement en direction de la Terre. Ce sont ces particules qui produisent les brillantes aurores, dont la durée peut atteindre plusieurs heures.

L'un des buts de Thémis est de mieux comprendre ces phénomènes de reconnexion et de sous-orages magnétosphériques, avec un espoir de prévision en tête. Un phénomène complet a été nobservé le 26 février 2008.

Le nom de sous-orages magnétosphériques vient de leur association aux orages magnétiques qui se produisent côté jour, là où les particules du vent solaire frappent directement le bouclier magnétique terrestre.

L'association entre les satellites et les stations au sol doit permettre de faire la liaison entre les phénomènes électromagnétiques dans la magnétosphère avec leurs conséquences au sol.

**Indice Kp**

Un indice a été créé pour tenter d'évaluer la probabilité d'observer une aurore. Son nom vient de *planetarische Kennziffer*, où les lettres sont curieusement inversées. Il mesure l'activité géomagnétique (le champ magnétique terrestre) sur les trois dernière heures. L'indice Kp change donc tout le temps, et indique la probabilité à très court terme de voir une aurore.

Le champ magnétique terrestre est produit essentiellement par des mouvements de matière dans le noyau de la planète, mais il est fortement influencé par le flot de particules provenant du Soleil. Il est donc constamment variable. Ses variations peuvent se subdiviser en :

- variations à longue période, qui traduisent les modifications des mouvements internes de la Terre (mouvements du noyau externe, seul liquide). Elles produisent en particulier le déplacement des pôles magnétiques par rapport à la surface terrestre ;
- variations à courte période, essentiellement induites par l'activité solaire. Ce sont elles qui définissent la probabilité d'occurence des aurores.

Il y a donc deux choses à considérer :

- l'activité solaire, qui décide de l'influence sur la Terre ;
- l'activité effective (et résultante) terrestre.

Lorsqu'on observe l'activité solaire, on le fait par des voies électromagnétiques : rayon X, visible. C'est ainsi qu'on détecte la formation des trous coronaux avec un retard de 8 minutes (temps mis par la lumière pour nous parvenir). La matière qui s'en échappe est éjectée à grande vitesse, mais elle met de 2 à 4 jours pour atteindre la Terre. C'est lorsqu'elle y parvient qu'elle produit les influences sur le champ magnétique terrestre.

Cette grande différence de vitesse entre la lumière et les particules nous donne, après la détection d'un nouveau trou coronal, un délai de deux à quatre jour pour se préparer à observer des aurores. Mais il faudra attendre les dernières heures avant pour savoir si, localement, on aura une chance d'en voir…

L'indice Kp est défini pour permettre cette prévision à très court terme. Il se base sur l'activité magnétique terrestre résultante. Il est défini sur une échelle fermée (fermée signifie qu'il y a une plus petite et une plus grande valeur) entre 0 et 9.

Cette définition est plus difficile à faire qu'il n'y parait. En effet, outre les variations dans le temps, le champ terrestre présente aussi de grandes variations dans l'espace : en des lieux même relativement proches, il peut prendre des valeurs assez différentes. C'est ce qui fait la difficulté d'en tirer un indice global.

On définit d'abord un indice K, qui reflète directement l'intensité du champ magnétique terrestre en un lieu donné. Ensuite, en regroupant les indices ainsi mesurés en diverses stations sur Terre, on en déduit le Kp qui est une moyenne pondérée.

Plus le Kp est élevé, plus les aurores descendent en latitude. En Europe, avec une valeur de 1 à 2, seul le nord de la Norvège est concerné. Lorsque la valeur du Kp augmente, l'anneau auroral descend vers le sud. Il faut un Kp maximum, pratiquement 9, pour avoir une petite chance de voir des aurores en France…

## *Les raies spectrales*

Les lumières aurorales sont dues à des transitions électroniques produites à partir d'états métastables. Métastable signifie que l'état excité dure très longtemps par rapport à la durée de vie d'un état instable ($10^{-8}$ à $10^{-9}$ s). Alors, avant de se désexciter spontanément en émettant sa raie, l'atome peut parcourir une grande distance. Si, au cours de ce périple, il rencontre un autre atome, le choc détruit l'état, et la raie ne sera jamais émise. Pour qu'elle le soit, il faut donc que l'atome ait la possibilité de franchir une telle distance sans en rencontrer d'autres, donc que la densité soit très faible. C'est pourquoi ces états métastables nécessitent une densité très faible pour produire de la lumière.

La plus importante de ces raies est à 557,7 nm, de couleur verte caractéristique. Elle est due à une transition à partir d'un état métastable de l'oxygène, de durée de vie 0,7 s. Pour qu'elle puisse se produire, il faut donc que l'atome reste dans cet état pendant une durée au moins égale, sans subir de choc. Un milieu suffisamment raréfié pour cela se trouve vers 100 km d'altitude. C'est cette raie qui confère aux aurores leur couleur dominante.

Plus haut, vers 250 km, la masse volumique de l'air n'est plus que de $10^{-8}$ g $cm^{-3}$, et deux raies de l'oxygène à 630,0 nm et 630,4 nm se produisent. Elles sont rouges, et proviennent d'états métastables de durée de vie 110 s (de durée de vie beaucoup plus longue, donc nécessitant un milieu plus raréfié encore).

Une raie jaune est aussi produite par l'oxygène, mais moins intense. Enfin, l'azote produit les raies violette (391,4 nm) et bleue (427,8nm).



Aurore vue depuis la navette spatiale
crédit AURA:STScI, NASA

Cette photo montre une aurore prise depuis la navette spatiale. Vue d'en haut, elle a l'avantage de montrer la stratification entre les parties rouges et vertes, illustrant parfaitement la production de ces raies à des altitudes (des densités) différentes.

## *Voyage vers les aurores*

Ce voyage a consisté en une navigation de Bergen à Kirkeness, à bord de l'express-côtier (Hurtigruten), en une semaine. Les ponts du navire offrent de beaux observatoires, et le bateau permet à la fois de se loger, et d'être disponible 24 h / 24 pour faire des observations si les conditions sont favorables.

Les aurores boréales, comme leur nom l'indique, se produisent préférentiellement dans les régions polaires, c'est donc là qu'il faut se rendre pour espérer en voir. Il est grandement préférable qu'il fasse nuit, et le choix de l'hiver polaire s'impose.




Trajet du bateau

34 ports sont atteints par le bateau au cours de son périple, qui comprend presque toute la côte norvégienne. Le périple nous amène de 60° à 71° nord. Il représente un trajet de 2.400 km (pardon, il faut dire 1.296 milles nautiques…). Kirkenes est à quelques centaines de mètres de la frontière russe.

Le bateau navigue bien sûr jour et nuit (en au début janvier, c'est presque toujours de nuit…). En l'absence de train, c'est le moyen d'approvisionner les populations du Nord du pays. C'est aussi un bus, leur permettant de se déplacer de port à port. Enfin, il associe une activité de croisière, qui rentabilise la navigation.

Et maintenant, quelques photos…

## *Des aurores sur d'autres planètes*

### Mars

Le cas de la planète Mars est différent de celui de la Terre. Mars n'a pas de champ magnétique actuel, comme notre planète. Cependant, elle possède un champ fossile, figé dans les roches, et mémoire de l'époque où elle était active. Ce champ n'a aucune raison d'être dipolaire comme le nôtre, et sa structure est bien plus chaotique. Aussi, des aurores se produisent-elles dans l'atmosphère de la planète rouge, mais leur localisation n'a pas le caractère régulier observable chez nous.

De plus, les aurores sont des luminescences produites par des particules énergétiques sur les atomes de l'atmosphère. Ceux-ci sont excité, et émettent la lumière en se désexcitant. Les raies émises sont caractéristiques des atomes excités, pour la Terre ce sont l'oxygène et l'azote. Ces gaz étant très rares sur Mars, les aurores n'auront pas le même aspect. En fait, elles ont été observées en ultraviolet, et ne se produisent probablement pas dans le visible.

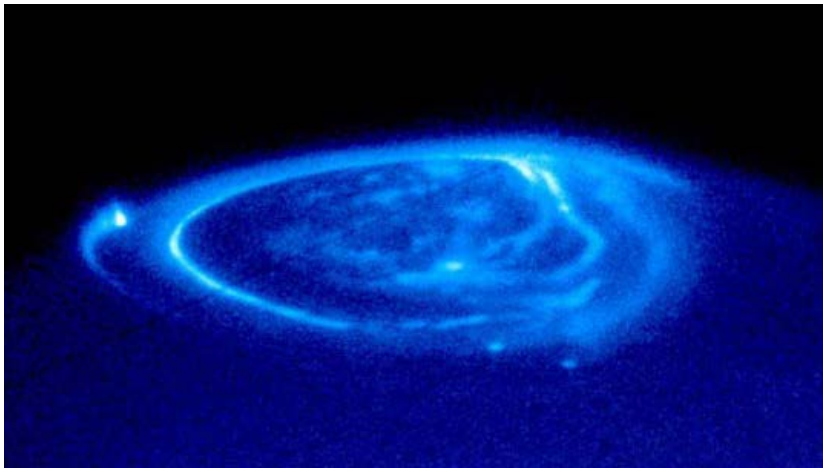


Carte des aurores sur Mars crédit ESA/CNRS

Le champ rémanent de Mars est toutefois bien faible pour expliquer simplement ce phénomène. Il restera donc à découvrir comment les particules du vent solaire peuvent bien être accélérée, de façon à acquérir l'énergie suffisante pour le provoquer.

**Jupiter**

Les possibilités d'observation dont on dispose aujourd'hui avec les moyens spatiaux nous permettent d'imager avec précision les autres planètes du système solaire. On a ainsi obtenu des photots d'aurores polaires sur Saturne, Jupiter, et même Mars malgré la faiblesse de son atmosphère. Bien entendu, sur cette dernière les conditions équivalentes à celles qui produisent les aurores sur Terre se rencontrent à bien plus basse altitude.

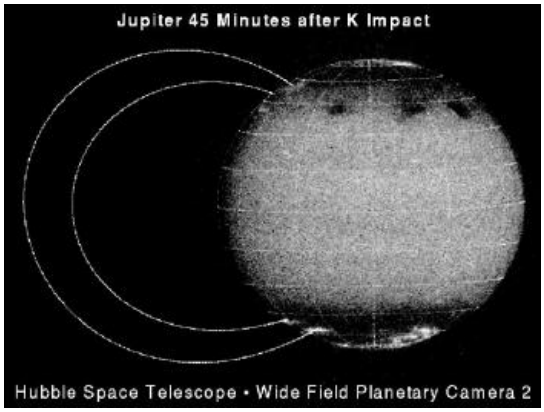


Aurore sur Jupiter crédit John T. Clarke (U. Michigan), ESA, NASA



Aurore sur Jupiter (HST)
crédit John T. Clarke (U. Michigan), ESA, NASA

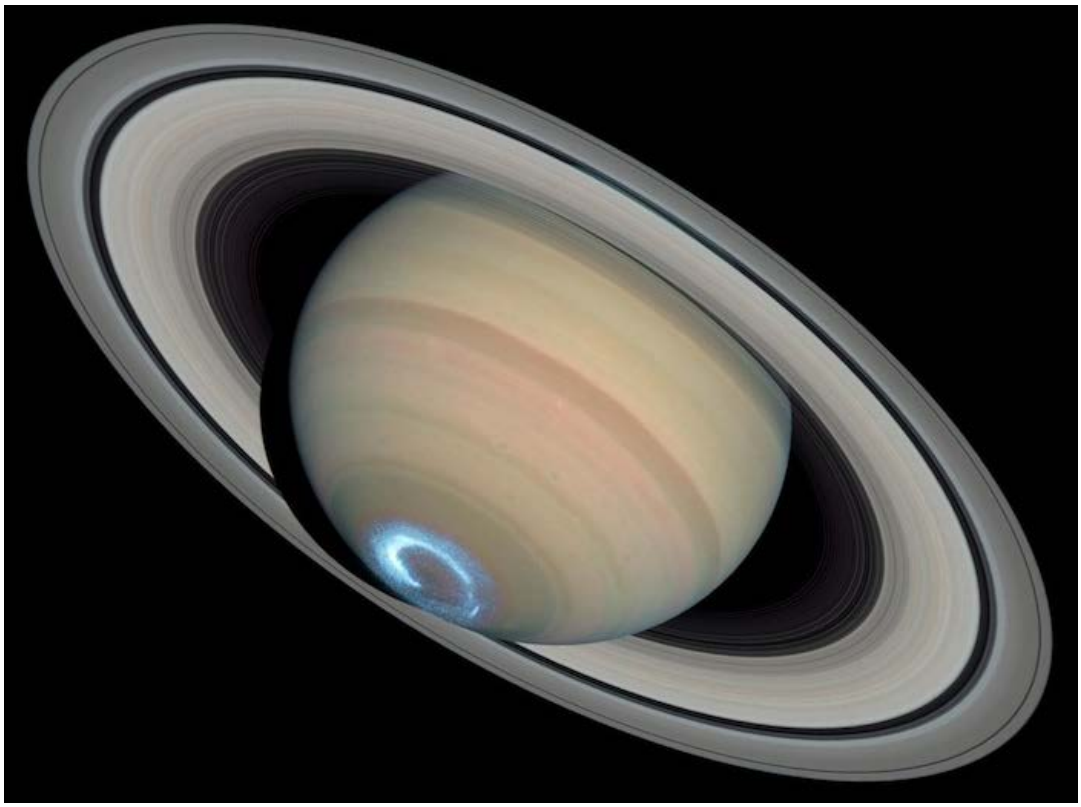
On voit parfaitement l'anneau auroral, mais il y a plus : le point très lumineux est bien une aurore, mais non produite par les particules du vent solaire ! En effet, les particules qui la créent proviennent de Io, elles sont ionisées, et piégées elles aussi par le champ magnétique de la planète. Elle produisent une lumière 1.000 fois plus intense que celle due aux particules solaires… Par conséquent, si les aurores sont toujours produites par des chocs de particules sur une atmosphère, l'origine de ces particules peut être diverse.




Aurore collisionnelle sur Jupiter (HST)
crédit NASA and John T. Clarke (Univ. of Michigan)

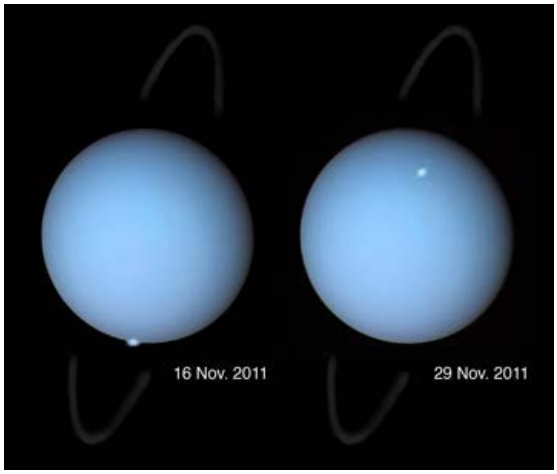
Encore une autre source : les fragments de la comète Shoemaker-Lévy 9 ont percuté Jupiter entre les 16 et 22 juillet 1994. L'énergie dégagée par ces chocs a éjecté de la matière à très haute température (jusqu'à 24.000 K). Aussi cette matière était-elle animée d'une grande vitesse et ionisée. Ces particules ont alors été piégées dans le champ magnétique de Jupiter, en ont suivi les lignes, et sont allé percuter l'atmosphère où elles ont produit les aurores visibles sur la photo ci-dessus. Ces aurores se sont situées à une latitude jamais observée dans l'atmosphère de Jupiter.

**Saturne**



Aurore sur Saturne
crédit NASA

**Uranus**




Aurores sur Uranus
crédit Laurent Lamy / Observatoire de Paris / CNES / ESA / NASA

Les aurores polaires d'Uranus ont été découvertes en janvier 1986 par la sonde Voyager 2. C'étaient des aurores permanentes, visibles du côté nuit de la planète.

Les photos ci-dessus sont des montages, car les différentes parties des images ne sont pas visibles aux mêmes longueurs d'ondes :

- le disque de la planète est une image visible prise par Voyager 2 :
- les aurores ont été photographiées en UV par HST ;
- enfin les anneaux sont des images infrarouges obtenues par le télescope au sol Gemini.

Ces images ont été obtenues dans des circonstances très particulières : la Terre, Jupiter et Uranus étaient alignées avec le Soleil ! Les chercheurs ont attendu une éruption solaire, qui a été détectée par des satellites en septembre 2011 (satellites Stereo). La vitesse des particules était de 500 km/s. Deux jours après, la Terre a connu des aurores intenses, et les particules ont été détectées par les satellites de la NOAA. Quinze jours après des aurores se produisaient sur Jupiter. Enfin, deux mois plus tard, elle se produisaient sur Uranus. La possibilité d'observer ces interactions du vent solaire avec les atmosphères des trois planètes apporte beaucoup de nouvelles informations sur l'activité et l'influence du Soleil.

Ces nouvelles aurores sont visibles du côté jour de la planète. Elles produisent des éclairs qui durent quelques minutes, et restent localisés. N'oublions pas qu'Uranus tourne autour d'un axe pratiquement inclus dans le plan orbital : elle roule sur son orbite. Ainsi, les conditions d'éclairement aujourd'hui (début de l'automne) sont très différentes de ce qu'elles étaient lors du passage de Voyager 2 (près du solstice d'été).

L'axe magnétique d'Uranus est incliné de 60° par rapport à l'axe de rotation. C'est extrêmement différent des quelques degrés correspondant sur Terre.

**Conclusion**

La science nous donne maintenant une connaissance étendue de ces merveilleux phénomènes ; elle a cependant des limites, puisque nous ne savons toujours pas s'il y a des ours blancs pour voir ce cinéma sur les autres planètes…

---=OO=---



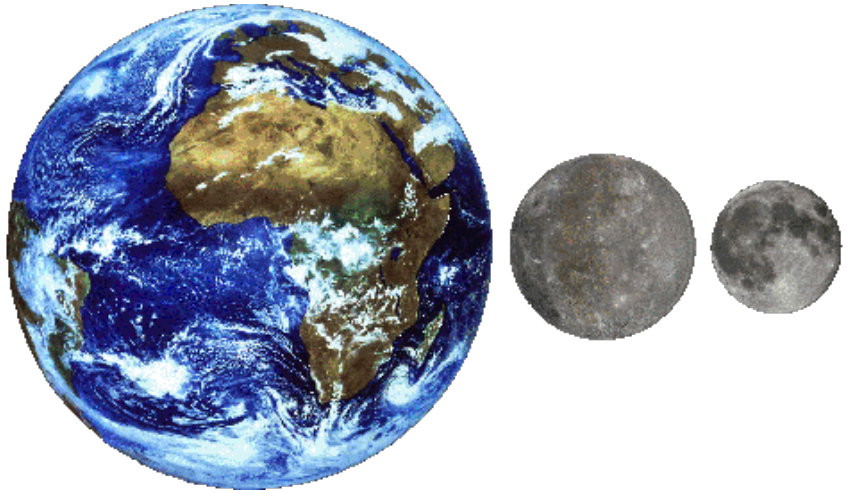

## Carte d'identité

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| diamètre | **4 879,4 km** | | demi grand-axe | **57,909 $10^6$ km** |
| | **0,3825 Terre** | | | **0,3871 UA** |
| diamètre angulaire max | 12,4" | | excentricité | **0,205631** |
| aplatissement | **0** | | inclinaison de l'orbite | **7° 0' 18"** |
| période de rotation | **58 j 15 h 30 mn 34 s** | | année sidérale | **87 j 23 h 14 mn 33 s** |
| inclinaison axe de rotation | **0°** | | vitesse orbitale | **47,8725 km/s** |
| masse | **3,3022 $10^{23}$ kg** | | révolution synodique | **115,8775 j** |
| | **0,055274 Terre** | | jour solaire moyen | 175 j 22 h 33 mn |
| masse volumique | **5,43 g/$cm^3$** | | sens | mixte (rétro majoritaire) |
| | **0,9846 Terre** | | pression au sol | **0** |
| pesanteur | **3,70 m/s/s** | | température min | -185 |
| | **0,38 Terre** | | température max | +430 |
| vitesse de libération | **4,25 km/s** | | albédo | **0,106** |
| nombre de satellites | 0 | | composition atmos. | - |

Les éléments en gras sont tirés du livre *Allen's astrophysical quantities*, quatrième édition

Mercure est une petite planète tellurique. Son diamètre est compris entre ceux de la Terre (Mercure 2,6 fois plus petite) et de la Lune (Mercure 1,4 fois plus grosse) :

| Terre | Mercure | Lune |
|---|---|---|
| 12.758 km | 4.880 km | 3.473 km |



**Energie reçue**

C'est la planète la plus proche du Soleil : elle en est en gros à 50 millions de km, 3 fois plus proche que la Terre. Elle reçoit donc $3^2 = 9$ fois plus de lumière et de chaleur que nous (application de la formule générale) :

$$E_{Mercure} = E_{Terre} \left( \frac{d_{Terre}}{d_{Mercure}} \right)^2 = E_{Terre} \left( \frac{150}{50} \right)^2 = E_{Terre}\ 3^2 = 9\ E_{Terre}$$

Du fait de sa proximité au Soleil, celui-ci y parait énorme dans le ciel : au périhélie, son diamètre angulaire atteint 1° 44' (plus de trois fois plus gros que sur Terre), alors qu'à l'aphélie, il est *seulement* de 1° 8' (deux fois plus gros)...

## *Mouvements*

**Mouvement orbital et rotation**

L'orbite de Mercure est très particulière, pour ne pas dire anormale. Elle est très excentrique (e = 0,2058) et de plus, assez inclinée sur le plan de l'écliptique (7°), plan partagé à peu près par les autres planètes (Pluton excepté, s'il s'agit d'une planète). Cette double particularité devrait trouver une explication dans une théorie de la formation du système solaire.

L'excentricité produit de gandes variations de la distance de Mercure au Soleil : entre 46 et 70 millions de km (voir formule).

A faible distance de la grande masse solaire, Mercure a dû subir des marées très importantes. On sait que les marées ont bloqué la rotation de la Lune de telle manière

qu'elle soit synchrone avec son mouvement orbital : résultat, la Lune tourne toujours la même face vers la Terre. On pourrait penser qu'il en soit de même pour Mercure par rapport au Soleil, et que la planète tourne toujours la même face vers son étoile. Mais dès qu'on a pu mesurer la période de rotation de Mercure, on a montré qu'il n'en est rien. La rotation sidérale est de 58,26 j et la révolution sidérale de 87,969 j. Le rapport entre les deux est 87,969 / 58,26 = 1,509. Deux années valent trois jours sidéraux !

Quand au jour solaire, qui est la combinaison des deux mouvements, il dure 176 jours, c'est-à dire exactement deux ans... Curieuse planète.

> Nous avons l'habitude d'avoir 365 jours dans une année.
> Sur Mercure, nous aurions deux ans dans une journée...

Les marées produites par l'attraction du Soleil ont agit en freinant la rotation de Mercure. Si l'orbite de la planète était circulaire, ce ralentissement l'aurait amenée à tourner toujours la même face vers le Soleil. Seulement, l'orbite est assez fortement elliptique. La planète passant très rapidement à son périhélie, et beaucoup moins vite à son aphélie, le ralentissement n'a pas agit avec la même intensité en ces deux points. La rotation de la planète a alors trouvé un équilibre en effectuant trois tours en deux de ses années.

De plus, les énormes variations de vitesse de la planète entre son périhélie et son aphélie y créent un phénomène spectaculaire (si quelqu'un s'y trouvait pour l'admirer...). En certains points de la planète, on peut voir le Soleil se lever, monter un peu dans le ciel, puis s'arrêter, et se recoucher ! Puis on le voit se lever à nouveau et enfin monter dans le ciel et aller se coucher de l'autre côté. En d'autres points de la planète, ce balancement du Soleil se manifeste en un autre point du ciel, par exemple au méridien : il est alors midi trois fois par jour... Difficile de régler sa montre ! Faut-il construire des horloges qui avancent jusqu'à midi et demi, s'arrêtent, retardent jusqu'à 11 heures et demi, puis repartent enfin pour un cours normal de fin de journée ? (elles seraient en contradiction avec la flèche du temps de la Physique...)

Ce phénomène très intéressant résulte de la combinaison du mouvement orbital à vitesse variable, et de la rotation de la planète sur elle-même à vitesse constante. Dans le cas de Mercure, il se produit régulièrement parce que les deux mouvements sont dans le rapport 3/2. On trouvera par ailleurs une explication détaillée. Il découle de ces deux mouvements un jour solaire de 176 jours (terrestres). Cette valeur est énorme par rapport aux autres planètes, sauf Vénus.

Il existe d'autres exemples de blocage par les marées dans le système solaire : en particulier, dans le couple Pluton-Charon, chacun des deux partenaires est stabilisé, et tourne toujours la même face vers l'autre.

**Avance du périhélie**

Pour finir, disons que Mercure a posé un gros problème de mécanique céleste : lorsque Newton a établi la loi de la gravitation universelle, on l'a appliquée pour expliquer le mouvement des planètes. Pour Mars, ce fut un succès total. Mais pour Mercure, le mouvement réel différait très légèrement du mouvement prédit : le périhélie de Mercure avance un tout petit peu à chaque révolution de la planète, de quelques 574" d'arc par siècle. A ce rythme-là, il lui faudra 226.000 ans pour faire un tour complet. La Mécanique de Newton explique une avance de 531" par siècle, mais il reste un résidu de 43" d'arc par siècle, vraiment inexplicable dans cette théorie. Cette valeur est très petite, mais elle suffit pour faire douter d'une théorie !

Il a fallu attendre la Relativité Générale d'Einstein pour que cette avance du périhélie soit expliquée. Il faut bien comprendre que la théorie de Newton donne une certaine approximation sur le réel, et que celle d'Einstein est un peu plus précise : lorsqu'on regarde une plaine, on a l'impression qu'elle est plate ; quand on fait quelques kilomètres à la surface de la Terre, on a cette même illusion. C'est pourquoi les Hommes ont pensé pendant très longtemps que leur domaine était plat. Mais si on entreprend le même voyage que Phileas Fogg, on sera obligé de reconnaître que l'apparence est trompeuse. Mais pour cela, il aura fallu faire le tour du monde… On sera donc passé d'une expérience locale, à toute petite échelle, à une expérience qui englobe un domaine beaucoup plus vaste. Newton a pensé sa théorie en fonction d'un domaine limité, l'orbite de la planète Mars ; dans ce domaine, elle est suffisamment exacte. Lorsqu'on l'applique à un domaine plus vaste, le système solaire, on se place en dehors du cadre fixé pour la définir, il n'est donc pas étonnant qu'on ait quelques difficultés. La masse du Soleil est beaucoup plus grande que celle de la Terre, et sa grande proximité de Mercure en accentue les effets ; ceci explique cette différence de cadre.

## *Observation*

### Observation élémentaire

En temps normal, elle est très difficile, car la planète, très proche du Soleil, ne s'en écarte jamais beaucoup pour nous. Elle n'est visible que le soir immédiatement après la disparition du Soleil, ou le matin très peu de temps avant son apparition. Le ciel est donc brillant. Dans son mouvement autour du Soleil, elle est en général cachée devant ou derrière le Soleil. En résumé, on ne peut la voir que quelques jours le matin, puis quelques jours le soir 44 jours plus tard, puis à nouveau le matin... Elle reste malgré tout plus ou moins noyée dans les lueurs du levant ou du couchant, toujours très basse sur l'horizon, et sa lumière doit traverser une épaisse couche d'atmosphère terrestre avant de nous parvenir. Elle en sort très dégradée. De petite taille, sa dimension angulaire reste de l'ordre de 10". Il est impossible d'y voir des détails, même avec de puissants instruments.



Mercure, la Lune et Vénus, calanque de Sugiton, Marseille 23/03/04 photo J. Gispert
Mercure est le petit point brillant juste au-dessus de la colline, noyé dans les dernières lueurs du Soleil

On peut photographier Mercure avec un appareil ordinaire sur pied, en faisant une pose de 3 à 5 secondes sur un film standard, ou un CCD de bonne qualité. Bien sûr, la planète n'apparaîtra que comme un point. Il est possible d'obtenir de beaux clichés si elle n'est pas seule dans le ciel au moment de la prise de vue (Vénus, Saturne, la Lune...).

**Passages de Mercure devant le Soleil**

Mercure passe entre la Terre et le Soleil environ tous les 3 mois; mais nous ne voyons pas un passage sur le disque solaire à chaque fois à cause de l'inclinaison entre les plans orbitaux de Mercure et de la Terre. Le passage n'a lieu que lorsque le Soleil, Mercure et la Terre sont sur la même ligne (intersection du plan orbital de la planète et de l'écliptique) ou *ligne des nœuds*.

Les passages de Mercure se produisent à des intervalles de 13 ans, 7 ans, 10 ans, 3 ans, et le cycle recommence. L'orientation de la ligne des nœuds fait que les passages de Mercure ont lieu aux alentours du 7 mai, ou du 9 novembre. Les derniers ont eu lieu le 12 novembre 1986, le 14 novembre 1999 et le 7 mai 2003.



Passage de Mercure du 8 mai 2003 photo J. Gispert

La planète est le petit point en bas de l'image. Les autres taches, au centre et au bord gauche, sont des taches solaires. On distingue nettement l'assombrissement au bord. Cette image montre bien l'énorme différence de taille entre le Soleil et la petite planète... La couleur du Soleil est produite par le filtre.

Pendant l'observation, on percevait très nettement que le disque de Mercure était plus noir que le centre des taches solaires. Ce dernier semble bien noir lors des observations courantes, mais la présence de Mercure montre que ce n'est qu'une illusion due au filtre utilisé, et que le centre des taches est seulement beaucoup moins brillant que la photosphère.

Voici les dates de quelques passages de Mercure, passés ou à venir :

| Date | Instant UT | distance | Durée | visible en |
|---|---|---|---|---|
| 9/5/1970 | 8 h 16 mn 11 s | 1' 47.05" | 7 h 57 mn 4 s | Europe, Afrique nord, Amérique nord |
| 10/11/1973 | 10 h 32 mn 15 s | 0' 22.27" | 5 h 31 mn 13 s | Europe sud, Afrique ouest, Amérique est |
| 13/11/1986 | 4 h 6 mn 60 s | 7' 46.43" | 4 h 49 mn 38 s | Amérique nord et centrale |
| 6/11/1993 | 3 h 56 mn 15 s | 15' 22.59" | 1 h 45 mn 54 s | Asie sud-est, Océanie |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 15/11/1999 | 21 h 40 mn 44 s | 15' 58.90" | 0 h 59 mn 52 s | Amérique Nord |
| 7/5/2003 | 7 h 52 mn 37 s | 11' 41.32" | 5 h 23 mn 59 s | Europe, Asie nord-ouest |
| 8/11/2006 | 21 h 40 mn 53 s | 6' 58.78" | 4 h 59 mn 38 s | Amérique sud |
| 9/5/2016 | 14 h 57 mn 14 s | 5' 11.48" | 7 h 33 mn 51 s | Europe, Afrique nord |
| 11/11/2019 | 15 h 19 mn 31 s | 1' 11.82" | 5 h 30 mn 11 s | Afrique sud, océan Indien |
| 13/11/2032 | 8 h 53 mn 38 s | 9' 27.98" | 4 h 27 mn 55 s | Amérique du sud |
| 7/11/2039 | 8 h 46 mn 1 s | 13' 38.12" | 3 h 0 mn 12 s | Amérique du sud |
| 7/5/2049 | 14 h 23 mn 48 s | 8' 24.81" | 6 h 45 mn 6 s | Europe, Asie |
| 9/11/2052 | 2 h 29 mn 22 s | 5' 14.56" | 5 h 14 mn 1 s | Europe, Asie ouest, Afrique nord |

Source : IMCCE. Tous les passages entre -2999 et 2999 : passages de Mercure.

**Observation spatiale**

Depuis la Terre, l'observation se limite essentiellement au radar, qui permet de déterminer les mouvements de la planète autour du Soleil, et sur elle-même. Les télescopes optiques permettent seulement d'obtenir des informations globales, par spectroscopie, sur la constitution chimique du sol. Il a fallu attendre la première sonde, Mariner 10, pour avoir des images, et une première approche de la géologie de Mercure. Lancée le 3 novembre 1973, pourvue de moteurs de correction de trajectoire seulement (pour des raisons de poids), cette sonde ne pouvait se mettre en orbite. Elle a seulement survolé Mercure trois fois, les 29 mars et 21 septembre 1974, et 16 mars 1975.

> Mariner 10 était une sonde légère, compatible avec les moyens de lancement de son époque. Pour se mettre en orbite autour de Mercure, après un lancement direct depuis la Terre (trajectoire de Hohmann), la vitesse d'arrivée est telle qu'il faut une impulsion de freinage de 13 km/s pour une insertion en orbite (il ne faut que 11,2 km/s pour quitter la Terre...). C'est pourquoi Mariner 10 n'a fait que passer, et que Mercure n'a pas été ciblée pendant longtemps après. Il a fallu les méthodes d'assistance gravitationnelle pour résoudre le problème, en acceptant un très long voyage...

Au cours de ces trois survols, elle a transmis 3.500 photos, à des résolutions différentes (de distances diverses), qui ont permi de cartographier 45 % de la surface (malheureusement, la résonnance orbitale de Mercure implique que les trois survols ont vu la même face de la planète).

Les apports essentiels de cette sonde sont :

- l'aspect lunaire de la surface : le sol est criblé de cratères ;
- la découverte d'un champ magnétique propre à la planète. Ce fut une surprise, car la lente rotation de Mercure, et son aspect lunaire (refroidi), faisait penser qu'il ne pouvait exister ;
- la faible densité de la croûte, alors que la densité moyenne de la planète est très élevée. Pour concilier les deux, il fallait un noyau très dense et très gros.

La sonde *Messenger* (*MErcury Surface, Space ENvironment, GEochemistry and Ranging*) a été lançée le 3 août 2004. Elle a utilisé largement l'assistance gravitationnelle, avec rebond sur la Terre, puis deux fois sur Vénus, et trois fois sur Mercure. Ces trois derniers survols (14 janvier 08, 6 octobre 08 et 29 septembre 09) participent à

l'étude de la planète, en apportant de nouvelles données. La mise en orbite a eu lieu le 18 mars 2011. Elle n'a nécessité qu'une implusion de freinage de 0,86 km $s^{-1}$, grâce à l'assistance gravitationnelle, au prix d'un voyage de 7 ans !

La sonde est équipée d'instruments scientifiques lui permettant d'analyser la composition chimique du sol, les ions qui constituent son exosphère, le vent solaire, la magnétosphère, et bien sûr des caméras permettant d'imager le sol à haute résolution afin de comprendre la géologie, et la formation de la planète. Les comptages de cratères peuvent, en particulier, donner de précieux renseignements sur l'âge des terrains. La publication de résultats scientifiques a commencé. Les plus importants sont donnés plus loin.

Avant l'ère spatiale, Mercure était quasiment inconnue. Après les trois sruvols de Mariner 10, on connaissait 45 % de sa surface, mais cette sonde était légère, et ne disposait que de peu d'instruments scientifiques. Les choses changent radicalement maintenant avec l'entrée en course de Messenger.

Le voyage vers Mercure est très coûteux (voir mécanique), c'est pourquoi cette planète avait été pratiquement délaissée.

Voyage de Messenger vers Mercure :

- Lancement le 3 août 2004 sur une orbite proche de celle de la Terre.
- Survol de la Terre un an plus tard, le 2 août 2005, ce qui lui a donné une impulsion pour aller vers Vénus (abaissement du périhélie).
- Premier survol de Vénus le 24 octobre 2006, ce qui a abaissé son aphélie.
- Second survol de Vénus le 5 juin 2007, qui a propulsé la sonde vers Mercure (abaissement du périhélie).
- Premier survol de Mercure le 14 janvier 2007 (premières photos de la planète au passage). Ce survol a abaissé l'aphélie de l'orbite.
- Second survol le 6 octobre 2008. La sonde diminue sa vitesse par rapport à la planète.
- Troisième survol le 29 septembre 2009, qui réduira encore la vitesse de la sonde.
- Enfin, satellisation autour de Mercure le 18 mars 2011...

Descendant vers le Soleil, la sonde augmente sa vitesse orbitale. Donc, elle fait le tour du Soleil en un temps de plus en plus bref (88 jours au niveau de l'orbite de Mercure). Elle atteint la vitesse maximale de 63 km/s par rapport au Soleil lors de sa descente vers la planète. Or la vitesse orbitale de Mercure n'est que de 47,9 km/s. La sonde doit donc beaucoup ralentir pour se mettre en orbite !

## *Atmosphère*

Mercure ne possède pas d'atmosphère véritable, car sa masse (donc sa gravité) est trop faible pour **retenir** une enveloppe gazeuse. La vitesse de libération à la surface de Mercure est seulement de 4,3 km/s. Tout corps atteignant cette vitesse verticalement à sa surface la quitte pour toujours. C'est le cas en particulier pour un atome de gaz de son atmosphère. Or la température très élevée à la surface de Mercure donne à son atmosphère éventuelle une très haute température, et donc une grande vitesse d'agitation à ses atomes. Ceux-ci atteindront bien vite des vitesses supérieures à la vitesse de libération et s'échapperont. On le voit, Mercure n'est pas capable de retenir durablement une atmosphère.

Cependant, la sonde Mariner 10 a détectée une très légère atmosphère résiduelle ; on préfère parler d'*exosphère*. Si on veut lui assigner une pression, il faut dire qu'elle est 100.000 milliards de fois plus faible que celle de l'atmosphère terrestre... Elle est composée essentiellement d'hydrogène, d'hélium, d'oxygène, de sodium, de

potassium et d'argon. Le sodium et le potassium sont arrachés au sol par les particules énergétiques du vent solaire.

Mercure a dû perdre son atmosphère primitive très tôt, bien avant la fin du bombardement météoritique. De ce fait, les cratères visibles à sa surface ne semblent pas avoir été altérés par une quelconque érosion.

Sa température superficielle atteint les 430 au soleil, mais descend à -185 dans la nuit ! Cet énorme écart de températures est dû au manque d'atmosphère (qui sinon transporterait la chaleur d'un côté à l'autre par le mécanisme des vents). Lorsque, dans le mouvement autour du Soleil, une roche passe du jour à la nuit ou de la nuit au jour, sa température change de presque 600 ! Les phénomènes de dilatation et de contraction cassent la roche, et produisent une poussière qui doit couvrir le sol. Cette poussière est nommée *régolithe*, et on en trouve sur la Lune, car les conditions y sont assez semblables. Une autre forme d'érosion est aussi produite par les micrométéorites, qui parviennent au sol puisqu'il n'y a pas d'atmosphère. Enfin, des particules rapides éjectées par le Soleil viennent encore fragmenter les roches.

## *Constitution*

Mercure est une planète tellurique, la plus proche du Soleil. Elle est donc constituée essentiellement de roches, c'est-à-dire de silicates, avec un noyau de fer-nickel.

Mercure n'ayant pas de satellite, sa masse a été déterminée par les perturbations qu'elle inflige à Vénus. Mais c'est une petite planète, et ces perturbations sont très faibles. La masse ainsi mesurée n'est pas très précise. C'est donc lors des survols par Mariner 10 qu'on a pu déterminer sa masse précisément, en analysant la trajectoire de la sonde. La masse de Mercure est de 0,055 fois celle de la Terre.

Son diamètre ayant par ailleurs été mesuré précisément, on en a déduit sa masse volumique : elle vaut 5,43 g/cm$^3$. Cette valeur est à rapprocher de celle de la Terre, 5,52 g/cm$^3$. Mais la masse de la Terre étant bien plus grande, il s'y produit une compression au centre, et certains matériaux sont comprimés. De ce fait, leur densité augmente. On peut calculer quelle serait la masse-volumique des planètes sans cette compression. On parle de la *masse volumique décomprimée*. On trouve de l'ordre de 4 seulement pour la Terre, et de 5,5 pour Mercure.

Une telle densité implique pour Mercure la présence d'un noyau très important constitué de matériaux lourds, fer et nickel, comme pour la Terre. Ce noyau a un diamètre estimé de 70 % du diamètre de la planète. C'est la planète du système solaire qui contient le plus de fer (au moins relativement à sa taille). On estime que la densité centrale de la planète atteint 9,8 g/cm$^3$.

## *Surface*

### Généralités

**Cratères, âge -** Mercure présente des cratères semblables à ceux de la Lune sur toute sa surface. Les âges de ces cratères sont variés : certains, les plus vieux, présentent des remparts érodés par les météorites, alors que d'autres ont des remparts acérés, et sont donc beaucoup plus jeunes. Ces derniers montrent aussi des rayons de couleur claire et issus du centre. On trouve de tels rayons autour du cratère de Copernic sur la Lune.

Le Bassin de Caloris, creusé par un violent impact, mesure 1.550 km de diamètre, et il est cerné par des anneaux concentriques atteignant 3.000 mètres d'altitude. Son sol est essentiellement lisse, mais présente des rides concentriques. Il a été produit par des coulées de lave à la suite de l'impact. Au point antipodal de Caloris se trouve une zone de fractures qui ont été provoquées par les ondes sismiques lors de l'impact de la météorite qui a creusé Caloris. Ces ondes, se propageant depuis l'impact, ont fait le tour de la planète et se sont focalisées dans cette zone qui couvre à peu près 100 km. Des éjecta sont visibles jusqu'à 800 km du centre du bassin.

Les plaines de Mercure sont pour certaines très vieilles, et très cratérisées. Formées au début du système solaire, elles ont subi le bombardement intense des innombrables

météorites qui encombraient le ciel. D'autres plaines sont beaucoup moins cratérisées, ce qui indique une formation plus récente : les plus grosses météorites étaient déjà tombées, il en restait beaucoup moins et de moins grosses. Aussi, la cratérisation est beaucoup moins intense. Les comptages de cratères constituent d'ailleurs la méthode essentielle de datation des terrains sur les planètes où des sondes ne se sont pas encore posées, pour analyser des échantillons de terrains.

**Volcanisme -** On voit aussi sur le sol de Mercure de nombreuses coulées de lave, qui ont dû se produire à la suite des impacts de météorites. Depuis le survol par Messenger, on a la preuve qu'il existe de vrais volcans sur Mercure. Mais on ne sait pas encore s'ils ont été produits sous le choc des impacts ou non.

**Falaises et failles -** D'autres éléments de la géologie mercurienne sont très importants, et caractéristiques de cette planète : de nombreuses falaises et failles qui se sont formées sous la poussée des terrains avoisinants. Les failles recouvrent de nombreux cratères, ce qui montre qu'elles sont plus jeunes. L'explication de ces failles tient dans un rétrécissement de la planète, qui a dû perdre 1 à 2 kilomètres de diamètre au cours de son refroidissement, et après la formation du noyau. La matière qui la composait, à l'état liquide ou pâteux, était dilatée par la chaleur. Au cours du refroidissement, cette matière s'est donc contractée, et la planète était alors trop grosse. La croûte a dû se refroidir la première, étant en contact avec l'espace froid. Elle était soutenue par un noyau encore chaud, donc dilaté. Lorsque ce noyau s'est à son tour contracté, la croûte s'est trouvée trop grande, mal soutenue de l'intérieur.Il s'est produit alors des effondrements en certains endroits, et ailleurs des compressions (si le diamètre de la sphère diminue, sa circonférence diminue aussi, donc les terrains se trouvent comprimés). Tout ceci a produit les falaises qu'on observe de nos jours, hautes de plusieurs milliers de mètres et longues de centaines de kilomètres, et de manière générale des rides sur le terrain.

On peut rapprocher Mercure d'un des satellites de Jupiter qui a subi un processus exactement inverse : en refroidissant, il s'est dilaté, ce qui a produit des accidents de terrain de même nature.

**Glace -** En 1991, on a découvert que Mercure pourrait avoir de la glace aux pôles. Des études ont été faites par radar depuis la Terre : un instrument impressionant a été réalisé en couplant le radiotélescope de Goldstone, avec son antenne de 70 m de diamètre, avec deux autres instruments, celui de Green Bank et celui d'Arecibo. L'antenne de Goldstone a été utilisée en émission, avec une forte puissance, afin que l'es ondes atteignent la planète (100 millions de km au moins), s'y réfléchissent, et reviennent sur Terre avec une puissance suffisante pour être analysables.

Une surface d'une centaine de kilomètres de diamètre serait recouverte au pôle nord, un peu moins au pôle sud. Les échos radar renvoyés par la planète montrent une intensité explicable par leur réflexion sur de la glace.

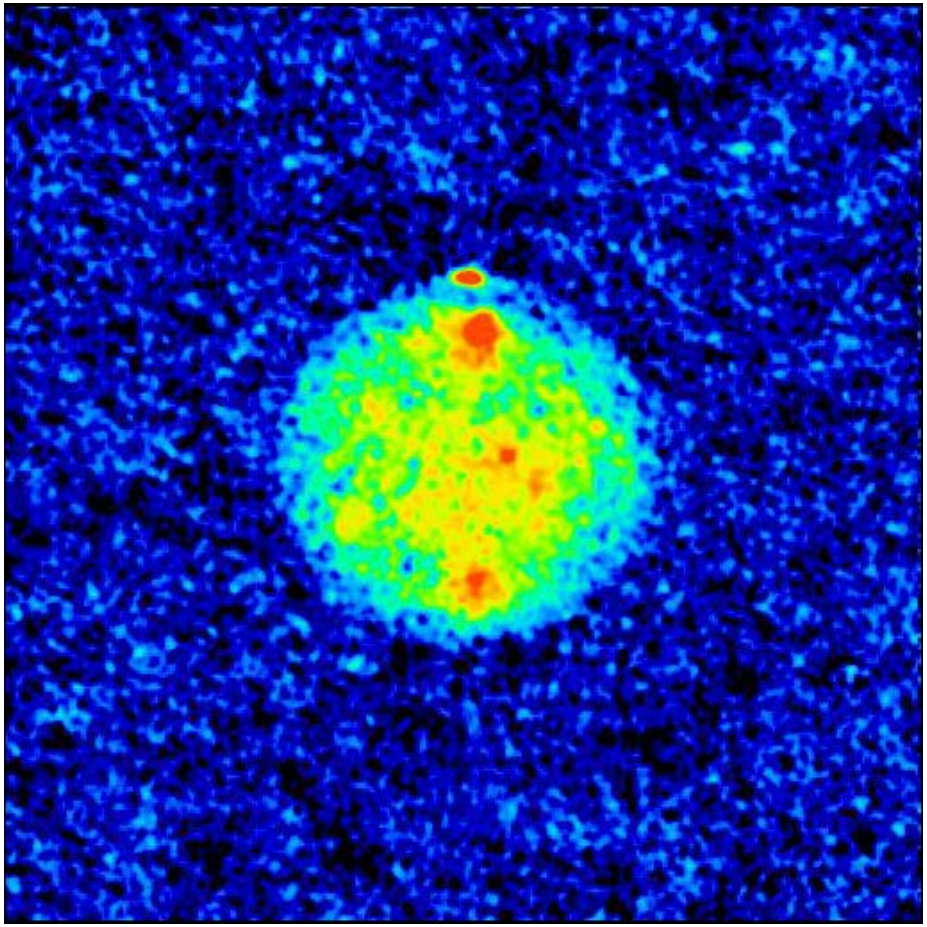


Photo radar de Mercure

Vu les conditions qui règnent à la surface de Mercure, la présence de glace n'était absolument pas envisagée ! Il faut donc trouver une explication.

La photo a été obtenue par radar en combinant le radiotélescope d'Arecibo (300 m de diamètre) pour envoyer un faisceau radar puissant vers Mercure (plus de 100 millions de km), et le VLA qui a capté l'écho. L'image n'est pas de très bonne qualité, mais elle montre tout de même clairement un écho particulièrement puissant au pôle nord, et un autre un peu moins brillant proche du pôle sud. Ces échos peuvent avoir plusieurs explications possibles, mais la plus probable, en considérant la localistation et la réflectivité, est donnée par une surface de glace.

L'axe de rotation de la planète est presque parfaitement perpendiculaire à son plan orbital (2°). Il s'ensuit qu'aux pôles, le Soleil est perpétuellement à l'horizon, et la température moyenne y est de -135 . Il suffit alors qu'il y ait un cratère, dont le fond est un peu plus bas, et protégé par le rempart, pour que le Soleil n'y atteigne jamais le sol. Alors, les très basses températures y sont constantes, et la glace peut y subsister, tout au moins ne pas y être rapidement détruite par le Soleil. Mais il y a un autre problème, lié à l'absence d'atmosphère. Exposée au vide de l'espace, la glace devrait se sublimer, même à très basse température. Les expériences de laboratoire montrent que 2 mètres de glace se subliment tous les 1.000 ans à -135 . Autrement dit, il ne devrait plus en rester depuis longtemps. Mais à -160 , la vitesse de sublimation est considérablement plus basse : 1 mètre seulement se sublime en un milliard d'années. Il est possible que la température soit assez basse au fond des cratères pour stabiliser la glace. Il est aussi possible qu'une source d'eau soit disponible dans la planète : une très lente remontée d'eau pourrait alors renouveler la glace qui se sublime.

**Composition chimique -** D'après sa forte densité, nous avons déjà envisagé que Mercure contienne un gros noyau de Fe-Ni. Mais un autre argument est important : les

éléments légers qui étaient présents dans le nuage primitif avant la formation des planètes n'ont pu subsister si près du Soleil. Ils ont été chassés plus loin, dans une zone moins chaude. Mercure doit donc en contenir moins que les autres planètes telluriques, ce qui contribue à augmenter sa masse-volumique. La croûte doit être constituée essentiellement de silicates.

**Champ magnétique -** La sonde Mariner 10, la seule à s'être approchée de Mercure avant 2011, a noté la présence d'un faible champ magnétique autour de la planète, dont l'intensité est de l'ordre de 1/100$^{e}$ de celui de la Terre, et qui est incliné de 11° par rapport à l'axe de rotation. Ce champ magnétique, bien que très faible, est suffisant pour piéger des particules du vent solaire (10 fois plus dense près de Mercure qu'au voisinage de la Terre) générant ainsi une magnétosphère. Il est très dépendant de l'activité solaire en raison de la proximité de ces deux astres et varie sans cesse selon l'activité solaire et suivant la position de la planète sur son orbite (périhélie, aphélie).

Ce champ peut avoir deux explications différentes :

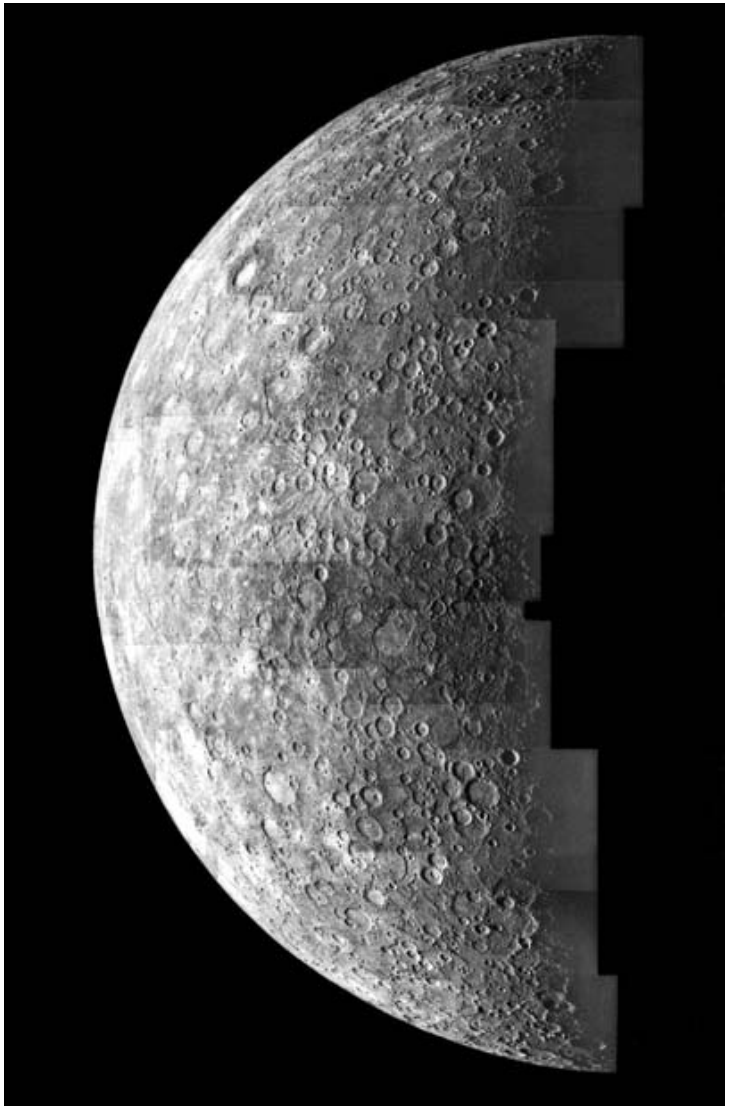
- le noyau n'est pas encore refroidi, et des mouvements de convection produisent un effet dynamo. On conçoit alors le noyau stratifié en une partie centrale liquide, et une partie externe solide. La lenteur du refroidissement en dépit de la petite taille de la planète pourrait être due dans ce cas aux effets de marée provoqués par le Soleil tout proche ;
- la planète s'est solidifiée, et le magnétisme est dû à l'orientation fossile des roches magnétiques : lorsque la planète était encore en fusion, elle possédait un champ magnétique, qui a orienté les cristaux magnétiques à l'intérieur de la lave. Lorsque la lave s'est refroidie, les cristaux ont gardé cette orientation commune, et leur magnétisme cumulé produit le faible champ actuel (magnétisme rémanent).

**Le noyau est liquide -** Pour justifier un noyau liquide, la petite taille de Mercure ne permet pas d'invoquer la désintégration nucléaire pour maintenir une température centrale élevée, comme dans le cas de la Terre. Mercure n'avait pas assez d'éléments radioactifs à longue période pour cela. Mais de récentes observations faites par radar (Goldstone, Green Bank et Arecibo ; Goldstone émettant un signal puissant vers Mercure, l'écho reçu par les trois instruments) ont mesuré la vitesse de rotation de Mercure avec une très grande précision (un cent millième). On a ainsi mis en évidence de petites variations, qui ne peuvent s'expliquer que par l'existence d'un noyau liquide (par analogie, pensez à faire tourner sur la table un œuf dur et un œuf cru). La question est maintenant : comment un tel noyau peut-il exister ?

S'il était constitué de fer-nickel, comme on pouvait le penser, il serait solidifié à l'heure qu'il est… Cependant, par analogie, considérons la fabrication du verre. Le verre est fait essentiellement de silice (sable) qui fond à 1.700 . Faire fondre de la silice pure est un exploit ! (les astronomes le font, tout au moins les verriers qui travaillent pour l'astronomie). Mais il y a une solution simple, qui a été trouvée empiriquement par les verriers de l'antiquité : on mélange le sable avec du natron (carbonate de calcium), et le miracle s'opère. Le mélange fond à 1.000 , ce qui est une température bien plus facile à atteindre et à maintenir. L'élément ajouté s'appelle un *fondant*. Si on considère le fer, sa température de fusion est de 1.800 . Mais si on ajoute certains ingrédients, elle baisse. On peut imaginer par exemple que le noyau de Mercure contienne une petite proportion de soufre. Ceci suffirait à abaisser le point de fusion du mélange suffisamment pour que le noyau de la petite planète soit encore liquide aujourd'hui.

Le problème du champ magnétique et de la vitesse de rotation variable serait ainsi résolu.

## *Géologie*



## Vue générale

Cette photo est une mosaïque prise par la sonde américaine Mariner 10 d'une distance de 75.000 km. Lancée en 1974, la sonde est passée à proximité de Vénus, dont elle a pris quelques photos, puis a survolé Mercure 3 fois, en mars et septembre 1974 et en mars 1975.

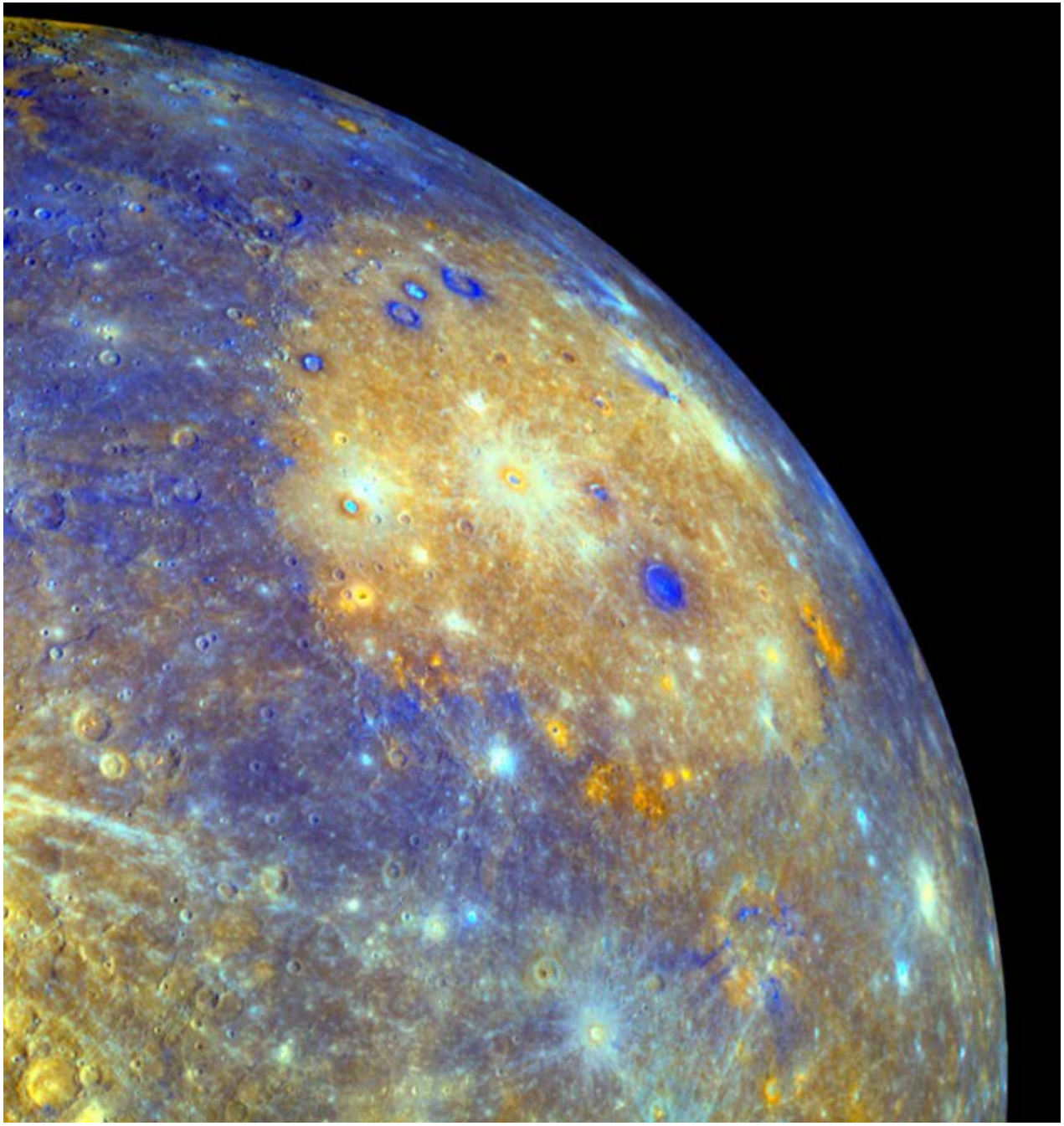
Sous son aspect général, la planète ressemble fort à la Lune. Toutes deux de petite taille, elles n'ont pas pu retenir d'atmosphère, ce qui se voit sur le cliché : remarquez le bord parfaitement net.

Il s'en est suivi une absence presque totale d'érosion, et donc la préservation des cratères formés il y a très longtemps, juste après la formation du système solaire.

La surface est régulièrement cratérisée, et les cratères sont de toutes tailles. Comme sur la Lune, on voit d'assez nombreux pitons centraux. On distingue aussi des traces d'éjectas plus clairs autour de certains cratères, notamment autour du cratère Kuiper vers le centre de l'image.

Photo Mariner 10, NASA

La zone la plus intéressante aujourd'hui est le bassin de Caloris, qui avait été découvert en partie par Mariner 10, et qui vient d'être entièrement dévoilé par les deux premiers survols de Messenger.



La photo est en fausses couleurs : la sonde possède des caméras qui photographient à travers 11 filtres différents. L'étude des différences entre les photos réalisées à travers ces filtres permet de déterminer des propriétés du sol. Elle montre en particulier des différences de composition minéralogique.

Le sol de Caloris est ici coloré en orange, alors que le reste de la planète est bleuté.

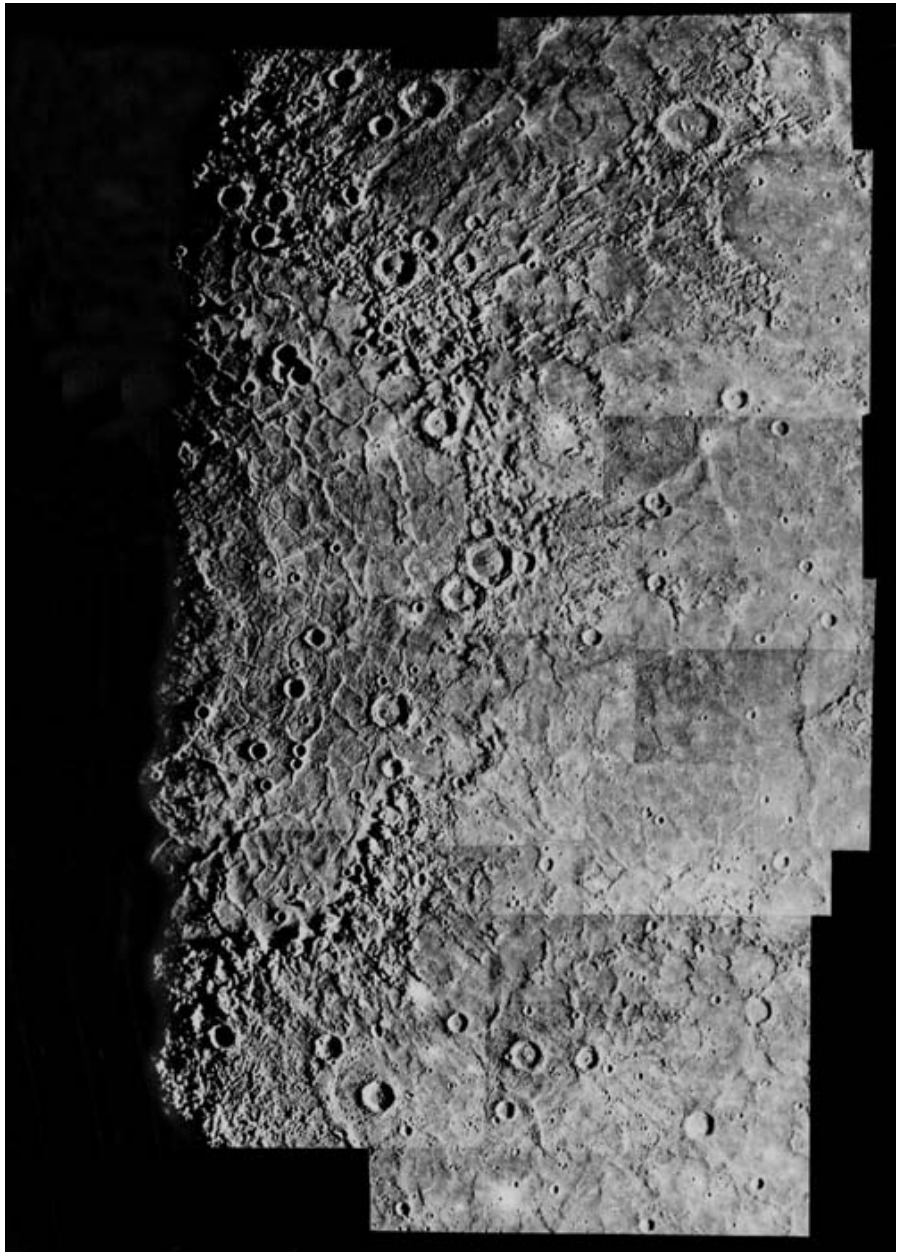
La découverte, peut-être la plus importante, qui a été faite dans cette région est la présence d'un volcan. Il apparaît en orange vif sur la gauche du bassin, sur le bord.

Remarquez aussi le cratère Cunningham, qui présente des rayons de couleur claire.

Plus à gauche, le cratère Kertesz montre un fond bleu, alors que les terrains environnants sont orange.

Enfin, en haut du bassin, on voit le cratère Sander qui montre un fond encore plus lumineux.

Les études faites sur ces photos ont servi de guide pour affiner le programme d'observation de la sonde après sa mise en orbite autour de Mercure.



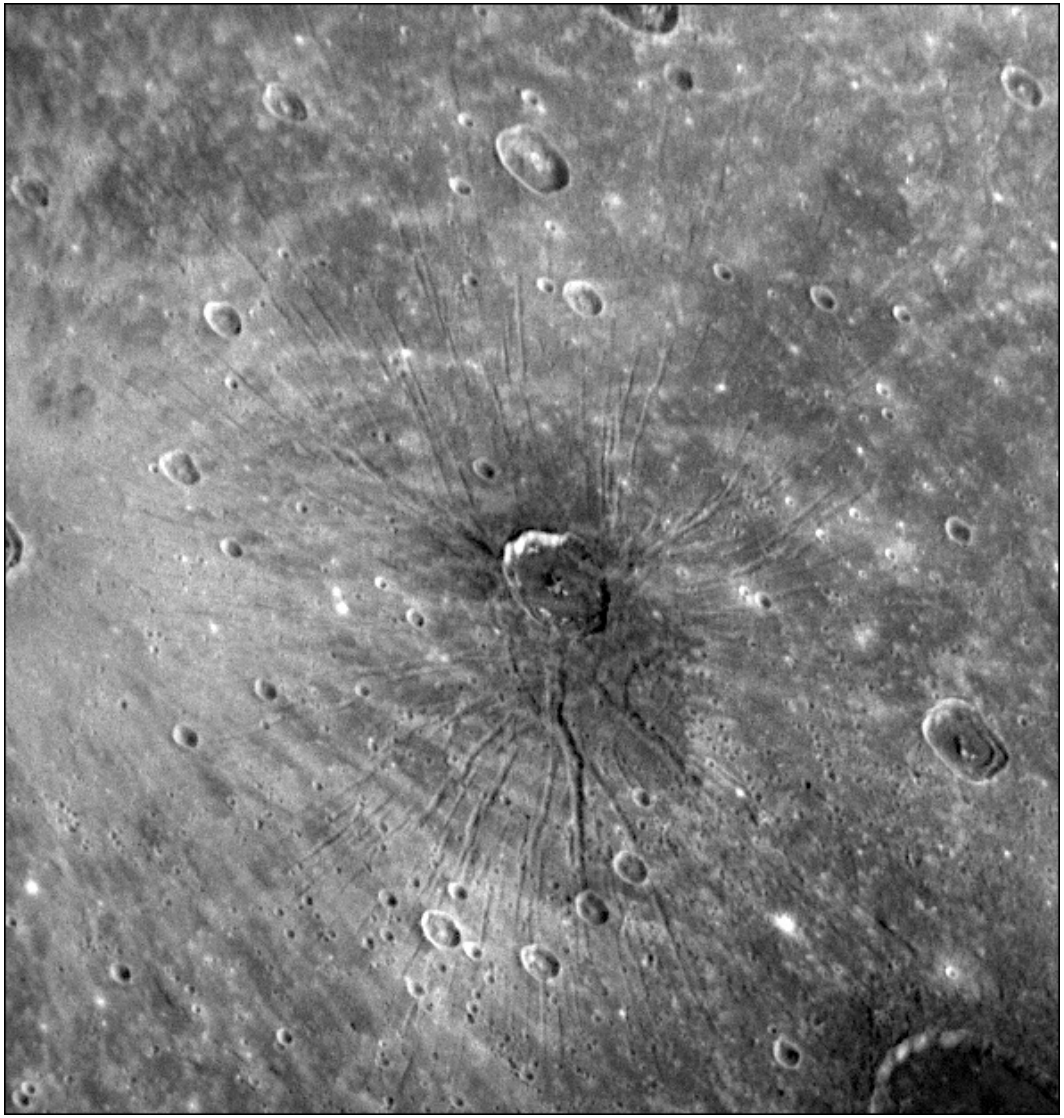
**Caloris**

Cette photo montre la moitié du bassin Caloris, qui se trouve sur la gauche de l'image. Ce bassin a été formé par l'impact d'un objet de grandes dimensions. Il a produit un série d'anneaux concentriques dont on voit une partie sur l'image.

L'intérieur du bassin, moins cratérisé que les régions l'entourant, est un peu plus jeune. De la lave s'est épanchée lors de l'impact, puis s'est figée en formant une surface plane. Par la suite, d'autres impacts moins importants ont formé par dessus de nouveaux cratères.

Les anneaux concentriques ont dû se former dans un matériau visqueux, dans lequel se sont propagées des ondes. Ces ondes, partant du point d'impact, se sont propagées en s'en éloignant, ont franchi l'équateur de la planète, puis ont convergé au point exactement opposé. En ce point, on observe les traces de l'onde de choc produite.

NASA, Atlas of Mercury, 1978



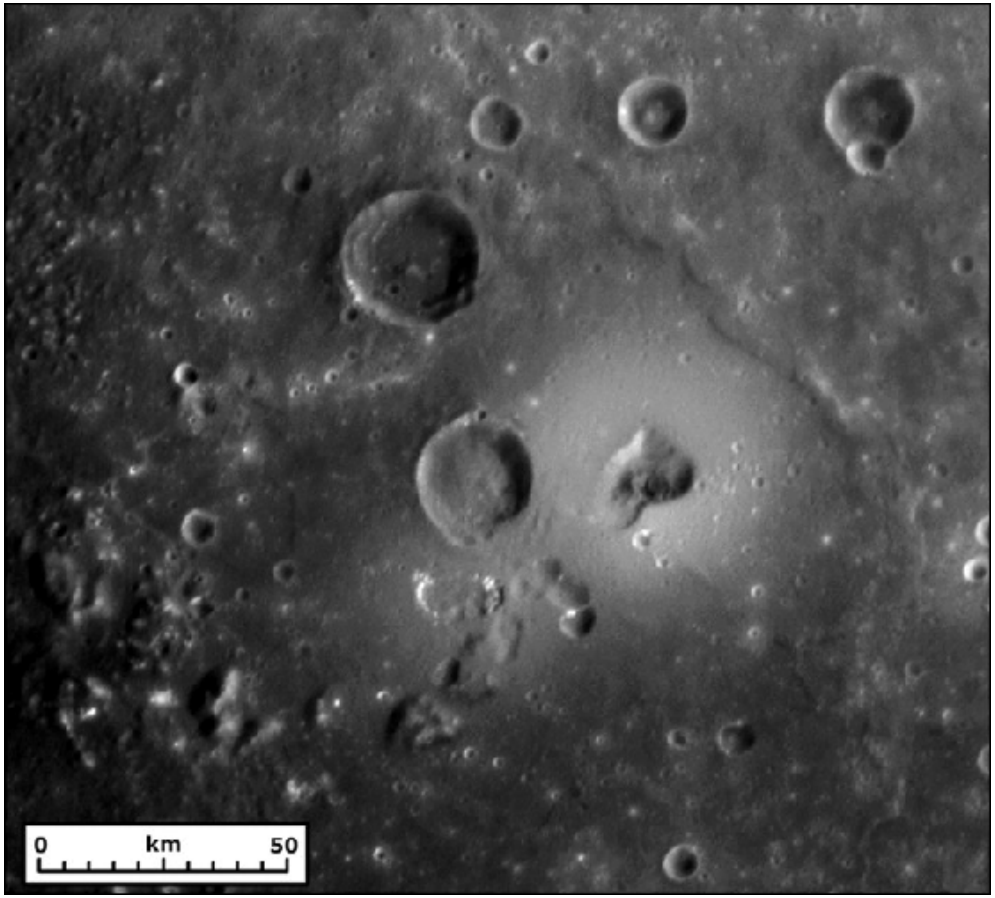
**Cratère Apollodorus, et Pantheon Fossae**

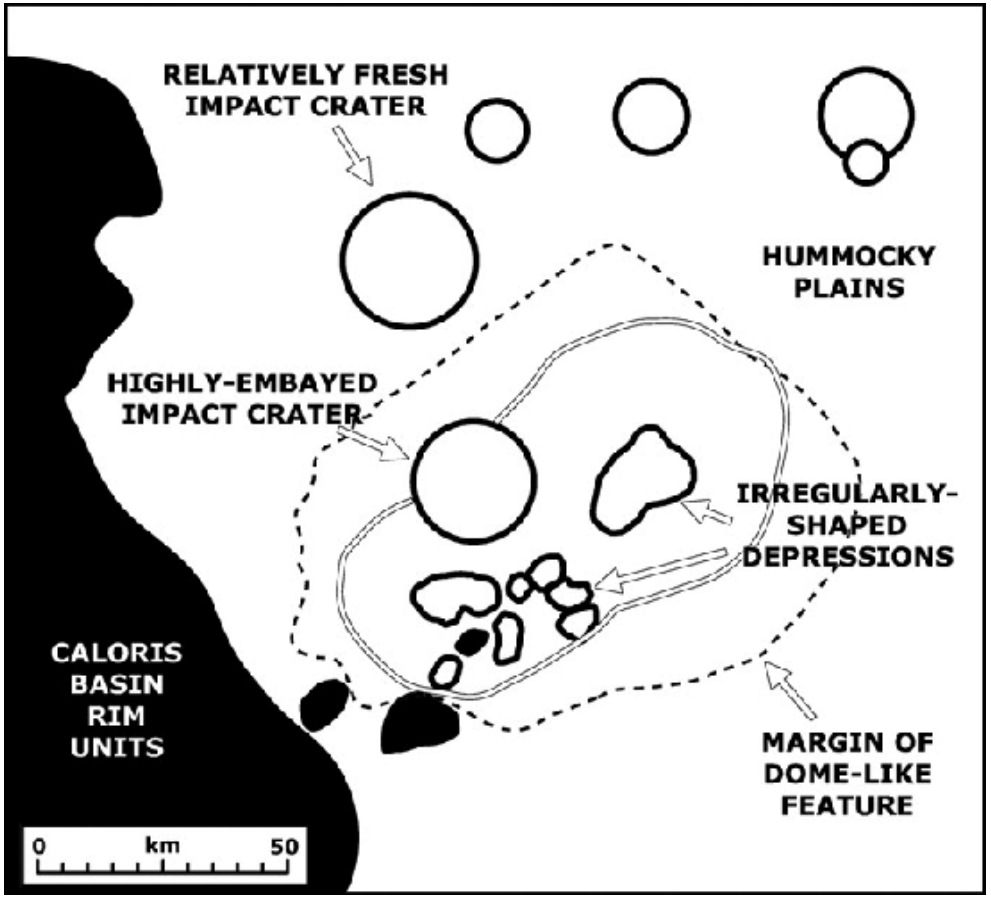
Ce beau cratère est situé au centre de Caloris Basin. Il n'avait pas été photographié par Mariner 10. Surnommé provisoirement l'araignée, en raison de son apparence, il présente des caractères jusque là inconnus sur Mercure. Les grabens (failles) qui irradient depuis le cratère ont donné le nom définitif : le Panthéon, à Rome, présente un dôme classique, avec une ouverture circulaire au centre, d'où partent des nervures délimitant un plafond en caisson. Le cratère et ses grabens évoquent cette structure. Apollodorus était l'architecte du Panthéon.

Apollodorus mesure 41 km de diamètre. La question est de savoir si l'impact a joué un rôle dans la formation des grabens, ou si le cratère résulte d'un impact indépendant.

Le grand cratère vu partiellement en bas à droite de l'image est Atget. On doit noter la coloration très sombre de son plancher, qui contraste fortement avec le matériau du fond d'autres cratères non loin, toujours dans Caloris.

Photo Messenger, survol du 14/01/08, NASA



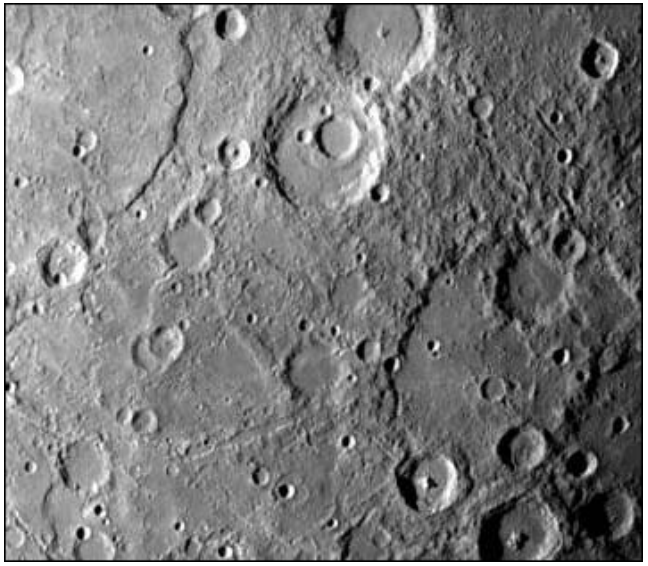

Cette photo montre le premier volcan photographié sur Mercure. Elle a été prise par Messenger le 14 janvier 2008, d'une altitude de 10.500 km, au cours du premier survol de Mercure. Les dépressions irrégulières visibles sont des cheminées volcaniques. On distingue également le flot de laves, qui se sont répandues autour du volcan, sans aller trop loin. Le cratère d'impact situé juste à gauche du volcan est partiellement rempli de laves. Le volcan se situe au bord interne du bassin de Caloris.

L'aire montrée sur cette photo mesure 460 par 640 km, elle est vue d'une distance de 78.000 km. La résolution est de 1,7 km par pixel.

En haut et à gauche on voit l'escarpement Discovery qui s'étend sur plusieurs centaines de km et atteint 3 km de hauteur. Ces escarpements sont expliqués dans le texte plus haut.

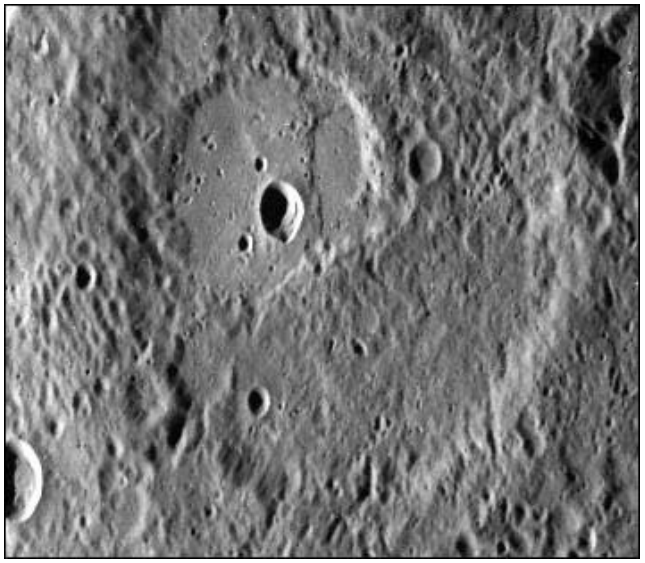
A droite de l'escarpement, on voit un grand cratère de 120 km de diamètre, dans lequel se trouve un cratère de 40 km, dont le rempart a été encore modifié par un troisième impact plus récent.

En bas à droite, un grand bassin de 240 km de diamètre a été recouvert par de nombreux impacts ultérieurs. Son rempart a été dégradé par les chutes de petites météorites.



En bas à gauche, juste dans le coin, on distingue une chaîne de petits cratères, produits par des chutes secondaires lors d'un gros impact en dehors de l'image.

NASA/JPL/Northwestern University

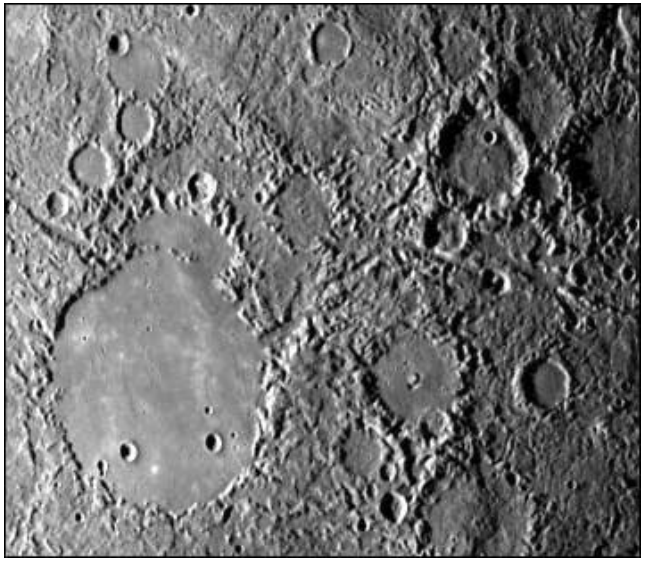


Cette photo montre bien les âges des différents cratères, depuis le vieux bassin érodé (par les impacts ultérieurs), jusqu'aux trois petits cratères intérieurs manifestement jeunes (car non érodés).

On notera de plus un escarpement à l'intérieur du cratère d'en haut, d'une dizaine de km de largeur. Cet escarpement est limité en bas par le rempart du cratère. Ceci montre qu'il est postérieur à la formation du cratère, et qu'il provient probablement d'un écroulement.

NASA/JPL/Northwestern University

A gauche, un grand bassin dont les bords sont très dégradés, mais dont le fond est bien plat. Il a probablement été rempli par une coulée de lave.



Les petits cratères sont rares sur ce terrain, ce qui atteste de sa jeunesse.

Remarquez les vallées qui coupent certaines parties de l'image.

NASA/JPL/Northwestern University

## *Résultats depuis la satellisation*

La sonde Messenger est maintenant en orbite autour de Mercure, depuis le 18 mars 2011, et les données se sont accumulés. Il faut du temps pour les dépouiller, les traiter et les comprendre. Les premiers résultats ont été publiés, et une collection de 7 articles est parue dans la revue *Science* le 21 octobre 2011. Ils ne modifient pas de façon critique les résultats exposés plus haut, mais ils affinent bien des points, contraignant bien davantage les modèles, et donc éliminant certaines hypothèses. En particulier, nous avons maintenant une vision un peu renouvelée de la formation de la planète, et de sa constitution par rapport aux trois autres planètes telluriques.

La première constatation a été relative au grand bassin d'impact Caloris. Lors des survols de Mariner, il n'était visible qu'en partie, et son diamètre a été évalué à 1.300 km. Messenger a montré qu'il était en réalité bien plus grand : 1.550 km de diamètre, comme indiqué plus haut.

### Les instruments

Pour présenter ces résultats, il est nécessaire de connaître un peu les instruments qui sont à bord, et qui nous distillent leurs obervations. Ceci permet de comprendre les possibilités et les limites de la sonde. Les principaux instruments sont :

- un spectromètre à neutrons ;
- un spectromètre gamma ;
- un spectromètre à rayons X ;
- un spectromètre infrarouge et ultraviolet ;
- des spectromètres à particules et à plasma ;
- un magnétomètre ;
- un altimètre laser ;
- des caméras.

Le simple examen de cette liste montre que **les spectromètres** se taillent la part du lion. La raison est simple. Ils permettent d'analyser à distance le spectre de la surface,

avec ses propriétés d'absorption, et de le comparer à des spectres connus. Comme on détermine la composition des étoiles par spectroscopie, on peut mesurer la *composition élémentaire* du sol de la planète. La composition élémentaire est le pourcentage de chaque élément chimique qui entre dans la composition du sol. Ce sont les abondances des divers éléments. A partir de là, on essaye de reconstituer la *composition minéralogique* du sol, c'est-à-dire la façon dont ces éléments peuvent être associés en molécules pour produire des minéraux. Il y a en général plusieurs solutions, ce qui introduit des ambiguïtés : plusieurs modèles différents peuvent s'accorder aux même données. Il ne faudra donc pas attendre des résultats définitifs de ces observations, mais un nombre de modèles d'autant plus petit que les données sont plus complètes.

Les mesures sont souvent relatives. On détermine l'abondance de deux éléments l'un par rapport à l'autre. Le silicium est le constituant du sable de nos plages, du quartz des granites, plus généralement des silicates. C'est un élément très abondant, aussi l'utiliste-t-on souvent comme étalon, en rapportant les abondances des autres éléments à la sienne. On peut ainsi donner le rapport Ca/Si, ou Al/Si. Ces mesures sont plus précises que des mesures absolues.

**Le magnétomètre** est destiné à revoir les résultats de Mariner 10. Le champ magnétique est important à deux titres : d'abord parce qu'il interagit avec le vent solaire (particules chargées), ensuite parce que sa présence doit s'expliquer. La seule explication valable actuellement est l'effet dynamo produit par un noyau liquide en rotation. Mais les théories antérieures ne le prévoyaient pas, parce que Mercure semblait refroidie depuis longtemps.

**L'altimètre et les caméras** permettent de cartographier la planète en 3D, et donc de produire une carte topographique. Les photos montrent également de précieux détails géologiques de la surface, permettant de caractériser les formations et l'évolution de la planète.

**Volcanisme**

Le volcanisme a été mis en évidence lors des survols de Mercure par Messenger. Mais depuis la mise en orbite, on a pu constater l'extension globale de ce phénomène.

La zone polaire nord montre un grand bassin d'impact nommé *Goethe*, et des plaines lisses couvrant 6 % de la surface de la planète. Ces plaines sont d'origine volcanique, produites par des épanchements de lave fluide. Les comptages de cratères montrent que leur âge est de l'ordre de 3,8 milliards d'années, indiquant qu'elles se sont formées juste après la fin du *Bombardement Tardif*. Toutes ces plaines sont de même nature, et leur couleur est différente de celle des terrains contigus beaucoup plus cratérisés. On y voit des cratères fantômes, presque totalement remplis par la lave qui les a entourés. Seuls les sommets du rempart affleurent. Certains de ces cratères, de grande taille, permettent d'estimer l'épaisseur de la lave entre 1 et 2 kilomètres.

La question est de savoir comment se sont formées ces plaines. Par un impact, ou par volcanisme ? Leur aspect rappelle celui de certaines mers lunaires, creusées par de violents impacts ayant réveillé un volcanisme par l'apport de chaleur. Cette possibilité n'est donc pas exclue. Mais par ailleurs, on recherche des fissures, des cheminées volcaniques ayant pu alimenter les écoulements de lave, ainsi que ces écoulements eux-même. Bien que les caméras soient à même de les repérer, aucun n'a été observé dans les plaines du nord.

Les plaines ont été recouvertes par des laves fluides, chaudes, jaillissant en abondance. Ces laves ressemblent aux basaltes et aux komatiites terrestres. Il fallait de grands volumes disponibles en un temps géologiquement bref pour couvrir de telles surfaces. Des édifices volcaniques ont été trouvés autour des plaines : des creux de 5 à 10 km de diamètre **sans rempart**, ne ressemblant pas à des cratères d'impact (par exemple celui-ci, vu plus haut). Ce sont probablement des effondrements, produits par l'affaissement d'une chambre magmatique proche de la surface, au cours de son refroidissement. C'est le mécanisme par lequel se forment les caldeiras. Mais avant de s'effondrer, ces fissures ont sans doute été la source des flots de lave.

On observe aussi des collines de forme allongée, comme une larme. Ces formes sont visibles également sur Mars, mais c'est un écoulement d'eau qui les y a produites. Sur Mercure, ce sont des laves fluides qui ont sculpté les reliefs antérieurs.

Enfin, les plaines s'arrêtent par des bourrelets lobés laissés, lorsque les laves, déjà refroidies, n'avaient plus la fluidité suffisante pour couler.

Source : *Flood volcanism in the northern high latitude of Mercury revealed by MESSENGER*. J. W. Head & al. Science vol. 333 september 2011

**Composition du sol**

Le spectromètre X détecte la fluorescence X du sol, induite par le rayonnement X du Soleil. L'influence de ces rayons se fait sentir sur quelques micromètres de la surface, c'est donc une analyse extrêmement superficielle qui est obtenue. Le rayonnement X du Soleil est très variable, et son intensité affecte les résultats. Pour standardiser les différentes mesures, il faut connaître l'intensité du rayonnement qui les a produites. Pour cela, un détecteur a été placé sur la sonde, en direction du Soleil, qui mesure l'intensité du rayonnement excitateur. La comparaison des mesures à l'intensité de l'excitation qui les a produites permet de normaliser les données en provenance du sol.

Mais la fluorescence est faible, et ne permet de mesurer que quelques éléments chimiques en période d'activité normale du Soleil. Aussi, les données les plus importantes sont-elles collectées pendant les éruptions solaires, lorsque le rayonnement excitateur est à son maximum.

Enfin, la surface concernée par chaque mesure varie en fonction de l'altitude de la sonde, qui va de 50 à plus de 3.000 km.

La nature du sol est globalement semblable à celle de la Terre ou de la Lune. Mais la sonde a observé des différences très significatives, sur les abondances de certains éléments.

**Magnésium, aluminium, calcium -** L'abondance du magnésium est plus élevée que sur la Terre et sur la Lune ; par contre, les abondances d'aluminium et de calcium sont plus faibles. Ces différences indiquent une plus faible proportion de feldspath plagioclase sur Mercure. C'est donc une première indication minéralogique : les terres hautes de la Lune en sont riches, parce que ces minéraux légers ont flotté sur un océan de magma. Ce scénario devrait donc être éliminé pour Mercure.

**Soufre -** L'abondance de soufre est plus élevée que ce que l'on croyait (4 % en poids). Elle est 10 fois supérieure à celle des roches superficielles terrestres. Le soufre est un élément volatil, qui est éliminé par une température élevée. De sa grande abondance, on déduit facilement que Mercure n'a pas pu être fortement chauffée lors de sa formation. Les modèles qui prévoyaient un tel chauffage sont donc éliminés. Sont éliminés aussi les modèles qui envisageaient que ce soit la poussière qui plus tard donnerait naissance à Mercure, qui aurait été chauffée par un jeune Soleil particulièrement violent. Mais une telle ambiance n'aurait pas permi aux poussières de se condenser.

**Potassium -** Le potassium est un élément assez volatil également. Les mesures ont été faites par rapport au thorium, qui au contraire est un réfrataire. Elles donnent ainsi une mesure représentative de l'abondance des volatils relativement aux réfractaires. Ce ratio est semblable à celui des autres planètes telluriques.

**Fer, titane -** A l'inverse, les roches de Mercure sont déficitaires en fer (4 % en poids), et en titane (0,8 % en poids).

Les abondances de magnésium (forte), aluminium et calcium (faibles), pourraient indiquer soit que la surface de Mercure a été évaporée par le Soleil après sa formation, soit qu'un impact géant l'ait éjectée. Mais le soufre aurait été affecté pareillement, et donc ceci est exclu par l'abondance du soufre. Les hypothèses de formation de Mercure à chaud, évoquées plus haut, sont également démenties par l'abondance du soufre, élément volatil.

Dans des **conditions réductrices**, le soufre s'incorpore aux silicates et se stabilise ainsi, alors que des conditions oxydantes le rendent encore plus volatil sous forme d'oxyde. Tout ceci indique que Mercure a dû se former à partir de matériaux assez riches en éléments volatils, et dans des conditions réductrices. Finalement, les chondrites à enstatite sont les matériaux connus les plus proches. Elles ne sont toutefois pas assez riches en fer pour expliquer la forte densité de Mercure. Mais connait-on parfaitement les planétésimaux qui ont formé les planètes telluriques ? Les météorites qui tombent sur Terre au hasard des perturbations gravitationnelles sont nos sources. Elles ne sont peut-être pas totalement représentatives, et des chondrites à enstatite plus riches en fer pourraient exister. On peut aussi envisager un apport de poussières de type cométaires, qui sont elles aussi réductrices.

Ces résultats accroissent notre connaissance de la planète, mais il reste bien des incertitudes. L'une d'elle est produite par un résultat du spectromètre à neutron, qui montre une absorption en neutrons semblable à celle des mers lunaires, où elle est produite par le fer et le titane. Mais la présence de samarium et/ou de gadolinium sur Mercure pourrait tout aussi bien expliquer cette absorption. Ce sont des données que la sonde actuelle ne permet pas de récolter. Il reste du travail pour les successeurs !

Source : *The major-element composition of Mercury's surface from MESSENGER X-ray spectrometry*. L. R. Nittler & al. Science vol. 333 september 2011

**Eléments radioactifs sur Mercure**

Le spectromètre à rayons gamma permet de mesurer les abondances du potassium K, du thorium Th, et de l'uranium U (ce sont les éléments qui permettent l'étude qui suit). Comme pour la spectrométrie X, il faut une source excitatrice, et il y en a deux ici. La première est la radioactivité naturelle des roches de Mercure, qui produit les rayons gammas observés lors des désintégrations. La seconde est fournie par le rayonnement cosmique de haute énergie en provenance de la Galaxie. Les caractéristiques de l'orbite, associées à une proximité du sol nécessaire pour avoir un signal exploitable, limitent les mesures aux latitudes au nord du 20$^{e}$ parallèle sud, mais les terrains couverts sont de natures diverses.

Les concentrations mesurées sont : 1.150 ± 220 ppm de potassium, 220 ± 60 ppm de thorium, et 90 ± 20 ppm d'uranium. Le rapport K / Th (volatil / réfractaire) mesuré est semblable à celui des autres planètes telluriques. Ce résultat rejoint les conclusions obtenue sur l'abondance du soufre.

En mesures absolues, les quantités de K et Th ressemblent davantage à celles des météorites martiennes, qu'à la surface de Mars elle-même, qui en contient 4 fois plus. Cette différence provient de l'origine mantellique des météorites martiennes, la surface résultant en partie de processus volcaniques. Ces abondances différentes montrent donc que Mercure et Mars n'ont pas subi la même évolution.

Si Mercure s'était formée à haute température, le rapport K / Th serait beaucoup plus faible, le potassium s'étant évaporé. De façon analogue, l'uranium serait parti, car il se serait combiné à l'oxygène pour former l'oxyde $UO_3$, qui est gazeux, et donc très volatil.

Les mesures relatives du potassium (volatil) par rapport aux autres (réfractaires) indique donc l'abondance des volatils. Ces résultats renforcent ceux déduits de la spectrométrie X, en particulier la formation de la planète à une température modérée. Ils justifient également le chauffage interne de la planète par radioactivité, pemettant un volcanisme intense jusqu'à la fin du bombardement tardif (3,8 Ga), suivi d'une activité sporadique.

Le modèle qui répond le mieux aux données des spectromètres X et gamma considère une formation de Mercure à partir de chondrites carbonées, du sous-type CB (le plus riche en métaux).

**Intérieur**

Ces données imposent également des contraintes sur la composition intérieure de Mercure. En effet, ces éléments radioactifs sont ceux qui chauffent l'intérieur de la planète en se désintégrant, chaleur à même de fondre le manteau si elle est suffisante. Or trois caractéristiques de la planète s'expliquent par un passé chaud de l'intérieur :

- Le champ magnétique, faible mais non négligeable, ne peut être compris sans l'effet dynamo. Et celui-ci se produit lorsque de la matière électriquement chargée est en mouvement. Pour cela, il faut invoquer un noyau (vers le centre, où la température est la plus élevée permettant un degré d'ionisation), fluide (donc liquide) pour pouvoir se mettre en mouvement ;
- Les multiples traces de volcanisme visibles sur les photos, attestent que de la lave en fusion a jailli des profondeurs, qui par conséquent étaient assez chaudes pour fondre la roche ;
- Les photos montrent des escarpements de grande dimension, produits par une contraction de l'ensemble de Mercure sous l'effet du refroidissement. La planète a dû perdre de 1 à 2 km de diamètre, ce qui a produit une forte compression des roches superficielles, puisque la surface du globe a ainsi diminué.

Les mesures du spectromètre gamma indiquent, il y a 4 milliards d'années, une production d'énergie thermique radioactive 4 fois plus forte qu'aujourd'hui. Cette date correspond à peu près à la fin du *Bombardement Tardif*. C'est l'époque où se sont formées les grandes plaines lisses, par inondation de laves fluides. Et à partir de là, le volcanisme global s'est arrêté, laissant la place à des épisodes éruptifs localisés. Bien que tout ceci soit cohérent, il reste des difficultés car on ignore en quelle mesure les proportions internes de K, Th et U sont semblables aux proportions mesurées à la surface.

Source : *Radioactive elements on Mercury's surface from MESSENGER : implications for the planet's formation and evolution*. P.N. Peplowski & al., Science vol. 333 september 2011

---=OO=---

# Vénus




## Carte d'identité

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| diamètre | **12 103,6 km** | | demi grand-axe | **108,209 $10^6$ km** |
| | **0,9488 Terre** | | | **0,7233 UA** |
| diamètre angulaire max | 65,3" | | excentricité | **0,006773** |
| aplatissement | **0** | | inclinaison de l'orbite | **3,3947°** |
| période de rotation | **243 j 0 h 27 mn rétrograde** | | année sidérale | **224 j 16 h 41 mn** |
| inclinaison axe de rotation | **177,3°** | | vitesse orbitale | **35,0214 km/s** |
| masse | **4,869 $10^{24}$ kg** | | révolution synodique | **583,9214 j** |
| | **0,815 Terre** | | jour solaire moyen | 116 j 18 h |
| masse volumique | **5,24 g/$cm^3$** | | sens | direct ! |
| | **0,9501 Terre** | | pression au sol | **90 bars** |
| pesanteur | **8,87 m/s/s** | | température min | +500° |
| | **0,905 Terre** | | température max | +500° |
| vitesse de libération | **10,36 km/s** | | albédo | **0,65** |
| nombre de satellites | 0 | | atmosphère | $CO_2$, $N_2$ |

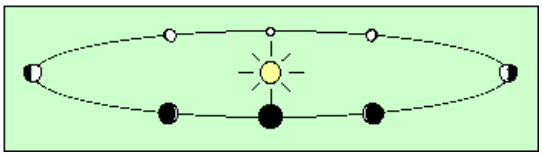
Les éléments en gras sont tirés du livre *Allen's astrophysical quantities*, quatrième édition

## *Généralités*

### Observation de Vénus

Vénus est une planète magnifique à voir à l'œil nu. Sa magnitude visuelle minimum est de -4,4. C'est donc l'objet le plus brillant après la lune, bien avant les autres planètes et les étoiles. Elle brille le matin, assez longtemps avant le lever de Soleil, ou le soir après son coucher, au moment où les bergers sortaient et entraient les bêtes. C'est pour cela qu'on l'appelle à tort *étoile du berger*, car ce n'est évidemment pas une étoile.

Elle montre des phases comme la Lune, car vue depuis la Terre, elle se présente selon le schéma suivant :



Historiquement, la première observation des phases de Vénus par Galilée a contribué à détruire le système géocentrique hérité de Claude Ptolémée. On ne peut pas distinguer les phases de Vénus à l'œil nu, car son diamètre apparent maximum reste inférieur au pouvoir séparateur de l'œil. Mais dès l'invention de la lunette, Galilée a remarqué que son disque est plus petit quand elle est pleine que quand elle est nouvelle. C'est donc qu'elle est plus loin de nous quand elle est pleine, et qu'elle ne tourne pas autour de la Terre (surtout sur une orbite circulaire comme il était admis).

Son diamètre varie de 10" (pleine) à 62" (nouvelle), ce qui la rendrait théoriquement discernable à l'œil nu parfois (sous la forme d'un minuscule disque).

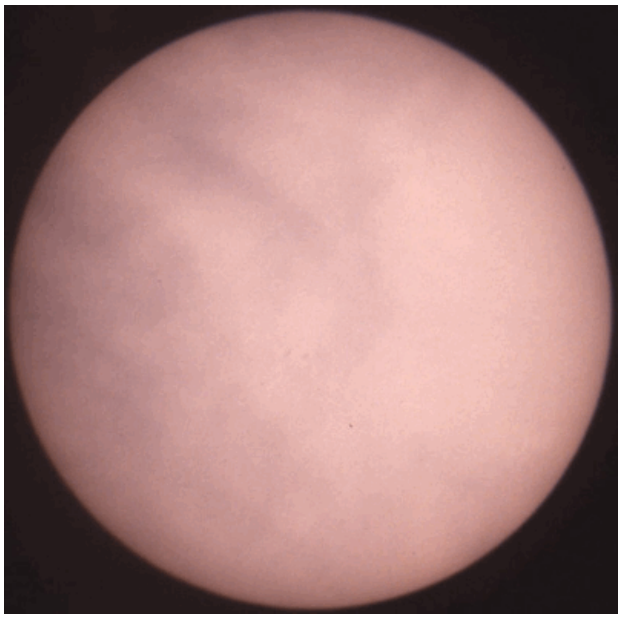
Comme pour les autres planètes, Vénus est explorée par des sondes spatiales. Leur emploi est d'autant plus indispensable ici que Vénus est entièrement couverte de nuages, dissimulant totalement le sol. Seules des sondes posées au sol peuvent donner des images à très petite échelle, et des satellites peuvent produire des images par radar, ondes capables de traverser l'atmosphère. Les observations au sol ont été faites par les

sondes soviétiques Venera, et les images radar par Venera 15 et 16, Pioneer-Venus et Magellan.

**Passages de Vénus**

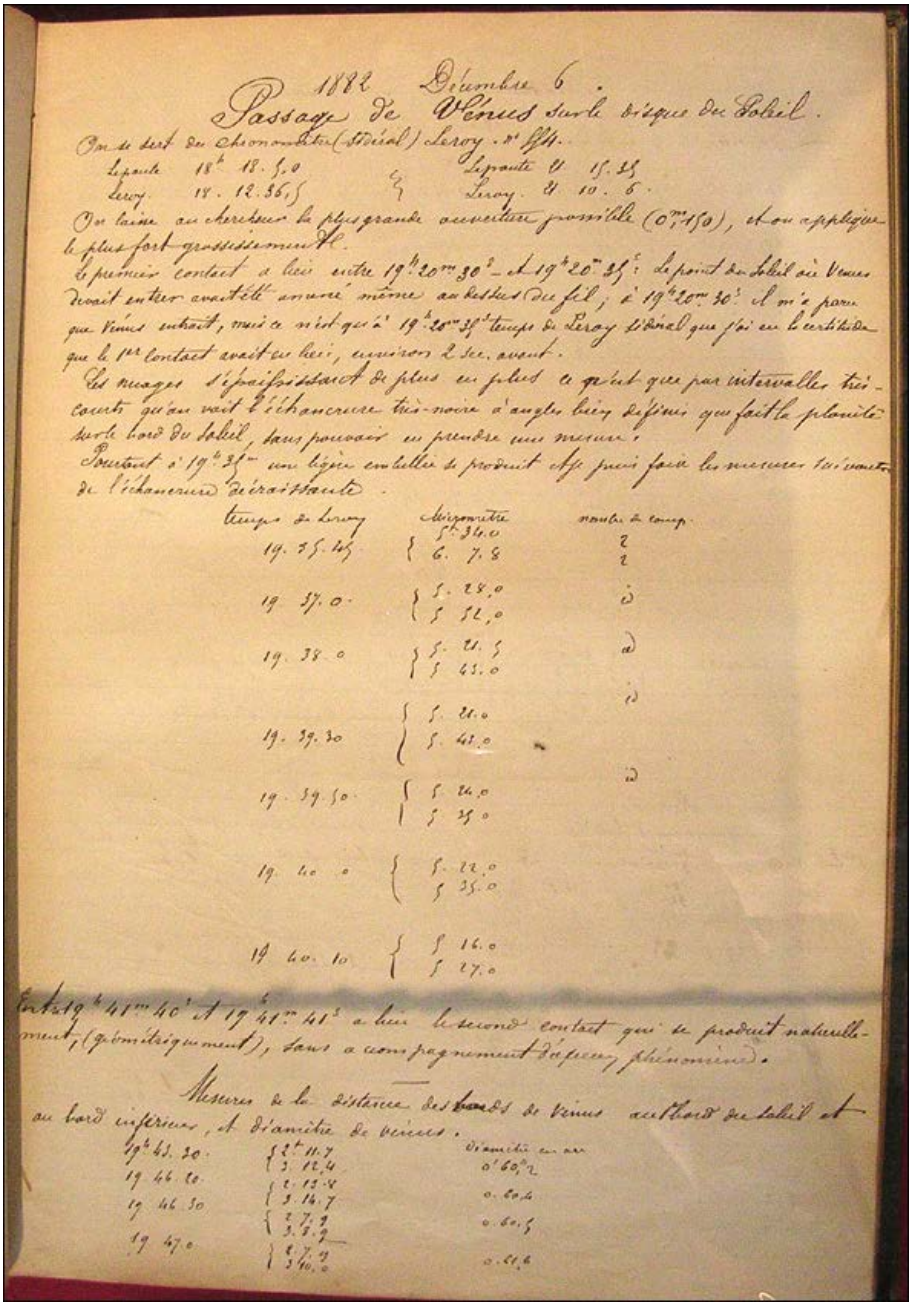
Les passages de Vénus devant le Soleil sont encore plus rares que ceux de Mercure. Leur périodicité est de 8 ans, 121,5 ans, 8 ans, 105,5 ans, et le cycle recommence. Les derniers ont eu lieu les 8 décembre 1874, 6 décembre 1882, 8 juin 2004 et 6 juin 2012. A bientôt pour les prochains…

Voici une animation (Gif animé) faite à partir de diapositives prises à Marseille :



Passage de Vénus du 8 juin 2004 photos J. Gispert télescope Maksutov 100/1000

La séquence d'images n'est pas régulière, pour réduire le temps de chargement. Le nombre de vues utilisées est plus important pour le début et pour la fin du phénomène.



1882 Décembre 6.

Passage de Vénus sur le disque du Soleil.

On se sert du chronomètre (sidéral) Leroy n° 1511.

Lepaute 18h 18. 5.0 ♀ Lepaute ♀ 15. 25
Leroy 18. 12. 55.5 Leroy ♀ 10. 6.

On laisse au chercheur la plus grande ouverture possible (0m,150), et on applique le plus fort grossissement.

Le premier contact a lieu entre 19h 20m 30s – et 19h 20m 35s : le point du bord du Soleil où Vénus devait entrer avait été amené même au bord du fil ; à 19h 20m 30s il m'a paru que Vénus entrait, mais a n'est qu'à 19h 20m 35s temps de Leroy et sidéral que j'ai eu la certitude que le 1er contact avait eu lieu, environ 2 sec. avant.

Les nuages s'épaississaient de plus en plus et ne laissaient que par intervalles très-courts qu'on vait l'échancrure très-noire à angles bien définis que faitla planète sur le bord du Soleil, sans pouvoir en prendre une mesure.

Pourtant à 19h 37m un léger entrebâillement se produit et je puis faire les mesures suivantes de l'échancrure ci-dessus.

| temps de Leroy | micrométre | nombre de comp. |
|---|---|---|
| 19. 35. 45 | 5t. 34.0 | 2 |
| | 6. 7.8 | 2 |
| 19 37.0 | 5. 28,0 | 3 |
| | 5 52,0 | |
| 19. 38. 0 | 5. 21. 5 | 3 |
| | 5 45.0 | |
| | | 3 |
| 19. 39. 30 | 5. 21.0 | |
| | 5. 45.0 | |
| | | 3 |
| 19. 39. 50 | 5. 24.0 | |
| | 5 35.0 | |
| 19. 40. 0 | 5. 22.0 | |
| | 5 35.0 | |
| 19 40. 10 | 5 16.0 | |
| | 5 27.0 | |

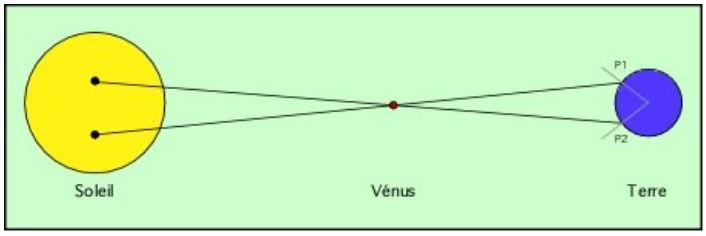
Entre 19h 41m 40s et 19h 41m 41s a lieu le second contact qui se produit naturellement (géométriquement), sans accompagnement d'aucun phénomène.

Mesures de la distance des bords de Vénus au bord du Soleil et au bord inférieur, et d'amitié de Vénus.

| | | d'amitié en arc |
|---|---|---|
| 19h 45. 30 | 2t 11.7 | 0' 60",2 |
| | 3. 12.4 | |
| 19 46 10 | 2. 13.4 | 0. 60.4 |
| | 3. 14.7 | |
| 19 46 30 | 2 7.3 | 0. 60.4 |
| | 3 8.7 | |
| 19 47.0 | 2 7.3 | 0. 61.6 |
| | 3 10.0 | |

Observation du passage de 1882 à Marseille photo J. Gispert

Les passages de Vénus ont revêtu une grande importance, car ils permettaient de déterminer précisément les distances absolues (en km) dans le système solaire, par effet de parallaxe :




Les passages de Vénus de 1761, 1769 puis 1874 ont été utilisés pour mesurer la parallaxe du Soleil, sans succès pour les deux premiers, avec une incertitude notable pour le troisième. C'est le passage de 1882 qui a donné la première mesure correcte : 8,85" exacte à 0,7 % près

Cet intérêt a totalement disparu, car maintenant on mesure quand on veut la distance de la Terre à Vénus, avec une précision bien meilleure de l'ordre du mètre, par des échos radar.

Lors du passage de 1761, Lomonosov a remarqué que le disque de la planète était flou, ce qu'il a interprété à juste titre comme prouvant la présence d'une atmosphère. En 1874, le petit disque noir de la planète est apparu entouré d'un anneau lumineux juste avant de passer devant le Soleil. Cet anneau est produit par la lumière du Soleil réfléchie par l'atmosphère entourant la planète.

Voici les dates des 4 passages de Vénus les plus proches de nous (passé et futur) :

| date | heure UTC max | durée max | durée min | visible en |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 6/12/1882 | 17 h 4 mn | 3 h 9 mn | 2 h 48 mn | Afrique, Amérique du sud |
| 8/6/2004 | 8 h 24 mn | 3 h 6 mn | 2 h 46 mn | Europe, Asie nord-ouest |
| 6/6/2012 | 1 h 36 mn | 3 h 20 mn | 3 h 2 mn | Amérique du nord |
| 11/12/2117 | 2 h 51 mn | 2 h 50 mn | 2 h 27 mn | Amérique du sud |

Vous pouvez trouver tous les passages de -3.000 à +3.000 sur le site http://www.imcce.fr/vt2004/fr/canons_fr/CanonVenus.html.

**Rotation**

La rotation de Vénus est extraordinaire. Il a fallu très longtemps avant d'en mesurer la durée, car le sol est invisible depuis la Terre. La vitesse de rotation tout d'abord est exceptionnellement lente : elle s'effectue en 243 de nos jours (il a fallu attendre de disposer de radars puissants, qui ont donné par effet Doppler la vitesse de rotation du globe solide)… Mais en plus, elle s'effectue dans le sens rétrograde (à l'envers, par rapport à la Terre et à la plupart des autres planètes).

On ignore toujours la cause de ces particularités. L'explication la plus probable est une collision gigantesque avec un autre corps de grande taille, pendant la phase de formation des planètes. Nous verrons un problème semblable pour Uranus.

**Jour solaire**

Le jour solaire est déterminé par la composition des deux mouvements de la planète : rotation sur elle-même et circulation autour du Soleil. L'année de 225 jours, et la rotation rétrograde en 243 jours se composent pour donner un jour solaire de 116 jours.

Comparez la vitesse de rotation de Vénus avec la durée de son année : 243 jours pour 225 jours. L'année vénusienne est plus courte que sa journée ! Avec une conséquence extraordinaire : le Soleil s'y lève à l'ouest et se couche à l'est ! Vous pouvez revoir le chapitre sur le jour solaire !

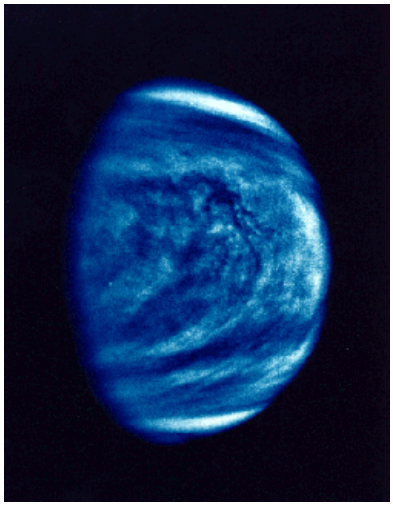
## *L'atmosphère*

La déesse de l'Amour n'est pas très accueillante ! Sœur jumelle de la Terre, elle possède un diamètre à peine inférieur, presque la même densité d'où 0,8 fois la masse de la Terre. Elle tourne autour du Soleil à 100 millions de km. Calculons l'énergie qu'elle reçoit du Soleil : le rapport des distances est 150/100 = 1,5 ; son carré 1,5 × 1,5 = 2,25 ; étant 1,5 fois plus proche, elle reçoit donc 2,25 fois plus d'énergie que la Terre. On peut donc penser qu'il y fait chaud ! Les calculs théoriques basés sur la seule distance au Soleil indiquent une température de l'ordre de 220°. Mais ce n'est pas si simple…

énus possède une atmosphère, très différente de celle de la Terre. Pas d'oxygène là-bas, mais du gaz carbonique (96 %), de l'azote pour 3,5 %, le reste (moins de 1 %) étant constitué d'anhydride sulfureux, d'oxyde de carbone, d'argon et d'un peu d'oxygène. La vapeur d'eau n'est présente qu'à l'état de traces.

La pression au sol est de 90 atmosphères, 90 fois la pression de chez nous ! C'est la pression qui règne dans nos océans à 900 mètres de profondeur… La masse de l'atmosphère de Vénus est 105 fois plus forte que la masse de l'atmosphère terrestre. C'est la gravité un peu plus faible de Vénus qui donne une pression de *seulement* 90 atmosphères ! Notons ici que, si le gaz carbonique n'avait pas été piégé dans le sol sur Terre, il y posséderait une pression partielle du même ordre.

Cette atmosphère est donc très lourde, très dense. Elle est aussi beaucoup plus profonde que celle de la Terre : elle se répartit sur une hauteur plus importante. Enfin, Vénus est entièrement couverte de nuages. Il y est impossible de voir le ciel (et pour nous de voir son sol). Ces nuages se trouvent à haute altitude (alors qu'ici nos cirrus culminent à 10 km), et sont constitués d'acide sulfurique.



Vénus, prise par Galileo (P-37222) à 2,7 millions de km. Pour distinguer des détails sur les nuages, la photo a été prise avec un filtre violet. La coloration bleue est artificielle. Le terminateur visible est celui du soir. Les nuages visibles se déplacent vers l'ouest, vers la gauche de l'image, à 100 m/s au niveau de l'équateur.

Les nuages sont séparés en trois couches. La plus basse se trouve à 48 km d'altitude, et présente une épaisseur de 1.000 mètres à peu près. La seconde est un peu plus haut : entre 50 et 55 km d'altitude. Elle est nettement plus épaisse que la première. La troisième enfin s'étend entre 56 et 66 km. Au-dessus, une légère brume est visible. C'est elle que nous voyons depuis la Terre, et qui nous empêche de voir plus bas.

Maintenant que le décor est planté, nous pouvons revenir sur la température. Les nuages sont clairs, et augmentent considérablement l'albédo de

la planète : Vénus possède l'albédo le plus élevé de tout le système solaire. Pas étonnant qu'elle soit si belle vue d'ici ! La plupart des rayons solaires qui parviennent à elle, plus des deux tiers, sont renvoyés dans l'espace, sans participer au chauffage du sol. Bien que plus proche du Soleil que nous, Vénus ne profite pas tellement de cette proximité pour se chauffer davantage.

Considérons 1 watt arrivant du Soleil au niveau de Vénus. Il s'étale sur une certaine surface s de l'atmosphère. Celle-ci, avec son albédo de 0,66 ne laisse passer que la fraction 1 - 0,66 = 0,34. Donc, 1 W arrivant ne donnera que 0,34 W au sol.

Considérons maintenant ce même watt, toujours au niveau de Vénus, mais continuant sa route vers la Terre. Lorsqu'il y parvient, il s'étale sur une surface 2,25 fois plus grande. Donc à surface égale, nous n'avons plus que 1 W / 2,25 = 0,44 W. C'est ce que reçoit notre atmosphère sur une même surface s que celle considérée pour Vénus. Or l'albédo de la Terre est de 0,39 ; donc la proportion 1 - 0,39 = 0,61 passe l'atmosphère. Il arrive donc au sol 0,44 W × 0,61 = 0,27 W.

La même quantité d'énergie solaire se traduit par 0,34 W au sol de Vénus, et 0,27 W au sol de la Terre. Il s'en faut de peu que Vénus recoive au sol moins d'énergie que la Terre ! En considérant distance au Soleil et albédo, chaque mètre-carré de Vénus et de la Terre reçoit pratiquement la même énergie. La température de Vénus devrait donc être proche de celle de la Terre.

Mais pour couronner le tout, l'effet de serre dû au $CO_2$ dont on parle chez nous à cause de la pollution, prend tout son sens sur Vénus : en retenant l'énergie reçue du Soleil, il fait monter la température au sol à 470 … (plus que sur Mercure, pourtant plus proche du Soleil ! ). Un amour de planète…

Sur la Terre, l'effet de serre naturel élève la température de 30°, rendant notre planète habitable. Sur Vénus, il l'élève de 227° ! Cette différence considérable s'explique parce que l'atmosphère de Vénus est beaucoup plus opaque aux infrarouges que celle de la Terre, et retient donc beaucoup plus efficacement l'énergie.

Le bilan énergétique de Vénus est le suivant : le $CO_2$ piège 55 % de la totalité de la chaleur retenue par l'atmosphère. La vapeur d'eau est responsable de 25 %, le $SO_2$ de 5 %, et les 15 % qui restent sont dûs aux brumes et aux nuages.

**Résumons :**

| | |
|---|---|
| distance au Soleil seule : | Vénus plus chaude que la Terre |
| distance au Soleil et albédo : | Vénus à peine plus chaude que la Terre |
| distance au Soleil, albédo et effet de serre : | Vénus **beaucoup** plus chaude que la Terre |

L'intuition est un bon guide sans doute, mais il ne faut pas s'y fier, car des effets contraires peuvent donner un résultat surprenant.

**Expérience** : placez la flamme d'un briquet à proximité de la main, pour sentir la chaleur dégagée (sur le côté, car au-dessus vous sentiriez les gaz chauds qui montent) ; c'est une émission d'infrarouge que l'on ressent. Interposez une vitre devant la flamme pour montrer que la vitre empêche le passage des infrarouges, tout en laissant passer la lumière visible de la flamme. Les IR qui arrivant du Soleil sont très énergétiques, ils sont de courte longueur d'onde. L'atmosphère de Vénus est assez transparente à ces radiations, qui vont donc parvenir au sol et le chauffer. Le sol chaud va émettre lui-même des IR, mais de grande longueur d'onde (correspondant à la température de corps noir). Il se trouve que la transparence de l'atmosphère à ces grandes longueurs d'onde est beaucoup plus faible. Les rayons sont donc piégés, et le sol ne peut pas se refroidir par émission. C'est l'effet de serre.

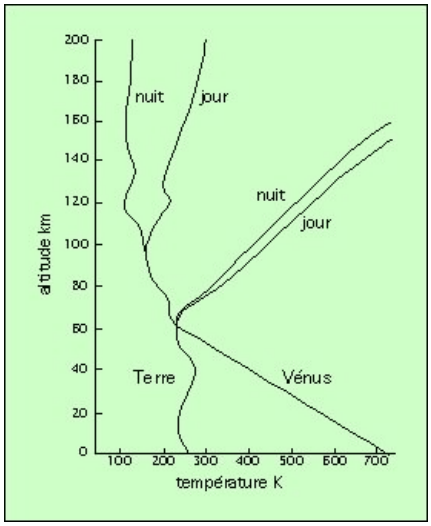
**Variation diurne de température**

La densité de l'atmosphère produit une égalisation des températures entre le jour et la nuit. Bien que le jour solaire y soit de 116 jours, donc que chaque point de la planète soit exposé au Soleil pendant cette durée, et au froid de l'espace pendant une durée égale, la chaleur ne peut pas baisser beaucoup la nuit car les vents égalisent les températures. La variation n'est que de quelques degrés entre le jour et la nuit au niveau du sol. Mais il n'en est pas de même en altitude, où l'atmosphère est plus légère : à 100 km, la température varie de +27 le jour à -143 la nuit.

**Evolution verticale de la température**

La structure verticale de l'atmosphère est complexe. Comme pour la Terre et Mars, la densité de l'atmosphère est divisée par trois tous les 10 km. A 20 km d'altitude, il ne reste donc plus que 10 % du gaz présent au sol. A 70 km d'altitude, la pression est équivalente à celle qui règne au sol de Mars.

La température à une altitude donnée est déterminée par divers paramètres, dont la densité de l'air, l'apport d'énergie en provenance de l'espace ou du sol… On a divisé l'atmosphère de la Terre en couches selon ce paramètre ; on fait de même pour Vénus. Comme sur Terre, la température décroît avec l'altitude : si au sol elle est de 450 , elle n'est plus que de -97 à 100 km d'altitude. Mais la variation n'est pas la même.




Le schéma montre les différentes couches de l'atmosphère terrestre, et les différences avec Vénus. Tout d'abord, on remarque que sur Vénus la décroissance de température est plus régulière, et jusqu'à une altitude bien plus élevée : c'est la troposphère. Ensuite, elle ne décroît pas : on ne peut pas parler de stratosphère… puis elle décroît jusqu'à 100 km d'altitude, dans une zone de type mésosphère. Et puis au-dessus, il y a une surprise : la courbe se divise en deux, car le comportement thermique de l'atmosphère n'est pas le même du côté jour, exposé au soleil, et du côté nuit. Du côté jour, on voit nettement une croissance de la température, comme dans la thermosphère terrestre. Mais dans la nuit, la température reste constante. On peut donc dire qu'il y a une thermosphère, mais seulement du côté tourné vers le soleil.

Dans cette thermosphère, la température varie de -97 à 100 km, jusqu'à +27 à 150 km. Du côté nuit, la température décroît encore. Enfin, la transition entre les deux zones est très brutale.

**Chimie de l'atmosphère**

La vapeur d'eau qui se trouve en altitude est dissociée par les UV solaires, en O libre et radical OH. Celui-ci est particulièrement réactif chimiquement, et contribue à la formation de l'acide sulfurique. Il existe cependant un peu d'oxygène moléculaire, d'oxygène atomique et d'ozone, produits par la photodissociation du dioxyde de carbone $CO_2$.

Le soufre injecté dans l'atmosphère par les volcans est rapidement éliminé sur Terre, par combinaison avec la vapeur d'eau, puis précipitation sur le sol. La forte température atmosphérique de Vénus ne permet pas ce mécanisme, et le soufre reste en suspension. Il forme du $SO_2$, en grandes quantités dans les couches basses. Ce dioxyde de soufre produit ensuite l'acide sulfurique qui forme des particules entre 50 et 80 km d'altitude.

On note dans l'atmosphère de Vénus une surabondance de l'isotope $^{36}Ar$, et une abondance triple de celle de la Terre pour le Krypton. Une explication envisagée est que le krypton viendrait en grande partie du vent solaire, mais que lors de la formation des planètes, la matière qui allait constituer Vénus formait un barrage pour le vent solaire, et se chargeait avec les atomes qui le constituaient. Ainsi, la matière qui allait former Vénus était enrichie, alors que celle qui allait donner la Terre et Mars ne l'était pas. L'abondance de Krypton dans l'atmosphère du Soleil est 2.000 fois plus importante que dans celle de la Terre. Le rapport est encore de 700 fois pour Vénus, mais seulement de 30 pour la Terre et Mars.

**Orages**

Les deux sondes Venera 11 et 12 ont enregistré des impulsions radio brèves, semblables à celles que l'on capte avec nos récepteurs radio lorsqu'il y a de l'orage. On en a déduit que des éclairs éclataient dans l'atmosphère de Vénus…

**Rotation de l'atmosphère**

Sur la surface nuageuse, aucune structure visible n'apparaît. En U.V., on distingue des formations qui tournent en quatre jours environ. Ces formations ont permis de déterminer la rotation de la haute atmosphère, et c'est un astronome amateur français, Charles Boyer, qui a réussi cette mesure à Brazzaville, entre 1957 et 1959, avec un télescope de 260 mm. Sur des photos successives prises en lumière violette, il a mis en évidence une structure en forme de Y couché, qui s'est montrée permanente. Cette structure tourne, et montre une rotation de l'atmosphère de la planète. Il s'agit d'un mouvement rapide d'ensemble de l'atmosphère, qui s'effectue en seulement 4 jours, dans le sens rétrograde. Ce résultat a été confirmé par la sonde américaine Mariner 10.

Les nuages empêchant de distinguer le sol, il a été très difficile de déterminer la vitesse de rotation de la planète elle-même. Il a fallu attendre de disposer de radars puissants, qui ont montré (par effet Doppler) que le globe solide tourne, aussi dans le sens rétrograde, en 243 jours, donc 60 fois plus lentement que la haute atmosphère. La différence entre la rotation du sol et de l'atmosphère produit des vents de 350 km/h en altitude, comme pour rendre le tableau encore plus charmant.

Les frottements entre le sol et l'atmosphère produisent une variation de vitesse entre le sol et les régions d'altitude. Au niveau du sol, le vent n'est que de l'ordre de 1 à 2 mètres par seconde (4 km/h), alors qu'à 60 km d'altitude, il souffle à 360 km/h. En plus de la pression, de la température, de la corrosion chimique, les sondes soviétiques ont eu à subir aussi des vents plus que cycloniques !

Vénus montre des cellules de Hadley dans son atmosphère : ce sont des zones qui tourbillonnent par l'effet de la convection. Elles sont responsables des vents, qui équilibrent les températures des différentes régions.

**Interactions avec le vent solaire**

La gravité de Vénus est *a priori* suffisante pour retenir son atmosphère.

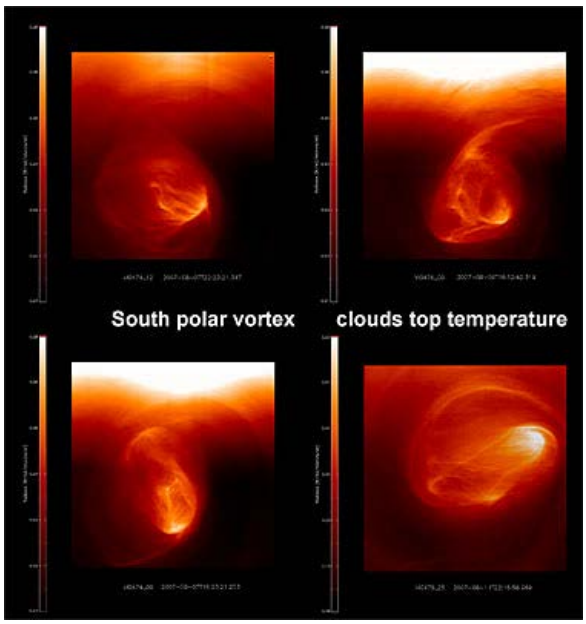
Vénus est plongée dans le vent solaire, qui interagit avec son atmosphère. Les résultats de la sonde Européenne *Vénus Express* montrent une diversité plus importante que ce que l'on croyait. Le vent solaire est très variable, c'est un flux de protons essentiellement. Vénus n'en est pas protégée, n'ayant pas de champ magnétique suffisant pour le dévier. Son atmosphère reçoit donc ce flux de particules de plein fouet. De plus, le gaz qui constitue la haute atmosphère est soumis au rayonnement UV du Soleil, qui l'ionise. Il s'agit donc de particules chargées, qui peuvent interagir par électromagnétisme avec le vent solaire. Le vent solaire entraîne des atomes de la haute atmosphère, qui acquièrent ainsi une énergie suffisante pour échapper à la planète.

L'ESA a produit une animation pour illustrer cette perte d'atmosphère. Mais bien sûr, pour illustrer le phénomène, il faut l'amplifier, car il est subtil. Au rythme visible sur ce film, Vénus aurait perdu toute son atmosphère demain matin ! Observez la forme du choc entre la haute atmosphère et le vent solaire, qui parvient de gauche. Notez aussi la variation de cette forme, conséquence de la variation du vent solaire. Une partie de l'atmosphère se trouve entraînée, et quitte la planète.

video
ESA, animation de C. Carreau

Quelle est l'importance de cette perte ? Vénus risque-t-elle rapidement de se retrouver nue comme la déesse de Botticelli ? La perte concerne-t-elle tous les gaz de l'atmosphère ? Est-elle symétrique?

Vénus Express a été construite pour répondre à ce genre de questions. Elle vient de boucler son programme d'étude, qui concernait deux jours vénusiens, c'est-à-dire à peu près 500 jours terrestres. Elle a commencé l'extension du programme pour deux journées vénusiennes supplémentaires.




Vénus Express a photographié en infra-rouge le pôle sud de Vénus, au cours de 3 orbites, c'est-à-dire 72 heures. Les nuages y forment un immense vortex, qui tourne en produisant des turbulences. On voit des différences de température dans la haute atmosphère, et des variations rapides.

Les divers instruments montrent des variations en fonction de l'altitude. Malgré des vents atteignant 100 m/s dans les hautes couches, l'atmosphère étant si épaisse, il est peu probable que ce vortex puisse descendre jusqu'à la surface. Les vents mesurés au sol par les sondes Venera sont très faibles (1 m/s).

images ESA/VIRTIS-VenusX/INAF-IASF/Obs Paris LESIA

## *Morphologie du sol*

L'étude physique du sol de Vénus a été faite par divers moyens, dont l'optique est pratiquement exclue, puisque les nuages qui recouvrent sans cesse la planète interdisent toute observation visuelle depuis l'espace. Seules les sondes Soviétiques qui se sont posées sur le sol ont pu nous en donner quelques photos. Mais les conditions infernales qui règnent à la surface ne permettent pas à un engin de fonctionner très longtemps. Toutes les expériences à bord doivent être achevées dans l'heure qui suit l'arrivée au sol.

Les photos prises au sol sont extrêmement utiles, puisqu'elles nous montrent des cailloux, avec leurs formes et leurs couleurs, mais ne permettent pas une vue d'ensemble de la planète.

Fort heureusement, il existe des moyens d'observation à distance, dans des longueurs d'onde autres que le visible. Ainsi, des sondes soviétiques et américaines ont utilisé des radars, dont les ondes traversent l'atmosphère, pour sonder le sol depuis l'orbite, en déterminer la structure, l'altimétrie, la pente, et les propriétés réfléchissantes pour les ondes utilisées. Ces propriétés donnent une estimation de la taille moyenne des objets qui constituent le sol. Si les aspérités du sol sont plus petites que la longueur d'onde, le sol se comporte pratiquement comme un miroir, et renvoie la lumière radar loin de la sonde ; le sol apparaît noir. Si les aspérités sont de l'ordre de la longueur d'onde, une partie du faisceau est renvoyée vers la sonde, et le sol commence à briller. Plus les aspérités sont grandes devant la longueur d'onde, plus le sol apparaît brillant. Ainsi, d'après les images radar, on a une idée de la texture du sol.

Il faut bien prendre garde, en observant une image radar, qu'elle ne correspond pas du tout à une image habituelle, dans le visible ! Lorsqu'on regarde un paysage, il est éclairé par le soleil, qui ne se trouve pas derrière nous, mais dans le ciel : la source de lumière et l'observateur occupent des régions distinctes de l'espace. Mais le Soleil n'éclaire pas Vénus avec des ondes radar, aussi c'est la sonde elle-même qui doit l'éclairer. Elle se trouve dans la même situation que nous lorsque nous observons un paysage de nuit, à l'aide d'une lampe de poche. Si nous éclairons un miroir (sans être exactement en face), nous ne le verrons pas, car il réfléchira toute la lumière dans une autre direction !

Le radar permet aussi de sonder très simplement la distance entre la sonde et le sol (temps de parcours aller-retour du faisceau). Connaissant l'orbite de la sonde, on déduit à chaque instant l'altitude du sol en-dessous de l'engin. On a ainsi obtenu des cartes en relief de Vénus. Ces

cartes montrent la présence de plaines, de montagnes, de volcans, de cratères d'impact… ainsi que des structures que l'on ne connait nulle part ailleurs dans le système solaire.

On a entrepris aussi une exploration radar de Vénus depuis la Terre, grâce à deux instruments de grande puissance : le radiotélescope d'Arecibo envoie un faisceau radar vers la planète, où il se réfléchit, puis le radiotélescope d'Arecibo et le radiotélescope de Green Bank reçoivent l'écho radar. On reconstitue ensuite une image de la surface de Vénus, à une résolution de 1 kilomètre. Cette technique permettra de découvrir, s'il y en a, des changements géologiques intervenus depuis la cartographie *in situ* de la planète par la sonde Magellan, qui date de 1994.

**Niveau de référence**

Pour étudier la géographie de Vénus, il nous faudra parler des altitudes (nous l'avons déjà fait pour l'atmosphère, sans précisions). Il faut donc définir un niveau zéro. Sur Terre, nous avons l'habitude de mesurer les altitudes à partir du niveau de la mer, qui prend la forme du géoïde, et donne une référence visible, aisée. C'est possible, parce que les océans sont tellement immenses, qu'ils communiquent tous entre eux, et donc ont un niveau commun. Il n'en serait pas de même s'il n'y avait pas de mers, mais seulement des lacs indépendants les uns des autres.

On peut d'autre part déterminer le niveau tel que 50 % des terres (en surface) soient plus hautes, et les 50 % restantes plus basses. Ce niveau d'altitude est appellé *niveau médian*. On peut le concevoir pour toute planète. Il définit une sphère concentrique à la planète. Chaque point du sol se trouve au-dessus ou au-dessous, et l'écart mesure l'altitude.

- Pour la Terre, le niveau médian est sous le niveau de la mer, parce que la surface des océans est supérieure à celle des continents.
- Pour Vénus, le niveau médian est le seul défini. Il correspond à un rayon de la planète de 6.051,84 km.
- Pour Mars, on a défini un autre niveau, qui se rapproche un peu du niveau de la mer terrestre : c'est celui où la pression atmosphérique moyenne vaut 6,1 mb (sur Terre, la pression atmosphérique moyenne a aussi une même valeur, à peu près, partout au niveau de la mer).

**La géologie vénusienne**

Les structures rencontrées sur Vénus sont :

*Tessera (pl. tesseræ)*. Une tessera est :

- une surface, plane globalement, mais hachée par des rainures et des crêtes parallèles. La plupart du temps, elles présentent deux systèmes de failles orthogonaux. Le résultat est un terrain particulièrement accidenté. On trouve des tesseræ de forme différente, dans lesquelles l'enchevêtrement des failles forme des chevrons, ou des plumes. L'origine des tesseræ est sans doute une plaine ondulée par des mouvements de terrain, en compression et en expansion (successivement, et selon des directions différentes). Elles n'affectent probablement que la surface. Peut-être résultent-elles d'un glissement de la croûte sur l'asténosphère. Ce sont les structures tectoniques les plus complexes.
- La distance entre deux crêtes voisines est de l'ordre de 5 à 20 km, et la hauteur entre la base et la crête, est de quelques centaines de mètres. Les failles et crêtes peuvent s'étendre sur des centaines de kilomètres.
- Les tesseræ sont en général des plateaux élevés, aux bords pentus. Leur surface est rugueuse à l'échelle du mètre et en-dessous.

*Chasma (pl. chasmata)*. Mot d'origine latine, mais dérivé du grec. On désigne ainsi une vallée dont les bords sont à forte pente, ou un canyon large. On trouve des chasmata sur Vénus, et sur Mars.

**Tesseræ et chasmata sont de nature tectonique** ; elles se forment par des mouvements de terrain.

**Les structures suivantes sont d'origine volcanique**.

**Le volcanisme vénusien**

On connait le volcanisme terrestre ; son modèle s'exporte-t-il sur Vénus ? Y existe-t-il un volcanisme semblable, ou bien différent ?

Certaines formes de volcanisme terrestre proviennent de la tectonique des plaques qui s'y produit (subduction et obduction). Se produisent-elles aussi sur d'autres planètes ? Cette question n'est évidemment pas résolue à l'heure actuelle.

Les fontaines de lave terrestres se forment dès que la lave contient 0,1 à 0,4 % d'eau en poids. Or sur Vénus, les conditions de température et de pression nécessitent 2 % d'eau en poids pour les produire (1 % sur les hauts plateaux où la pression est plus basse) soit à peu près dix fois plus. Sachant que l'eau est rare sur cette planète, on peut penser que les éruptions explosives doivent y être rares.

Supposons maintenant qu'une éruption pyroclastique s'y produise cependant. Alors, la lave éjectée n'ira pas loin, car elle sera fortement et rapidement freinée par la densité de l'atmosphère. La lave s'élèvera trois fois moins haut que sur Terre, et quinze fois moins haut que sur Mars. En conséquence, les dépots pyroclastiques, s'ils existent, ne doivent pas être très étendus.

Les fontaines de lave sur Terre permettent à la lave de se débarrasser de ses composants volatils, et donc sa densité augmente. Il n'en est pas de même sur Vénus, puisque la pression atmosphérique 90 fois plus forte empêche le dégazage. Les éruptions explosives doivent donc être exceptionnelles, et les laves plus légères (elles contiennent davantage d'éléments volatils légers).

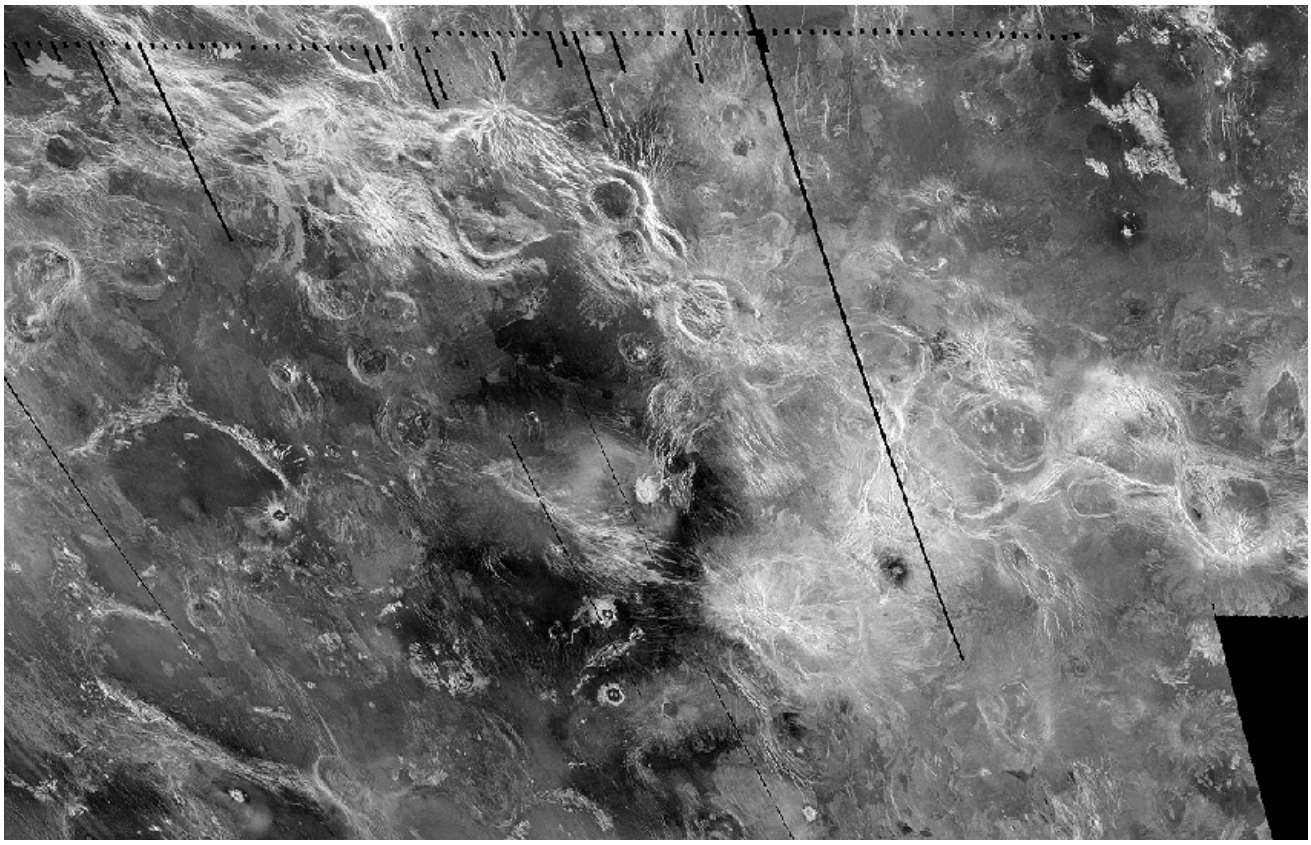
Les éruptions calmes peuvent très bien se produire dans les conditions qui règnent à la surface de Vénus. Et on observe de nombreuses structures volcaniques sur les images produites par les radars embarqués sur les sondes.

*Corona (pl/ coronæ)*. Mot créé par les chercheurs soviétiques, pour désigner les structures elliptiques observées sur les images de Venera 15 et 16. Le centre est plus ou moins irrégulier. Il est cerné par des anneaux concentriques de rides séparées par des sillons. On peut compter jusqu'à 12 rides autour d'une corona. Ce sont des structures typiquement vénusiennes, rares dans les basses terres, fréquentes dans les plaines vallonées. Cette différence de représentation pourrait n'être que le résultat de leur disparition par comblement dans les basses terres. On a recensé 176 coronæ, dont les diamètres vont de 60 à 2.000 km, le diamètre moyen étant de 250 km, et couvrant 49.000 $km^2$. La largeur de l'anneau va de 10

à 150 km. Les coronæ sont assez bien réparties sur la planète, mais avec tout de même un regroupement entre *Aphrodite Terra* (*Atla Regio*) et le groupe *Beta*, *Phoebe* et *Themis Regiones*.

Les coronæ ont été probablement produites par des plumes mantelliques ou par des points chauds.

On trouve des formes variées, parmi lesquelles des coronæ à double anneau (deux structures annulaires concentriques), des coronæ présentant des fractures radiales (en plus de l'anneau), des coronæ multiples entourées par un même anneau, des coronæ asymétriques…

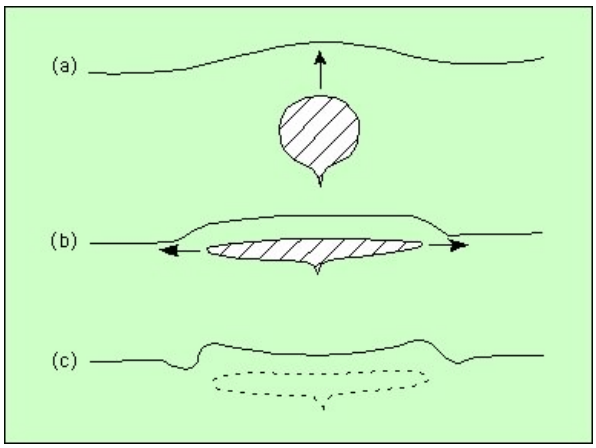


Chaîne de coronæ ; le nord est en haut (Magellan C3-MIDR 14S300;1,framelets 35,36,43,44)

Cette image de Magellan montre une chaîne de coronæ située le long de *Parga Chasma*, qui coupe *Themis Regio*. Themis Regio est à droite. Il s'agit de la plus importante concentration de coronæ sur Vénus. La photo couvre 4.200 km en largeur.

*Tamfana Corona* est entourée d'un fossé, en partie comblé par un flot de lave. Un autre flot de lava a coulé à l'intérieur du rempart. Les deux flots ne sont pas à la même hauteur. On se demande alors s'ils se sont formés ensemble, par la même coulée, donc à la même altitude, puis ont été déformés après, ou bien s'ils ont été produits par deux coulées différentes. L'interprétation géologique n'est pas la même.

L'interprétation raisonnable avec les données actuelles invoque un soulèvement du bord et un effondrement qui produit le fossé, si fossé il y a. Les rides concentriques se forment de la même manière. De la lave très fluide peut ensuite couler et combler en partie les creux.



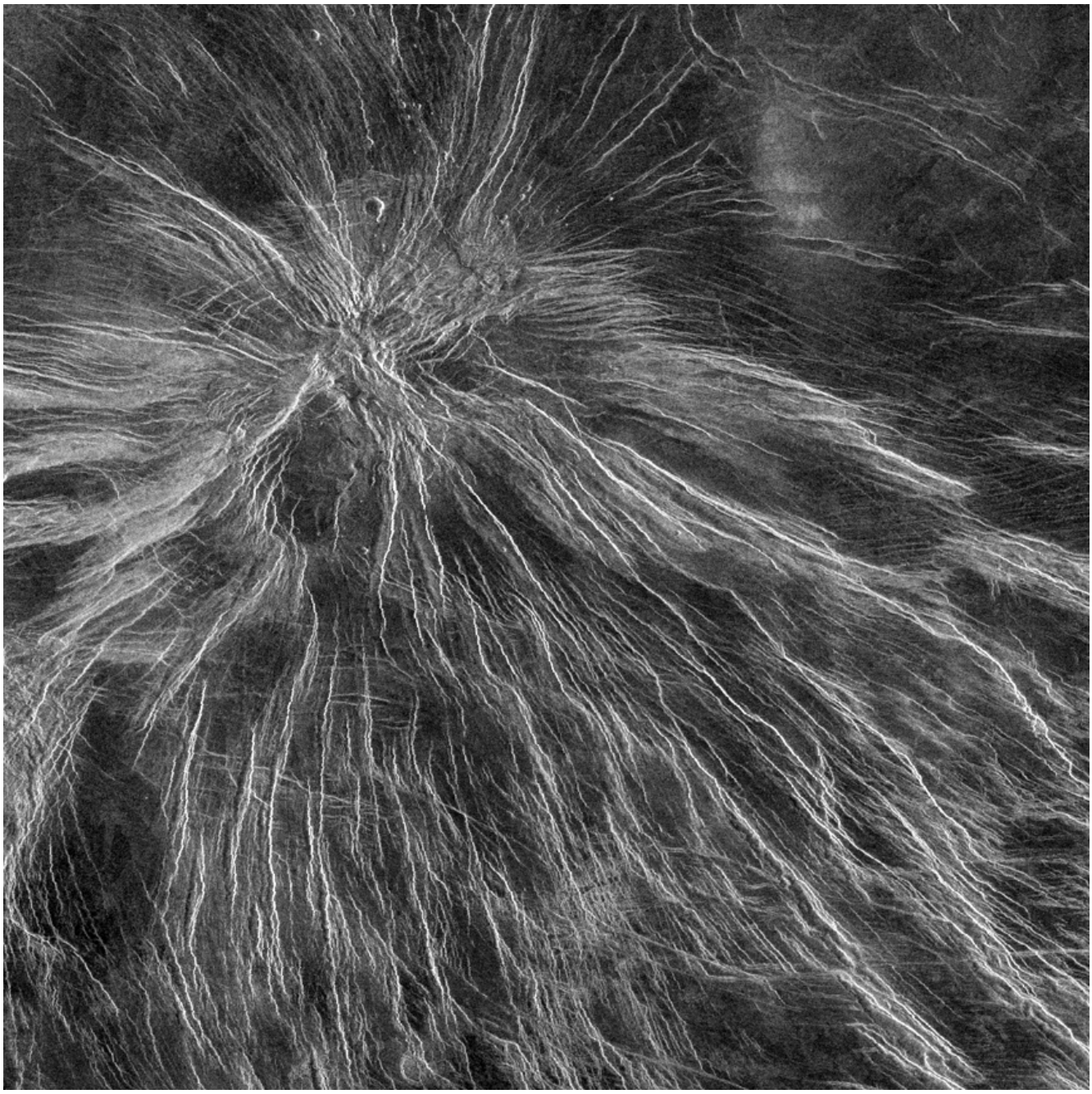

Formation d'une corona

Une corona se forme par la remontée d'un diapir (bulle de lave chaude provenant du manteau). Cette bulle n'est pas assez chaude pour percer la surface, mais suffisamment pour la soulever. Elle provoque tout d'abord un bombement (a). Ensuite, la remontée se ralentit, et le poids de la croûte au-dessus entraîne une poussée horizontale, qui aplatit le diapir et le bombement qui le recouvre (b). Enfin (c), le diapir se refroidit, et une compensation gravifique se produit, qui donne une dépression centrale et souvent un effondrement autour.

***Artemis***. Artemis Corona est une structure circulaire très vaste, entourée d'un ravin, Artemis Chasma. Elle se trouve dans Aphrodite Terra. Elle mesure 2.600 km de diamètre, alors que les coronæ normales sont limitées à 2.000. Le sol du centre est particulièrement déformé, et par places

se trouve jusqu'à 4.000 m au-dessous de la plaine environnante, ce qui particularise encore Artemis par rapport aux coronæ normales. Les creux sont en partie comblés par des épanchements de lave. Artemis Corona est entourée d'un rempart de 150 km de large, qui s'élève par endroits à presque 4.000 m au-dessus du niveau moyen. Le dénivellé entre le bord du rempart et le fond de la dépression atteint donc 7.500 mètres. Il semble qu'elle soit intermédiaire entre une corona et un bombement volcanique.

*Nova (pl. novæ)*. Structure circulaire, un peu semblable à une corona, mais qui ne présente pas ou peu d'anneaux de fractures autour. Par contre, on y voit un dôme central fracturé radialement. Lors de la remontée du diapir, la croûte, poussée par en-dessous, peut se fracturer. Les fractures sont alors radiales, ce qui explique les novæ. Les novæ ne se trouvent que sur Vénus, comme les coronæ.

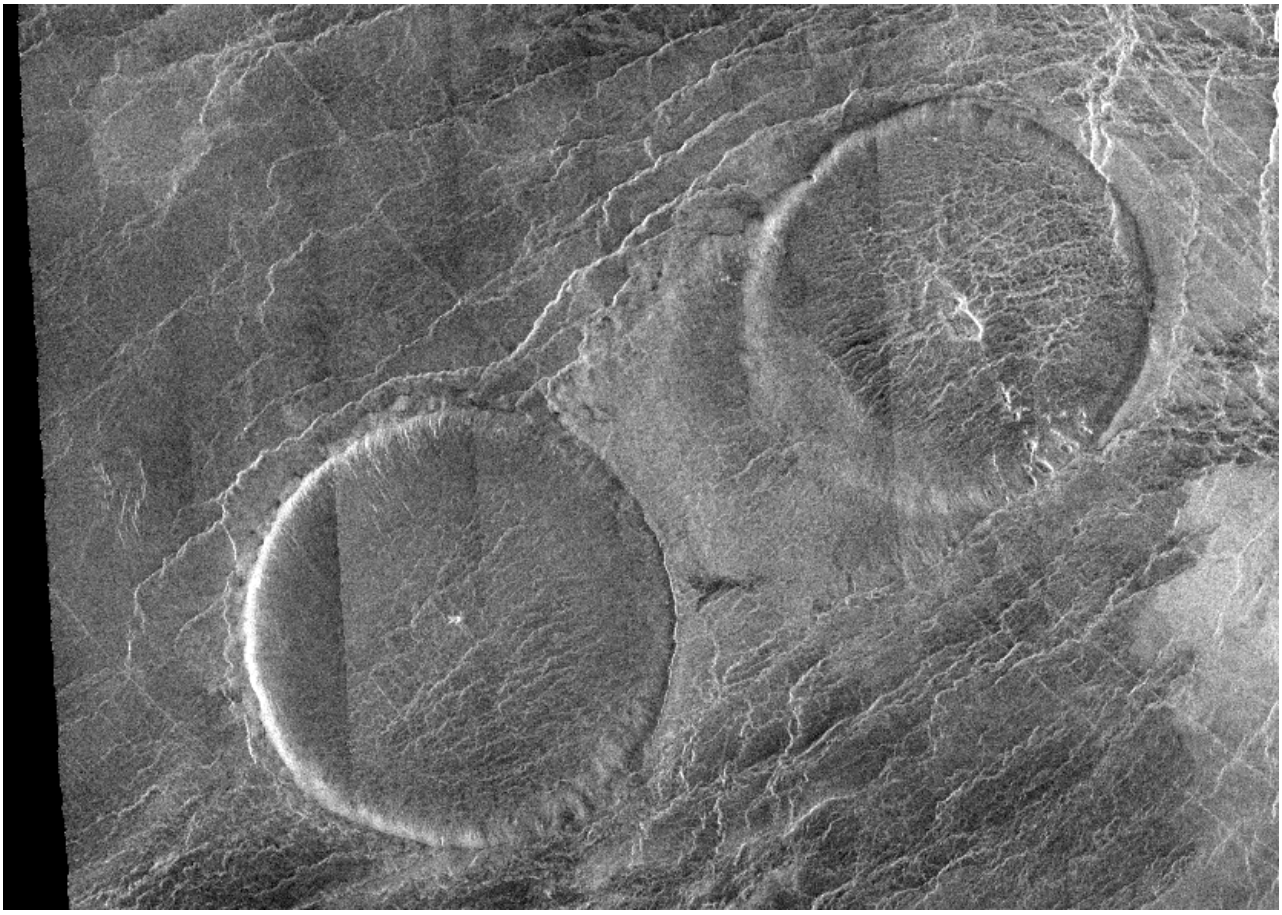


Nova dans Themis Regio ; le nord est en haut (Magellan C1-MIDR 30S279;1,framelet 18)

Cette image montre une nova située dans Themis Regio (au sud de Beta Regio). On distingue un bombement central, duquel partent radialemement de nombreux grabens. On note une forte disymétrie, la densité de grabens et leur longueur étant bien plus importantes du côté sud. Les grabens sont très proches les uns des autres. Le diamètre de cette nova est de 250 km.

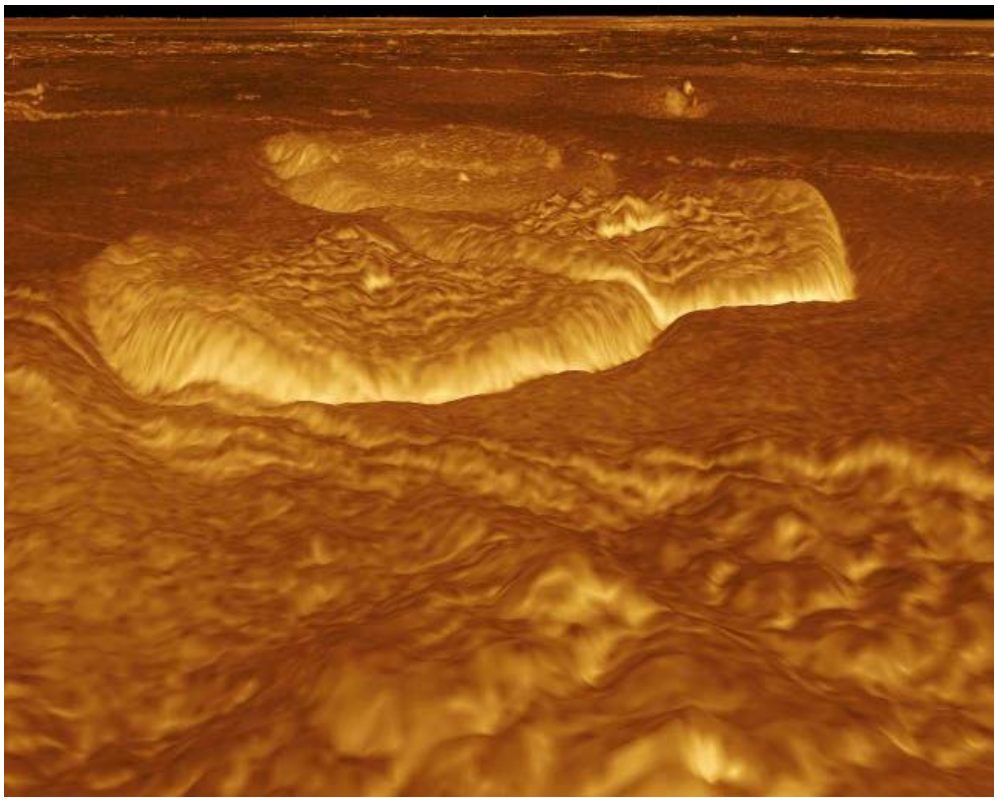
*Arachnoïde*. Ce dernier type de structures vénusienne est analogue aux deux précédents. La croûte se fracture autour d'une corona, en de nombreux graben radiaux.

*Pancake*. Littéralement, crêpe. C'est une forme de volcanisme typique de Vénus, car on n'en trouve nulle part ailleurs dans le système solaire.



Pancake dans Tinatin Planitia, est de Alpha Regio ; (Magellan C1-MIDR 15N009;1,framelet 36) ; nord en haut

Cette image montre deux pancakes, le plus grand ayant 62 km de diamètre. Ils présentent une forme plate, et sont peu élevés, ce qui leur vaut l'apellation de crêpe. Les bords sont très pentus. Leur hauteur est de quelques centaines de mètres. Sur le plateau, on voit des fractures, qui ont pu se produire pendant la formation ou après. Au centre, il y a une petite dépression.



Paysage de synthèse de Vénus, obtenu d'après les données de la sonde Magellan, NASA

Bord est d'Alpha Regio, vu d'une altitude de 2.400 mètres. Le diamètre moyen des dômes visibles est de 25 km, pour une altitude maximum de 750 m. Les fractures visibles autour des dômes sont à la fois plus vieilles et plus jeunes. Les dômes pourraient avoir été produits par des éruptions de lave visqueuse, peut-être au cours de plusieurs éruptions successives, chacune augmentant un peu l'altitude.

Les pancakes se trouvent sur toute la surface de la planète, dans les plaines, souvent autour des coronæ. Le diamètre moyen est de 24 km, pour

700 mètres de hauteur. On en trouve par paires, ou même par amas.

Leur forme semble indiquer une formation avec de la lave assez visqueuse, qui n'a pas pu s'écouler au loin, et s'est accumulée sur place, donnant un sommet plat et des pentes raides. Une lave andésitique pourrait donner l'explication. Mais une plus classique lave basaltique (plus fluide) dans les conditions de pression qui règnent sur Vénus, pourrait aussi produire ces empilements. En effet, une lave visqueuse sur Terre se forme par contact et mélange avec la croûte, par la subduction. Si une analyse plus précise venait à montrer une composition andésitique pour ces pancakes, l'histoire de Vénus pourrait en être changée.

**Volcan bouclier**. Un volcan bouclier est produit par la surrection d'une lave très fluide, capable de s'écouler très loin de la cheminée. Sur Terre, ce sont des laves provenant directement du manteau, sans mélange à la croûte. Ce sont les laves qu'on s'attend à trouver sur Vénus, si la tectonique des plaques ne s'y produit pas. La pente est très faible, le diamètre de l'édifice important. Le bouclier est convexe. Les grands volcans que l'on voit sur les images de Magellan sont de ce type.

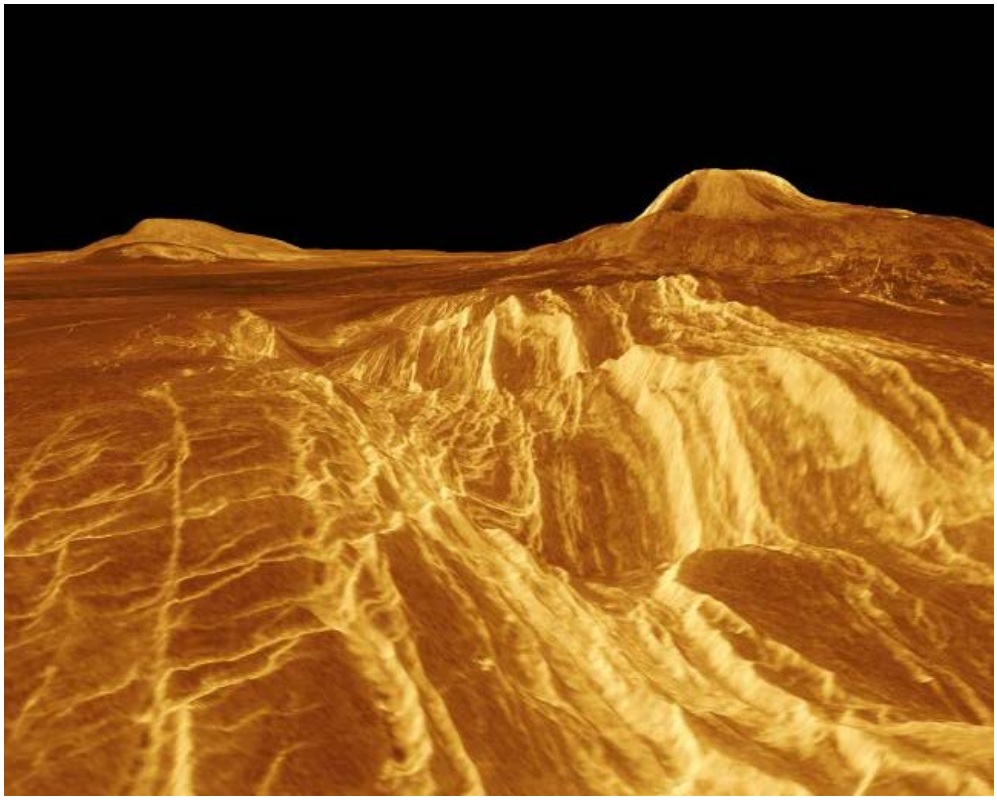
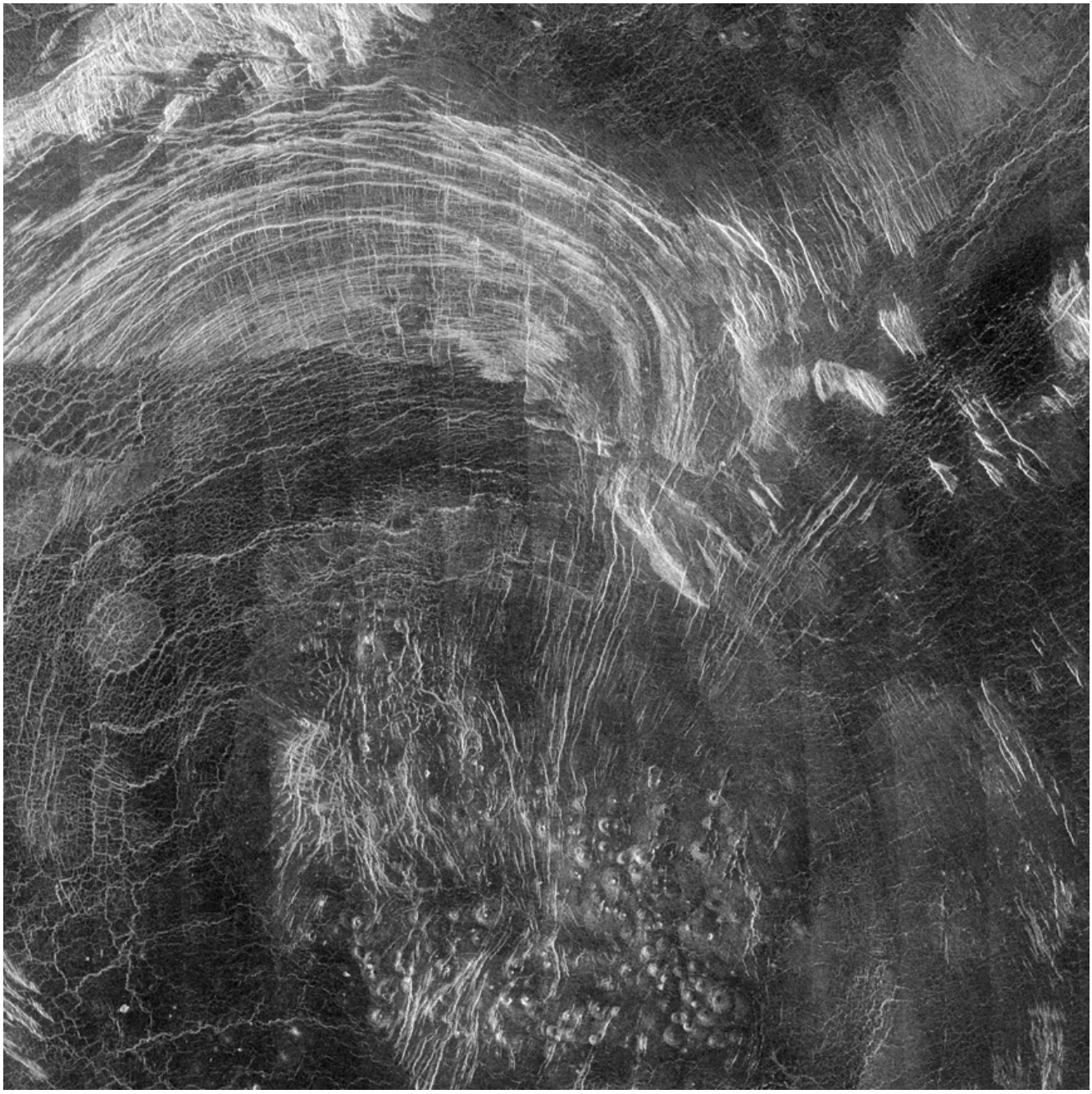


Image de synthèse, obtenue à partir des relevés radar de la sonde Magellan, NASA

L'image montre Eisla Regio, telle qu'elle apparaîtrait d'une altitude 1.200 mètres, à 700 km de *Gula Mons* (le volcan de droite), qui culmine vers 4.400 mètres. *Sif Mons* est le volcan de gauche. Un peu moins haut, il atteint seulement 3.500 mètres. Les couleurs ont été choisies d'après les résultats des sondes soviétiques, seules à s'être posées sur le sol de Vénus et à avoir transmis des photos. Le paysage a été entièrement construit par ordinateur, d'après les données altimétriques fournies par la sonde Magellan. Connaissant l'altitude de chaque point de la planète, il est possible de créer cette sorte de paysage. Mais attention, **toutes** ces images sont produites avec une altitude exagérée ! Les vrais reliefs ressemblent à cela, mais sont bien moins importants…

On observe également de très nombreux petits volcans boucliers, très souvent groupés en champs de plusieurs dizaines d'individus.



Boana Corona ; le nord est en haut (Magellan C1-MIDR 30N135;1,framelet 37)

Boana Corona se situe au nord de Thetis Regio. La corona est manifeste par les anneaux qui la ceinturent. Le centre est parsemé de failles brillantes au radar, mais on y voit surtout un champ de volcans boucliers. La corona mesure 225 km dans sa plus petite dimension.

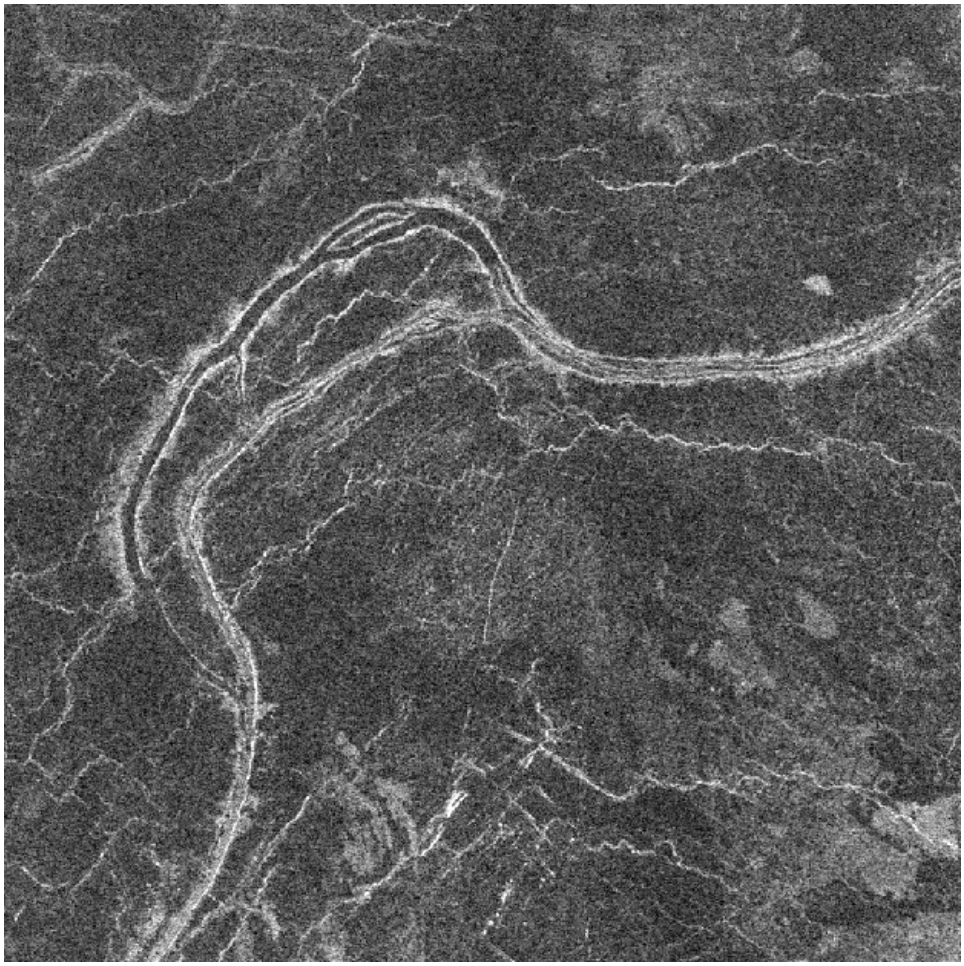
*Calderas*. C'est un nom espagnol signifiant chaudron. Il est appliqué sur Terre pour désigner le sommet de certains volcans qui s'est effondré après une eruption. Lorsque la pression retombe dans la chambre magmatique, le poids des matériaux accumulés au sommet est trop important pour rester en équilibre. Le sommet s'effondre alors et produit des structures en terrasse. Si le volcan produit une lave riche en silice, elle est visqueuse, et produit des éruptions explosives. La chambre magmatique se vide brusquement. Si au contraire la lave est pauvre en silice, elle est très fluide, et la chambre se vide par écoulement. Le résultat final est le même.

On trouve des calderas de ces deux types sur Terre. Mais le plus bel exemple est sur Mars, c'est le sommet d'Olympus Mons.

L'exemple typique sur Vénus est *Sacajawea Patera*, sur Lakshmi Planum. Elle mesure 280 par 140 km. Son plancher est recouvert de laves sombres au radar, donc lisses.

**Chenaux**

Enfin, il existe des chenaux de lave qui s'étendent jusqu'à 6.000 km. Pour avoir une telle extension, il faut que la lave ait été extrêmement fluide, et que son débit ait été très important.



Lo Shen Valles, chenal de lave au nord d'Ovda Regio ; le nord est en haut (Magellan C1-MIDR 15S095;1,framelet 18)

Remarquez le cheminement de la lave, semblable à celui d'un fleuve, montrant des branches et des îles. Ce chenal, qui part de Fortuna Tessera, est de longueur vraiment inhabituelle. Sa largeur est de l'ordre de 2 km. La zone représentée mesure 50 km.

**Les flots de lave**

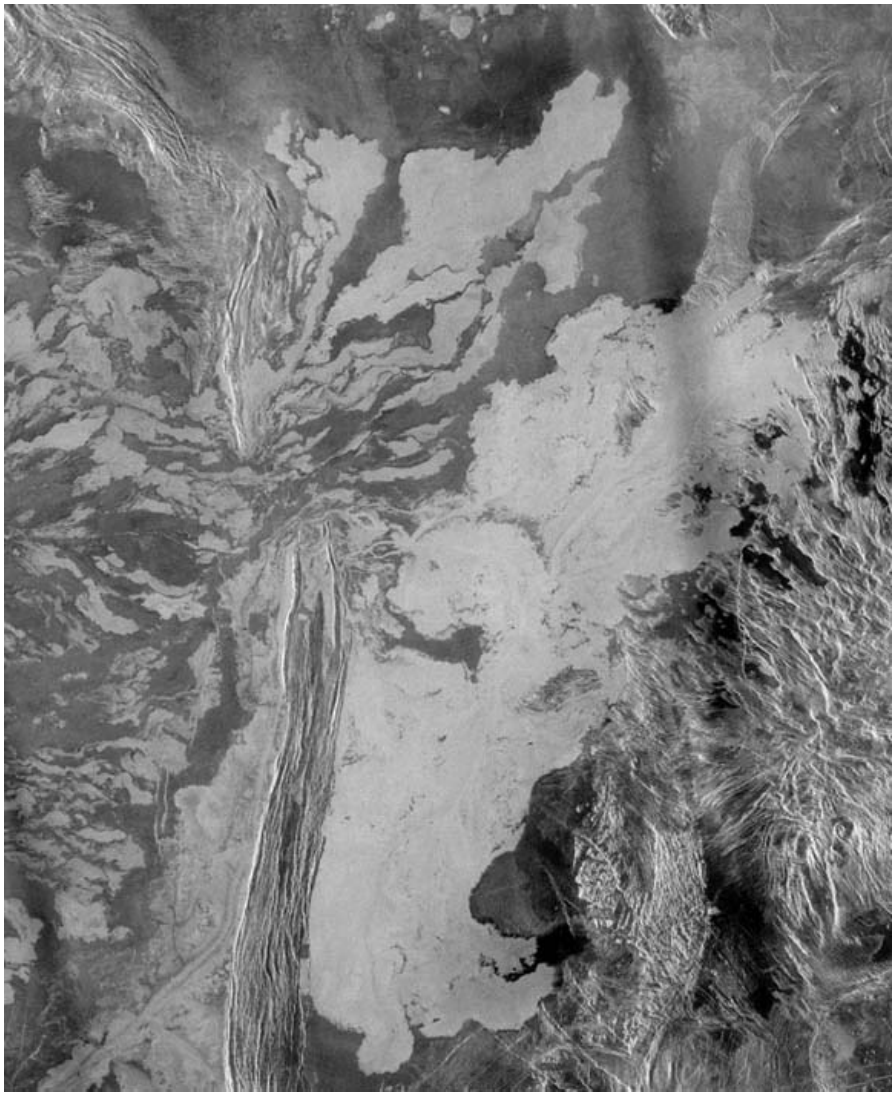


photo radar, sonde Magellan, NASA

Zone située dans Lada Regio, à 47° de latitude sud, et 25° de longitude est. La photo mesure 550 km de large. On y voit un flot de lave qui s'écoule de la gauche vers la droite, en franchissant une faille. La lave présente des zones brillantes aux ondes radar, et des zones sombres. Après franchissement de la faille, le flot s'étale, et présente une surface très brillante. L'épanchement couvre une surface d'une centaine de milliers de kilomètres carrés. La lave provient de la caldéra Ammavaru, qui est située à 300 km à l'ouest de l'image.

**Age de la surface**

La surface de Vénus, comme en attestent les comptages de cratères, est relativement jeune. Elle a entre 300 millions et 1 milliard d'années. Les tesserae sont plus anciennes que les autres terrains, alors que les grandes régions volcaniques sont au contraire bien plus jeunes. *Maat Mons* est l'une des zones les plus récentes, elle n'a sans doute pas plus de 100 millions d'années ; elle est même peut-être contemporaine.

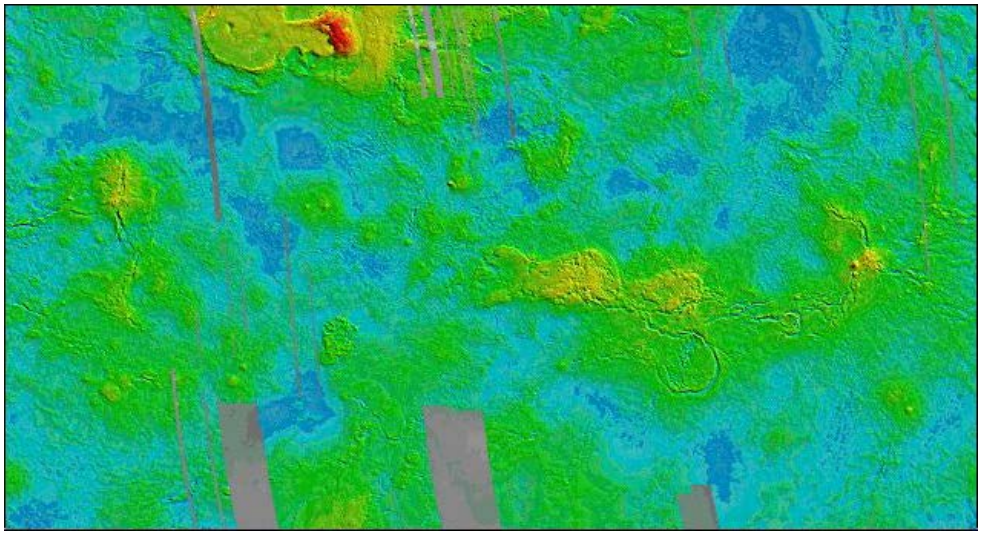
Le volcanisme est-il encore actif sur Vénus ? D'après les propriétés globales de la planète, ce serait possible : Vénus a presque la même masse que la Terre, donc même quantité de matériaux fissiles, ayant pu maintenir la chaleur interne jusqu'à aujourd'hui. Mais aucun volcan en éruption n'a été observé. Ceci n'est pas contradictoire : les volcans ne sont pas en éruption permanente, mais présentent des périodes d'activité séparées par de longues pauses.

On peut établir un argument quantifié. Pour chaque région, on divise le volume de laves qui la constituent par la durée de sa mise en place (âge de la partie la plus vieille moins âge de la partie la plus jeune). On constate alors que l'activité volcanique était intense il y a 800 millions d'années, le taux d'émission étant semblable à celui que l'on constate aujourd'hui sur Terre (volcans sous-marins y compris). Par contre, dans les régions les plus jeunes, le taux est 20 fois plus faible (correspondant à l'activité d'un seul volcan terrestre contemporain). L'ensemble de la croûte vénusienne ne dépassant pas le milliard d'années, il a dû y avoir un épisode volcanique intense autour de 800 MA, qui a renouvelé entièrement la croûte vénusienne. Ensuite, l'activité a diminué.

Cetains modèles envisagent qu'il y ait eu plusieurs épisodes intenses successifs, produits par des réchauffements internes, chacun renouvelant la croûte. Mais rien ne permet de les confirmer observationellement.

## *Géographie vénusienne*

Vénus, comme la Terre, présente des plaines et des montagnes. Mais bien sûr, la température ne lui permet pas d'avoir aujourd'hui des océans. Les plaines de Vénus dessinent un immense X à la surface de la planète. *Atalanta Planitia* (en haut à droite), *Niobe Planitia*, *Lavinia Planitia* et *Helen Planitia* (en bas à gauche) constituent la branche nord-est-sud-ouest, *Sedna Planitia* (en haut), *Guinevere Planitia* et *Aino Planitia* la branche nord-ouest-sud-est. Cette structure très remarquable a été observée par les premières sondes spatiales soviétiques possédant un radar :



Carte topographique de Vénus, montrant la structure en X ; NSSDC Photo Gallery

Cette carte en fausses couleurs montre très bien la structure en X (bleu, bleu-vert) des grandes plaines, ainsi que les trois principaux massifs montagneux qui les délimitent (en rouge ou orange). Le bleu colore les plaines les plus basses, le rouge les plus hauts sommets. Ishtar Terra au nord (en haut de l'image) ressort très distinctement ; Aphrodite Terra vers l'équateur (au centre) est moins élevée, quoique plus étendue ; enfin, Beta Regio à l'ouest (à gauche) est encore plus discrète.

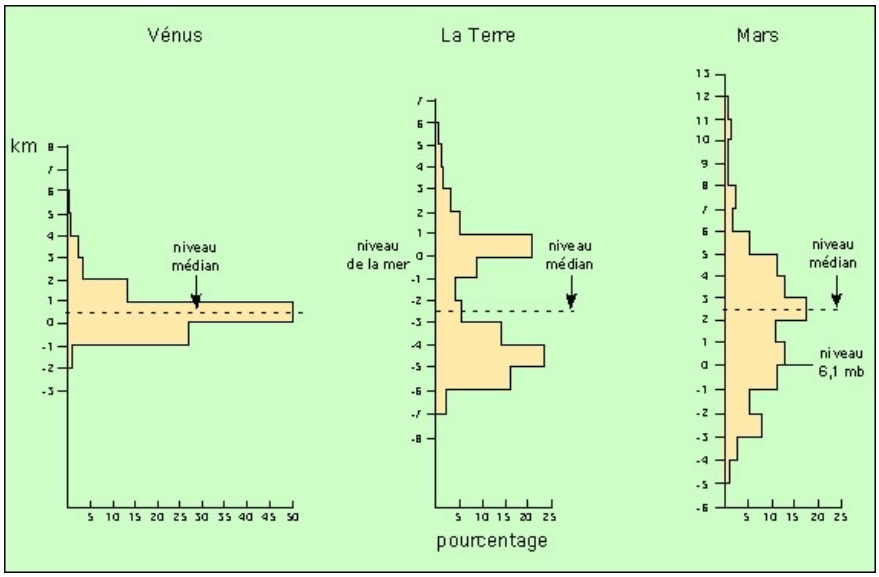
La distribution des zones déformées (montagneuses) indique que les forces qui les ont produites concernent des régions vastes, par opposition aux montagnes terrestres, qui suivent les marges des plaques tectoniques.

Vénus est relativement plate, les pentes y sont généralement moins fortes que sur Terre. On y trouve :

- des plaines ondulées (plus de la moitié de la surface totale, en vert sur la carte) s'écartant de moins de 500 m du niveau de référence,
- des plaines basses de moindre étendue (27 %, en bleu),
- des régions montagneuses plus petites encore (8 %, rouge ou orange) qui s'élèvent de 2 à 11 km au-dessus du niveau moyen.

Un histogramme des altitudes est très intéressant. Cet histogramme prend les intervalles d'altitude, et leur fait correspondre la surface de la planète dont l'altitude se trouve dans l'intervalle. Par exemple, l'histogramme de Vénus montre, par le rectangle le plus grand, que 50 % (pourcentage, axe horizontal du dessin) de la surface de la planète se trouvent entre les altitudes de 0 et 1.000 mètres (limites du rectangle sur l'axe vertical).

La comparaison entre Vénus, la Terre et Mars montre d'un coup d'œil les différences morphologiques entre ces trois planètes :




Histogramme des altitudes, d'après Cattermole, *Venus,the geological story*

L'histogramme pour la Terre, bimodal (deux bosses), s'explique par la présence des continents (bosse entre 0 et 1.000 m), et des océans (bosse entre -4.000 et -5.000 m). Il existe peu de terres entre 1.000 et 2.000 m dans les océans (5 %), ce sont les marges continentales. De même, il y a peu (en surface) de sommets (au-dessus de 2.000 m), et de fosses marines (au-dessous de 6.000 m).

L'histogramme trimodal de Mars montre les plaines basses du nord (-2.000 à -3.000 m sous le niveau moyen), le plateau de Tharsis et ses volcans ( de 0 à 1.000 m), et enfin les hauts plateaux cratérisés du sud (entre 2.000 et 3.000 m).

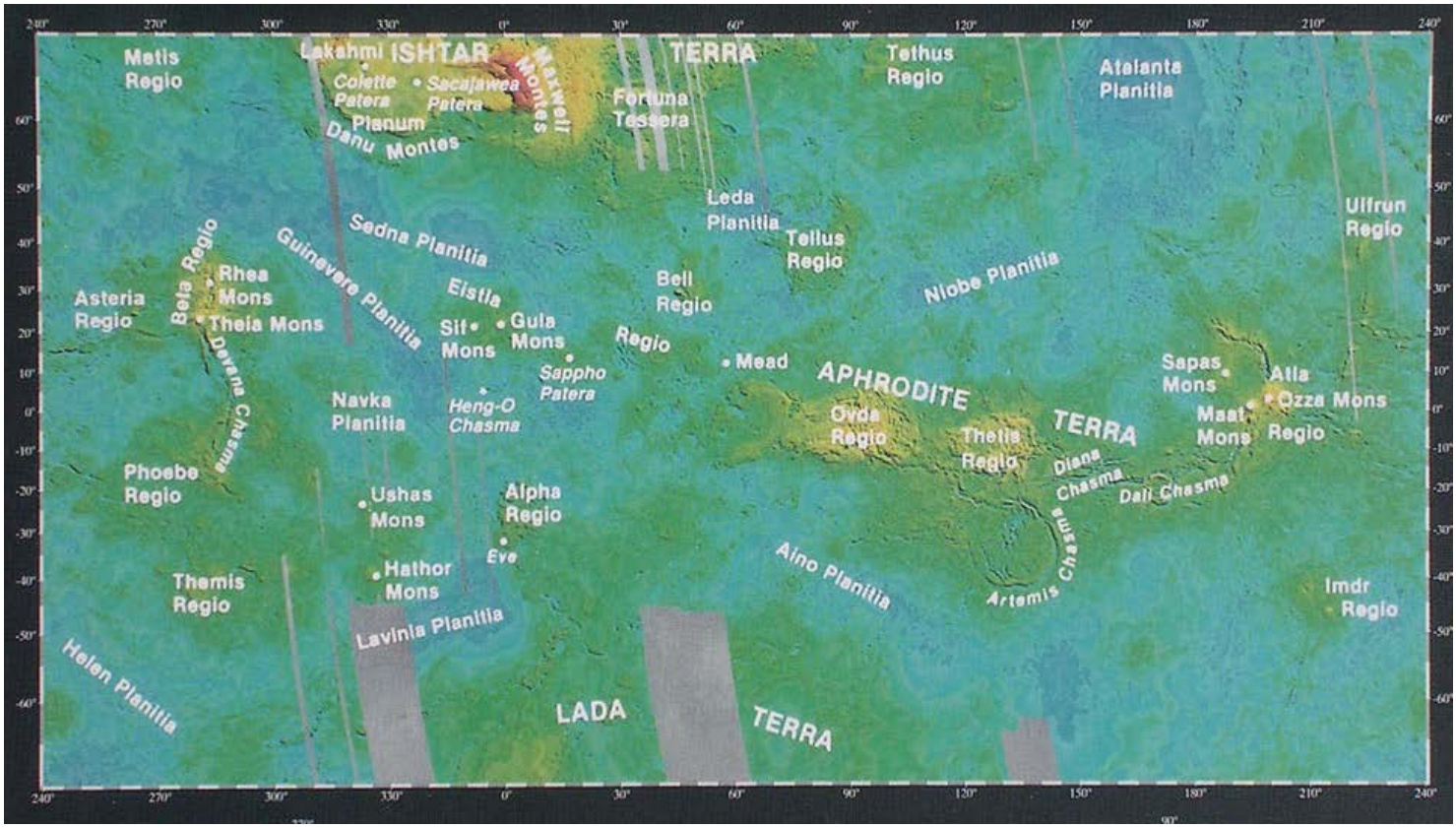
En comparaison, l'histogramme unimodal de Vénus montre que la grande majorité des terres se trouvent au même niveau. Et de ce fait, elles définissent le niveau moyen, ce qui explique que le pic soit juste à ce niveau. Il y a très peu de terres basses ou hautes. On peut constater que les trois paliers du pic totalisent presque 90 % des terres, qui se répartissent sur seulement 3.000 m d'altitude. Il ne reste donc qu'un peu plus de

10 % des terres à répartir entre les zones basses et les montagnes. Vénus est une vaste plaine…

On a montré aussi que les pentes les plus fortes caractérisent les plus hauts sommets, et que les zones les plus rugueuses (les plus gros cailloux au sol) se trouvent dans les hauteurs.

Les parties les plus basses de Vénus se trouvent au nord, dans *Atalanta Planitia*, *Leda Planitia*, et *Sedna Planitia* ; mais le point le plus bas se trouve dans *Diana Chasma* près de l'équateur, à 4.000 m sous le niveau moyen. Le point le plus haut, dans les *Monts Maxwell*, est à 11.000 m d'altitude.

Examinons maintenant une carte plus détaillée et commentée :




Carte topographique de Vénus en fausses couleurs ; Magellan product P-41938

Le premier coup d'œil montre que les deux principales structures, Aphrodite Terra et Ishtar Terra, ne sont pas des blocs compacts, mais sont chacune constituées de diverses parties plus ou moins individualisées. Nous allons détailler quelques régions particulières, représentatives de l'ensemble.

**Les plaines**

On distingue grossièrement deux sortes de plaines : les *plaines ondulées*, et les *terres basses*. Les premières sont plus importantes en superficie couverte, et s'étagent entre 0 et 2.000 mètres d'altitude ; les terres basses sont en-dessous du niveau moyen. Les terres basses sont très basses, elle atteignent 4.000 m sous le niveau moyen. C'est pour cela qu'elles tirent le niveau moyen vers le bas.

La surface de Vénus est presque entièrement recouverte de matériaux volcaniques. On y voit de vastes plaines de lave, agrémentées de champs de dômes volcaniques. Dans les zones montagneuses, on trouve de très grands volcans boucliers.

Sedna, Guinevere, Aino, Niobe, Atalanta Planitiæ sont des basses terres (les parties en bleu et bleu-vert sur la carte).

Les terres basses sont plus régulières, globalement, que les plaines ondulées, mais on y trouve tout de même quelques cratères d'impact, ainsi que des coulées de lave, des dômes et des boucliers volcaniques, et des plissements très longs.

Atalanta est la plaine la plus basse. Un plissement la traverse presque entièrement, et continue à travers la région polaire nord. C'est le plissement le plus long et le plus élevé de Vénus. On trouve à la surface de Guinevere Planitia les mêmes ingrédients que sur Atalanta, mais en plus on observe de grandes coronæ. Vers le sud, la plaine devient accidentée, mais les creux sont en partie remplis par des laves postérieures. Ceci se retrouve dans nombre d'autres plaines, et la question est de savoir si toute plaine ne serait pas une ancienne tessera recouverte.

Les plaines ondulées sont caractérisées, au radar, par une diffusion intermédiaire entre entre celles des basses terres et des hautes terres. Les pentes sont de l'ordre de 1,5° à 3° sur ces échelles de la dizaine de mètres. On observe également des structures circulaires aux remparts bas, que l'on a pris au début pour des cratères d'impact. Par rapport au diamètre, la profondeur est très faible.

*Guinevere Planitia*, et *Sedna Planitia* atteignent 1.000 m sous le niveau moyen à leurs points les plus bas. Sur ces plaines sont érigées de petites formations montagneuses : *Eistla Regio*, *Alpha Regio* et *Bell Regio*. Eistla Regio contient deux magnifiques volcans, nommés *Sif Mons* et *Gula Mons*. Alpha Regio est un plateau bordé de grands dômes volcaniques. Bell Regio, enfin, est un vaste dôme d'un millier de km de diamètre, allongé dans la direction nord-sud. On y trouve Tepev Mons, volcan double, et diverses structures volcaniques.

Les plaines montrent ausi des structures inconnues ailleurs que sur Vénus : les coronæ. Ce sont des déformations de la croûte probablement formées par des plumes mantelliques ou des points chauds. La plus importante est Heng-O corona, dont le diamètre atteint 750 km, et qui forme un grand dôme.

*Guinevere Planitia*, avec les plaines adjacentes, forme dans la région équatoriale une structure en forme de croix. La plus grande plaine vénusienne est *Atalanta Planitia*, dont l'altitude moyenne est 1.400 m sous le niveau moyen. Cette plaine est très lisse, et dépouvue de structures. Ceci fait penser aux mers lunaires. Ce serait une véritable mer s'il y avait encore de l'eau sur Vénus. Les mesures gravifiques par ailleurs montrent que la croûte y est plus fine et la densité du sol plus faible que dans les hauts plateaux vallonés.

**Les plateaux**

Alpha Regio est une vaste zone de terres hautes, de 1.300 × 1.500 km, brillante au radar. Elle est située dans l'hémisphère sud, en face d'Ishtar Terra, à l'intersection des deux branches du X formé par les plaines (voir ci-dessous). L'altitude des bords est de 2.000 m au-dessus du niveau moyen, et 500 mètres au-dessus des plaines environnantes, alors que le centre est déprimé jusqu'au niveau moyen. Alpha Regio abrite une importante corona, *Eve*. Les structures observées dans Alpha Regio sont probablement produite par des forces de compression. Il s'agirait alors de plissements.

Le sol que nous observons aujourd'hui est le résultat d'une évolution plus ou moins importante, qui a suivi la phase d'accrétion de la planète. Le sol peut être modifié par '

| | |
|---|---|
| **tectonique** | pas d'indices probants |
| **volcanisme** | abondant ; de nombreux types de volcans ; plaines volcaniques |
| **impacts de météorites** | peu de cratères ; la surface semble jeune |
| **érosion** | minime ; de nature assez différente de l'érosion terrestre |

**Les structures**

La géologie s'est constituée à partir de l'étude de la Terre, comme son nom l'indique. Lorsque les premières sondes spatiales sont allé explorer d'autres planètes (et satellites), les paysages qu'on y a découverts ont intéressé les géologues, puisqu'ils doivent procéder des mêmes mécanismes généraux que sur Terre. Leur terrain de jeu s'est subitement agrandi dans des proportions considérables.

Ce qui était prévisible est arrivé : on a trouvé ailleurs ce qu'on connaissait ici, … mais pas seulement ! Le volcanisme est présent en de nombreux endoits dans le système solaire, sous des formes parfois très différentes de ce que nous connaissons. Vénus n'échappe pas à cette règle. De même, les paysages sont parfois semblables, mais certains sont de nature inconnue sur Terre.

On trouvera dans les fiches la liste expliquée des figures (formes visibles au sol) que l'on observe sur les différentes planètes. Le nom d'une figure indique sa nature.

Ces structures sont représentées sur Vénus dans des proportions diverses : les plaines (*planitiæ*) couvrent la plus grande surface, et par importance décroissante, on trouve ensuite les *tesseræ*, zones collinaires, *coronæ*, volcans et montagnes. Ces grandes structures ont une distribution qui reflète leur origine.

Plus en détail, on observe des traînées éoliennes, des coulées de lave lobées, des chenaux, des dunes, et des cratères d'impact de plus de trois kilomètres de diamètre et des éjecta d'impact.

**Les montagnes**

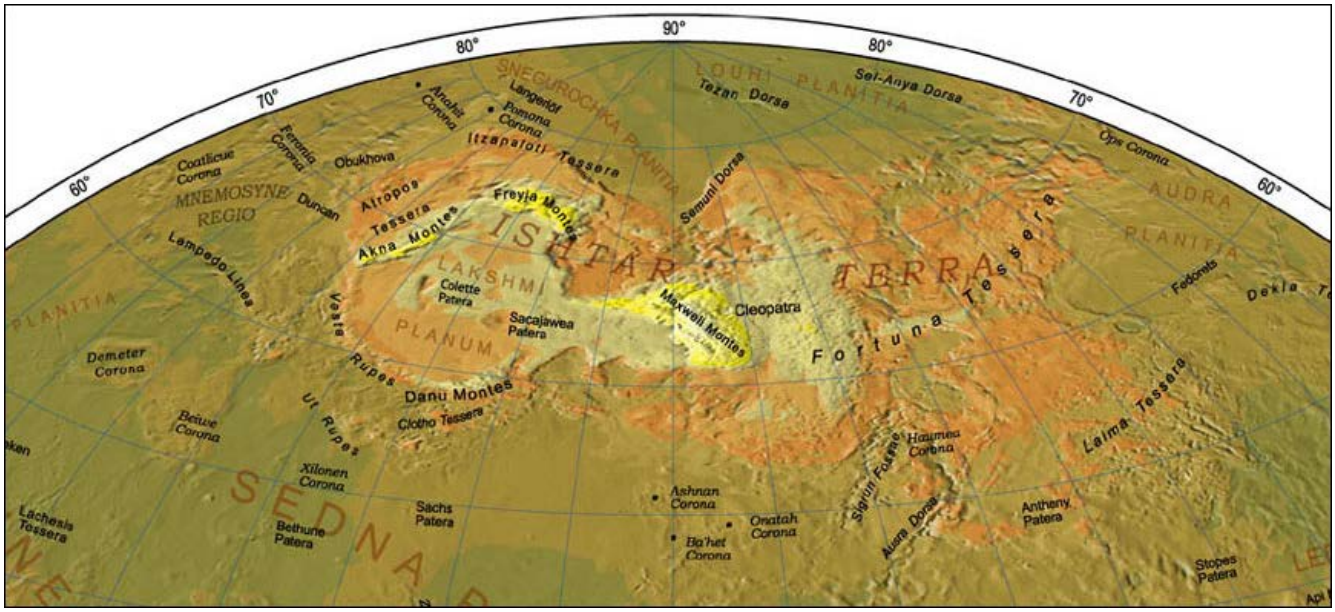
Les régions montagneuses de Vénus, bien que beaucoup moins étendues que les autres, sont sans doute plus intéressantes géologiquement. On en distingue trois principales :

- *Ishtar Terra*, au nord, de la taille de l'Australie (Ishtar est le nom Sumérien de Vénus) ;
- *Aphrodite Terra*, dans l'hémisphère sud et proche de l'équateur, de la taille de l'Afrique (Aphrodite est le nom grec de Vénus) ;
- *Beta Regio*, dans l'hémisphère nord, un peu au-dessous d'Ishtar Terra et vers l'ouest. Le plus petit des trois massifs.

La plupart des montagnes sont des volcans, dont l'activité passée est sans doute à l'origine du soufre qui a produit l'acide sulfurique des nuages.

**Ishtar Terra** est un vaste ensemble qui se construit autour de *Lakshmi Planum* (bien que celui-ci ne soit pas au centre, et ne constitue qu'un quart à peu près en surface). Situé entre 60 et 70° de latitude nord, son extension est de 3.700 km dans le sens est-ouest, et de 1.500 km dans le sens nord-sud.

Lakshmi Planum est un haut plateau en forme de poire, dont la tige serait au nord. Son altitude générale est de plus de 2.000 m au-dessus du niveau moyen. Il est situé à l'ouest d'Ishtar Terra, et sa taille est le double de celle du Tibet. Il est ceinturé par des massifs montagneux : *Akna Montes* à l'ouest (8 km d'altitude), *Freya Montes* au nord (9 km d'altitude), et *Maxwell Montes* à l'est (12 km d'altitude). Au sud, la bordure formée par *Danu Montes* est moins élevée et descend en pente raide à l'ouest vers un escarpement géant nommé *Vesta Rupes*, qui tombe de 3 à 4 km vers la plaine, et qui borde Lakshmi Planum au sud-ouest. Le haut de Vesta Rupes, qui touche au plateau, présente des failles et rides qui se croisent et forment un paysage chaotique. Ces montagnes sont formées de longues crêtes, sur des centaines de km, séparées par des vallées espacées de 1 à 20 km.



Ishtar Terra ; fragment d'une carte topographique réalisée par Ralph Aeschliman

Chacun de ces massifs montagneux est lui-même bordé d'une tessera d'altitude inférieure à celle du plateau : *Itzpapalotl Tessera* au nord de Freya Montes, *Atropos Tessera* au nord-ouest de Akna Montes, *Clotho Tessera* au sud de Danu Montes, et enfin et surtout *Fortuna Tessera* à l'est de Maxwell Montes.

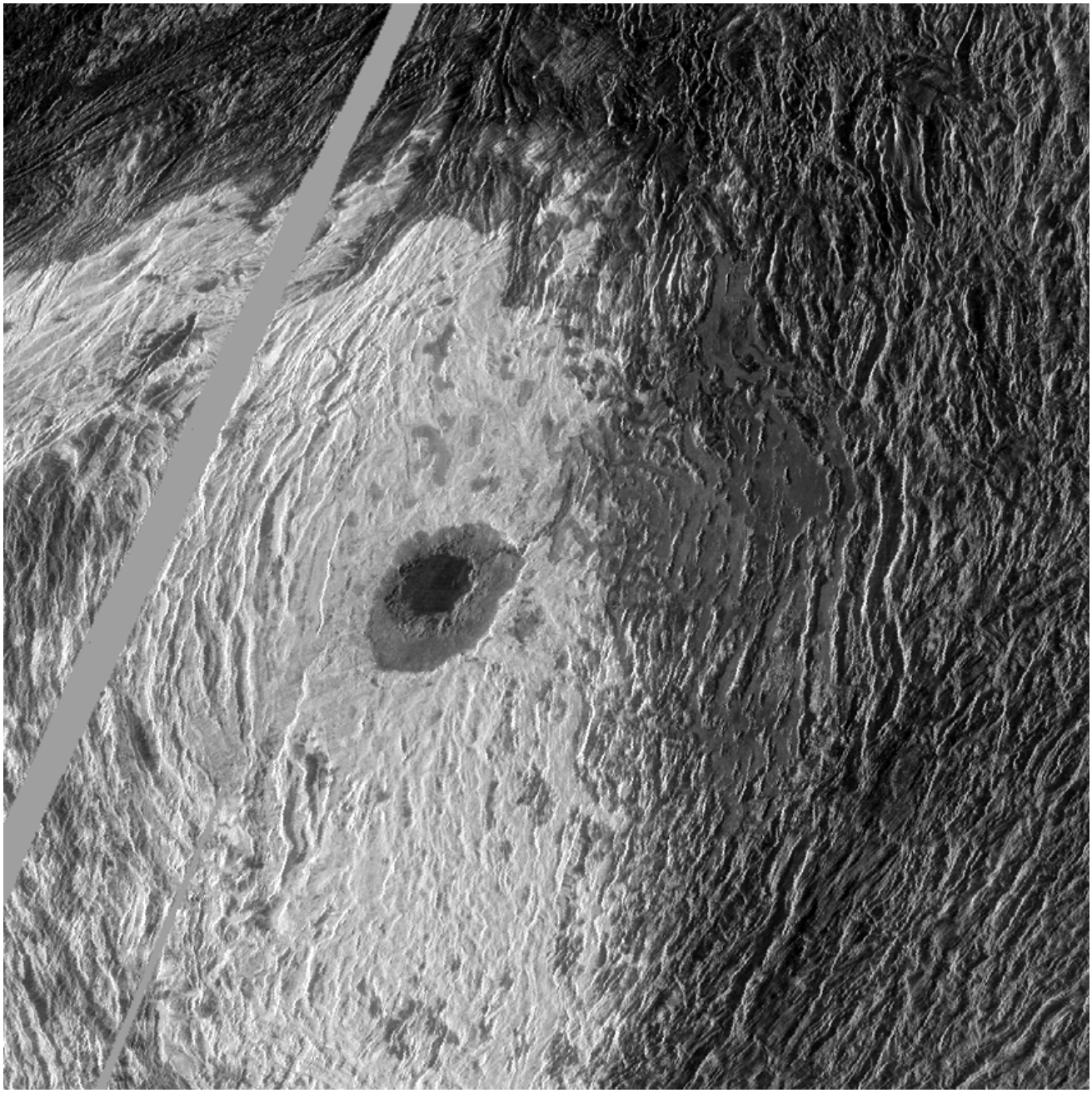
Enfin, tout cet ensemble est ceinturé de plaines.

**Lakshmi Planum** présente deux grandes dépressions, *Colette Patera* (120 × 80 km) et *Sacajawea Patera* (280 × 140 km), qui sont de grandes caldeiras. Elles sont entourées de fractures annulaires. Il existe d'autres calderas plus petites sur le plateau. A l'est de Sacajawea, on trouve un terrain fracturé très complexe, en partie comblé par des flots volcaniques plus récents. De tels flots recouvrent la partie sud de Lakshmi Planum.

Les **Danu Montes** au sud s'étendent sur 1.200 km, et dominent les plaines de 3.000 m. A leur bordure ouest, *Vesta Rupes* présente une pente moyenne de 20°. De l'autre côté, la partie nord-est de Danu Montes est le plissement le plus récent de cette zone ; il a été produit par une force de compression nord-ouest-sud-est. Les Danu Montes se sont formés après Lakshmi Planum.

Les **Freyja Montes** présentent une allure générale semblable à celle des Danu Montes, avec des grabens perpendiculaires à la pente. Les chaînes de collines, qui atteignent 140 km de long, sont espacées de 1 à 4 km, davantage du côté de la plaine, moins vers les montagnes.

**Maxwell Montes**, à l'est de Lakshmi Planum, est le plus haut massif de Vénus. Sa base est à 5.000 m d'altitude, et son point le plus élevé, qui culmine à 11.000 m, est le toit de la planète. A l'est du sommet, se trouve un immense cratère d'impact nommé *Cleopatra*. Son diamètre est de 105 km. Il est à 350 km des pentes raides au sud-ouest des Monts Maxwell. C'est le seul dans ce massif. Les éjecta qui l'entourent ont modifié les propriétés optiques du sol, qui apparaît beaucoup plus brillant au radar.



Partie ouest de Maxwell Montes, et cratère Cleopatra (Magellan C2-MIDR 60N033;2, framelet 19)

Le flanc ouest des Maxwell Montes est extrêmement brillant au radar. C'est un complexe de cannelures. Dans la partie nord-ouest, les crêtes ont un profil en dents de scie, et sont espacées de 10 à 20 km. Cette structure a dû être modifiée par la gravité. Son aspect rapproche les Maxwell Montes des autres massifs montagneux. Le bord sud des monts Maxwell, brillant aussi, ne présente pas le même aspect de crêtes et vallées. On y voit des structures alignées le long de la pente, et d'autres en arc de cercle, centrées sur le sommet. Ces dernières résultent sans doute de glissements de terrain.

Le problème géologique essentiel des monts Maxwell est leur hauteur. Le poids d'une telle montagne ne peut être supporté par une croûte quelconque. La croûte doit être compensée : le massif doit posséder une racine qui s'enfonce profondément dans le sol. Est-ce possible dans le cas des monts Maxwell ? Il semble bien que non, ce qui les prive d'équilibre statique. Alors, ils doivent être en équilibre dynamique, soumis à une forte compression orientée ouest-sud-ouest, est-nord-est. Une telle compression entraînerait un enfoncement de la croûte située au-dessous. Ceci contredit quelque peu l'idée que le manteau supérieur de Vénus est relativement visqueux. Mais cet enfoncement serait acceptable s'il était de courte durée. La géologie de Vénus n'est pas achevée…

**Fortuna Tessera** est l'une des plus grandes tesseræ de Vénus ; elle s'étend sur 2.000 km, et descend en pente douce depuis les monts Maxwell jusqu'à la plaine de *Audra Planitia*. Fortuna Tessera se divise en quatre parties, selon le dessin des structures superficielles :

- au contact des monts Maxwell, les failles s'orientent parallèlement à la montagne ;
- plus loin, les 2/3 nord montrent des figures en chevron, d'où le nom de tessera en chevron ;
- le 1/3 sud restant ressemble à des plumes ;
- enfin, la partie la plus éloignée des montagnes présente une structure de tessera normale.

Les tesseræ qui entourent ainsi les montagnes ont été produite probablement par des forces de compression, les mêmes qui ont érigé les montagnes. Mais les tesseræ non standard à l'est de Maxwell Montes ne s'expliquent pas totalement ainsi ; un épaississement de la croûte pourrait compléter l'explication. Cette zone doit être la plus ancienne de l'ensemble.

Les tesseræ se sont formées en deux temps : un terrain valloné s'est d'abord mis en place par une compression de la croûte, puis des graben sont

venus le couper sous l'effet de forces contraires d'étirement. Plus une tessera est vieille, plus sa structure est complexe. Enfin, leur altitude élevée les a protégées des épanchements de lave, qui les auraient comblées.

Généralement, la largeur des tesseræ correspond à la hauteur des montagnes qu'elles bordent.

Des coulées volcaniques s'épandant sur Lakshmi Planum sont visibles seulement en provenance des Danu Montes. Par contre, le volcanisme se manifeste beaucoup sur les pentes extérieures, où toutes les montagnes d'Ishtar Terra montrent de nombreux flots de lave figée, sauf les monts Maxwell où seul l'impact qui a formé Cleopatra a provoqué l'épanchement de lave.

L'étude précise de la région montre que le volcanisme y est plus récent que l'orogénèse.

**Aphrodite Terra**, moins élevée qu'Ishtar, culmine au mont Maat, volcan récent de 8 km d'altitude. C'est la plus vaste zone de hautes terres sur Vénus ; elle s'étend sur 23.000 km, mais ce n'est pas un massif unique. Elle présente de grandes variations topographiques, structurelles et gravifiques.

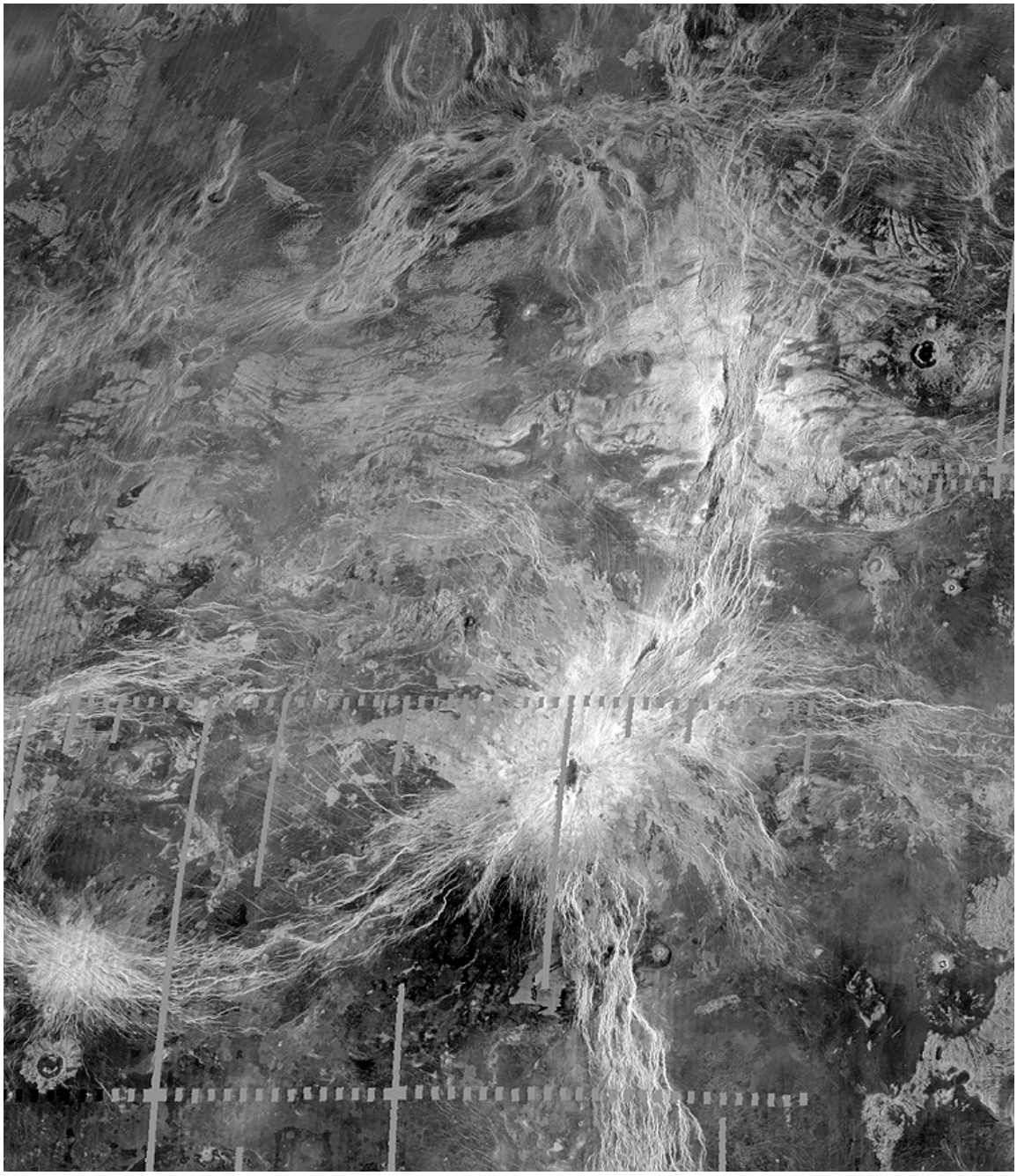


Aphrodite Terra ; fragment d'une carte topographique réalisée par Ralph Aeschliman

L'altitude moyenne d'Aphrodite Terra est de 5 km au-dessus du niveau moyen. La partie la plus élevée est à l'ouest : Ovda et Thétis regiones sont des plateaux de 3 à 4.000 m d'altitude. A l'est, dans le prolongement de Diana Chasma, une chaîne montagneuse incurvée vers le nord donne naissance à *Atla Regio*. Celle-ci prend la forme d'une queue de scorpion. Aphrodite présente des systèmes de chaînes de collines-vallées, comme Ishtar, mais le terrain y apparaît plus dégradé, ce qu'on interprête comme un indice d'âge plus élevé. Le sud est limité par un abîme courbe nommé *Artemis Chasma*. Un réseau de vallées linéaires coupe Aphrodite de l'ouest-sud-ouest à l'est-nord-est ; l'une d'entre elles, *Diana Chasma*, est longue de 1.400 km et profonde de 7 km ; sa largeur atteint 280 km. Tout ceci la rend tout à fait comparable à Valles Marineris sur Mars.

Les échos radar autour du mont Maat pourraient indiquer que le volcan est encore en activité, ou qu'il l'a été il y a très peu de temps. En effet, la réflectivité du sol autour de lui est plus faible que dans les autres zones de la planète. Or le sol est rendu très réfléchissant par la présence de minérais de fer, probablement des pyrites de fer, qui renvoient bien les ondes radar grâce à leurs propriétés électriques. Ce sulfure est stable dans les conditions régnant en altitude, mais pas dans les basses régions. La pyrite se forme par érosion chimique des roches éruptives. Si le sol autour du volcan est peu réfléchissant, c'est que les roches n'ont pas encore été attaquées, donc qu'elles sont récentes.

**Beta Regio** est une vaste région élevée, présentant un volcanisme intense, et très crevassée. Elle se trouve à l'intersection de plusieurs lignes tectoniques majeures. Cet aspect rapproche Beta Regio du volcanisme terrestres de rift (Afar par exemple) où l'activité est liée à une plume mantellique. Toutefois, la présence de tesseræ autour de Beta Regio donne à penser qu'il s'agit d'un upwelling du manteau plutôt qu'un simple bombement volcanique. Beta Regio est coupée en deux, dans le sens nord-sud, par la faille *Devana Chasma*, dans laquelle s'est construit le volcan *Theia Mons*, lequel est traversé par des failles récentes… Cet exemple montre à quel point la topographie vénusienne est complexe.



Beta Regio (Magellan C3-MIDR 14N300;1,framelet 20) ; nord en haut

Cette image montre Beta Regio (centrée sur 29.5° N, 281° E) constituée de deux grands volcans : Theia Mons au sud (en bas de l'image), et Rhea Mons au nord. Ces deux volcans sont les deux taches brillantes plutôt à droite de l'image. Ils sont séparés par 800 km, ce qui donne les dimensions de la région. Le plus remarquable est le rift qui traverse Rhea Mons

**Cratères**

Les radars ont montré de nombreux cratères d'impact à la surface, répartis au hasard. Leur diamètre est en général au-dessus de 2 km, car les objets plus petits ont été détruits lors de leur passage dans une atmosphère aussi dense.

La surface de Vénus est relativement jeune. Elle semble avoir été remaniée depuis 300 à 500 millions d'années, sans qu'on sache encore pourquoi et par quel mécanisme. On trouve de vastes plaines couvertes de laves. Des roches volcaniques couvrent 85 % de la surface. On a dénombré plus de 100.000 petits volcans boucliers, et des centaines de grands volcans. On observe également de grandes calderas de plus de 100 km de diamètre.

**Structures géologiques**

Les structures principales sont les plaines, les dômes, les coronæ, les failles et plissements, les super-coronæ.

Les tesseræ pourraient être des structures anciennes, peut-être des paléo-continents. Beta, Atla et Eistla Regiones sont relativement jeunes. Les tesseræ semblent anormaux par rapport aux terrains environnants, et sont partiellement recouverts de dépôts plus jeunes, et sont plus vieux que les plaines.

Il existe des ceintures de failles d'échelle globale, et d'autres à plus petite échelle. En étudiant ces dernières, deux auteurs ont conclus à la présence de mini-plaques tectoniques. Les relations structurales dans les régions de Ishtar Terra Est, Allat Planitia, Fortuna Tessera, pourraient

indiquer un mouvement d'une petite plaque contre le haut massif Ishtar-Fortuna.

Les régions hautes sont très complexes, en particulier les Tesseræ. Elles présentent une grande diversité de structures tectoniques et morphologiques. On distingue :

- des hautes terres de type Beta, soulèvements volcaniques ;
- des hautes terres de type Ovda ; pentes latérales fortes, massifs Tesseræ ;
- Ishtar Terra, mélange des deux.

**Formation**

Lors de sa formation, Vénus devait contenir de l'eau, et on pense qu'il y avait des océans comme sur Terre, bien que beaucoup moins profonds. D'ailleurs, le jeune Soleil était un peu moins chaud que maintenant, de l'ordre de 70 % de sa brillance actuelle. Vénus devait donc bénéficier d'une température à peine supérieure à celle de la Terre aujourd'hui. Par conséquent, l'eau qui provenait de sa formation a dû se condenser pour former des océans. Mais l'évaporation a produit de la vapeur d'eau, gaz à effet de serre. Allié à l'énorme quantité de gaz carbonique, l'effet de serre a dû accélérer l'évaporation, ce qui l'augmente encore… Cette accélération a entraîné rapidement l'assèchement des océans. La vapeur d'eau est montée dans la haute atmosphère. Là, elle a subi une destruction par les rayons ultraviolet du Soleil : dégradée en oxygène et hydrogène. L'hydrogène, le plus léger de tous les éléments, a acquis la vitesse de libération et s'est échappé. L'oxygène restant a dû oxyder les roches, et disparaître par fixation dans le sol. La durée de ce cycle d'assèchement est évaluée à seulement 300 millions d'années.

**Champ magnétique**

L'évolution interne a laissé cette planète quasiment dépourvue de champ magnétique intrinsèque. Pourtant, située dans la même région du système solaire que la Terre, elle a très certainement une composition chimique semblable et a dû subir une différenciation identique. Par conséquent, elle possède vraisemblablement un noyau interne de même nature. Aucune mesure sismique n'a été effectuée sur la surface de Vénus, nous ne pouvons donc être certains de sa composition interne. Cependant, d'après l'analyse des orbites des satellites, on a déterminé une densité moyenne de 5,25 qui suggère la présence d'un noyau comparable à celui de la Terre. L'état de solidification du noyau de Vénus nous est inconnu, mais les différentes hypothèses formulées doivent tenir compte de la faiblesse du champ magnétique intrinsèque actuel. Les différentes missions spatiales ont prouvé l'insignifiance d'un champ d'origine interne ($10^{-5}$ fois celui de la Terre). Cela n'implique pas que Vénus ait toujours été privée d'un champ intrinsèque. On pense que les champs magnétiques des planètes telluriques sont générés, par effet dynamo, dans le noyau ferreux liquide. Ces théories suggèrent que Vénus ait eu un moment magnétique du même ordre que celui de la Terre. La lenteur de la rotation de la planète ne serait pas responsable de son affaiblissement prématuré.

Vénus ne possède donc pas de véritable magnétosphère, le vent solaire interagit directement avec l'ionosphère (région de l'atmosphère où les particules chargées sont très nombreuses et qui est de ce fait conductrice de l'électricité) créant des champs magnétiques complexes.

Vénus n'aurait maintenu aucun champ magnétique rémanent dans sa croûte à l'instar de Mercure, parce qu'on s'attend à ce que les températures de surface soient supérieures au point de curie (température au-delà de laquelle les corps perdent leurs propriétés magnétiques)

**Le sol**

L'étude du sol a été menée de deux façons différentes, par des sondes soviétiques et américaines.

Les Russes ont choisi de poser des atterrisseurs sur le sol, équipés d'instruments de mesure et de caméras pour découvrir le relief et la structure des roches. Ils ont envoyé toute une famille de sondes nommées Venera. La première n'a pas résisté aux conditions sévères de l'espace. Il a fallu attendre la quatrième pour que le succès soit au rendez-vous. La sonde a traversé l'atmosphère de Vénus pendant 1 heure et demie, temps qu'elle a mis à profit pour faire des analyses de température, de pression, de composition de l'atmosphère. Elle a montré que le gaz carbonique était le composant essentiel, mais elle n'a pas pu atteindre le sol en bon état : à 278 km d'altitude, la pression était 20 fois supérieure à celle que nous connaissons sur Terre, et la température était de 270°. Ces conditions extrêmes n'étant absolument pas prévues, la sonde n'était pas construite pour y résister. Venera 8 a été la première sonde atteignant en bon état le sol d'une autre planète. Elle a mesuré une pression de 100 bars, et une température de 470°. Après ces temps héroïques, les soviétiques envoyèrent des sondes beaucoup plus lourdes et plus robustes. Venera 9 et 10 ont donné les premières photos du sol de Vénus :




Le lieu d'atterrissage de Venera 9 est une pente à l'est de Rhea Mons, qui borde Beta Regio. La sonde est inclinée par rappport à la verticale. On voit de nombreux cailloux, qui font penser à un éboulis. Les blocs sont plats, comme des dalles, et mesurent de 20 à 70 cm de côté, mais pas plus de 15 à 20 cm d'épaisseur. Les dalles montrent des plans de clivage, mais pas ou peu d'altération chimique. Entre les dalles, on voit un matériau sombre à grain fin.

Venera 10 est sur un terrain lisse, plus ancien, situé dans Rusalka Planitia, au nord de Beta Regio. On y voit des affleurements mesurant de 1 à 3 mètres; Entre ces rocs se trouve un sable grossier très sombre, dont l'albédo ne dépasse pas 3 %. La densité des blocs, sur les deux sites, et de $2,8 \pm 1$ g $cm^{-3}$. Les abondances des éléments chimiques mesurées sont semblables à celles des basaltes terrestres.



Site d'atterrissage de Venera 10. La sonde s'est posée à peu près au centre de cette image (la localisation exacte est inconnue), au bord sud-ouest de Beta Regio. Elle se trouve dans la partie sombre de l'image. La partie brillante est une tessera. La zone représentée mesure 600 km.

(Magellan C1-MIDR 15N283;1,framelet 32) ; nord en haut

Le site de Venera 11 montre des traces évidentes d'érosion chimique.

En 1982, Venera 13 et Venera 14 ont donné des photos en couleurs du sol vénusien.



Le sol photographié par Venera 13

La sonde Venera 13 a détecté des roches basaltiques contenant un pourcentage élevé de potassium.




Le site d'atterrissage de Venera 14 (13° S, 310° E) est curieux ; il montre des strates régulières, et des plaques rocheuses de diverses couleurs. Les roches sont essentiellement des basaltes. Mais il y a peu de particules fines, de cailloux, de sol, contrairement aux autres sites d'atterrissage.

La difficulté de poser une sonde sur le sol de Vénus, l'opacité de l'atmosphère, rendent très difficile l'étude du relief de la planète par des moyens au sol. Mais depuis une orbite, on ne voit que des nuages… Les ingénieurs soviétiques ont alors conçu une sonde équipée d'un radar, qui peut percer l'atmosphère et voir à travers.Venera 15 et 16 ont rempli cette tâche.

**Les sondes Vega**

Le nom *Vega* n'a rien à voir avec l'étoile de même nom ! Ces sondes ont été construites pour observer la comète Halley, et pour l'atteindre ont utilisé l'assistance gravitationnelle de Vénus. Au passage, les Russes ont profité pour continuer l'exploration de la planète. Les deux sondes avaient par conséquent deux buts, Vénus et Halley. Or en russe, les noms qui commencent par H en français (*Halley*, *Hanibal*…), sont écrits avec un G initial. Halley devient ainsi Galley, d'où l'acronyme Vega.

Ces deux sondes ont largué des ballons dans l'atmosphère vénusienne, qui a été étudiée dans ses parties de jour et de nuit. Les deux sondes se sont posées dans *Rusalka Planitia*, près d'*Aphrodite Terra*.

Les américains n'ont jamais posé de sonde sur Vénus. Quelques sondes américaines ont survolé la planète, qui était leur but ou bien en voyage vers une autre cible (assistance gravitationnelle). La sonde américaine qui a donné les meilleurs résultats est Magellan, équipée d'un radar semblable à ceux de Venera 15 et 16, mais nettement plus précis. Cette sonde a réussi à cartographier 98 % de la surface, et nous a réservé des surprises par l'observation de structures géologiques jusque là inconnues.

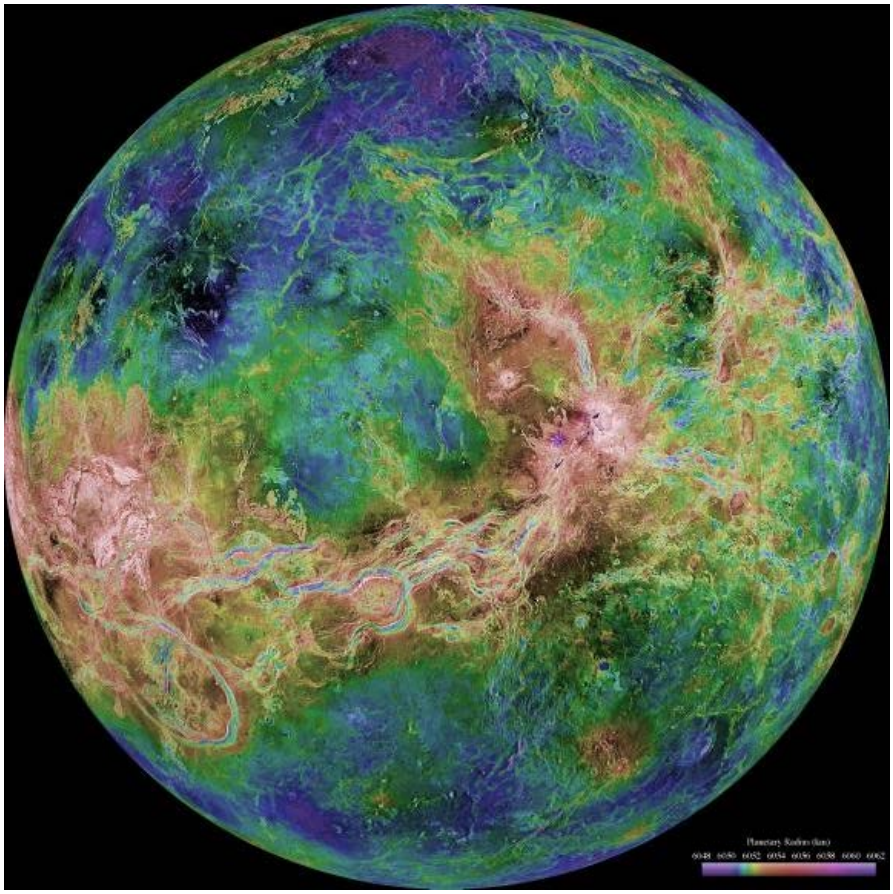


photo radar de Vénus, sonde Magellan, NASA

Cette image en fausses couleurs montre l'hémisphère de Vénus centré à la longitude 180°. La résolution est de 3 km par pixel. Le contraste a été exagéré pour mettre en évidence les fins détails. Les couleurs roses sont les zones élevées, les bleues représentent les zones de faible altitude.

**Erosion**

Bien que Vénus ait une atmosphère très lourde, il existe à sa surface très peu de signes d'érosion. Le transport de matériaux par le vent est aussi très peu marqué, et les dunes assez rares. Ceci est curieux si on compare à Mars, dont l'atmosphère très légère construit des dunes et produit une érosion intense.

L'érosion chimique transforme les matériaux de surface : l'interaction entre les basaltes et l'atmosphère peut donner des oxydes de fer, et des composés soufrés.

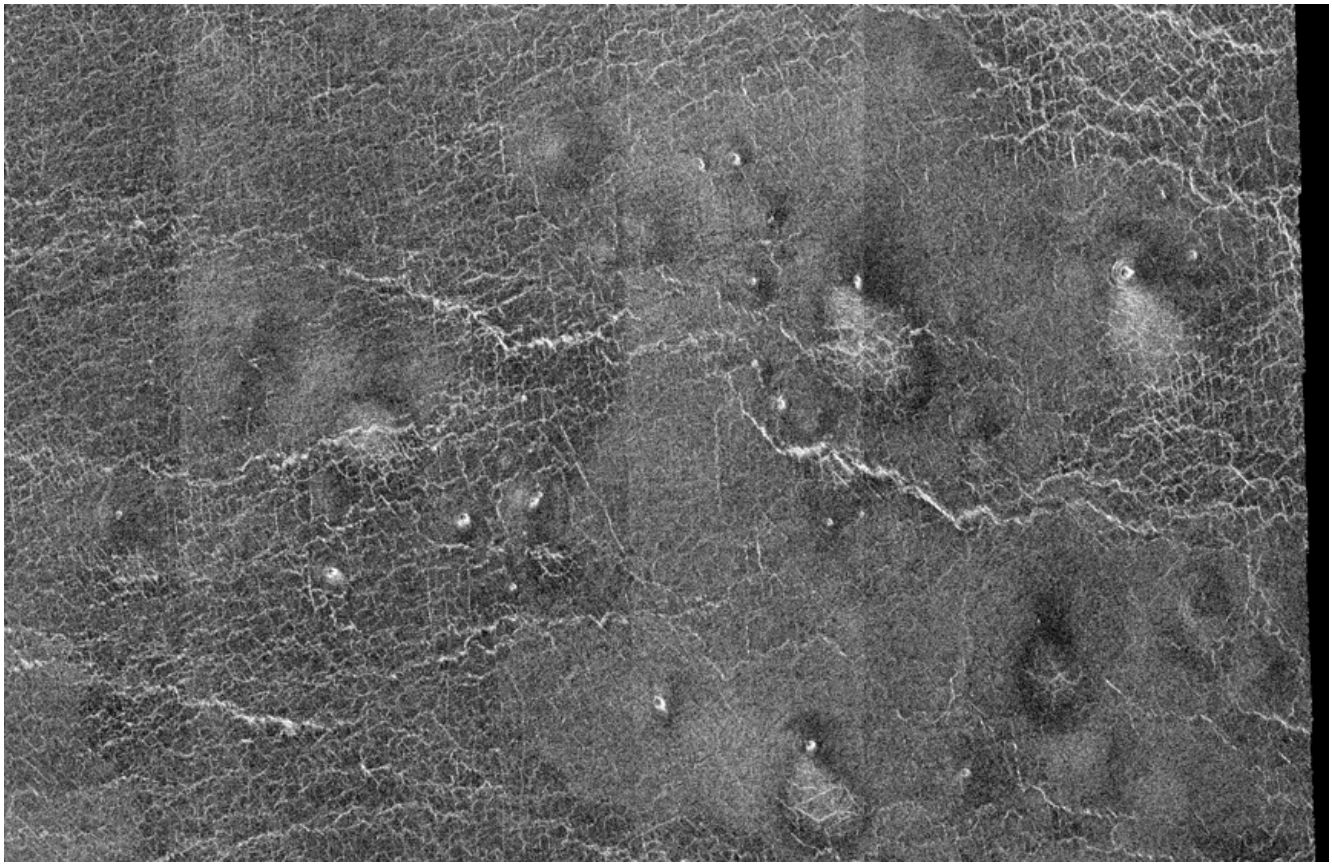
L'érosion est la destruction, ou transformation, des roches superficielles, au contact avec l'atmosphère. Une roche en place subit une dégradation chimique ou physique qui la fragmente. Ensuite, la gravité entraîne les fragments, qui ne sont plus mécaniquement liés au sol, dans le sens de la pente. Les produits de la dégradation s'accumulent donc dans les points bas, où ils forment de nouvelles roches, plus ou moins solides.

L'érosion terrestre se produit par l'action de l'eau (attaque chimique et mécanique, transport), de la glace (destruction mécanique), du vent (action mécanique par transport et projection de particules solides de sable). Sur Vénus, il n'y a pas d'eau aujourd'hui, donc pas d'érosion par ses différentes formes (liquide, glace), et pas de transport par l'eau. La question se pose de savoir s'il y a eu de l'eau liquide dans le passé.

Les produits de l'érosion sont des particules (débris de roches, sable, grains d'argile…), ou des substances chimiques en solution. La végétation sur Terre absorbe certaines de ces substances, et joue donc un rôle dans leur devenir. Plus important encore, les animaux microscopiques, tels les coraux, ont une action déterminante : pour construire leurs squelettes, ces animaux prélèvent le gaz carbonique de l'air, conservant le carbone et rejetant l'oxygène. A leur mort, il reste leur squelette de carbonates, qui s'ajoute à ceux qui ont précédé. C'est ainsi que se forment des montagnes de roches sédimentaires, qui ont retiré le gaz carbonique de l'atmosphère, diminuant la pression et modifiant sa composition. Sur Vénus, ce genre de processus n'existe pas.

Une analyse très simple permet donc de penser que Vénus ne doit pas présenter une si grande diversité de processus d'érosion que la Terre. Mais les conditions de surface différentes permettent d'envisager des mécanismes que nous ignorons ici ! En particulier, les carbonates qui constituent les roches sédimentaires terrestres sont instables dans les conditions de température élevée de Vénus. Même s'ils s'étaient formés dans le passé, ils auraient été détruits. Cette remarque laisse penser que les dépôts sédimentaires seront peut-être difficiles à trouver.

Toutefois, la rapide diminution de la pression atmosphérique et de la température avec l'altitude permettrait à des carbonates, des sulfates et des sulfites de se former vers le sommet des montagnes, tels Maxwel Montes. Mais si l'érosion transporte ces matériaux dans des zones de moindre altitude, ils seront retransformés et libéreront gaz carbonique et acide sulfurique. L'analyse des échos radar est compatible avec la présence de pyrite ($FeS_2$), d'ilménite ($FeTiO_3$) et de magnétite ($Fe^2Fe^3{}_2O_4$), minéraux à forte constante diélectrique. La production d'anhydrite $CaSO_4$ est aussi envisagée par l'action du dioxyde de soufre $SO_2$ sur la calcite $CaCO_3$.



Dépôts éoliens dans Guinevere Planitia (Magellan F-MIDR 20N334;1,framelets 2 and 3 ) ; nord en haut

Les taches claires en éventail semblent être déblayées, par le vent, de leurs matériaux sombres, ces matéraiux étant déposés sur les bords (cernes sombres). Les zones nettoyées montrent le sol sous-jacent, plus clair. Il s'agit de la brillance radar, indiquant la rugosité du terrain, ou ses propriétés diélectriques.

Ces figures éoliennes allongées, de diverses formes, se trouvent réparties à toutes les altitudes, et tendent à s'orienter vers l'équateur. Si on considère qu'elles s'orientent en fonction des vents dominants, elles nous donnent leur direction. Celle-ci est compatible avec l'existence de cellules de Hadley, telles qu'on les imagine dans la basse atmosphère.
On observe également des dunes

**Cratérisation**

Contrairement à Mercure ou Mars, on observe très peu de cratères d'impact. Ceci indique que la surface de la planète doit être très jeune, et on l'évalue à moins de 800 millions d'années !

Les images de Magellan ont permis de compter 798 cratères d'impact à la surface de Vénus, de diamètre compris entre 1,5 et 280 km. L'absence de cratères plus petits n'est pas due à une déficience de la sonde : il n'y en pas ! On pouvait s'attendre à un tel résultat. L'atmosphère de Vénus est si dense, que tout objet trop petit arrivant de l'espace est détruit par échauffement et fragmentation.

Les cratères sont en général bien conservés, les remparts sont bien nets, avec des bords aigus. Les ejecta sont intacts. Cette situation rappelle celle de la Lune, sur laquelle il n'y a pas d'érosion (sauf par vent solaire, ce qui est peu important). Les ejecta s'étendent jusqu'à trois fois le rayon du cratère.

Les cratères de plus de 15 km de diamètre sont généralement circulaires, comme sur les autres planètes. Mais les plus petits sont moins ronds, et plus complexes, ce qui n'est pas le cas sur la Lune. Beaucoup de grands cratères présentent un rempart multiple, un plancher sombre au radar (lisse), des ejecta brillants. Près du rempart, les ejecta sont accidentés ; ils s'évasent en lobes contigus, et le dessin rappelle une fleur. Plus loin, les ejecta sont moins brillants.

Autour des cratères plus petits, les ejecta n'ont plus leur belle symétrie centrale, mais conservent une symétrie axiale, par rapport à une droite passant par le centre du cratère. Cette forme est due à l'entrée dans l'atmosphère oblique du bolide qui l'a creusé.

Les caractères morphologiques sont liés à la taille. Les plus grands cratères ont un rempart à anneaux multiples, ensuite selon les tailles décroissantes, l'anneau est double, puis simple, puis on note la présence d'un pic central, puis un plancher sans structure, et enfin, pour les plus petits, la forme devient irrégulière, et le cratère se dédouble. Cette dernière caractéristique, particulière à Vénus, est produite par l'atmosphère, qui produit des effets aérodynamiques sur les ejecta lorsqu'ils se forment, et brise les petits projectiles, donnant plusieurs petits impacts au lieu d'un.

Peu de cratères ont été altérés, soit par érosion, soit par comblement par de la lave, soit par tectonisme (fractures). Ce genre d'altérations est observé sur la Lune. Mais de plus, le nombre de cratères est bien moins important que sur la Lune, mais ce fait doit être analysé en détails. En effet, les comptages de cratères sont utilisés pour évaluer l'âge d'un terrain : plus celui-ci est jeune, moins il été exposé au bombardement et donc moins il y a de cratères. Le nombre de cratères au mètre-carré donne une indication directe de l'âge. Ceci est valable si la surface n'a pas été remodelée depuis la fin du bombardement. Mais sur Vénus, qui possède une atmosphère épaisse et qui presque a la même masse que la Terre, il faut envisager les phénomènes d'érosion et de tectonique. Si la surface se renouvellait par subduction, comme sur Terre, les cratères

seraient vite effacés. De même, une érosion par l'eau détruit rapidement des reliefs de quelques centaines de mètres de hauteur.

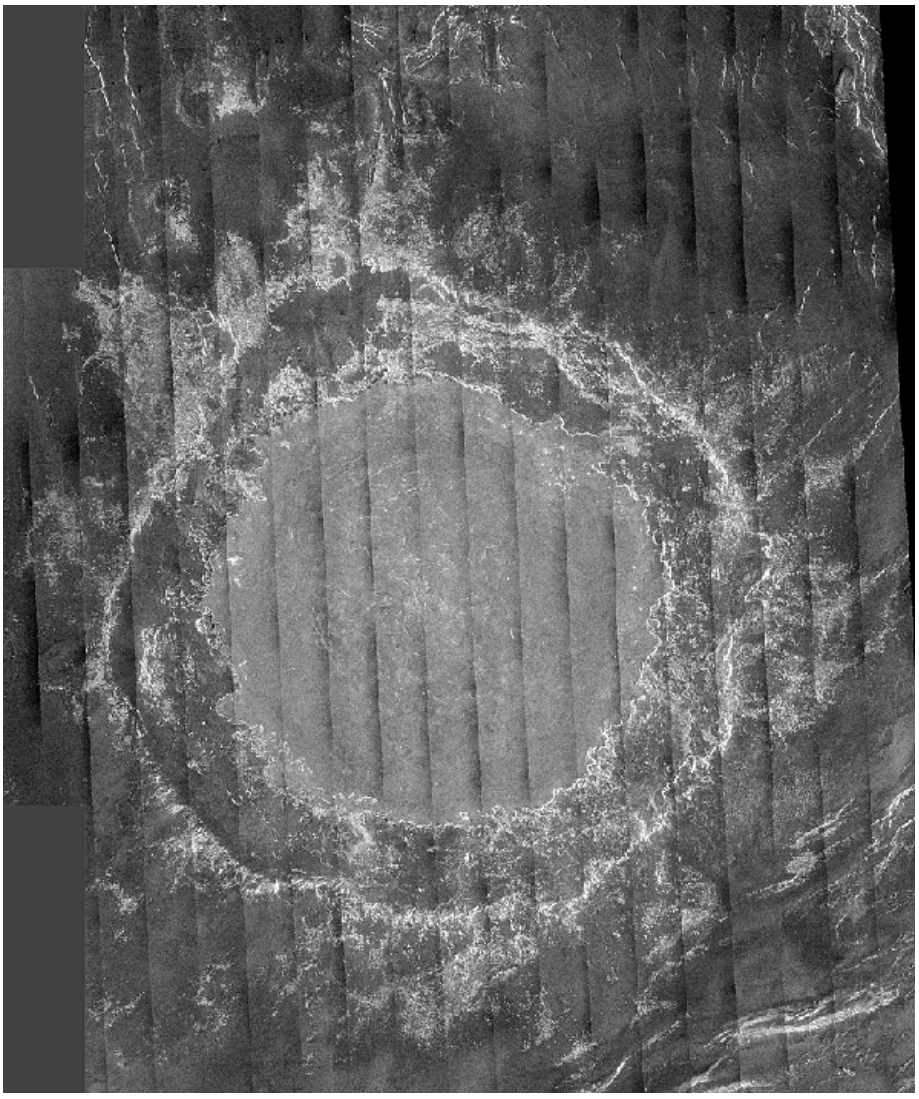
Les cratères, sans distinction de type, sont répartis au hasard sur la planète. Cependant, si on ne considère que les cratères modifiés (par dépôt de lave ou fracturation ; 17 % des cratères), on constate qu'ils sont regroupés dans la zone équatoriale. Presque tous les cratères, dans le triangle allant de Beta et Themis Regiones jusqu'à Atla Regio (la queue du scorpion), sont altérés. La région à l'ouest d'Aphrodite Terra, déficiente en volcanisme, présente des cratères modifiés par tectonisme ; la partie située à l'ouest d'une ligne Beta-Atla-Thetis montre à la fois des altérations par volcanisme et tectonisme. Toute cette partie de Vénus est donc plus jeune.

**Filtrage atmosphérique**

Une analyse théorique des interactions entre l'atmosphère et un bolide la percutant montre que les effets sont plus importants pour les plus petits impacteurs. Les projectiles pierreux se déforment, et en-dessous de 80 km d'altitude, sont aplatis à l'avant. Ceci ne se produisant pas sur les autres planètes, où l'atmosphère est bien moins dense, entraîne une modification du cratère produit. Mais on a montré que pour les cratères de plus de 32 km de diamètre, l'influence de l'atmosphère devient négligeable. C'est donc sur cette population qu'il faut faire porter une analyse comparative avec la Lune, dont on connait l'âge par analyse directe des roches.

Alors, on trouve que l'âge des terrains est de l'ordre de 4 à 500 millions d'années, ce qui est vraiment très jeune. Toutefois, si le filtrage atmosphérique n'était pas négligeable pour les gros bolides, comme on l'a supposé, ceci ne serait qu'une limite inférieure. Il est raisonnable de considérer que l'erreur ne peut dépasser un facteur 2, ce qui donne un âge de l'ordre de 800 millions d'années.

La localisation limitée des cratères affectés montre qu'il n'y a pas eu de bouleversement global, catastrophique. Il s'agit plutôt de modifications graduelles.



cratère Mead ; (Magellan C1-MIDR 15N060;1,framelets 27, 28, 34, 35, 36, 43, 44) ; le nord est en haut

Le cratère Mead est un immense cratère d'impact, de 280 km de diamètre, le plus grand sur Vénus. Il se trouve dans une plaine, au nord-ouest d'Aphrodite Terra.

On doit remarquer le double rempart, le fond particulièrement plat, et les zones brillantes autour. Ces dernières sont les éjecta, que la rugosité (taille des blocs) rend plus réfléchissants au radar.



Photo radar sonde Magellan, NASA

La région représentée s'étend autour du point géographique 74,6° nord, 177,3° est, dans la région nord-est d'Atalanta Regio. Elle mesure 185 km de large. Elle montre un cratère d'impact dont le fond est comblé par deux sortes de matériaux dont la réflectivité radar est fort différente. Au centre même, un anneau partiel s'est constitué. Des éjectas sont visibles tout autour, sauf à l'ouest. Cette absence pourrait être due à un impact oblique, d'un objet provenant de l'ouest. Les matériaux éjectés pourraient être de la roche fondue par l'impact, ou bien de la lave provenant des profondeurs, et libérée par l'impact.

**Structure interne**

Presque même diamètre et même masse, pratiquement même densité que la Terre, la structure de Vénus qui découle de ces paramètres doit être très semblable à celle de la Terre. Les modèles théoriques assignent au noyau et au manteau une épaisseur semblable de 3.000 km. La croûte, de 20 km d'épaisseur à peu près, serait plus épaisse que la croûte océanique terrestre (6 km), mais plus fine que notre croûte continentale (45 km).

Mais Vénus se différencie de la Terre par l'absence de champ magnétique.

---=OO=---




## Carte d'identité

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| diamètre | **12.756,28 km** | | demi grand-axe | **149,59789 $10^6$ km** |
| | **1 Terre** | | | **1 UA** |
| diamètre angulaire max | - | | excentricité | **0,01677** |
| aplatissement | **0,003354** | | inclinaison de l'orbite | **0,00005°** |
| période de rotation | **23 h 56 mn 4,1 s** | | année | 365 j 5 h 48 mn 46 s |
| inclinaison axe de rotation | **23,45°** | | vitesse orbitale | **29,7859 km/s** |
| masse | **5,9742 $10^{24}$ kg** | | révolution synodique | - |
| | **1 Terre** | | jour solaire | 24 h |
| masse volumique | **5,515 g/$cm^3$** | | sens | rétrograde |
| | **1 Terre** | | pression au sol | **1,013 bars** |
| pesanteur | **9,80 m/s/s** | | température min | -80° |
| | **1 Terre** | | température max | +60° |
| vitesse de libération | **11,18 km/s** | | albédo | **0,367** |
| nombre de satellites | 1 | | composition atmos. | $N_2$, $O_2$, $CO_2$ |

Les éléments en gras sont tirés du livre *Allen's astrophysical quantities*, quatrième édition

Troisième planète du système solaire, la Terre est naturellement la mieux connue, mais il ne faut pas croire que l'on sache tout d'elle ! En particulier, les sondages les plus profonds que l'on ait pu faire à l'heure actuelle n'ont pas dépassé 10 km sous nos pieds, valeur à comparer avec les 6.379 km qui nous séparent de son centre.

Toutes les techniques d'observation possibles sont utilisées pour analyser notre planète, et le coût est relativement limité, puisque nous sommes déjà sur place !

Certains caractères sont plus évidents que d'autre, nécessitant moins d'instrumentation pour leur analyse. C'est le cas des mouvements de la Terre dans l'espace. Bien que les aspects visibles soient parfois trompeurs, les esprits éclairés dans l'Antiquité ont compris les éléments essentiels. Parfois perdus au fil du temps, ces éléments ont été retrouvés ultérieurement.

Nous allons étudier tout d'abord les mouvements de la Terre dans l'espace, qui déterminent une bonne partie de notre environnement : durée du jour, alternance des saisons, retour des années… Nous verrons ensuite l'atmosphère de notre planète, qui est aussi sensible dans notre vie courante, et enfin nous nous intéresserons au globe terrestre, qui est bien davantage affaire de spécialistes, tant les techniques d'analyse sont sophistiquées.

### *Les mouvements de la Terre*

La Terre présente deux mouvements principaux : la **rotation sur elle-même** et le **mouvement autour du Soleil**.

Le déplacement de la Terre autour du Soleil au cours de l'année est dû à l'attraction gravitationnelle du Soleil, qui produit un mouvement elliptique (Képlérien) que nous avons déjà vu dans les généralités. Nous allons donc considérer les conséquences du second mouvement.

#### La rotation sur elle-même

La rotation de la Terre sur elle-même produit l'alternance des jours et des nuits. Elle s'effectue en à peu près 24 h (à peu près, car il y a plusieurs façons de considérer le jour : dans le langage courant, on désigne par jour soit la période variable entre le lever et le coucher du Soleil, soit une durée fixe de 24 h. Les astronomes distinguent aussi plusieurs sortes de jours, selon le point auquel on les rapporte).

Le mouvement de la Terre sur elle-même est très régulier. C'est lui qui a défini le temps pendant très longtemps, et il n'a été détrôné sur ce plan que récemment. S'il était le seul mouvement de la Terre, on verrait toujours les mêmes étoiles dans le ciel, et elles se lèveraient toujours à la même heure. On peut constater ce mouvement la nuit en observant les levers et couchers d'étoiles.

* Ce soir, regardez une étoile brillante à 22 h (précises). Observez-la à nouveau les jours suivants à la même heure. Vous la verrez se déplacer progressivement par rapport aux objets fixes, maisons, arbres… Notez bien l'heure à laquelle vous l'observez, car elle passe bien sûr chaque jour au même point, mais pas au même moment. Chaque soir, vous pourrez constater un décalage de près de 4 minutes. Ce décalage est dû au mouvement de la Terre autour du Soleil. Cumulé sur un an, il totalise 1 jour entier, et l'étoile reviendra à la même heure que le premier soir (365 × 4 minutes font à peu près 1 jour).

Le retour de l'étoile tous les soirs est le résultat de la rotation de la Terre sur elle-même. Le décalage de 4 minutes provient du déplacement de la Terre autour du Soleil pendant ces 24 heures.

**Observation** : rotation de l'ensemble du ciel autour d'un point proche de la Polaire. Pour bien s'en apercevoir, il faut faire une photo avec une pellicule argentique de faible sensibilité (64 ISO) en dirigeant l'objectif vers l'étoile polaire (vous pouvez utiliser un appareil numérique, à condition qu'il permette la pose). Il faut fixer l'appareil sur un pied solide, déclencher à l'aide d'un déclencheur souple muni d'un blocage, et faire une pose d'une dizaine de minutes. Ainsi, les étoiles sont entraînées par la rotation de la Terre et laissent chacune sur la pellicule un petit arc de cercle. Plus l'étoile est proche du pôle, plus le rayon de cet arc est faible. L'étoile polaire elle-même ne bouge pratiquement pas. Le centre de rotation désigne le pôle céleste. Pour bien réussir ce cliché, éloignez-vous autant que possible de toute source de lumière, qui blanchirait le ciel et voilerait la pellicule.



Rotation du ciel autour de la Polaire photo J. Gispert

Cette rotation nous indique la direction de l'axe de rotation de la Terre (axe nord-sud). Le plan perpendiculaire à l'axe, et passant par le centre de la Terre, est le plan équatorial. Si vous regardez un globe terrestre, le plan équatorial est matérialisé par l'ajout des deux hémisphères.

On remarque aussi que certaines étoiles se trouvent sur des cercles complets, non coupés par l'horizon en bas de la photo. Ces étoiles ne se couchent jamais, à la latitude à laquelle la photo a été prise. Ces étoiles sont nommées *circumpolaires*.

**Position de l'écliptique**

Nous avons maintenant défini deux plans : le plan de l'orbite (1$^{e}$ loi de Kepler), et le plan équatorial. Quelles sont leurs positions relatives ?

L'équateur terrestre est incliné de 23° 26' sur l'écliptique. C'est pourquoi un globe terrestre est présenté incliné sur son support. C'est une valeur assez forte, qui a beaucoup d'influence sur la vie courante, nous allons le voir.

Par suite de l'inertie encore, l'axe de rotation de la Terre reste toujours dirigé vers le même point du ciel, malgré le déplacement de la Terre autour du Soleil. Ce point est proche de l'étoile polaire.

On peut sentir l'inertie d'un objet qui tourne vite. Il suffit de prendre une grosse perceuse électrique, de la laisser pendre au bout du bras. D'un mouvement du poignet, on peut facilement l'incliner de diverses façons. Mettons-là en marche ; en la tenant de la même façon, on ressent une résistance pour la faire balancer autour du poignet. Cette résistance vient de la rotation du moteur, qui produit une force d'inertie. Ce phénomène est utilisé pour la construction des gyroscopes.

La Terre tournant autour de son axe, et ayant une masse très grande, il n'est pas possible de modifier son axe de rotation, ceci nécessiterait une énergie colossale. C'est pourquoi, dans son mouvement autour du Soleil, la Terre conserve son axe toujours dans la même direction (vers la même étoile, qui est la Polaire).

**Equinoxes et solstices**

Les *équinoxes* sont les points de l'orbite où nuit et jour sont égaux. Ce terme est formé à partir des mots latins *æque nox*, qui signifient : nuit égale (au jour). Ce sont les points où le Soleil se trouve dans le plan de l'équateur.

Les *solstices* par contre sont les points extrêmes, où le Soleil est le plus loin au-dessus ou au-dessous de l'équateur. Solstice vient de *sol stat*, Soleil fixe.

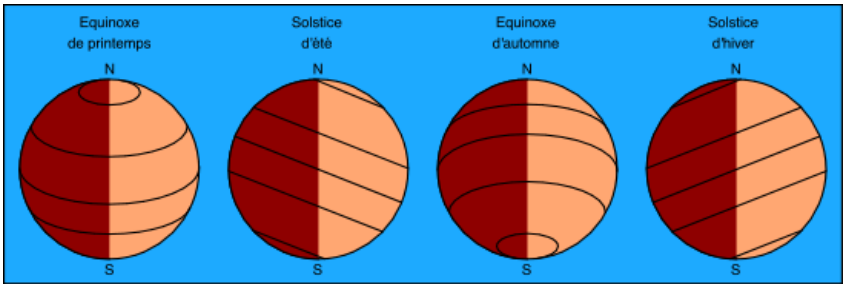
Equinoxes et solstices marquent les changements de saisons.

**Les saisons**

Les saisons sont les variations climatiques qui se produisent régulièrement au cours d'une année. Elles ont plusieurs causes :

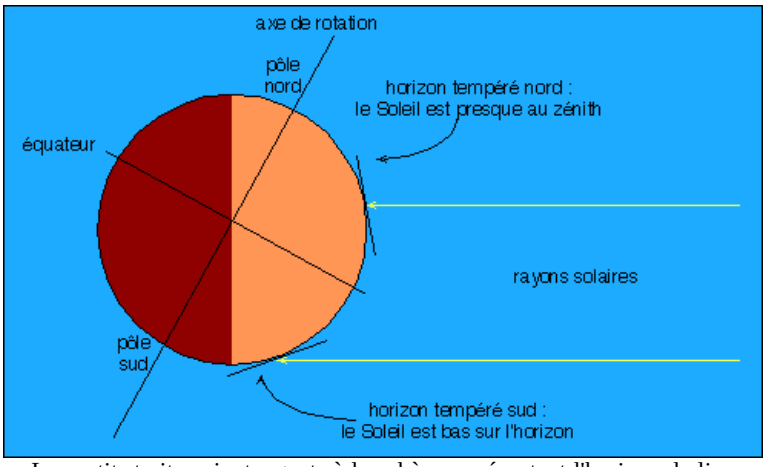
- l'inclinaison de l'axe de rotation de la planète, qui provoque :
  - une variation de l'inclinaison des rayons lumineux qui arrivent au sol selon la période de l'année ;
  - une variation de la durée d'ensoleillement.
- la distance variable de la planète au Soleil, qui implique un chauffage plus important au périhélie qu'à l'aphélie ;

Considérons la Terre dans l'espace, le Soleil étant à droite. Aux équinoxes et solstices, la Terre se présente orientée différemment par rapport au Soleil :




Ceci est dû au fait qu'elle tourne autour du Soleil, son axe restant toujours dirigé vers la même étoile (la Polaire).

Sur le schéma ci-dessous, l'orientation de l'axe de rotation correspond au solstice d'été de l'hémisphère nord :




Les petits traits noirs tangents à la sphère représentent l'horizon du lieu

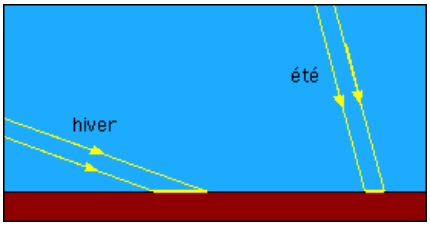
On constate l'inclinaison différente des rayons solaires par rapport au sol, selon la latitude du lieu où l'on se trouve.

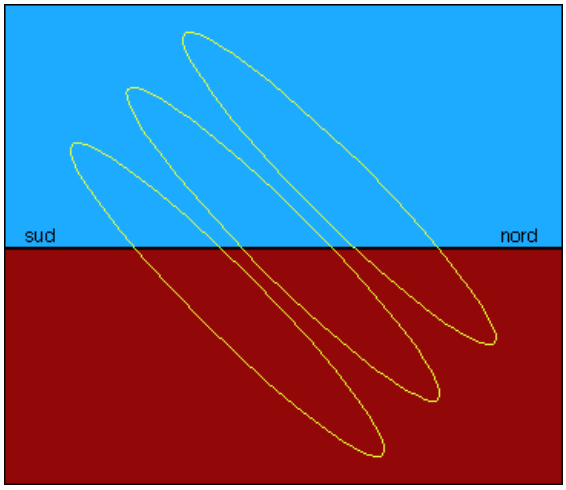
C'est l'été dans l'hémisphère nord, lorsque c'est l'hiver dans l'hémisphère sud. Et la distance au Soleil est la même… On voit donc bien que ce n'est pas cette distance qui détermine les grosses variations de la température à la surface de la Terre.

Ce sont donc les deux phénomènes liés à l'inclinaison de l'axe de rotation qui produisent les variations saisonnières sensibles.

**Premier point** : les rayons solaires étant proches de la verticale en été se concentrent sur une petite surface au sol. Par contre, en hiver, ils s'étalent sur une grande surface.

Par exemple, à Marseille, le 21 juin (solstice d'été), le Soleil monte dans le ciel à 67° au-dessus de l'horizon, alors qu'au solstice d'hiver le 21 décembre il culmine à 20° seulement. La même quantité d'énergie provenant du Soleil s'étale en hiver sur une surface 2,4 fois plus grande qu'en été. Donc chaque mètre carré du sol reçoit 2,4 fois moins d'énergie en hiver.






**Deuxième point** :

Considérons une latitude moyenne de l'ordre de 45° nord. En hiver, la course du Soleil se fait pour deux tiers au-dessous de l'horizon (à gauche sur le dessin, c'est-à-dire vers le sud). Donc pendant les deux tiers du temps, il fait nuit, et le sol se refroidit dans l'espace.

En été, le rapport est inversé. Les deux tiers de la course du Soleil se font au-dessus de l'horizon. Le temps de chauffage par le Soleil est double du temps de refroidissement dans l'espace.

Sur le schéma, l'inclinaison des cercles qui représentent la course du Soleil est égale à la latitude, ici de 45°.

En été, à Marseille, chaque mètre carré du sol reçoit 2,4 fois plus d'énergie, pendant deux fois plus longtemps… Donc pratiquement 5 fois plus d'énergie qu'en hiver. C'est là la cause essentielle des saisons.

A l'équateur, les cercles du dessin ci-dessus sont verticaux. De ce fait, il n'y a pas de différence au cours de l'année, et les saisons sont pratiquement inexistantes. C'est pour cela que la température y est relativement constante tout au long de l'année.
Aux pôles, les cercles sont horizontaux. Celui qui correspond à l'hiver est sous l'horizon, ce qui explique la longue nuit polaire. L'été au contraire, le cercle est constamment au-dessus de l'horizon, et c'est le soleil de minuit.

L'excentricité de l'orbite a cependant une influence, faible, mais qui agit de deux façons différentes :

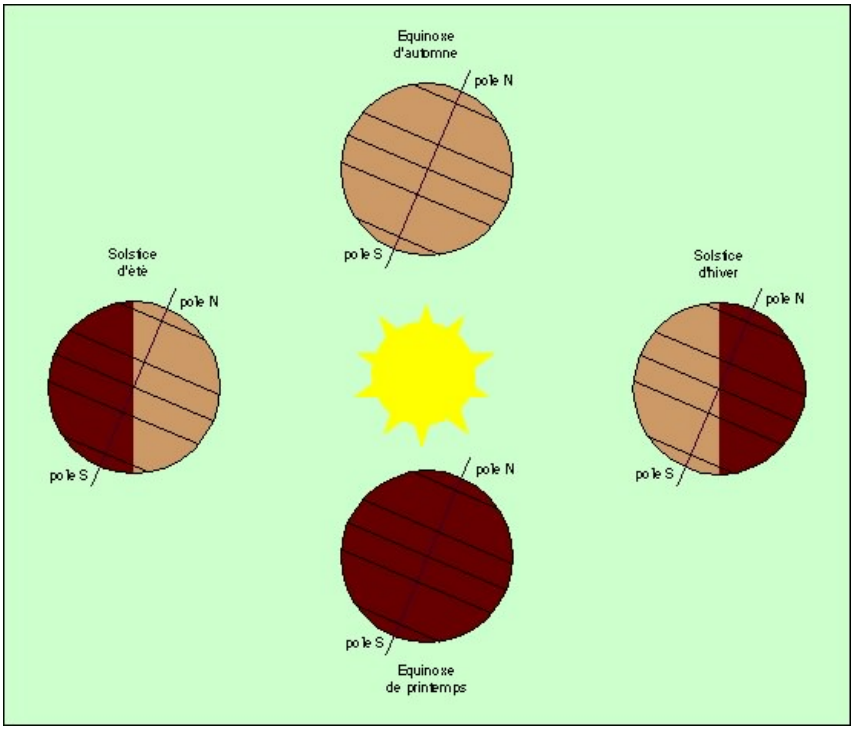
- le périhélie étant le 2 janvier, nous sommes, dans l'hémisphère nord, un peu plus près du Soleil. Donc nos hivers en sont un peu adoucis. De même, nos étés sont un peu moins torrides, grâce à un éloignement un peu plus important. Bien sûr, cet effet joue dans l'autre sens dans l'hémisphère sud, où les hivers sont un peu plus froids, et les étés un peu plus chauds. Nous dirons que les saisons y sont un peu plus marquées.
- au périhélie, la planète possède une vitesse plus grande qu'à l'aphélie (loi des aires), et donc y passe moins de temps. Nos hivers de l'hémisphère nord, qui sont autour du périhélie, s'en trouvent légèrement raccourcis, et nos étés allongés. C'est l'inverse dans l'hémisphère sud. Les hivers y sont un peu longs et les étés un peu plus courts que chez nous. Nous avons bien choisi notre hémisphère !

Confirmation théorique de cette analyse : l'excentricité de l'orbite terrestre est très faible, et les variations de distance au Soleil sont minimes (de 4 % entre les deux extrêmes). Les variations correspondantes d'énergie reçue du Soleil sont aussi très faibles.

Durée des saisons :

| | |
|---|---|
| printemps | 92,81 j |
| été | 93,62 j |
| automne | 89,82 j |
| hiver | 89,00 j |

Si vous voulez matérialiser ce que nous venons d'étudier, prenez une mapemonde et une ampoule électrique. Placez l'ampoule au centre d'une table, et la mapemonde d'un côté. Orientez-là de telle manière que l'extrémité sud de l'axe soit dirigée vers le Soleil (vers l'ampoule, position à droite sur le schéma). C'est la position de la Terre au solstice d'hiver. En la faisant tourner sur son axe, vous constaterez que le pôle nord n'est jamais éclairé par le Soleil, c'est la nuit polaire. Par contre, le pôle sud est éclairé en permanence. Vérifiez aussi que la nuit, à une latitude de 45° dans l'hémisphère nord, est deux fois plus longue que le jour.




Ensuite, déplacez la mapemonde de 90° autour de la lampe, en conservant l'axe parallèle à lui-même ! Vous arrivez à l'équinoxe de printemps, et vous pourrez constater en faisant tourner le globe que les deux pôles sont éclairés, et que la nuit est égale au jour.

Déplacez la mapemonde de 90° encore, vous arriverez au solstice d'été. Les phénomènes sont les mêmes qu'au solstice d'hiver, les rôles des deux hémisphères étant inversés.

Les derniers 90° nous amènent à l'équinoxe d'automne, qui produit des phénomènes semblables à l'équinoxe de printemps.



Coucher de Soleil aux solstices et équinoxes photo J. Gispert

Ce panorama est un montage sur la base d'une photo prise le 22 mars 2006, juste après l'équinoxe de printemps. Les deux autres images du Soleil ont été ajoutées par montage, et représentent les positions du Soleil lors du solstice d'hiver (à gauche) et du solstice d'été (à droite). Le paysage est pris depuis la Faculté des Sciences de Luminy à Marseille. L'angle visuel sur l'horizon, entre les images du Soleil à un solstice et à l'équinoxe, est d'un peu plus de 31° (projection de 23° selon la latitude du lieu). L'image complète montre un panorama de près de 80°. D'un coucher de Soleil au suivant, le Soleil se déplace sur l'horizon de quelques 21', c'est à dire des deux-tiers de sa largeur (3 mois = 90 jours, 21'/j × 90 j = 1.890' = 31,5°, distance entre l'équinoxe et le solstice). Ceci est vrai à nos latitudes ; à l'équateur, l'angle qui sépare équinoxe et solstice n'est que de 23°, et au-delà des cercles polaires il est non défini puisque le Soleil ne se couche plus ! Voici une animation qui vous permettra de bien comprendre ces phénomènes.

«Qu'est-ce que c'est que la zone torride ? C'est la partie de la surface du globe comprise entre les tropiques du Cancer et du Capricorne. Tous les points de cette zone jouissent de la propriété de voir le Soleil deux fois par an à leur zénith, tandis que pour les points des tropiques, ce phénomène ne se produit annuellement qu'une fois.

Qu'est-ce que c'est que la zone tempérée ? C'est la partie qui comprend les régions situées entre les tropiques et les cercles polaires, entre 23° 28' et 66° 72' de latitude, et pour lesquelles le Soleil ne s'élève jamais jusqu'au zénith, mais paraît tous les jours au-dessus de l'horizon.

Qu'est-ce que la zone glaciale ? C'est cette partie des régions circumpolaires que le Soleil abandonne complètement pendant un laps de temps, qui, pour le pôle même, peut aller jusqu'à six mois.»

*Sans dessus dessous*, chapitre VIII
Jules Verne

Ce passage d'un roman de Jules Verne explique à merveille ce que sont les tropiques et les cercles polaires. Pour une autre présentation, vous pouvez voir le chapitre consacré à la sphère armillaire.

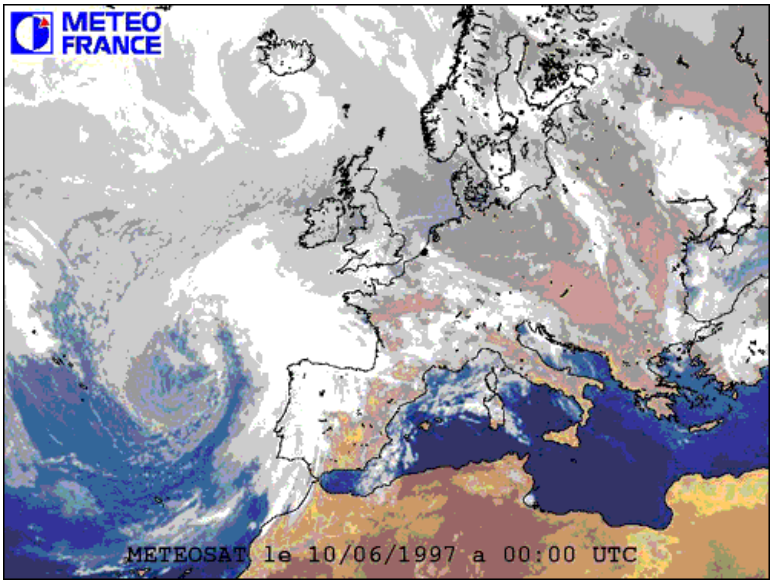
**Inclinaison du coucher de Soleil**

Voit-on le coucher (ou le lever) de Soleil de la même manière partout dans le monde ? Non. Nous avons l'habitude de le voir tous les soirs là où nous habitons, et cet aspect nous semble normal. Mais pour des personnes habitant plus près ou plus loin de l'équateur, les choses sont différentes. L'animation ci-dessus a dû vous le faire comprendre, mais rien ne vaut de voir les choses pour bien les assimiler. Alors, voici réunis deux petits films montrant la Lune près du pôle sud, et le lever de Soleil au centre du Vietnam. Ils montrent bien comment on voit un même phénomène selon la latitude où l'on se trouve.

**Climat**

A propos des saisons, on peut expliquer les transferts d'énergie entre l'équateur et les pôles. A l'équateur, l'énergie reçue du Soleil est supérieure à celle rayonnée dans l'espace. Aux pôles, c'est l'inverse. Pour équilibrer, il faut donc qu'un transfert se fasse, qui amène de la chaleur de l'équateur vers les pôles, où elle pourra s'échapper dans l'espace. Ce transfert se réalise par des mouvements de masses fluides, les grands courants océaniques d'une part, les vents d'autre part (alizés en particulier). C'est ce transfert qui est à l'origine des instabilités atmosphériques du printemps et de l'automne.

En regardant à la télévision les belles images transmises par les satellites, on voit bien les perturbations qui tournent dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. La partie droite d'une perturbation remonte vers le nord ; c'est de l'air chaud, qui va vers les pôles. Par contre, la partie gauche redescend de l'air froid du pôle vers l'équateur. C'est pourquoi à Marseille on a souvent la succession "vent d'est, qui amène la pluie (car chaud et chargé d'humidité sur la mer) ; puis mistral sec et froid, qui chasse les nuages". Cette succession se fait dans cet ordre, les perturbations se déplaçant d'ouest en est.



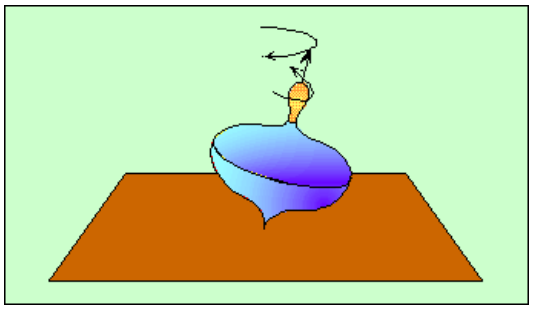

Le *Gulf Stream* transporte 100 millions de $m^3$ d'eau par seconde ! (Pour la partie située à moins de 1.000 mètres de profondeur ; ceci représente 100 fois le débit de tous les fleuves de la Terre…). Cette eau est chaude, car elle provient de l'équateur. En passant par la Bretagne, elle réchauffe les côtes françaises ; c'est pour cela que Brest bénéficie d'un climat relativement clément, alors que New York (40° 43' Nord), qui n'a pas ces conditions favorables, est la cible de fortes tempêtes de neige en hiver, bien qu'elle se trouve à la même latitude que Rome (41° 54' Nord)! Le Gulf Stream transporte de l'eau chaude vers le nord ; il faut bien qu'une masse équivalente retourne vers le sud, sinon tout l'océan se retrouverait bientôt accumulé au pôle… La branche descendante du Gulf Stream, nommée *courant du Labrador*, charrie donc des eaux froides. Elle passe près de New York, qu'elle refroidit autant que le Gulf Stream chauffe la Bretagne. Nous ne sommes décidément pas tous égaux…

**Précession des équinoxes**

Lorsque les constellations ont été définies par les Anciens, le Soleil se trouvait dans le Bélier au moment de l'équinoxe de printemps. Une tête de bélier vue de face, avec ses cornes, a donné le symbole de l'équinoxe de printemps. Ce doit être aussi l'origine de la lettre grecque *gamma*. Toujours est-il qu'elle se dessine de la même manière, et c'est pourquoi elle est utilisée pour désigner l'équinoxe de printemps. Voilà pourquoi on le désigne souvent sous le nom de *point gamma*. Mais puisqu'il marque le début du printemps, on le nomme également *point vernal* (du latin *vernalis*, relatif au printemps).

Nous avons dit plus haut que l'axe de la Terre restait toujours dirigé vers la même étoile au cours de l'année. Ceci est vrai sur une courte période, disons quelques dizaines d'années. On sait que l'étoile polaire indique le nord, et ceci depuis longtemps. Mais si on fait des mesures fines, on s'apercevra qu'en fait, le pôle se déplace lentement par rapport aux étoiles. Ce déplacement est connu depuis longtemps ; il amène le pôle à effectuer un tour complet sur le ciel en à peu près 25.770 ans. Ce mouvement déplace par conséquent l'équinoxe de printemps (celui d'automne et les solstices aussi évidement, mais on a choisi le premier comme référence) qui va faire un tour complet du zodiaque dans ce même temps.

Pour comprendre la précession des équinoxes, il faut une théorie assez fine et difficile. Mais on peut l'illustrer tout simplement par un gyroscope ou une toupie.



Lançons une toupie. Observons le déplacement de l'axe de rotation. Si on dessine des étoiles au plafond, on voit bienque le pôle de la toupie se tourne vers un point du plafond, puis se déplace lentement vers un autre et ainsi de suite, et revient à sa position initiale au bout d'un certain temps.

La précession de la Terre fait qu'actuellement nous avons une étoile brillante proche du pôle (*la Polaire*, *α Ursae Minoris*, *α UMi*, distance angulaire 51'. Ce n'est pas le cas dans l'hémisphère sud). Dans 13.000 ans, Véga sera la polaire pour l'hémisphère nord de la Terre.

La précession des équinoxes est due à la forme de la Terre, qui présente un bourrelet équatorial sensible à l'attraction gravitationnelle du Soleil et de la Lune.

L'équinoxe de printemps se trouve actuellement, non plus dans le Bélier, mais dans les Poissons, à cause de la précession des équinoxes… Mais, chut ! Les astrologues ne s'en sont pas encore aperçus, et ceci risquerait de les gêner. L'équinoxe d'automne est dans la Vierge.

La précession des équinoxes entraîne une difficulté importante pour les astronomes : pour définir la position d'une étoile, ils utilisent des coordonnées dites équatoriales, c'est-à-dire relatives à la position de l'équateur, avec comme origine l'équinoxe de printemps. Puisque celui-ci se balade sur le ciel, les coordonnées des étoiles changent lentement au cours du temps. Ce qui oblige, lorsqu'on donne la position d'une étoile, à dire par rapport à quel équinoxe elle est mesurée. La précession étant lente, on change d'équinoxe de référence tous les 25 ans. Les équinoxes de référence récents sont : 1950,0 ; 1975,0 ; 2000,0.

L'année tropique est légèrement plus courte que l'année sidérale. L'équinoxe est donc en avance sur les étoiles. Chaque année, il avance de la différence :

d = 365 j 6 h 9 mn 9,75 s - 365 j 5 h 48 mn 46 s = 31.558.149,75 - 31.556.926,00 = 1.223,75 secondes

Cet écart totalisera une année (sidérale) entière au bout de :

31.558.149,75 / 1.223,75 = **25788,069 années**.

On vient de retrouver facilement la période approximative de la précession.

**Nutation**

A la précession s'ajoute encore un mouvement de plus faible amplitude, mais de durée beaucoup plus courte. C'est la nutation, qui est produite par l'effet conjugué de la Lune et du Soleil sur le bourrelet équatorial de la Terre. La période de la nutation est de 18 ans, tout comme celle de la précession du nœud ascendant de la Lune.

**Durée de l'année, le calendrier**

La durée astronomique de l'année, c'est celle qui influe sur notre vie quotidienne, car elle fixe la position du Soleil par rapport à la Terre, et donc les saisons. Elle était d'une importance primordiale pour les Egyptiens anciens, car la crue fécondatrice du Nil se produisait très régulièrement à la même époque par rapport au Soleil. Les anciens Egyptiens se sont donc vite préoccupés de la durée de l'année, et ils ont trouvé la valeur 365,25 jours il y a plus de 4.000 ans ! Malgré cet exploit, leur calendrier ne comportait que 365 jours, et dérivait très vite par rapport aux saisons…

Ce résultat a été atteint par l'observation d'un phénomène astronomique dépendant fortement de la position de la Terre sur son orbite : le lever héliaque de Sirius. Une étoile, ici Sirius, se trouve à certaine époque de l'année derrière le Soleil, donc invisible de la Terre. Puis, à mesure que la Terre tourne autour du Soleil, l'étoile va peu à peu se dégager de la lumière du Soleil, et devenir visible à nouveau. C'est ce moment que l'on appelle lever héliaque de l'étoile (du nom grec du Soleil, *Hélios*). Les Egyptiens ont très tôt remarqué que la crue du Nil survenait peu de temps après le lever héliaque de Sirius, et donc ils ont observé précisément ce phénomène. Ils ont eu accès à la durée de l'année par là. L'erreur sur le lever héliaque est d'une journée seulement, bien plus faible que par tout autre moyen d'observation courant.

Jules César a voulu établir un calendrier précis, et il en a chargé l'astronome Egyptien *Sosigène*. Celui-ci a donc défini une année commune de 365 jours, trop courte. Il a prévu une année anormale, comportant un jour de plus, donc 366. En prenant 3 années communes suivies d'une année longue, on obtient en 4 ans : 3 × 365 + 366 = 1.461 jours. Ceci fait une année moyenne de 1.461 jours / 4 = 365,25 jours, le but est atteint. C'est le calendrier julien.

Il fallait savoir à quelle date ajouter le jour supplémentaire. Dans le calendrier latin, le mois était divisé en périodes nommées *Nones*, *Ides* et *Calendes*. De plus, les jours étaient numérotés à l'envers… On parlait ainsi du 6$^{e}$ jour avant les calendes de mars, en latin : *sexto ante calendas martii*. Et c'est justement celui-là qu'on a décidé de doubler, ce qui fait que le jour supplémentaire s'est appelé tout naturellement *bis sexto ante calendas martii*, en abrégé *bis sexto*. C'est l'origine du mot *bissextile*. Plus tard, le jour ajouté a été repoussé à la fin du mois de février.

La règle julienne est : "les années dont le millésime est divisible par 4 sont bissextiles".

Malgré tout, la durée astronomique de l'année, ou *année tropique*, n'est pas exactement de 365,25 jours, mais plus précisément de 365,2422 jours (l'année tropique est l'intervalle de temps qui sépare deux équinoxes de printemps succesifs). Bien sûr, la différence est faible, mais quand on l'accumule pendant des siècles… C'est ainsi qu'un peu avant 1582, le pape Grégoire XIII a trouvé insupportable le décalage qui s'était creusé entre le calendrier et les saisons réelles. Il a décidé d'y mettre bon ordre, et donc de donner une nouvelle définition de l'année. Voyons comment :

La valeur précise 365,2422 est plus courte que la valeur de 365,25 ; la différence est 365,25 - 365,2422 = 0,0078 jour. C'est très faible, mais l'erreur accumulée en un siècle est 100 fois plus grande, donc de 0,78 jour. On remarque que 0,78 est à très peu près 3/4 de jour (0,75). Donc l'erreur est de 3/4 jour par siècle, ce n'est encore pas un nombre entier. Prenons maintenant une période de 4 siècles : l'erreur sera de 4 x 3/4 = 3 jours !

Donc l'année du calendrier julien est trop longue de 3 jours en 400 ans ; il faut supprimer trois jours du calendrier en 400 ans. Puisqu'on ajoute des jours (les bissextils), on va tout simplement en ajouter un peu moins, d'où la règle grégorienne :

> "les années séculaires (comme **1600**, 1700, 1800, 1900, **2000**…) sont bissextiles si leur millésime est divisible par 400 ;
>
> les autres le sont si leur millésime est divisible par 4".

Ainsi, la règle julienne est conservée pour presque toutes les années, donc la modification est insensible. Par contre, les années séculaires, qui étaient toutes bissextiles avant, ne le sont plus qu'une fois sur quatre, et la correction est donc bonne. Ainsi 1600 et 2000 ont été bissextiles, mais 1700, 1800 et 1900 ne l'ont pas été (alors qu'elles auraient dû l'être si on avait conservé le calendrier julien).

En 1582, le calendrier avait déjà dérivé de 10 jours. Grégoire XIII a décidé de supprimer 10 jours pour rétablir l'équinoxe de printemps au 21 mars. C'est ainsi que le lendemain du jeudi 4 octobre 1582 a été le vendredi 15 octobre ! Cette réforme n'a pas été adoptée partout en même temps. Les Russes ne l'ont pas acceptée, et ce n'est qu'au moment de la Révolution d'Octobre (qui a donc eu lieu en novembre…) qu'ils ont changé de calendrier. Shakespeare est mort à Stratford upon Avon le *23 avril 1616*, Cervantes est mort à Madrid le *23 avril 1616*, à 11 jours d'écart !

Il faut ajouter que le calendrier Julien, puis le calendrier Grégorien, sont à la fois solaire et lunaire. En effet, l'un des principaux problèmes du calendrier a été la détermination de la date de Pâques. Or Pâques doit survenir le premier dimanche qui suit (strictement) la première pleine lune de printemps. Ceci fait intervenir la Lune dans notre calendrier, mais c'est un problème complexe que nous ne traiterons pas ici (voir le chapitre spécial).

A propos de calendrier, pourquoi dit-on "renvoyer aux calendes grecques" ? … Il n'y a jamais eu de calendes dans le calendrier grec ! Cette locution vient d'une expression romaine : "ad calendas græquæ solvere" dont la signification est plus précisément "payer aux calendes grecques". Elle s'appliquait aux mauvais payeurs dans la Rome antique.

## *L'atmosphère*

Les atmosphères planétaires sont des milieux incroyablement complexes. Leur composition, leur chimie, les variations de température, les vents, les phénomènes optiques… Nous avons déjà vu les particularités de celle de Vénus, qui tourne beaucoup plus vite que la planète elle-même, qui a une composition chimique étrange, et produit un effet de serre extrême. Celle de la Terre est aussi très complexe, et de plus elle est très bien connue. Elle présente une caractéristique très intéressante, grâce à laquelle la vie est apparue : **pression et température la situent au point triple de l'eau**.

### Composition

L'atmosphère de la Terre est constituée de deux gaz principaux qu'on retrouve rarement sur les autres planètes. L'azote est le plus important, l'oxygène vient ensuite.

### Structure verticale

On divise l'atmosphère de la Terre en couches, celles-ci étant déterminées par les variations de température :

- la *troposphère* s'étend du sol jusqu'à l'altitude à laquelle la température cesse de décroître ;
- la *stratosphère* est la couche au-dessus, dans laquelle la température augmente avec l'altitude ;
- la *mésosphère* est plus complexe, car la température décroît d'abord pour croître ensuite, et il est plus simple de la définir comme la couche entre la stratosphère et la thermosphère ;
- la *thermosphère* présente une augmentation régulière de la température avec l'altitude ;
- enfin, plus haut encore se trouve une couche dans laquelle, la densité étant très faible, la notion de température n'a plus grand sens, mais les atomes qui la composent sont ionisés par le rayonnement solaire, ce qui lui vaut le nom d'*ionosphère*.

### Le point triple de l'eau

L'atmosphère de la Terre est composée essentiellement d'azote et d'oxygène, avec de petites quantités de nombreux autres gaz, et de vapeur d'eau. Cette dernière est en quantités fort variables, à la fois dans l'espace et dans le temps (dans l'espace : séparation entre régions sèches et régions humides ; dans le temps : saison sèche et mousson par exemple). D'autre part, les conditions physiques qui règnent dans notre atmosphère sont très particulières : la température moyenne de la Terre se trouve proche du point triple de l'eau. Ceci est une expression savante pour dire que la température et la pression sont telles que l'eau peut exister sous trois formes : l'eau liquide, la glace, et la vapeur d'eau. On voit les trois formes cohabiter sur la photo ci-dessous :



Lac Blanc, massif des Aiguilles Rouges, Chamonix photo J. Gispert

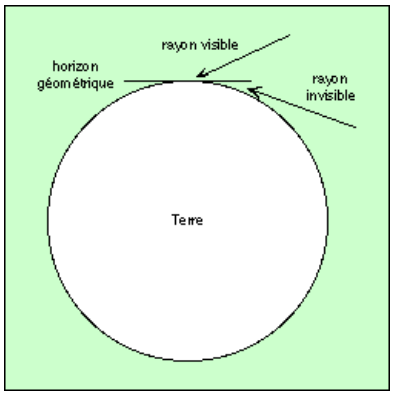
Les températures de congélation et d'ébullition de l'eau sont fonction de la pression. Au sommet du Mont Blanc, l'eau bout aux alentours de 80° seulement. Mais la température de congélation ne varie pas de la même façon. Le résultat est qu'à la pression de 611 Pa, les deux se rencontrent : la glace devient directement de la vapeur, sans passer par l'état liquide. A cette pression, les trois états de l'eau coexistent, ce qui justifie le nom. Toutefois, ceci a été montré pour de l'eau pure, et la présence des impuretés modifie un peu ces données, ce qui permet à l'eau d'exister sous ses trois états sur Terre.

L'atmosphère contient donc des gaz, de la vapeur d'eau, des cristaux de glace (en altitude), auxquels il faut encore ajouter des poussières. Il n'est donc pas étonnant qu'une telle richesse de constitution produise une grande diversité de phénomènes optiques. Nous allons en aborder quelques uns.

**La réfraction atmosphérique**

Pour une information générale sur la réfraction, reportez-vous au chapitre sur la lumière.

L'indice de réfraction de l'air (sa propension à courber les rayons lumineux), dépend de la température. Or celle-ci varie en fonction de l'altitude. Donc, puisque les diverses couches d'air à traverser ont des indices différents, il est logique de penser que les rayons lumineux seront courbés par l'atmosphère. C'est effectivement le cas, et on peut l'observer facilement. Tout d'abord, si on plonge une règle verticalement dans l'eau, on n'observe pas de cassure. Pareillement, un rayon provenant du zénith ne sera pas affecté. Par contre, un rayon issu de l'horizon subira l'effet maximum, et on peut le constater en admirant un coucher de Soleil ! Celui-ci nous apparaît aplatit, déformé par l'effet de la *réfraction*.




Puisqu'en première approximation les rayons lumineux vont en ligne droite, on les représentera par des droites (plus précisément par des flèches pour montrer dans quel sens ils se déplacent).

A la surface de la Terre, nous voyons une droite qui représente l'horizon géométrique : c'est le plan habituel du sol. Ce qui est en-dessous est invisible.

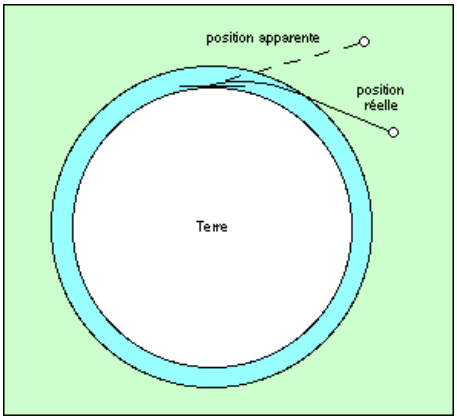
Le premier rayon dessiné arrive d'en haut, il est au-dessus de l'horizon, donc visible.

Le second vient par en-dessous, il est invisible. Lorsque le Soleil se couche, il passe au-dessous de l'horizon, et donc devient théoriquement invisible à cet instant (puisque maintenant ses rayons arrivent par dessous).

Dans ce second schéma, on a représenté l'atmosphère qui entoure la Terre.

Un rayon lumineux venant cette fois d'en bas (en-dessous de l'horizon) est courbé par la réfraction due à l'atmosphère, et parviendra donc à l'observateur.

Mais ce qui compte pour celui-ci, n'est pas la partie droite du rayon en dehors de l'atmosphère, à laquelle il ne peut pas accéder, mais ce qu'il voit. Or il voit un rayon qui lui arrive par en haut ! Il a donc l'impression de voir l'objet au-dessus de l'horizon, alors qu'en




fait il se trouve en-dessous… La droite en pointillés montre d'où le rayon **semble** provenir. L'observateur croit donc que l'objet se trouve en cette position apparente.

Ce raisonnement s'applique à tous les objets célestes, et en particulier au Soleil ! Quand on le voit disparaître à l'horizon, il est déjà couché depuis un moment !

**Le Canigou**

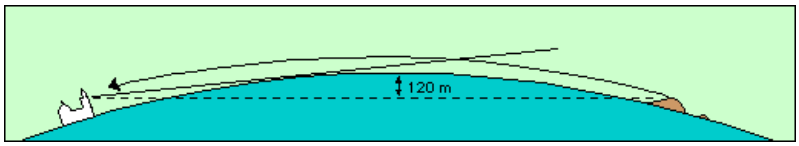
A Marseille, on a la chance de pouvoir constater ce phénomène d'une façon plus subtile, et surprenante : il est possible de voir une montagne située très au-delà de l'horizon géométrique.

Au bord de la mer, l'horizon géométrique serait matérialisé par la limite entre la mer et le ciel, s'il n'y avait pas la réfraction. Il est en réalité plus haut, d'à peu près 37' (un peu plus que le diamètre du Soleil).

Le Canigou est un sommet des Pyrénées, situé près de la Méditerranée, à une distance de 253 km de Marseille. Il culmine à 2.785 mètres. Si on trace sur un schéma l'horizon géométrique de Marseille, le Canigou se trouve très largement en-dessous. Une ligne droite joignant ND de la Garde au sommet passe à 120 mètres sous la mer.

Deux fois par an, le Soleil se couche juste derrière la montagne. Si le temps est parfaitement dégagé sur la Méditerranée, on peut alors voir, de Notre-Dame de la Garde, la chaîne du Canigou se profiler en ombres chinoises sur le disque rouge du Soleil.

Les rayons du Soleil qui passent autour du Canigou sont ensuite réfractés, et suivent la courbure de la Terre pour parvenir jusqu'à Marseille. Notez bien que ce phénomène dépend de l'altitude d'observation : de ND d'Allauch, toute proche mais plus haute, le sommet est au-dessus de l'horizon géométrique et le phénomène est moins probant…



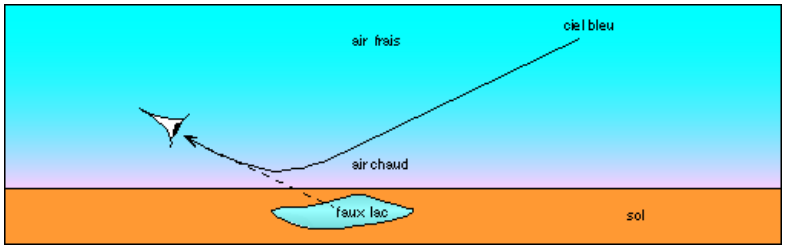

Le phénomène s'observe, selon les années, du 10 au 13 février, et du 28 au 31 octobre



photo du Canigou prise de ND de la Garde le 10 février 1998 photo J. Gispert

**Mirage**

Dans le désert, le sol atteint des températures très élevées. Il chauffe donc fortement l'air qui est à son contact immédiat, et change son indice de réfraction. On a donc un indice de réfraction variable en fonction de la hauteur au-dessus du sol, et la réfraction se produit.




Les rayons bleus arrivant du ciel sont courbés au voisinage du sol, et remontent. On les voit donc arriver d'en bas, et tout se passe donc comme s'il y avait une grande nappe bleue par terre : on a l'impression de voir un lac… Mais la courbure des rayons étant limitée, on ne voit cette nappe qu'au loin. Si on approche, elle donne l'impression de s'éloigner !

Toujours dans le désert, on voit souvent une grande montagne à l'horizon. A mesure qu'on s'approche, on a la surprise de voir la montagne diminuer, pour n'être finalement qu'un modeste rocher…



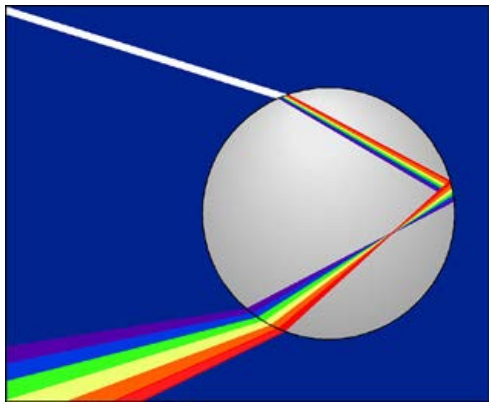
Mirages dans l'oued Ten Aout, tassili du Hoggar photo J. Gispert

L'observation de tous ces phénomènes dans le désert est très instructive, car on peut se déplacer et observer l'objet tel qu'il est réellement après en avoir vu des images déformées. Il faut garder cela présent à l'esprit en regardant le ciel, car les mêmes perturbations se produisent sur les objets que nous observons, étoiles, planètes et galaxies.

**Arc-en-ciel**

C'est un phénomène bien connu, de formation courante. Mais tout le monde n'a pas réalisé que l'arc-en-ciel se voit lorsqu'on a le Soleil exactement dans le dos. Si on se déplace, l'arc-en-ciel se déplace également (c'est bien perceptible si on est en voiture). Ceci nous prouve que sa formation dépend de la position du Soleil et de la position de l'observateur. De plus, on l'observe après un orage, lorsque l'atmosphère est surchargée d'humidité.

L'arc-en-ciel est produit par les goutelettes de brouillard en suspension dans l'atmosphère. Lorsqu'un rayon de Soleil frappe une goutelette (supposée sphérique, c'est à peu près le cas), il se produit de multiples réflexions, et les deux changements d'indice de réfraction (à l'entrée et à la sortie de la goutte), produisent un effet de prisme et décomposent la lumière.



Le trajet que suit la lumière dans la goutte ne décompose la lumière que si l'angle entre le Soleil et l'observateur est de 42°. On montre qu'il existe un second arc-en-ciel visible sous un angle plus grand de 51°. Ce deuxième arc-en-ciel présente les couleurs inversées.



Arc-en-ciel double, Les Houches le 20/8/03 à 18 h 39 photo J. Gispert

Remarquez bien que les deux arcs-en-ciel ont leurs couleurs inversées : le principal (le plus brillant) à l'intérieur a le rouge vers l'extérieur, alors que l'autre a le rouge à l'intérieur.



Arc-en-ciel double, Les Houches le 20/8/03 à 18 h 45 photo J. Gispert

Sur cette seconde photo, il faut remarquer que la bande entre les deux arcs est nettement assombrie. On le voit tout particulièrement à gauche, où le fond du paysage est sombre. Cette bande est nommée *bande d'Alexandre*, d'après Alexandre d'Aphrodisias, péripatéticien du II$^{e}$ siècle, qui l'a décrite. *A contrario*, la zone à l'intérieur de l'arc principal est plus brillante.

Ces deux phénomènes s'expliquent par la déviation des rayons lumineux par les gouttes de pluie, qui produisent une accumulation de lumière à l'intérieur de l'arc principal et sur l'arc lui-même, une diminution entre les deux arcs, et une légère augmentation sur l'arc secondaire. Les réflexions pouvant être multiples, d'autres arcs se produsient, mais sont bien plus faibles, et très difficiles à voir ou à photographier.

**Parhélies**



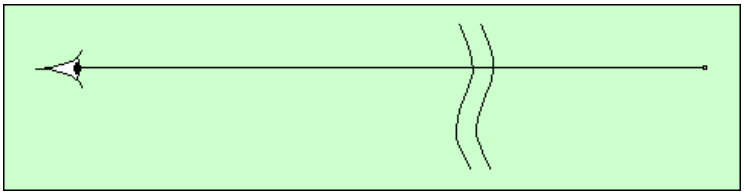
Parhélie à Marseille, le 7 septembre 2003 Photo B. Potet

Les parhélies, ou *faux soleils*, sont des images du Soleil qui se forment à la même hauteur que lui, et de part et d'autre. Elles sont produites par des réflexions de la lumière solaire sur des cristaux de glace de forme prismatique, et dont la base est parallèle au sol. Ces cristaux, et d'autres de formes différentes, sont aussi responsables de halos qui entourent parfois le Soleil ou la Lune, et d'autres phénomènes optiques encore.

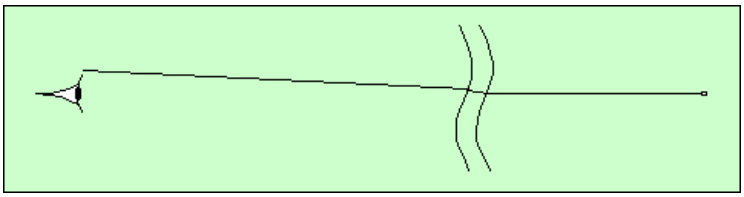
**Le scintillement des étoiles**

A l'œil nu, on peut distinguer entre étoiles et planètes : il suffit de se rappeler que les étoiles scintillent, et les planètes pas. La raison en est encore la réfraction atmosphérique. Le schéma ci-dessous montre une étoile, figurée par un tout petit cercle, et le seul rayon parvenant de cette étoile vers l'œil de l'observateur. Ce rayon va traverser l'atmosphère, composée de couches à des températures différentes.

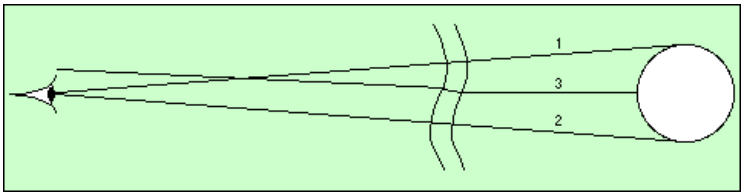
Une couche particulière est représentée, avec une forme ondulée. Cette forme est due à l'agitation de l'air, comme l'air surchauffé au-dessus d'une route en été. Cette veine d'air n'a pas le même indice de réfraction que les autres, mais le rayon la traverse perpendiculairement, et n'est donc pas dévié. L'observateur voit donc bien l'étoile, à sa luminosité normale :



Un instant après, la veine d'air s'est déplacée. Le même rayon la traverse maintenant de biais. Il est réfracté et va se perdre au-dessus de l'œil de l'observateur, qui ne voit plus l'étoile. L'instant d'après encore, il la verra à nouveau, et retiendra de tout ceci une impression de luminosité variable. Il dira que l'étoile *scintille* (ce n'est bien évidement pas l'étoile qui scintille, mais son image ! C'est une propriété de l'atmosphère qui est mise en évidence).



Examinons maintenant ce qui se passe pour une planète : celle-ci a une dimension sensible (on ne peut pas voir le disque à l'œil nu, mais il est suffisamment étendu pour que plusieurs rayons en arrivent simultanément). Considérons les 3 rayons sur le schéma ci-dessous. Deux d'entre eux rencontrent la veine d'air agitée perpendiculairement, et la traversent sans perturbation. Le troisième est dévié, et n'atteint pas l'œil. Il en résulte une impression de luminosité qui est inférieure à la luminosité de la planète. Un instant après, le rayon 1 sera dévié à son tour, tandis que le rayon 3 passera tout droit. En moyenne, la proportion de rayons déviés sera à très peu près constante, et l'œil percevra une luminosité un peu affaiblie, mais constante. La planète ne paraît pas scintiller comme une étoile.




Il est bien évident que tous ces phénomènes viennent perturber la qualité des images : des rayons sont perdus, d'autres sont déviés, toute l'image tremble comme l'air au-dessus d'une route surchauffée en été…

C'est si important, qu'un télescope d'amateur de 300 mm de diamètre a le **même pouvoir séparateur réel** que les monstres de Palomar ou de Zélentchouk… Bien sûr, ces derniers conservent l'avantage pour la quantité de lumière reçue, et donc pour voir des objets faibles. Par contre, le télescope spatial, évoluant au-dessus de l'atmosphère, observe la lumière des étoiles directement, sans perturbations. Il atteint donc son pouvoir séparateur théorique.

Pour la compréhension, les astronomes ont introduit un terme nouveau qui définit la limite de résolution imposée par l'atmosphère : c'est le *seeing*. Alors, le pouvoir séparateur d'un instrument est toujours celui calculé par la formule optique, quelles que soient les conditions, alors que le seeing indique la finesse des images accessible à un instant donné, dans un lieu donné, en tenant compte de l'état de l'atmosphère. Le seeing, dans des endroits normaux, descend légèrement en-dessous de la seconde d'arc quand l'atmosphère est calme ; dans les sites où on implante les grands instruments actuels, il descend jusqu'à 0,3". Heureusement, l'optique adaptative vient pallier à ce défaut de notre atmosphère…

**Les aurores boréales**

Un magnifique phénomène lumineux produit par une interaction entre le vent solaire et l'environnement terrestre nécessite un chapitre à part.

## *Le globe*

Le forage le plus profond jamais creusé n'a guère dépassé 10 km, et ceci ne permet donc pas d'explorer en profondeur. Pour connaître l'intérieur de la Terre, nous avons deux moyens : le premier, direct, consiste à rechercher en surface des matériaux provenant de zones profondes (par les remontées de magmas dans les volcans, ou les dorsales océaniques). Le second est l'analyse des ondes sismiques, produites par les tremblements de terre. Lorsqu'une discontinuité de densité se produit (brusque augmentation en descendant vers le centre de la terre), les ondes sismiques se réfléchissent à sa surface. Leur temps de parcours en est diminué. Les mesures de temps de parcours des ondes sismiques, permettent de sonder l'intérieur de la Terre.

L'analyse sismique a permis de trouver plusieurs discontinuités de pression, qui ont montré que la Terre est constituée de trois parties principales :

- *l'écorce*, ou *croûte*, constituée majoritairement de silicates d'aluminium ; zone autrefois nommée SiAl ;
- *le manteau*, constitué principalement de silicates de magnésium ; zone autrefois nommée SiMa ;
- *le noyau* constitué essentiellement de fer et de nickel ; zone autrefois nommée NiFe.

Lors de la formation de la Terre, il est évident que tous ces matériaux étaient mélangés. Ils se sont séparés ensuite pendant que la Terre était encore très chaude, donc liquide. Les plus lourds (fer et nickel) sont tombé vers le centre, les plus légers (silicates d'aluminium) sont remonté vers la surface, ceux de densité intermédiaire (silicates de magnésium) sont resté dans la zone intermédiaire. N'oublions pas les éléments volatils, qui se sont échappé et ont constitué l'atmosphère.

Ce tri est nommé *différenciation*. Il s'est produit dans tous les corps du système solaire assez massifs. La différenciation n'est pas parfaite, tous les éléments chimiques se trouvent dans l'écorce et le manteau, les constituants indiqués ci-dessus étant les plus abondants. Dans le noyau, les éléments autres que le fer et le nickel ne sont qu'à l'état de traces.

L'écorce est constituée de roches de masse volumique moyenne 2,67 g/cm$^3$. Elle est limitée à sa base par une discontinuité de densité, la *discontinuité de Mohorovicic* ou *Moho* : la vitesse des ondes sismiques y passe brutalement de 7,9 à 8,5 km/s, c'est ce qui a permis de la détecter. La masse volumique y est de 3,27 g/cm$^3$. L'épaisseur de la croûte varie entre 10 et 40 km. C'est l'écorce océanique qui est la moins épaisse.

Au-dessous du Moho, se trouve la partie supérieure du manteau terrestre, qui est rigide parce que la température est trop basse pour le rendre fluide.

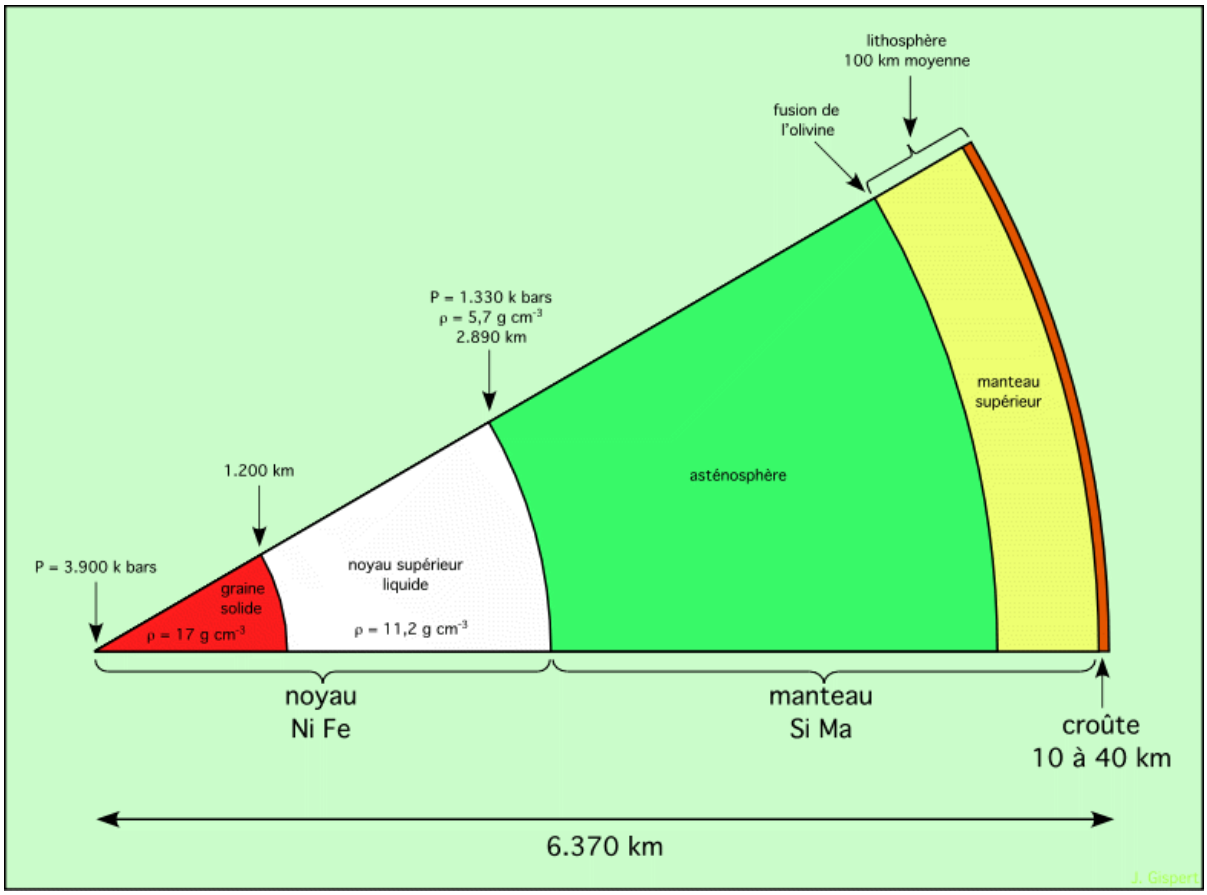
L'écorce, et cette partie supérieure du manteau, constituent la *lithosphère* (de grec *lithos* = pierre). La lithosphère est divisée en *plaques tectoniques*, ou *plaques lithosphériques*. Ces plaques sont mues par la convection dans le manteau.

> Pour donner une image, on peut considérer les plaques tectoniques comme un gigantesque puzzle, dont les pièces s'assemblent, mais aussi se repoussent. Regardez une carte du monde, et constatez que l'Afrique et les Amériques s'emboîtent l'une dans l'autre ! C'est cette simple constatation qui a donné l'idée première de la dérive des continents (Wegener, 1915). Elle a été largement confirmée par la suite, par des arguments mesurables. Ainsi, par des moyens radioélectriques utilisant des satellites, on peut maintenant mesurer de grandes distances sur Terre avec une précision de quelques centimètres. Ainsi, on a pu mesurer l'élargissement progressif de l'Atlantique, qui est de l'ordre de la dizaine de centimètres par an. Des explications sont notées plus loin.

Le manteau supérieur s'étend en profondeur jusqu'à ce que la température devienne suffisante pour fluidifier la matière. C'est l'isotherme où

l'olivine change d'état qui marque cette limite : liquide au-dessous, elle se cristallise pour température insuffisante au-dessus.

Le manteau proprement dit s'étend de là jusqu'à 2.890 km, où commence le noyau. On le nomme *asthénosphère* (du grec *a*, privatif, et *sthenos* force). La limite entre l'asthénosphère et le noyau est bien connue par les réflexions d'ondes sismiques. *L'asthénosphère* est le niveau souple (non rigide) qui permet de rétablir l'équilibre isostatique (pour compenser le poids des montagnes par exemple).




Le noyau s'est avéré décomposé en deux parties encore, la partie externe fluide, et la partie interne solide, qu'on nomme *graine*. C'est encore une variation de vitesse des ondes sismiques qui délimite la graine.

La densité est de 5,7 à la base du manteau. La densité moyenne du noyau est de 11,2 et doit croître de l'extérieur vers le centre. La pression à la limite extérieure de noyau est de 1.330 kilo bars, et la pression centrale de 3.900 kbars. La graine pourrait avoir une densité de 17.

L'hypothèse d'un noyau de Ni Fe provient de l'analogie avec de nombreuses météorites. Le noyau pourrait aussi contenir du silicium et du soufre, en faibles quantités.

Le noyau et le manteau contiennent un peu d'uranium radioactif, dont la désintégration entretient la chaleur. Cette chaleur doit être éliminée, sinon la Terre se réchaufferait fortement. La convection y pourvoit, en transportant de la matière chaude vers l'extérieur, et en ramenant en profondeur de la matière refroidie au contact de la croûte. La vitesse des courants de convection est de l'ordre de 100 km par an, soit de l'ordre de 10 mètres à l'heure. Le contact entre ces remontées de magma chaud et l'écorce est à l'origine d'une partie du volcanisme.

La lithosphère est une zone de transport conductif de la chaleur, alors que l'asthénosphère est convective.

**Champ magnétique**

Le champ magnétique terrestre est produit par les mouvements de matière dans le noyau, sans qu'on sache exactement comment à l'heure actuelle. Il est très complexe, et sa valeur est loin d'être uniforme à la surface de la Terre. A l'équateur, elle est de 0,32 m T (milli Tessla) ; 0,48 m T en France ; 0,6 m T au niveau des pôles.

En toute première approximation, il s'agit d'un champ dipolaire, comme celui créé par un bareau aimanté. Il en résulte un pôle nord et un pôle sud. Historiquement, on a nommé Nord Magnétique le pôle magnétique situé à proximité du pôle nord géographique. Malheureusement, il s'agit d'un pôle magnétique sud… Mais l'appellation est restée. Ce pôle sud magnétique est donc situé actuellement au Canada, dans la mer, au large de Resolute Bay. Ses coordonnées sont 81° N, 110° Ouest. Le pôle nord magnétique se trouve aussi dans un océan, au large de la Terre Adélie.

Des recherches sont en cours en particulier à Grenoble, au laboratoire Géodynamo, où un modèle du noyau, constitué d'une sphère contenant du sodium liquide, en rotation rapide, est en cours de réalisation (un premier modèle de petite taille a été construit en 2003). Les courants de sodium engendrés par la rotation seront mesurés, ainsi que le champ magnétique engendré, dans le but de comprendre le lien entre les deux.

Le pôle magnétique se ballade constament à la surface de la Terre. Actuellement, il se rapproche du pôle géographique. Sa valeur non plus n'est pas constante, et varie en particulier avec l'activité solaire. Parfois (à l'échelle des temps géologiques), le champ s'affaiblit, puis disparaît, avant re réapparaître avec une polarité inverse !

Comment le sait-on ? Grâce aux volcans ! Les laves contiennent des oxydes de fer magnétiques, et sont liquides. Chaque particule magnétique, sensible au champ terrestre, s'oriente comme l'aiguille d'une boussole. Lorsque la lave se refroidit, la particule se trouve bloquée dans sa gangue

de roche, et ne peut plus bouger. Si le champ magnétique change de direction, la particule conservera la mémoire du champ au moment du refroidissement. Cette observation est capitale. Les géologues ont récolté des laves anciennes (de tous âges) en de nombreux endroits de la Terre. Ils ont voulu en déduire les mouvements du pôle magnétique. Des géologues européens l'ont fait, des américains aussi. Puis ils ont comparé leurs résultats. La surprise a été grande de constater qu'ils ne s'accordaient pas du tout. Pire, plus les mesures comparées étaient anciennes, plus elles divergeaient de part et d'autre de l'Atlantique. Il faut croire qu'ils ne mesuraient pas le même pôle…

Pourtant, une explication simple justifiait ces résultats : la dérive des continents (non encore rebaptisée tectonique des plaques). Mieux, une fois cette interprétation acceptée, la divergence des résultats donnait une mesure de l'écartement progressif des continents. C'est elle qui permet d'établir des cartes de la Terre à différentes époques.

Les inversions de polarité semblent avoir une périodicité de l'ordre de 100.000 ans. Pourtant, la dernière date de 780.000 ans…

**Champ à l'extérieur de la Terre**

Les lignes de champ produites à l'intérieur de la Terre se prolongent à l'extérieur, et intéragissent avec le vent solaire, constitué de particules chargées (essentiellement des protons). La forme résultantes est fort complexe, mais on peut la décrire approximativement de façon relativement simple.

Le vent solaire produit lui-même un champ magnétique, puisqu'il est contitué de particules chargées en mouvement. Ces particules arrivent du Soleil, donc du côté jour de la Terre. Elles viendraient frapper la surface, si le champ de la Terre ne produisait pas de déviation. Les particules se trouvent piégées dans le champ terrestre, et sont déviées en direction des pôles. Les moins énergétiques sont alors guidées vers le sol dans les régions polaires nord ou sud. Là, elles viennent frapper les molécules d'air de la haute atmosphère, qu'elles ionisent. La recombinaison des atomes produit de la lumière, et forme les *aurores polaires*.

Les particules plus énergétiques ne sont pas piégées par la Terre, mais seulement déviées, et contournent notre planète. Lorsqu'elles passent derrière, elles entraînent avec elle le champ magnétique terrestre. Plusieurs conséquences importantes s'ensuivent :

- un tassement du champ magnétique du côté jour ;
- un étirement du côté nuit. On le nomme *magnetotail* ;
- une zone de radiations intenses au-dessus de la partie éclairée de la Terre.

La zone de radiations a été découverte par le premier satellite américain, *Explorer 1*, dit Pamplemousse. Ce sont les *ceintures de Van Allen*.

La zone de l'espace autour de la Terre, dans laquelle le champ magnétique est relativement important, est nommée *magnétosphère terrestre*. Toutes les planètes qui possèdent un champ magnétique présentent également une magnétosphère.

## *Volcanisme*

Le volcanisme est l'ensemble des manifestations liées à remontée en surface de matière plus ou moins fluide. La viscosité de cette matière, sa composition chimique, produisent des comportements différents, et des résultats très divers. La construction la plus évidente est le volcan, dont il existe plusieurs types. Tout d'abord, que sont les laves ? On en distingue deux grands types :

**Les basaltes**

Les basaltes sont des roches profondes. Ils sont fondus aux alentours de 1.200 , température normale d'une éruption volcanique. C'est un mélange de plagioclases et de pyroxènes :

- les plagioclases sont des feldspaths calco-sodiques ; les feldspaths sont les minéraux les plus abondants de l'écorce terrestre, ils contiennent la majeure partie de l'aluminium, la quasi-totalité du sodium et du potassium, une grande partie du calcium et du silicium. Les plagioclases constituent une série de minéraux allant de l'albite $NaAlSi_3O_8$ à l'anorthite $CaAl_2Si_2O_8$, en proportions diverses.
- les pyroxènes sont des silicates ferro-magnésiens. Pline l'Ancien utilise ce terme pour désigner une roche noire originaire d'Ethiopie, ce qui donne le mot éthiopien ancien *bsalt* (cuit) comme origine du mot basalte. Les pyroxènes constituent deux séries différentes ; les pyroxènes monocliniques -$XYSi_2O_6$ où X = Mg, Al ou Fe et Y = Ca, Mn, Na, ou K- et les pyroxènes orthothombiques -$MgSiO_3$ à $FeSiO_3$.

Le basalte est le constituant principal de la lithosphère, aussi bien continentale qu'océanique. La densité est voisine de 3.

Les basaltes ont tous une composition très voisine, ce qui entraîne des propriétés physiques semblables. Le point de solidification se trouve vers 1.150 , très proche de la température de liquéfaction. Les basaltes sont constitués de 45 à 55 % de silice ($SiO_2$), avec beaucoup de fer, de calcium et de magnésium, mais pratiquement pas de potassium.

Les basaltes sur Terre proviennent de :

- **volcans boucliers** : Hawaï, Islande. Coulées très fluides, qui constituent donc des volcans à pentes faibles. Le Mauna-Loa est la plus grande montagne de la Terre, assise sur le socle à 5.000 m sous l'océan, et culminant à 4.000 m.
- **basaltes de plateau** ; le basalte sort par une fissure dans le sol, et s'épanche horizontalement. Ces basaltes-là sont appellés trapps. On en trouve en Islande, aux USA, au Brésil, en Patagonie. Les trapps du Dekkan, en Inde, sont contemporains de la disparition des dinosaures, et ont été invoqués comme cause de celle-ci.
- **les éruptions sous-marines** ; le basalte subit un refroidissement très rapide (trempe) qui produit diverses formes, en particulier les laves en coussin (pillow lava).

**Les andésites**

Les andésites sont des laves produites après subduction (voir plus bas) d'une croûte océanique. En plongeant à grande profondeur, la croûte s'échauffe, puis fond. Les plaques provenant de la surface sont imbibées d'eau. Les matériaux hydratés (contenant des sédiments), chauffés, donnent une lave différente de composition, qui produit les andésites (50 % d'albite et 50 % d'anorthite)

Le nom de ces roches provient de la cordillière des Andes, où on les a étudiées d'abord. Elles sont caractéristiques des cordillières jeunes.

**Les types de volcans**

Le volcanisme de subduction est produit par la fusion d'une croûte continentale ou océanique qui plonge sous une autre. A la ligne de contact, se produit la fusion, et donc le volcanisme. Les volcans se trouvent par conséquent le long de la ligne qui délimite les deux plaques. On distingue :

- **les bordures continentales** (*cordillière des Andes*). Cette lave s'est mélangée à la croûte continentale riche en silice. La lave est plus visqueuse, et les éléments volatils sont sous forte pression. Lorsque la lave arrive en surface, ils se détendent brusquement, donnant un caractère explosif à ces éruptions.
- **les arcs insulaires** (*Indonésie*, *Aegean*). La lave y est mélangée à la croûte océanique et aux sédiments marins, riches en éléments volatils (eau en particulier). Comme dans les bordures continentales, cette lave est visqueuse, et les volcans produits de même type.

A une lave visqueuse sont associées des éruptions pyroclastiques, explosives, très dangereuses.

Il existe d'autres modes de formation de volcans :

- **les points chauds**. Ils sont situés à l'intérieur d'une plaque, et sont produits par un panache de magma chaud qui remonte du manteau. Lorsqu'il entre en contact avec la croûte, il la perfore et les laves s'écoulent par la fissure. Hawai est le type des volcans de point chaud.
- **les dorsales océaniques**. Il s'agit là de magma qui remonte du manteau et qui arrive directement à la surface entre deux plaques océaniques. Cette lave n'a pas été contaminée par la croûte, et reste fluide. Elle est pauvre en silice et en éléments volatils.

Ces laves sont fluides, et provoquent des éruptions calmes.

Selon la viscosité de la lave, la forme du volcan diffère. Les laves fluides donnent des volcans larges et peu élevés, ce sont les *volcans boucliers*. Parfois, la lave s'épanche par de nombreuses fissures dans le sol, et les coulées se mèlent pour former des plaines volcaniques. Un bel exemple sur Terre est le plateau du Deccan en Inde. Les plaines de Mars ont la même origine.

Ces paysages sont représentatifs des planchers océaniques et des îles. Les laves visqueuses, *a contrario*, vont produire des formes plus pointues, donner des *strato-volcans*. Ceux-ci ont une forme beaucoup plus élancée, leurs pentes sont fortes, les flancs sont convexes. La lave visqueuse a des difficultés à s'échapper, et par conséquent la pression monte dans la chambre magmatique. Les gaz dissous sont sous forte pression. Finalement, une faille se produit, mettant la lave en contact avec l'atmosphère. La décompression est donc brutale, les gaz s'échappent explosivement comme le gaz carbonique d'une bouteille d'eau gazeuse ouverte brusquement. Ces explosions sont très dangeureuses, alors que les éruptions des volcans boucliers ne présentent en général aucun danger.

**Résumé**

| cause | localisation | caractéristique des laves | consistance | éruption | volcan |
|---|---|---|---|---|---|
| subduction d'une plaque océanique passant sous une autre plaque océanique | limite des plaques ; arcs insulaires (Indonésie) | magma mélangé à la croûte océanique, chargée d'eau et de sédiments (éléments volatils) | visqueuse ; éléments volatils sous forte pression | explosive (détente brusque des éléments volatils), pyroclastique | strato-volcan |
| subduction d'une plaque océanique passant sous une plaque continentale | bordure continentale ; (cordillière des Andes) | magma mélangé à la croûte océanique, chargée d'eau et de sédiments (éléments volatils), et à la croûte continentale, riche en silice | | | |
| | | | | | |
| points chauds, ou panaches de magma | zones actives en milieu de plaque (Hawai) | pauvres en silice et en éléments volatils, non contaminées par la croûte. | fluide | calme, la lave s'écoule loin | volcan bouclier |
| remontée de magma écartant deux plaques océaniques (obduction) | dorsales océaniques | | | | |

Selon la viscosité de la lave, la forme du volcan diffère :

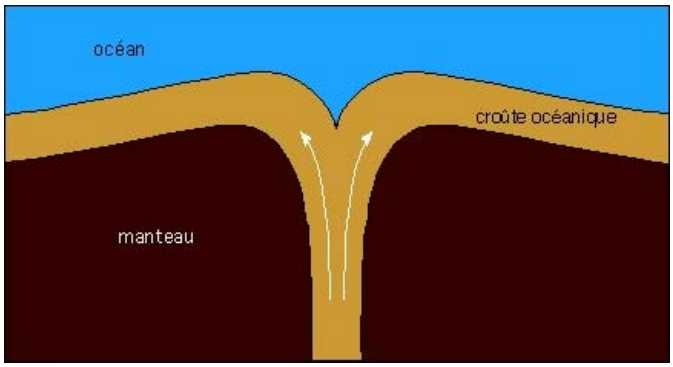
| | | | |
|---|---|---|---|
| **laves fluides** | une cheminée | volcan bouclier, large et peu élevé, pentes faibles, flancs concaves | *Mona Loa* à Hawaï |
| | des fissures | plaines volcaniques | plateau du *Deccan* (Indes) ; planchers océaniques ; plaines martiennes |
| **laves** | une | strato-volcans, élancés, pentes fortes, flancs | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **visqueuses** | cheminée | convexes | *Etna* |

Dans les strato-volcans, la lave visqueuse a des difficultés à s'échapper, et par conséquent la pression monte dans la chambre magmatique. Les gaz dissous sont sous forte pression. Finalement, une cheminée se forme, mettant la lave en contact avec l'atmosphère. La décompression est donc brutale, les gaz s'échappent explosivement comme le gaz carbonique d'une bouteille d'eau gazeuse ouverte brusquement. Ces explosions sont très dangeureuses, alors que les éruptions des volcans boucliers ne présentent en général aucun danger.

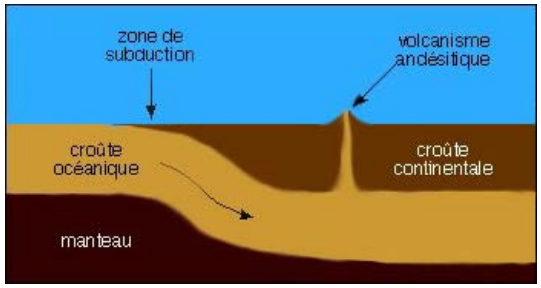
**L'intérieur**

Le mécanisme du mouvement des continents est la *convection*. La convection est un mécanisme de transfert d'énergie, depuis les zones profondes où elle est produite, jusqu'à la surface où elle peut s'échapper vers l'espace. Vous pouvez voir la convection dans une casserole d'eau bouillante. La source de chaleur étant située sous la casserole, la pellicule d'eau en contact avec le fond est plus chaude que le reste. Or l'eau chaude (ou l'air chaud, ou la lave…) est plus légère que l'eau froide, car elle est un peu dilatée. Donc, elle va avoir tendance à monter vers la surface, tandis que de l'eau plus froide va descendre la remplacer au fond. Cette eau va donc se réchauffer, et remonter… L'eau chaude va monter verticalement en formant une colonne, arrivée à la surface, elle va se diriger à l'horizontale, se refroidir, et redescendre verticalement. Il se forme donc des tourbillons. Dans la Terre, ce sont des roches fondues qui, dans les zones profondes, sont chauffées, et donc s'allègent. Elles vont donc monter tout comme l'eau dans la casserole, et à l'endroit où elles arrivent à la surface, elles vont se diriger horizontalement en poussant les roches déjà en place. C'est cette poussée qui va élargir l'Atlantique, car la remontée de magma se fait selon une ligne médiane tout le long de l'océan.



Obduction

Cette ligne s'appelle *dorsale médio-Atlantique*. Cette remontée de magma produit du basalte, qui crée la croûte océanique, et se nomme *obduction*. Puisqu'il y a création de croûte, et que la surface de la Terre n'augmente pas, il doit y avoir ailleurs disparition d'une quantité équivalente. C'est la *subduction*, qui se produit lorsqu'une croûte lourde plonge sous une autre plus légère. C'est le cas de la plaque indienne qui plonge sous la plaque asiatique.



Subduction

Haroun Tazief a trouvé une autre zone d'élargissement, à pieds secs : dans l'Afars, en Ethiopie, il y a un grand cañon bordé par des falaises, et dont le fond est parsemé de volcans actifs (dont l'Erta Alé qui possède l'un des rares lacs de lave connus). Il a placé des réflecteurs laser sur un bord, et des émetteurs sur l'autre ; il a pu ainsi mesurer très exactement la distance entre les deux falaises. Cette distance augmente avec le temps, car le volcanisme au centre du cañon repousse les bords. Un océan est en train de se creuser là.

Tout ceci est possible parce que la Terre est une planète possédant plusieurs plaques tectoniques, qui peuvent glisser sur leur socle. Ces plaques se promènent à la surface du globe, et l'une d'entre elles, la plaque Indienne, se dirige vers le nord depuis quelques millions d'années. Elle est venue heurter la plaque asiatique, qui n'a pas voulu bouger ; de ce fait, l'Inde est en train de se glisser sous l'Asie, en provoquant des plissements. C'est ce qui forme l'Himalaya. Les planètes telluriques n'ont pas toutes plusieurs plaques.

Une autre conséquence de la dérive des plaques est la présence de chapelets de volcans. Il existe en profondeur ce que l'on appelle des points chauds : un endroit à la surface du manteau plus chaud que les autres. A l'aplomb de ce point, il va y avoir une colonne montante de matière chaude, qui va arriver à la surface. Là, une partie de cette matière va s'épancher en formant un volcan. Mais la plaque ainsi perforée et qui porte le volcan se déplace, alors que le point chaud est fixe. Il s'ensuit qu'il va perforer la plaque un peu plus loin, et ainsi de suite, formant une ligne de volcans. C'est le cas en particulier des volcans du Pacifique : on peut voir qu'ils sont alignés. Ce phénomène limite la hauteur maximale des volcans : puisque la plaque se déplace, il n'y a pas d'accumulation des éruptions successives.

**Cratères d'impact**

On a vu que Mercure, la Lune présentent en surface de très nombreux et importants cratères. La Terre s'étant formée dans les mêmes conditions, a du être bombardée tout autant. Mais elle possède une atmosphère très importante, et surtout de l'eau, qui tombe en pluies plus ou moins fortes, et qui ruisselle sur le sol, en provoquant une intense érosion. En hiver, le gel fait éclater les roches également, en faisant augmenter le volume de

l'eau qui s'est infiltrée dans les fissures.

Il ne faut pas oublier non plus la présence de la vie : certains organismes qui vivent fixés au sol, produisent des composés chimiques agressifs pour les roches, et participent à leur transformation chimique, les rendant plus aptes à l'assimilation par des formes de vie plus évoluées.

Toutes ces causes font qu'une structure géologique telle qu'une montagne n'a sur Terre qu'une durée de vie limitée ; tous les torrents de montagne nous en apportent la preuve en charriant des cailloux qui n'ont pour vocation que de descendre… Les cratères qui se sont formés sans doute au même taux ici que sur d'autres planètes voisines (Mercure, la Lune, Vénus) ont pratiquement tous disparu. C'est le cas obligatoirement de ceux de la première heure, juste après l'accrétion de la Terre. Mais longtemps après, il reste encore de rares (heureusement) objets volants parfaitement identifiés qui voguent sur des orbites proches de la notre, et qui n'attendent qu'une occasion pour venir nous voir de près.

Un exemple est la gigantesque explosion qui s'est produite en 1908 en Sibérie, à Tougouska : un objet céleste est venu percuter la Terre à grande vitesse, et a tout dévasté dans un rayon de plusieurs centaines de kilomètres. Tous les arbres étaient couchés, dans une direction opposée au point d'impact. Un cratère a été creusé. Malgré de nombreuses recherches, engagées seulement 13 ans plus tard pour des raisons politiques, on n'a jamais trouvé les débris de la météorite responsable. L'objet s'est très probablement désintégré en explosant dans les couches hautes de l'atmosphère. On a envisagé que ce soit un noyau de comète car, formé principalement de glace, il se serait volatilisé.

On peut observer sur notre planète quelques autres cratères d'impact, dont le plus célèbre est le Meteor Crater en Arizona. Un autre bel exemple est celui de la Manicouagan au Canada.



Le cratère d'impact de la Manicouagan, au Québec photo STS9 NASA

Le cratère de la Manicouagan mesure 100 km de diamètre. La présence de shattercones prouve son origine météoritique. Il a été creusé il y a 214 millions d'années par une météorite qui devait atteindre 5 km de diamètre. Depuis, le cratère a subi des glaciations qui l'ont considérablement érodé. Il pourrait être à l'origine d'une exctinction massive, ayant fait disparaître 60% des espèces existant à l'époque.

Il existe encore quelques dizaines de cratères d'impact, plus ou moins visibles.

Terminons sur ce paragraphe en mentionnant la disparition des dinosaures. D'innombrables théories plus ou moins étayées ont été proposées pour expliquer leur disparition brutale, il y a 65 millions d'années. Mais celle qui maintenant semble la plus solide suppose la chute d'une météorite d'une dizaine de kilomètres, qui se serait produite dans le golfe du Mexique. Par des sondages géologiques, on a retrouvé des traces du cratère creusé à l'époque, ainsi que des sédiments charriés sur toutes les côtes par le tsunami qui a suivi l'impact.

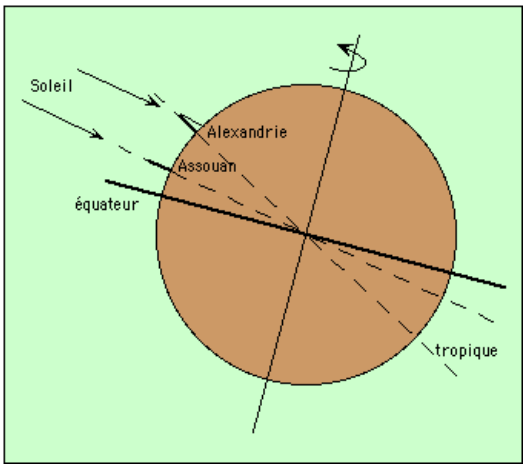
**Mesure de la Terre**

La première mesure de la Terre est due à Eratosthène, et elle a été faite par des observations simultanées à Alexandrie et Assouan.

La distance entre Assouan et Alexandrie était évaluée à 850 km. Deux bâtons sont plantés verticalement au sol à Assouan et à Alexandrie. Au même moment (à midi le même jour), on constate qu'à Assouan le bâton ne fait plus d'ombre, alors qu'à Alexandrie l'ombre fait un angle de 7° 12' avec le bâton (avec la verticale). Puisque 7° 12' correspondent à 850 km, 360° correspondent à 42.500 km, ce qui est une excellente valeur.

Une fois connue la circonférence, on obtient le diamètre de la Terre :

$$l = 2 \pi r = 42.000$$




d'où r = 42.000 / 2 π = 6.680 km

et enfin d = 13.360 km (au lieu de 12.758)

**Champ magnétique**

Le champ magnétique de la Terre, même s'il n'est pas totalement expliqué à l'heure actuelle, provient du mouvement des charges électriques dans le noyau. C'est lui qui permet de se diriger à l'aide d'une boussole.

**Age de la Terre**

L'âge de la Terre a d'abord été évalué par l'étude littérale de la Bible. Un religieux anglais a même calculé la date exacte de la création, en remontant la généalogie des personnages bibliques ! Il a obtenu un âge de l'ordre de 6.000 ans.

Buffon le premier a tenté de faire une mesure scientifique. En supposant que la Terre avait été créée chaude, les roches étant à l'état liquide, il a calculé combien de temps il leur aurait fallu pour se refroidir jusqu'à leur température actuelle. Il a ainsi obtenu un âge de 75.000 ans, ce qui était difficile à croire pour les mentalités de l'époque. C'était donc un très grand progrès, malgré une valeur très inférieure à la réalité. En fait, Buffon avait trouvé 3 millions d'années, mais il n'avait pas osé le publier…

Un anglais a ensuite utilisé une autre méthode : il a supposé que les sédiments se déposaient à vitesse constante au fond des mers, et connaissant la vitesse actuelle et l'épaisseur atteinte, il en a simplement déduit combien de temps ce dépôt avait duré. Il a obtenu 96 millions d'années, valeur encore insuffisante, mais constituant un pas de plus vers la solution du problème.

Autre détermination (anglaise aussi), autre méthode : au départ, il n'y avait pas d'océans. Ils se sont déposés par condensation de la vapeur d'eau après refroidissement suffisant de la Terre. C'était donc de l'eau douce ; le sel a été transporté ensuite dans les océans par les fleuves, qui lessivent les sols et dissolvent le sel qu'ils contiennent. On sait mesurer la quantité d'eau arrivant chaque année dans les mers, et en supposant constante la quantité de sel qu'elles y amènent, il est facile de déterminer le temps passé pour atteindre la salinité actuelle. Cette méthode elle aussi a donné une valeur de l'ordre de 95 millions d'années. Ceci est un peu gênant, puisque cette méthode semble conforter la précédente…

Plus tard, lord Kelvin a recalculé le temps mis par la Terre pour se refroidir, après avoir fait des expériences sur des boules de roches chauffées, et a obtenu entre 20 et 400 millions d'années…

Tous ces chercheurs ne savaient pas que la chaleur interne de la Terre, comme celle des autres planètes telluriques, est d'origine *radiogénique* ( ? ! *Radiogénique* : engendré par la radioactivité des éléments naturels qui se désintègrent). La chaleur primordiale a été évacuée depuis très longtemps, mais les désintégrations de l'uranium en particulier produisent de la chaleur qui maintient la température. Donc, si l'idée était bonne, elle ne pouvait mener à une valeur correcte !

Il nous faut considérer la décroissance radioactive : prenons par exemple l'uranium 235, qui se désintègre en plomb 207, avec une période de 710 millions d'années. Chaque atome radioactif est susceptible de se désintégrer à tout instant, mais on ne peut pas savoir quand il le fera. Comme on ne peut pas attendre patiemment (des millions d'années…) en scrutant un atome particulier, on observe une grande quantité d'atomes à un instant donné, puis cette même masse un peu plus tard. On calcule combien d'atomes se sont désintégrés entre temps. On en déduit ce qu'on appelle la période d'un élément radioactif : c'est le temps au bout duquel la moitié des atomes se seront désintégrés.

Pour l'uranium 235, ce temps est de 710 millions d'années. Au bout de 710 millions d'années, on trouvera donc deux fois moins de cet uranium. Au bout de 710 nouveaux millions d'années, il ne restera plus que la moitié de la moitié, donc le quart… Par contre, la concentration de plomb va augmenter, puisqu'il se forme à partir de l'uranium. Si on détermine le rapport de plomb et d'uranium, on peut en déduire l'âge de la roche. Les valeurs ainsi trouvées sur des roches de l'écorce terrestre sont de l'ordre de 4 milliards d'années.

Mais la Terre s'est constituée avant, puis elle s'est différenciée (chute vers le centre des éléments lourds qui ont formé le noyau, montée en surface des éléments légers qui ont formé la croûte). Ce qu'on a obtenu est donc l'âge de la croûte terrestre, pas l'âge de la Terre.

Actuellement, on connaît des roches dans l'ouest du Groënland dont l'âge est de 3,9 milliards d'années. Mais l'âge de la croûte terrestre est encore plus élevé, il est de l'ordre de 4,7 milliards d'années . Pourquoi ? Parce que la surface du globe a été transformée après sa formation, par le bombardement des météorites qui erraient en abondance dans les parages de la Terre à l'époque. Lorsque les météorites se sont faites plus rares, les roches ont pu se stabiliser. Cet âge est comparable avec celui des plus anciennes roches lunaires, et celui des météorites. On gardera en mémoire que le système solaire globalement est âgé d'environ 5 milliards d'années. On étudiera plus tard la formation du système solaire.

Un autre indicateur nous vient des météorites : certaines parties (chondres) se sont formées à haute température (1.400 ). Donc lorsque la Terre était encore chaude, non différenciée. En utilisant la même méthode de datation sur les chondres, on obtient un âge de 4,6 milliards d'années. C'est l'âge du système solaire, au moment de la formation des planètes (chaudes).

---=OO=---

# La Lune

photo : coupoles de l'OHP au coucher du sole

*La Lune, prétexte des mauvais jardiniers…*


photo NASA

Tout le monde croit connaître la Lune, tant sa présence dans le ciel est évidente, mais on ne sait en général pas grand chose d'elle.

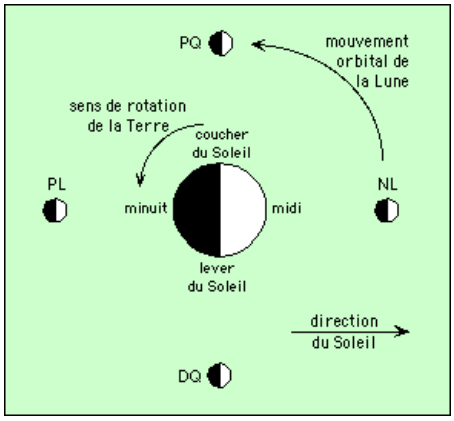
Considérons d'abord le plus simple : la Lune se présente parfois comme un gros disque brillant, parfois comme un fin croissant, avec tous les intermédiaires. Ces différents aspects sont nommées *phases*. Quatre phases particulières sont intéressantes :

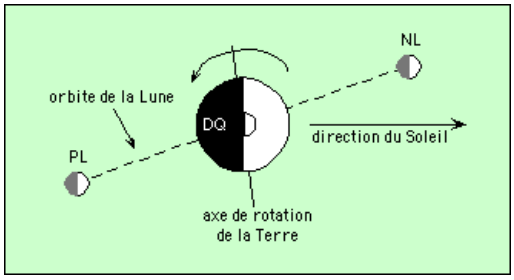
- la *Nouvelle Lune* se produit lorsque la Lune se trouve entre le Soleil et nous ; elle est alors éclairée par derrière, et nous montre sa face obscure ; elle est donc invisible ; elle se trouve au plus haut dans le ciel à midi ;
- le *Premier Quartier* ; en tournant autour de la Terre, l'alignement avec le Soleil se détruit, et nous commençons à voir une partie de la face éclairée ; le premier quartier correspond à la visibilité de la moitié de la face éclairée, 7 jours à peu près après la nouvelle lune ; le premier quartier culmine dans le ciel au coucher du Soleil ;
- la *Pleine Lune* est opposée à la nouvelle lune ; l'astre a maintenant fait un demi-tour, et nous montre sa face éclairée en entier ; Soleil et Lune sont donc opposés pour l'observateur terrestre ; la pleine lune est donc au méridien à minuit ;
- enfin le *Dernier Quartier* nous montre encore la moitié de la face éclairée, mais cette fois de l'autre côté ; il se produit 7 jours avant la nouvelle lune suivante ; le dernier quartier culmine dans le ciel au lever du Soleil.

Le schéma ci-contre montre les 4 positions de la Lune par rapport à la Terre, le Soleil étant à droite, et le pôle nord de la Terre visible (au centre du disque, on est à la verticale du pôle).

On voit que la NL se présente en plein jour ; le PQ est visible le soir, au coucher de soleil ; la pleine lune au milieu de la nuit, et enfin le DQ le matin.

L'échelle des distances entre la Terre et la Lune n'est pas du tout respectée ; en dessinant les globes de cette taille, il faudrait placer la Lune à 65 cm de la Terre. D'autre part, il manque la profondeur à un dessin, et il faut bien se souvenir que l'orbite lunaire est inclinée sur l'écliptique ; par conséquent la Lune passe au-dessus ou au-dessous de la Terre lorsqu'elle est nouvelle ou pleine. Ceci justifie qu'elle soit éclairée en position de pleine lune (sinon il y aurait une éclipse).




L'orbite inclinée fait passer la Lune au-dessus ou au-dessous de la Terre, interdisant en général les éclipses.

Pour la lisibilité du schéma, la distance est très diminuée et l'inclinaison augmentée. L'ombre de la Lune passe le plus souvent au-dessus ou en-dessous de la Terre.

Pour l'observation, il est intéressant de noter que la Lune se déplace dans le ciel d'un jour à l'autre, d'ouest en est. Ainsi, après la nouvelle lune, où elle est inobservable, on voit apparaître un fin croissant qui SUIT le Soleil, donc visible juste après le coucher du Soleil. De nuit en nuit, ce croissant s'éloigne du Soleil en grossissant. La Lune devient pleine au bout de 15 jours, et elle est alors à l'opposé du Soleil. Donc, elle se lève à l'est au moment où le Soleil se couche à l'ouest.

Ces explications sont **qualitatives**. Elles supposent les orbites circulaires et parcourues à vitesse uniforme, ce qui représente un cas idéal.

Le cas réel est bien différent : le grand axe de l'orbite lunaire ne se présente jamais sous le même angle par rapport à la ligne Terre-Soleil qui définit son éclairement, donc les phases. L'orbite étant elliptique, la Lune va plus ou moins vite dans son mouvement entre deux phases successives, ce qui donne une grande variabilité à leur écart temporel.

Ensuite, le mouvement continue, avec une succession d'aspects symétriques : le croissant de Lune diminue en se rapprochant du Soleil après la pleine lune suivante.

Outre les phases principales indiquées plus haut, on distingue aussi les *phases gibeuses* (ce qui signifie *bossue* ; en provençal, bossu se dit *gibous*). Ce sont les phases entre les quartiers et la pleine lune, où plus de la moitié de la surface est éclairée. Avant la pleine lune, on dit *gibeuse croissante*, et après *gibeuse décroissante*.

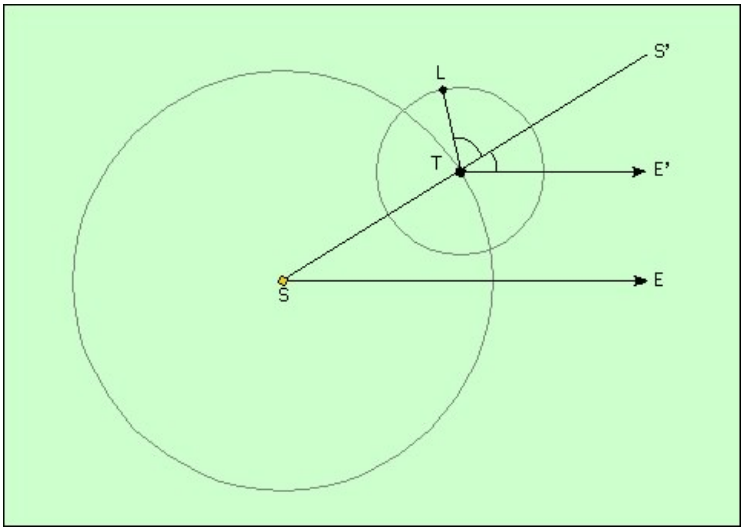
La nouvelle lune et la pleine lune portent le nom générique de *syzygies*. Les syzygies sont intéressantes car ce sont les instants où peuvent se produire les éclipses.

L'intervalle de temps entre les différentes phases (NL, PQ, PL et DQ) a donné naissance à la semaine de sept jours. De même, la Lune est à l'origine du mois, qui d'ailleurs porte son nom : mois vient de *mêné* qui signifie Lune en grec, et provient d'une très ancienne racine Indo-Européenne.

## *Mouvements de la Lune*

Lune et Soleil sont à l'origine de toutes nos mesures de temps. Dommage que leurs mouvements ne soient pas synchronisés, car notre calendrier en serait infiniment simplifié.

L'intervalle de temps compris entre deux nouvelles lunes successives est nommé *lunaison*, ou *mois lunaire*, ou *révolution synodique* ; sa valeur moyenne est de 29 j 12 h 44 mn 2,8 s. Ses valeurs extrêmes sont 29 j 6 h et 29 j 20 h.




Ce schéma montre le Soleil, la Terre sur son orbite, et la Lune sur son orbite autour de la Terre. Pour simplifier, les orbites sont dessinées circulaires. La direction SE est celle d'une étoile, située à l'infini, et prise pour repère. La direction TE' repère la même étoile vue de la Terre, et SE et TE' sont parallèles, puisque l'étoile est infiniment loin.

Pour étudier les phases de la Lune, il convient de calculer l'angle que font les directions de la Lune et du Soleil, vues de la Terre. Si nous prenons comme point de repère les pleines lunes, on considérera la position de l'antisoleil, qui est notée S'.

L'angle qui nous intéresse est S'TL. On peut écrire :

$$E'TS' + S'TL = E'TL$$

donc :

$$S'TL = E'TL - E'TS'$$

E'TL est l'angle que la Lune a parcouru depuis l'instant où elle était dans la direction de l'étoile E', dans le temps t. Or elle fait un tour complet par rapport à cette étoile dans le temps de sa révolution sidérale, que nous noterons $T_L$. A chaque seconde, elle parcours donc $\omega_L = 2\pi / T_L$. Dans le temps t, elle parcours donc un angle t fois plus grand, et donc :

$$E'TL = 2\pi\ t / T_L$$

On peut dire exactement la même chose pour le Soleil, en considérant les points E' et S'. La période à considérer est celle de la Terre autour du Soleil, donc $T_T$ = 365,2422 jours. On a alors :

$$E'TS' = 2\pi\ t / T_T$$

Il vient par substitution :

$$S'TL = E'TL - E'TS' = 2\pi\ t / T_L - 2\pi\ t / T_T$$

Enfin, les phases de la Lune sont périodiques, et reviennent identiques au bout d'un temps qui est la lunaison, ou mois lunaire. Soit θ cette

période. Dans le temps t, la Lune aura progressé de :

$S'TL = 2\pi\ t / \theta$

Il nous reste à égaler les deux expressions de S'TL :

$S'TL = 2\pi\ t / \theta = 2\pi\ t / T_L - 2\pi\ t / T_T$

On peut simplifier par $2\pi\ t$ ; il vient :

$$1 / \theta = 1 / T_L - 1 / T_T$$

Remplaçons les périodes connues par leurs valeurs :

$1 / \theta = 1 / 27,32 - 1 / 365,2422 = 0,0366 - 0,0027 = 29,5287$ jours = 29 j 12 h 41 mn.

Nous avons retrouvé la valeur donnée plus haut, à 3 minutes près (erreur due aux approximations faites sur les données).

**Vitesse de la Lune sur son orbite**

Une observation toute élémentaire permet d'en trouver une bonne approximation. On a remarqué que la Lune se déplace dans le ciel, parmi les étoiles, de son propre diamètre apparent en une heure. Son diamètre vaut à peu près 3.500 km, et une heure comporte 3.600 secondes.

Par conséquent, la Lune se déplace de 3.500 km en 3.600 secondes, c'est-à-dire pratiquement d'un kilomètre par seconde (à comparer aux 30 km/s de la Terre autour du Soleil).

**Observation** : regardez la Lune aux jumelles, peu de temps après la nouvelle lune. Faites un dessin approximatif de ce que vous voyez, en positionnant les plus gros cratères et les mers (taches sombres).

Refaites un dessin 4 jours plus tard, et ainsi de suite jusqu'à la prochaine nouvelle lune. En comparant les dessins, on s'aperçoit que les cratères et les mers vus au début sont toujours présents à la même place. Ceci prouve que la Lune tourne toujours la même face vers la Terre. Or dans la durée du mois, elle a pourtant effectué un tour complet autour de nous. Par conséquent, elle tourne sur elle-même et autour de la Terre dans le même temps.

L'égalité entre deux valeurs dans la nature est rarement fortuite ; il convient de l'expliquer. Nous montrerons comment les marées ont modifié la durée de la rotation lunaire jusqu'à ce qu'elle soit égale à la lunaison.

La Lune tournant autour de la Terre sur une orbite elliptique, sa vitesse est variable. Or sa vitesse de rotation sur elle-même est constante. Il s'ensuit un balancement de la Lune dans le ciel. Ce balancement s'appelle *libration*, et il est expliqué dans une animation.

La Lune présente trois sortes de libration. Celle que nous venons de voir est la libration en longitude, et son amplitude atteint 8° de part et d'autre de la position centrale.

Il existe aussi une libration en latitude. Elle est due à l'inclinaison de l'orbite lunaire sur l'équateur terrestre. Lorsque la Lune se présente avec une déclinaison positive, on aperçoit une partie de la zone polaire sud, et réciproquement on voit une partie de la zone polaire nord lorsque sa déclinaison est négative. L'amplitude de cette libration est 6,8°.

Enfin, il existe une libration diurne, qui est produite par le déplacement de l'observateur. Au cours d'une nuit, nous nous déplaçons par rapport à la Lune de 12.000 km (le diamètre de la Terre).

Tout ceci permet de voir, depuis la Terre, 59/100$^{e}$ de la surface lunaire, au lieu des 50/100$^{e}$ qui nous seraient accessibles si la Lune tournait sur une orbite circulaire, dans le plan équatorial terrestre.

Les diverses librations (précession de l'axe de rotation de la Lune en 18 ans incluse) nous montrent 59 % de sa surface. Attention, les librations sont des mouvements apparents de la Lune, dus à des effets de perspective. Il ne s'agit nullement de mouvements réels.

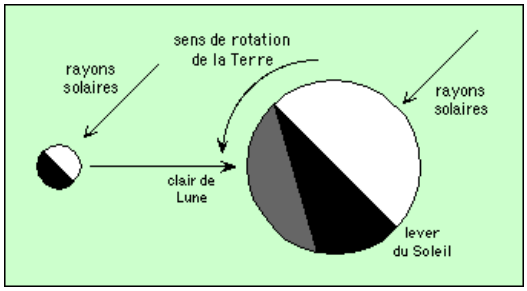
Une conséquence surprenante de ceci est que, sur la Lune, on ne voit pas forcément la Terre ! Si on se trouve sur la face cachée (celle que nous ne voyons jamais), la Terre est invisible et le reste toujours ! Si la Lune était habitable, un sélénite pourrait vivre toute sa vie en ignorant l'existence de notre Terre…

De plus, si on se trouve sur la face visible (comme ce fut le cas pour les astronautes), la Terre est fixe dans le ciel, en première approximation. Elle le serait vraiment si l'orbite lunaire était circulaire. Mais étant elliptique, et parcourue à vitesse variable, le phénomène de la libration en longitude se présente là-bas comme un balancement de la Terre autour de sa position moyenne. Décidément, les mouvements apparents des astres peuvent nous réserver de belles surprises…

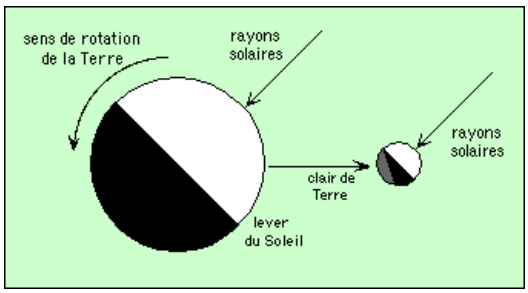
**Lumière de la Lune**

La Lune ne brille pas par elle-même. Elle reçoit de la lumière du soleil, comme la Terre, et c'est la lumière qu'elle nous renvoie que nous percevons. C'est elle qui donne le *clair de lune*.

Si elle brillait par elle-même, comme le Soleil, elle serait toujours pleine !




Lorsqu'il y a le clair de lune, on voit le sol et les arbres, les bâtiments… C'est parce qu'ils nous renvoient encore un peu de la lumière qu'ils reçoivent de la Lune (en provenance du Soleil).

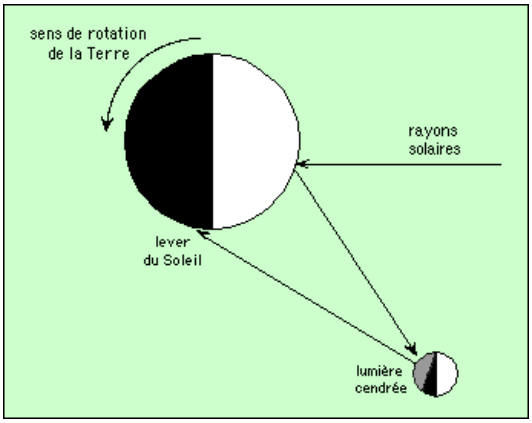



Si nous étions sur la Lune, nous verrions la Terre éclairée par le Soleil. Et lorsqu'il fait nuit sur la Lune, on pourrait y admirer le clair de Terre ! Regardez le schéma ci-contre : la situation est exactement symétrique pour la Terre et la Lune.

Le clair de Terre illumine doucement le sol lunaire. Mais la Terre est 3,7 fois plus grosse que la Lune (diamètre de la Terre = 12.758 km ; diamètre de la Lune = 3.473 km). Par conséquent, la surface éclairée de la Terre est $3{,}7^2 = 13{,}7$ fois plus grande. Si leur albédo était le même, la lumière renvoyée par la Terre serait donc 13,7 fois plus intense que le clair de lune. Mais les albédos sont très différents : celui de la Lune ne vaut que 0,073 alors que celui de la Terre est de 0,39. Par unité de surface, la Terre est 5 fois plus lumineuse que la Lune ($0{,}39 / 0{,}073 \approx 5$). Surface plus grande et albédo plus élevé donnent un clair de Terre 60 ($13{,}7 \times 5$) fois plus lumineux que le clair de lune. On ne doit pas avoir besoin de lampe de poche sur la Lune… Cette lumière fait briller la partie de la Lune où il fait nuit, et celle-ci nous en renvoie encore une partie…

Si on regarde bien, juste après la nouvelle lune, on peut distinguer cette partie de la Lune qui est dans la nuit, éclairée par le clair de Terre… Cette faible lueur porte le joli nom de *lumière cendrée*. Il faut bien comprendre que c`est de la lumière émise par le soleil, qui se réfléchit une première fois sur la Terre, puis à nouveau sur la Lune, avant de nous revenir. On conçoit que cette lumière soit faible.

La lumière cendrée est 10.000 fois plus faible que la pleine lune. Aussi, elle n'est visible que lorsque le croissant est très fin. Lorsque le croissant grossit, sa lumière éblouissante nous masque la lumière cendrée, qui n'est donc visible que deux ou trois jours avant ou après la nouvelle lune.




La lumière solaire touche la Terre, sur laquelle elle se réfléchit. Elle arrive ensuite sur la partie de la Lune opposée au Soleil, sur laquelle il fait nuit.

Elle se réfléchit à nouveau sur le sol lunaire, qui est donc visible d'une petite partie de la Terre plongée dans la nuit.

La lumière cendrée est donc visible juste après le coucher du Soleil le soir, ou bien juste avant le lever du Soleil le matin (configuration du schéma).

La lumière que nous renvoie la Lune permet de l'étudier. Tout d'abord, si on la disperse à l'aide d'un prisme (voir la spectroscopie), on y distingue exactement les mêmes raies d'absorbtion que dans le spectre du Soleil. Ceci est une première indication sur l'absence d'atmosphère de la Lune, car sinon elle modifierait le spectre.

La lumière permet aussi de se faire une idée du sol lunaire :

- un morceau de charbon ne renvoie pas la lumière comme une pierre blanche ;
- une surface lisse renvoie la lumière dans une direction particulière, comme la surface d'un lac (*réflection spéculaire*) ;
- une surface poreuse, comme la pierre ponce, renvoie la lumière dans toutes les directions, mais en absorbe une grande partie dans les innombrables petits trous de sa surface ;
- une surface poreuse polarise la lumière qu'elle réfléchit.

Par le calcul, on peut déterminer l'éclat de chaque phase, puisqu'on connaît l'angle sous lequel le Soleil éclaire le sol lunaire, et l'angle sous lequel il nous renvoie la lumière, selon les propriétés supposées du sol.

Quand on trace les courbes théoriques correspondant aux différents types de sol, et la courbe mesurée, sur un même graphique, on peut sélectionner la courbe théorique qui s'approche le plus de la réalité. Le type de sol qu'elle modélise est celui qui se rapproche le plus du sol réel de la Lune.

Ceci a montré que la Lune n'est pas un très bon réflecteur, et surtout que son sol doit être poreux. Si on suppose la surface creusée de nombreux

petits trous, la réflectance sera bonne à la verticale, et de plus en plus mauvaise si on s'en écarte. D'où l'idée que le sol lunaire pourrait être recouvert de poussières, dans lesquelles un vaisseau spatial pourrait s'enfoncer… Dès les premières sondes expédiées là-haut, on a su que le sol était suffisamment résistant pour supporter un engin spatial. La porosité a été confirmée par la découverte de la polarisation de la lumière lunaire.

Le sol est très sombre : la Lune absorbe 92,7 % de la lumière qu'elle reçoit du Soleil. Son *albédo* n'est que de 0,073 ce qui est vraiment très faible.

Etant très sombre, la Lune absorbe les rayons du Soleil et se réchauffe : la surface atteint les 130 au Soleil. Par contre, dès que le Soleil se couche, le refroidissement est brutal, car il n'y a pas d'atmosphère comme ici pour retenir la chaleur un peu comme une couverture (vous savez que sur Terre, lorsque le temps est couvert, il n'y a pas de gelées. Elles ne peuvent se produire que par temps clair, quand le sol rayonne, vers l'espace, la chaleur reçue pendant le jour). Les roches lunaires sont donc soumises à rude épreuve : au lever du soleil, elles passent très vite de -150 à +130 , et au coucher elles se refroidissent tout aussi rapidement. Ceci produit une dégradation des roches, qui les réduit lentement en poudre.

Les astronautes qui se sont posés sur la Lune ont trouvé cette poussière sur le sol. On la nomme *régolithe*. C'est elle qui explique les propriétés optiques de la Lune.

La magnitude apparente de la Lune est de -13.

**Phénomène de Purkinje**

Dans les faibles éclairements, l'œil humain est beaucoup plus sensible au bleu qu'au rouge. C'est pour cette raison que la Lune nous paraît bleutée, alors qu'en fait elle est plus rouge que le Soleil !

**Diamètre**

La Lune est grosse par rapport à la Terre. On dit parfois que le système Terre-Lune constitue une planète double. Son diamètre est de 3.473 km, un peu moins du tiers de celui de la Terre. Les satellites des autres planètes sont beaucoup plus petits par rapport à leur planète.

**Masse**

La Lune est légère : sa masse-volumique, déduite de sa masse et de son diamètre, n'est que de 3,34 g/cm$^3$. Sa masse vaut 0,0123 fois celle de la Terre. Bien que de même nature rocheuse que la Terre, sa masse-volumique moyenne est nettement plus faible. Pourquoi ? Tout simplement parce que la masse-volumique élevée de la Terre (tout comme de Mercure ou Vénus) est une moyenne, calculée entre la croûte légère et le noyau lourd. Et la masse-volumique de la Lune est égale à celle de l'enveloppe terrestre, constituée essentiellement de basaltes.

Ceci nous donne une indication sur la contitution interne de notre satellite : si la Lune possède un noyau lourd, il doit être vraiment très petit…

**Relief**

En observant la Lune aux jumelles, on y distingue des cratères, de vastes zones lisses et sombres, des régions accidentées. Les premiers observateurs, disposant de lunettes de très mauvaise qualité, ont cru voir dans les grandes zones sombres des océans, tels que sur Terre. Ils les ont donc baptisées de noms comme *mer*, *océan*, *golfe*, *marais*… On sait bien maintenant qu'il n'y a pas d'eau sur la Lune (vraiment ? On soupçonne qu'il y ait un peu de glace dans des fonds de cratères ne voyant jamais le soleil, vers les pôles…). Les mers sont en fait de vastes plaines de basalte, qui se sont formées par fracturation de la croûte après un violent impact de météorite, lorsque la Lune était encore chaude. Par ces fractures, le magma est remonté, a recouvert les terrains anciens, et s'est refroidi. A l'heure actuelle, la Lune entière s'est refroidie, car elle est beaucoup plus petite que la Terre. En fait, la Terre est encore chaude parce qu'elle est massive, et qu'elle contient pas mal de matière radioactive (uranium…) qui en se désintégrant produit de la chaleur.

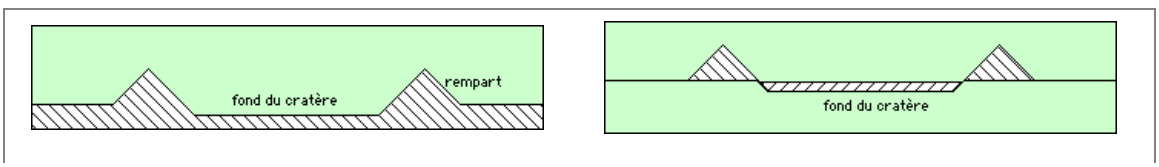
Les mers sont donc des plaines, d'altitude un peu plus basse que le reste du sol. Elles représentent aussi un terrain plus récent, puisqu'il a été remanié par les impacts. Elles sont globalement plates, mais les mers ne se sont pas formées d'une unique éruption. Chaque éruption a coulé vers les points les plus bas, qu'elle a comblés. Mais la lave doit lutter contre le refroidissement, qui est rapide dans ces conditions de vide spatial.

**Les cratères**

Vus depuis la Terre, les cratères ressemblent un peu aux cratères volcaniques que l'on connait ici. Aussi, bien que l'impact des météorites ait été tout de suite envisagé, la possibilité qu'une partie au moins des cratères lunaires soient d'origine volcanique a été prise en compte. La polémique qui s'en est suivi n'a pris fin qu'avec l'astronautique, qui a permi de vérifier sur place.

La conclusion est claire : les cratères sont d'origine météoritique. Il y a certainement eu du volcanisme sur la Lune, mais il a peu duré, à cause des petites dimensions de l'astre. Elle s'est refroidie vite, arrêtant le volcanisme. Les manifestations volcaniques visibles aujourd'hui sont les mers, mais il ne s'agit pas de volcans au sens strict ; ce sont plutôt des épanchements de lave suite à une rupture brutale de la croûte par un choc.

Les cratères sont bien ronds, car les objets qui les ont produits possédaient une grossière symétrie sphérique, et parce qu'ils résultent d'une brusque décompression après le choc.



| | |
|---|---|
| Schéma d'un cratère lunaire.<br>Le fond est légèrement plus bas que la plaine alentour. | Ce dessin montre que le volume de matériaux du rempart<br>correspond au volume enlevé au fond par l'impact. |

Les cratères que l'on voit ont été formés par le choc de météorites, peu de temps après la formation du système solaire. La surface de la Lune devrait être entièrement couverte de cratères, mais là où il y a des mers, les anciens cratères ont été effacés. Depuis, il s'en est formé de nouveaux, mais en petit nombre, car les météorites susceptibles de les creuser se sont peu à peu épuisées.

**L'atmosphère**

Ou plutôt, son absence ! Car la question se pose : la Lune possède-t-elle une atmosphère ?

Un argument théorique nous laisse penser que non, ou toutefois que son atmosphère ne peut pas contenir de gaz légers. En effet, la Lune est chauffée par le Soleil comme la Terre. Cette chaleur entraîne une agitation des molécules de gaz, dont la vitesse est d'autant plus élevée que la température est plus forte. On peut calculer la vitesse moyenne d'une molécule de gaz, en fonction de la température ; on s'aperçoit que pour l'hydrogène, corps le plus abondant de l'Univers, la vitesse d'agitation est beaucoup plus grande que la vitesse d'évasion de la Lune. Donc il ne peut subsister dans son atmosphère. Les autres gaz abondants sont dans une situation meilleure, mais ne résistent pas aux milliards d'années…

Certaines molécules lourdes pourraient être retenues. Mais celles-ci, non protégées des rayonnements solaires, sont brisées par les rayons ultraviolets très énergétiques, et se décomposent en atomes plus légers, qui ne peuvent être retenus. La conclusion théorique est donc que la Lune, petite et proche du Soleil, ne peut pas retenir une atmosphère conséquente.

Plusieurs observations le confirment :

- nous avons déjà dit que le spectre lunaire est semblable à celui du Soleil ; la Lune n'a pas d'atmosphère pour le modifier ;
- les occultations sont une autre preuve (voir ci-dessous) ;
- la certitude a été donnée par les instruments apportés par les sondes, qui ont fait des mesures directes.

La Lune n'a définitivement pas d'atmosphère.

**Occultations**

Dans son périple autour de la Terre, la Lune balaie un bande dans le ciel ; les étoiles ou les planètes qui se trouvent sur son passage sont cachées pendant un certains temps. On appelle ce phénomène une *occultation*. La Lune est éclairée d'un côté, sombre de l'autre, selon la phase. L'étoile va donc être cachée soit par le côté éclairé, soit par le côté sombre, et réapparaître de l'autre côté. Du côté éclairé, il est difficile de distinguer l'étoile à l'œil nu, à cause de l'éblouissement dû à la Lune.

Avec un télescope, le problème se pose moins. Si la Lune avait une atmosphère, on verrait l'étoile à travers cette atmosphère pendant son approche. Son éclat en serait affecté. On fait l'expérience à l'aide d'un photomètre (cellule photoélectrique très sensible) : la lumière de l'étoile n'est pas affectée, jusqu'à l'instant où elle disparaît brusquement (l'étoile n'a pas de surface sensible, même avec un grand instrument). S'il y avait une atmosphère, la lumière diminuerait progressivement.

**Les montagnes**

Les zones accidentées sont nommées *montagnes*. Leur formation n'est sans doute pas semblable à celle des montagnes terrestres, car il n'y a pas de plaques tectoniques qui se déplacent sur la Lune pour les former. D'autre part, ces montagnes ne présentent aucune vallée, donc il n'y a pas d'érosion, donc pas de rivières.

Un autre argument pour croire à l'absence d'eau, c'est l'absence d'atmosphère : s'il y avait des rivières sur la Lune, leur eau se vaporiserait dans le vide et s'échapperait rapidement, car cette vapeur, chauffée par le Soleil, aurait une vitesse suffisante pour quitter la Lune.

La Lune est petite, elle a une faible masse et donc une faible gravité. Au sol, la pesanteur n'est que le 1/6 de ce qu'elle est sur Terre. Par conséquent, il est beaucoup plus facile de quitter la Lune dans un vaisseau spatial que de quitter la Terre. Si vous vous souvenez des images des vols Apollo, vous voyez bien que le moteur de l'étage de montée du LEM est tout petit par rapport à une fusée destinée à lancer un satellite géostationnaire à partir du sol terrestre (masse équivalente). Les gaz constituant une éventuelle atmosphère peuvent atteindre sans difficulté la vitesse nécessaire pour quitter définitivement la Lune.

**La nature du sol**

On craignait, avant les premières missions, que le sol de la Lune soit entièrement recouvert de poussières, dans lesquelles un engin risquerait de s'enfoncer. On le croyait parce que le sol de la Lune, n'étant pas protégé par une atmosphère, reçoit en permanence les chocs de micrométéorites, arrivant à des vitesses de plusieurs dizaines de milliers de km/h ! Ceci produit une érosion qui s'ajoute à la dégradation thermique dont on a parlé plus haut, et arrache de petits éclats aux roches. En réalité, s'il y a bien de la poussière à la surface de la Lune, elle forme une mince pellicule, le sol est très solide, et permet de poser un engin et de marcher. Comme on l'a déjà vu à propos des mers, on trouve là-bas des basaltes, des roches très semblables aux roches éruptives terrestres. Il ne peut y avoir de roches sédimentaires, ni métamorphiques, puisqu'il ne s'y produit pas d'érosion au sens habituel du terme.

Cette évolution du sol a donné une roche poreuse, couverte de poussières, qui absorbe énormément la lumière. La roche étant de plus de couleur sombre, ceci explique l'albédo très faible de la Lune.

**Composition et âge de la Lune**

Les diverses missions Apollo ont permis de rapporter sur Terre 382 kg d'échantillons de sol lunaire. Ces roches ont pu être analysées en

laboratoire par les méthodes les plus fines, en particulier pour les dater. Le résultat est variable selon le lieu d'où elles proviennent : il existe des terrains très anciens, qui sont contemporains des plus vieilles roches terrestres : 4,5 milliards d'années. Par contre, les mers, qui ont un aspect plus sombre, sont constituées de roches plus récentes, les plus jeunes n'ayant que 2 milliards d'années. Ceci nous éclaire sur la formation des mers : les terrains anciens de la Lune ont été bombardés par des météorites qui tombaient en abondance peu après la formation du système solaire. Ils sont marqués par de nombreux cratères qui se chevauchent. Mais les mers sont peu cratérisées, car elles se sont formées beaucoup plus tard.

On a déterminé une relation entre la densité de cratères et l'âge de la surface où ils se trouvent. Cette relation permet maintenant de dater approximativement la surface de tous les astres que l'on peut observer de près, c'est le cas des astéroïdes Ida et Gaspra : le premier d'entre eux n'a plus été modifié depuis un milliard d'années, alors que la surface du second n'a que 200 millions d'années. Ils n'ont donc pas la même histoire.

D'autre part, de nombreuses sondes ont été satellisées autour de la Lune, et l'analyse de leurs orbites a révélé des surprises : en passant au-dessus des grandes mers, elles subissaient une force plus importante, attestant d'une anomalie dans la répartition des masses dans le sous-sol en cet endroit. Ces masses anormales sont les restes d'astéroïdes importants ayant percuté la Lune, en dégageant énormément d'énergie. Ceci a chauffé les roches, les a fondues ; l'astéroïde s'est enfoncé dans le sol, où il provoque des anomalies gravifiques. Les roches se sont ensuite refroidies, en conservant dans les plus grandes mers les traces de rides concentriques. Les objets enfouis dans les mers ont reçus le joli nom de *mascons*, mot construit d'après l'anglais *Mass Concentration*.

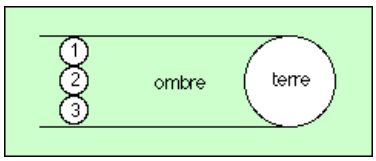
Pour bien comprendre, remplissez une bassine de boue ; jetez-y un aimant ; il s'enfonce et disparaît du regard. La surface de la boue est assez fluide pour qu'après un certain temps, plus aucune trace ne subsiste du choc. Pourtant, vous pouvez détecter l'aimant en déplaçant une épingle au-dessus. Les roches lunaires sont assez fluides après un impact pour se comporter comme la boue, et l'attraction de l'aimant joue un rôle analogue à l'attraction gravitationnelle de la masse de l'astéroïde.

Les missions Apollo ont déposé sur la Lune des sismographes, qui ont enregistré des tremblements de Lune naturels. Mais les étages de remontée des LEM (Lunar Exploration Module), qui ont permis aux deux astronautes de remonter dans la cabine Apollo en orbite, ne servaient plus à rien. En rallumant par télécommande leur moteur, on les a précipités sur la Lune, où ils sont allés s'écraser. Sous le choc, un léger tremblement de Lune a eu lieu, qui a été enregistré par les sismographes. L'analyse des données transmises a montré que le noyau de la Lune est solide, refroidi depuis longtemps. Il n'a pas non plus la même composition que celui de la Terre, et ne contient que peu de fer et de nickel.

**Taille et distance de la Lune**

Méthode d'Aristarque de Samos

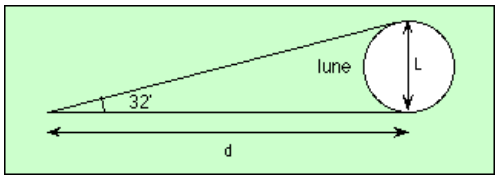
Avec une assez bonne approximation, on peut considérer que les premier et dernier quartiers sont alignés. Il s'ensuit que le soleil est beaucoup plus éloigné que la Lune. On peut donc supposer que l'ombre de la Terre est un cylindre (en réalité c'est un cône, mais son angle au sommet est très faible, et cette approximation est acceptable). En observant la Lune au cours d'une éclipse totale, Aristarque vit qu'elle restait dans l'ombre du Soleil pendant presque deux heures. Or en une heure, elle se déplace de son propre diamètre.




En position 1, la Lune est totalement éclipsée. Au bout d'une heure, elle se trouve en 2, ayant avancé de son propre diamètre. Au bout de 2 heures, elle se trouve en 3, toujours totalement dans l'ombre. Elle en sort alors. Ainsi : la Lune est trois fois plus petite que la terre.
Si L est le diamètre de la Lune, et T celui de la terre : L = 0,3 T.

On voit la Lune sous un angle de 32' à peu près ; on a donc : tg 32' = L / d = 0,3 T / d = 0,0093

d'où d = 0,3 T / 0,00893 = 32 T = 64 R




La valeur correcte est de 60 R. Aristarque avait donc trouvé une excellente approximation. Remarquons que cette mesure est **relative** ! Elle exprime la distance de la Lune par rapport au rayon de la Terre. C'est très souvent en Astronomie qu'on rencontrera ce genre de problème. Il est plus facile d'obtenir des rapports que des valeurs absolues.

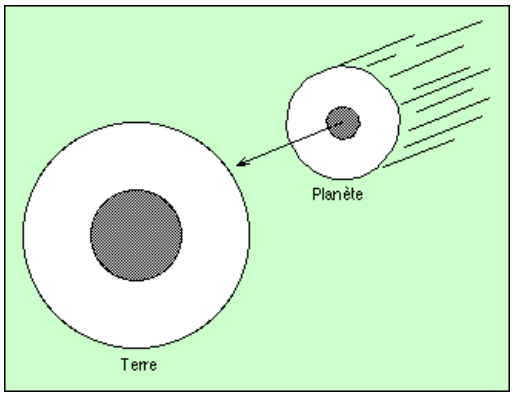
Dans le chapitre relatif à la Terre, nous avons vu comment le diamètre de la Terre avait été mesuré. Reprenant la valeur trouvée alors, 6.680 km on en déduit la distance de la Lune : 6.680 × 64 = 427.000 km (au lieu de 384.000). Les ordres de grandeur sont très corrects.

**Origine de la Lune**

On a recherché si la Lune s'était formée en même temps que la Terre ; ceci n'est pas évident. Trois théories principales ont été avancées :

- la Terre et la Lune se sont formées ensembles, à partir du disque de poussières qui entourait le Soleil juste après sa formation ;
- la Lune s'est formée ailleurs dans le système solaire, puis par le hasard de son orbite, est venue se satelliser autour de la Terre ;
- il y a 4,55 milliards d'années, une autre planète aussi grosse que Mars est venue percuter la Terre, dont elle a vaporisé une partie importante, ainsi que sa propre enveloppe. Le noyau lourd de la planète s'est enfoncé dans la Terre. Les matériaux vaporisés (légers) se sont mis en orbite autour de la Terre, et là se sont agglutinés pour former la Lune.

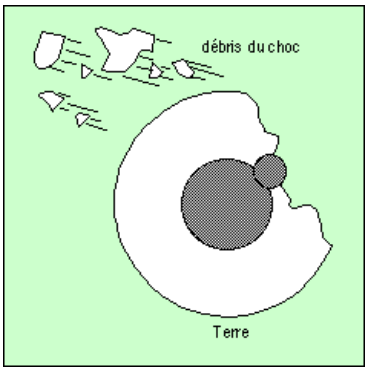
Ces trois hypothèses ont des forces et des faiblesses, et on ne sait toujours pas vraiment laquelle est la bonne. Formées ensembles, Terre et Lune devraient avoir la même composition, ce qui n'est pas le cas (absence de noyau ferreux dans la Lune). Pour se satelliser autour de la Terre, il faudrait que l'orbite de la Lune autour du Soleil soit vraiment très particulière, car sinon elle percuterait celle-ci, ou bien simplement dévierait sa trajectoire et repartirait autour du Soleil.




La troisième hypothèse expliquerait la différence de composition, puisque l'enveloppe de la planète et une partie de la croûte terrestre auraient constitué la Lune, alors que le noyau lourd de l'astéroïde serait incorporé à la Terre (justifiant la différence de densité).

Une planète de la taille de Mars à peu près, s'approche de la Terre peu de temps après leur formation. Les deux planètes sont déjà différenciées : elles possèdent un noyau lourd, un manteau de densité moyenne et une croûte légère.

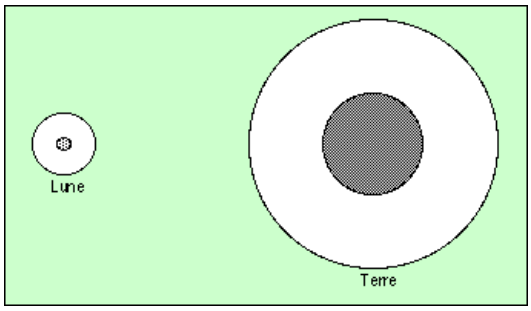
Avec la vitesse, elle possède une énergie suffisante pour volatiliser une partie des enveloppes. Sous le choc, la planète la plus petite est détruite.




Une partie de l'énergie cinétique est transformée en chaleur, et fond la croûte des deux planètes.

Le reste de l'énergie est communiqué aux matériaux arrachés, et les envoie dans l'espace. Le noyau de la planète projectile n'est pas détruit, mais pénètre dans le noyau de la Terre.

Par contre, l'enveloppe légère est expulsée. Les matériaux rejetés dans l'espace sont donc de densité inférieure à la densité moyenne de la Terre, les éléments lourds du noyau ayant été retirés.




Les débris éjectés se sont mis en orbite autour de la Terre, puis par la gravité se sont agglutinés pour former la Lune.

Les missions Apollo ont déposé sur la Lune des équipements scientifiques, comprenant des réflecteurs laser. Ce sont de simples miroirs, qui ne nécessitent aucune source d'énergie et aucun entretien. Leur durée de vie est très longue. Grâce à eux, il est possible de mesurer la distance de la Lune à quelques décimètres près. Pour cela, on envoie un faisceau laser vers l'un des réflecteurs, et on mesure le temps mis par ce signal pour effectuer l'aller-retour entre l'appareil de mesure et le réflecteur.

**Les éclipses**

Les mouvements de la Lune sont très complexes. On doit considérer, comme pour la Terre autour du Soleil, les deux mouvements autour de la Terre, et sur son axe. Le premier ne présente pas de régularité évidente. Cependant, il existe des tables permettant de prévoir exactement où se trouvera la Lune à une date et heure données, avec une très grande précision. Ces tables ont été publiées par Brown au début du XX$^{e}$ siècle, et comptent plus de 1.500 termes… Ce sont, au sens propre, des calculs astronomiques !

Le diamètre apparent du Soleil dépend de l'excentricité de l'orbite de la Terre, qui est faible. Il s'ensuit une variation de 32' à 32' 31" seulement. Par contre, l'orbite lunaire est plus excentrique, et la Lune est soumise à de nombreuses perturbations. Le diamètre apparent de la Lune varie donc bien plus, de 29' 22" à 33' 20". C'est vraiment un hasard si ces deux diamètres apparents sont très proches l'un de l'autre, et autorisent ainsi les éclipses.

Il y a trois révolutions différentes qu'il faut considérer :

- la *révolution sidérale*, qui est le temps d'un tour complet **par rapport aux étoiles** ;
- la *révolution synodique*, ou lunaison, qui est le temps **entre deux nouvelles lunes** consécutives ;
- la *révolution draconitique*, temps entre deux **passages du Soleil au noeud ascendant** de l'orbite lunaire.

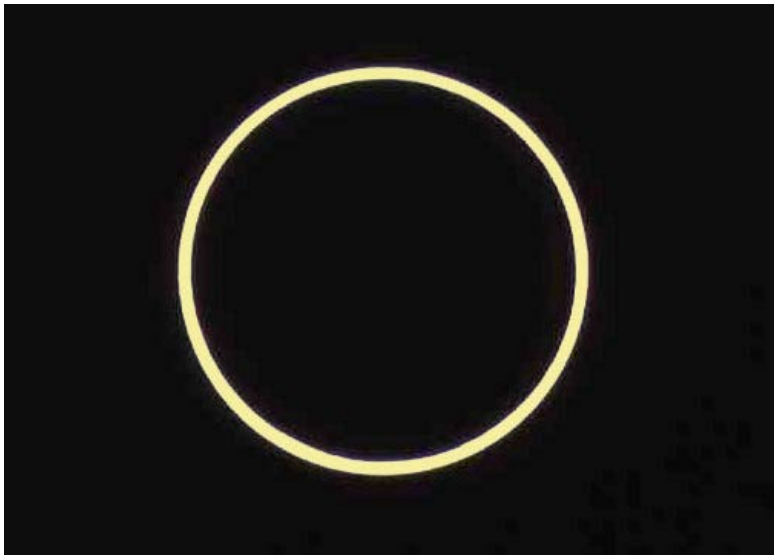
Mais de façon simple, les astronomes grecs dans l'Antiquité ont été capables, à force d'observations patientes, de trouver des périodes qui reproduisent les phases de la Lune : le *Saros* est une période de 18 ans 11 jours et 8 heures qui ramène les phases de la Lune aux mêmes dates et dans le même ordre. C'est ce qui est à la base de notre calendrier dans sa partie lunaire (calcul de la date de Pâques). Le Saros n'étant pas un nombre entier de jours, c'est une autre région de la Terre qui est concernée, et puisque 3 x 8 h = 24 h, c'est décalé d'un tiers de circonférence vers l'ouest. Mais au bout de 3 Saros, les éclipses reviennent à peu près aux mêmes endroits.

Une *éclipse* se produit quand un corps en cache un autre, ou bien lui fait ombre. On observe des éclipses de Lune et des éclipses de Soleil. Les éclipses de Lune se produisent lorsque la Lune passe dans l'ombre de la Terre, les éclipses de Soleil lorsque la Lune passe devant le Soleil. Pour qu'il y ait éclipse, il faut donc que Soleil, Terre et Lune soient alignés. Or on a vu que cela se produit à chaque nouvelle lune ou pleine lune.

Pourquoi alors n'y a-t-il pas d'éclipses deux fois par mois ? Tout simplement parce que l'orbite de la Lune n'étant pas dans le plan de l'écliptique, notre satellite passe en général au-dessus ou au-dessous du Soleil au moment des NL et PL. Il ne peut alors y avoir d'éclipse.

Pour que l'éclipse se produise, il faut que la Lune soit, au moment de la syzygie, dans le plan de l'écliptique, donc à l'intersection du plan de son orbite et de l'écliptique (orbite de la Terre). On appelle cette intersection la *ligne des nœuds*. Il y a donc deux nœuds, par lesquels la Lune passe chaque mois ; celui qui la fait passer du sud de l'écliptique au nord est le *nœud ascendant*, l'autre est le *nœud descendant*.

Pour qu'il y ait éclipse de Soleil, encore faut-il que l'ombre de la Lune atteigne la Terre. Or, par hasard, la diamètre réel du Soleil est 400 fois plus grand que le diamètre réel de la Lune ; mais sa distance est également 400 fois supérieure. Il en résulte que vu de la Terre, Soleil et Lune ont à très peu près le même diamètre apparent ! Par suite, si la Lune vient se placer exactement devant le Soleil, elle le cachera totalement, ce sera une éclipse de Soleil. Mais il faut penser que l'orbite lunaire est elliptique, et donc que notre satellite se rapproche et s'éloigne dans son mouvement. Ce faisant, son diamètre apparent change aussi ; il arrive donc qu'il soit supérieur à celui du Soleil, et l'éclipse est de longue durée ; si la Lune est plus proche, l'éclipse aura lieu aussi, mais sera de plus courte durée ; enfin, si la Lune est près de son éloignement maximum, son diamètre apparent sera inférieur à celui du Soleil, qu'elle ne couvrira pas entièrement : un petit anneau de Soleil restera visible autour de la Lune, on appelle ces phénomènes *éclipses annulaires*.



Eclipse anulaire du 3 octobre 2005, Forna, Espagne photo J. Gispert
télescope Maksutov 10/100

Quand une éclipse totale de Soleil se produit, elle concerne une bande de terrain sur la Terre qui n'excède guère 300 km. En-dehors de cette bande, on peut voir une éclipse partielle, la Lune étant un peu décalée par rapport au Soleil. Plus on s'éloigne de la bande, plus petite est la partie du Soleil cachée ; à une distance suffisante, il n'y a plus d'éclipse du tout.

Les dernières éclipses totales de Lune visibles en Europe onteu lieu les 16 septembre 1997, 21 janvier 2000, et 9 janvier 2001.

Les deux dernières éclipses totales de Soleil visibles en France ont eu lieu le 15 février 1961, entre Marseille et Aix, et le 11 août 1999 entre la Bretagne et l'Alsace. La prochaine aura lieu en 2081 !

**Observation simple**

Nous avons vu ce qu'est un sténopée : un petit trou laissant passer un peu de lumière, capable de former une image. Lorsqu'on se trouve sous un arbre en plein soleil, on peut constater en levant la tête qu'on arrive à voir le Soleil entre les feuilles, par de petits trous qu'elles laissent entre elles. Chacun de ces petits trous est un sténopée, et donc donne sur un écran une image du Soleil. Vous obtiendrez donc des taches bien rondes si vous exposez une feuille de papier en direction du Soleil sous un arbre.

Si vous regardez le sol, à condition qu'il ne soit pas trop irrégulier, vous verrez ces taches, non pas rondes, mais elliptiques, le sol n'étant pas perpendiculaire aux rayons de soleil. On a l'habitude de voir ces taches de soleil sur le sol, sans trop se poser de questions sur leur nature : chacune est une image du soleil.

Pendant une éclipse de soleil, la Lune cache une partie de notre astre. On voit un croisant de soleil. Si vous regardez au sol, vous verrez les taches rondes remplacées par de petits croissants !



Images formées par des sténopées naturels à Forna, Espagne, le 2/10/05 pendant la phase partielle photo J. Gispert

L'image ci-dessus montre l'ombre d'une plante, qui est visible à gauche, projettée sur une feuille de papier. Vous distinguerez parfaitement tous les petits croissants qui constituent autant d'images du soleil en partie éclipsé.

Remarquez de plus que l'ombre des feuilles verticales est floue, alors que celle des feuilles horizontales est nette. Ceci est dû au fait que le Soleil n'étant plus visible que sous un fin croissant, la lumière qui éclaire une feuille verticale provient de tout le croissant, d'une corne à l'autre, alors que celle qui éclaire les feuilles horizontales provient d'une zone beaucoup moins étendue.

**Les marées**

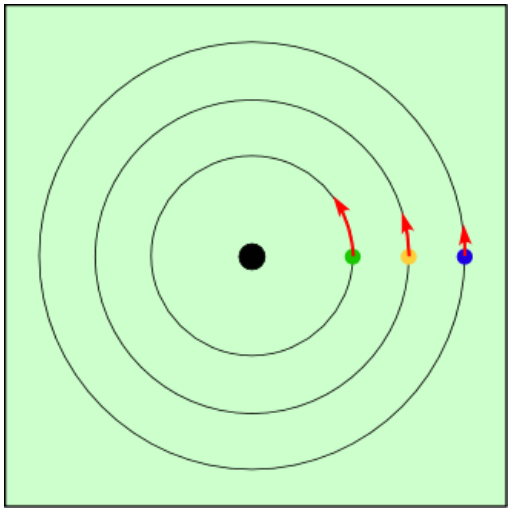
La Lune est responsable des marées sur Terre. Lorsqu'elle passe au-dessus de nous, elle provoque une force d'attraction qui peut soulever les masses d'eau océanique. C'est donc son passage qui fait arriver la marée haute. Lorsqu'elle s'éloigne, la marée redescend. Puisqu'on sait calculer les positions de la Lune, on sait aussi prédire les marées.

Ce qui est moins connu, c'est que la Lune produit aussi des marées terrestres ! Sur son passage, les continents aussi se soulèvent… Bien sûr beaucoup moins, car leur densité est plus forte, et les roches sont moins plastiques que l'eau. Mais à l'échelle d'un continent, elles peuvent tout de même se plier quelque peu, et on montre que le soulèvement atteint 30 cm.

Enfin, vous avez sans doute entendu parler de l'usine marémotrice de la Rance (en Bretagne). Sur l'embouchure d'un petit fleuve côtier, on a installé un barrage muni de portes. Au moment où la marée monte, on ouvre les portes pour laisser l'eau de mer pénétrer à l'intérieur. Au passage, on en profite pour turbiner cette eau et récupérer un peu d'énergie. Mais surtout, on turbine lorsque la mer redescend, en profitant de la différence de niveau entre marée haute et marée basse. D'où vient l'énergie récupérée ? Forcément du mouvement de la Lune autour de la Terre, qui nous a cédé une petite fraction de l'énergie qu'elle possède. Imaginez maintenant des roches en bord de mer ; au moment de la marée montante, la Lune attire l'eau et lui fait franchir cette barrière. A la marée descendante, l'eau repasse par-dessus les rochers, sur lesquels elle frotte. Ce frottement prend de l'énergie au mouvement de la Lune, et contribue à freiner la rotation de la Terre ! Il s'est produit la même chose sur la Lune il y a très longtemps, disons 4 milliards d'années… La Lune était encore assez fluide, et tournait sur elle-même en 20 heures à peu près. La Terre produisait sur elle des marées : ces marées ont petit à petit freiné la rotation de la Lune, qui s'est finalement stabilisée en synchronisant sa rotation sur elle-même et son mouvement autour de la Terre. Ceci nous explique pourquoi elle tourne toujours la même face vers la Terre…

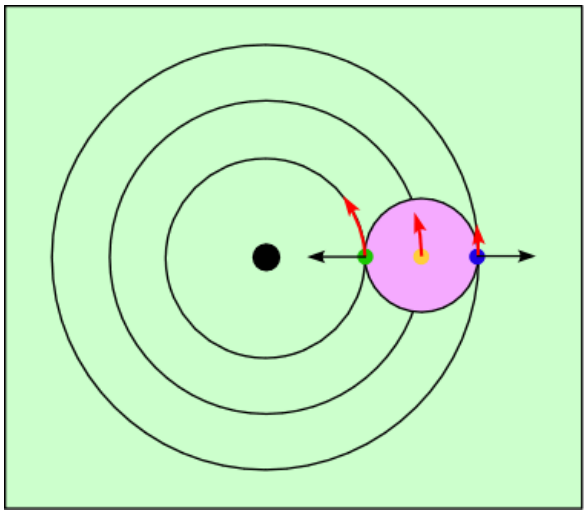
**Explication des marées**

Considérons trois petits satellites tournant autour de leur planète, sur des orbites circulaires proches les unes des autres. On suppose leurs masses assez faibles pour que les perturbations réciproques soient négligeables. Au départ, ils sont alignés :



…mais cette situation évolue rapidement. En effet, le plus proche de la planète subit une gravité plus forte, et doit donc tourner plus vite pour la compenser. A l'opposé, le plus lointain subit une attraction plus faible, et va moins vite.

Si on remplace les trois petits satellites par un gros, le même raisonnement s'applique aux trois points particuliers suivants : le centre, le point le plus proche de la planète, le point le plus éloigné. Mais maintenant, ces points sont liés ! Les forces de cohésion et de gravitation du satellite les maintiennent groupés, et les forcent à tourner à la même vitesse autour de la planète. Naturellement, c'est la vitesse du point central (jaune) qui sera la vitesse de l'ensemble :



Ainsi, le point vert (le plus proche) tournera trop lentement pour être en équilibre, et aura tendance à tomber sur la planète ; ce qui se traduit par une force dirigée vers cette dernière (flèche noire). Cette force sera ressentie par ce point du satellite. L'autre point, le plus éloigné, tournera trop vite, et aura tendance à s'échapper.

L'animation suivante explique tout ceci en mouvement :

On voit les trois petits satellites qui tournent autour de la planète à des vitesses différentes, ils s'éloignent progressivement l'un de l'autre. En cliquant sur le bouton, on fait apparaître trois satellites, bleu, jaune et vert, reliés par un cable… De ce fait, ils sont contraints d'aller à la même vitesse que celui du centre.

Le vert et le bleu tirent sur la corde. La tension de la corde mesure les forces de marées imposées aux points proche et éloigné d'un gros satellite, qui remplacerait les trois petits.

La cohésion des matériaux qui constituent le satellite, et la gravité qu'ils s'imposent réciproquement, joue le rôle de la corde d'attache. Le satellite se déforme alors, et forme **deux bourelets opposés**.

Si les forces de cohésion du satellite sont trop faibles, il se brise sous l'effet des marées. Ceci se produit donc si la force de cohésion de ses matériaux est plus faible que la force de marée. Or la force de cohésion est constante, elle ne dépend que du matériau constitutif du satellite, alors que la force de marée dépend de la masse de la planète et de la distance du satellite. La distance limite en deçà de laquelle un satellite se brise se nomme *limite de Roche*, non parce que le satellite est rocheux, mais parce que ce problème a été résolu par un astronome français qui s'appelait Edouard Roche (1820-1883) !

Hors de la limite de Roche, les marées produisent des frottements entre les matériaux du satellite. Ces frottements se transforment en chaleur, qui est dissipée dans l'espace. D'où vient l'énergie ainsi dissipée ?

La réponse dépend de la situation. Considérons un satellite qui tourne autour de sa planète, dans le même temps que celle-ci tourne sur elle-même. Le bourrelet produit par les forces de marée est toujours au même endroit à la surface de la planète. Il n'y a pas de déplacement du bourrelet, donc pas de frottements, donc pas d'énergie à dissiper.

Considérons maintenant un satellite qui orbite plus loin, donc moins vite. Il est en retard par rapport à la rotation de la planète. Par conséquent,

le bourrelet qu'il produit à la surface de celle-ci se déplace en sens inverse de la rotation. Alors, le satellite prend de l'énergie à la planète, qui donc ralentit sa rotation. Et l'énergie gagnée par la satellite accélère sa vitesse orbitale, et donc l'éloigne de la planète. Donc, si un satellite est plus loin que l'orbite synchrone, il gagne de l'énergie et s'éloigne progressivement de sa planète.

C'est le cas de la Lune qui, actuellement, s'éloigne de 4 cm par an à cause des marées. Elle prend de l'énergie à la Terre qui ralentit doucement sa rotation. Les coraux fossiles témoignent que cette rotation s'effectuait en 10 heures il y a deux milliards d'années.

Enfin, imaginons un satellite qui tourne plus près que l'orbite synchrone. Il crée un bourrelet qui se déplace sur la planète, mais cette fois dans le même sens que la rotation. On montre que dans ce cas, c'est la planète qui gagne de l'énergie, et le satellite qui en perd. Et petit à petit, il se rapproche de la planète, jusqu'à lui tmober dessus. C'est le cas de Deimos, qui tourne autour de Mars en-dessous de l'orbite synchrone. Il est destiné à tomber sur la planète rouge…

C'est le père de Charles Darwin, Georges Darwin, qui a montré que les marées consommaient de l'énergie au dépend des objets sur lesquels elles s'appliquent, et donc modifient leurs mouvements. Il a découvert que les marées produites par la Lune sur la Terre (marées océaniques et continentales) ralentissent la rotation de la Terre, et éloignent la Lune de nous.

**Le sol**

Le sol de la Lune n'étant pas protégé par une atmosphère, subit sans arrêt les agressions de l'espace, bombardement par les météorites et les rayons cosmiques. Les météorites, par l'énergie de leur impact, brisent la roche plus ou moins superficiellement, selon leur taille ; aujourd'hui, il ne reste guère que des micrométéorites. L'action des rayons cosmiques est seulement superficielle, mais certains rayons ont une énergie extrêmement élevée, et sont capables de faire des dégats.

Un autre phénomène altère les roches en profondeur. Il s'agit des chocs thermiques. Pendant la nuit lunaire, qui dure 14 jours, la roche se refroidit dans l'espace. Sa température tombe à -150 . Lorsque le Soleil se lève, la roche reçoit brutalement l'énergie solaire. Sa température monte rapidement jusqu'à +130 . Une roche soumise à une telle élévation de température brutale se dilate très brusquement, ce qui provoque des fractures. A chaque lunaison, la roche est soumise à ce choc thermique, qui petit à petit la fragmente. Au fil des milliards d'années, la roche se tranforme finalement en poussière.

On soupçonnait l'exitence de cette poussière bien avant l'ère spatiale, sans en avoir de preuve. La première sonde qui s'est posée à la surface de la Lune aurait pu s'enfoncer dans cette poussière et y disparaître. Ce ne fut pas le cas, et la preuve fut faite que le sol lunaire avait malgré tout une certaine portance. Les missions Apollo qui se sont posées par la suite en divers endroits de la Lune ont confirmé cette propriété de la surface.

L'inspection télescopique de la Lune ne pouvait nous montrer qu'une seule face, celle que notre satellite tourne perpétuellement vers nous. Il fallut attendre 1959 pour que l'Union Soviétique envoie une sonde, Luna 3, faire le tour de notre satellite. Le système de prise de vue était très élaboré pour l'époque, très complexe techniquement, et a réussi à merveille. Il s'agissait d'un appareil photographique normal argentique (on ne connaissait rien d'autre à l'époque). Le film a été exposé de manière très classique, puis développé par le procédé chimique normal automatisé. L'ensemble de ces opérations, exécuté de l'autre côté de la Lune, constituait déjà un exploit. Mais ce n'était pas fini. Il n'était pas question de récupérer les photos sur Terre. Il fallait les envoyer par radio. Ce fut fait par belinogramme ! Ce procédé était utilisé pour transmettre les photos d'actualité entre les deux rives de l'Atlantique. La photo était enroulée sur un cylindre tournant, devant lequel se déplaçait une cellule photoélectrique. L'intensité lumineuse mesurée était transmise sur Terre, et permettait de reconstituer l'image.

Ce procédé très long et complexe a été maîtrisé par les soviétiques, qui ont ainsi obtenu les premières photos de la face cachée de la Lune.

Ces photos furent surprenantes. Elles montraient un terrain très cratérisé, ce qui était attendu, mais pas trace de mers. Il y a entre les deux faces de la Lune, celle qui nous regarde et l'autre, une disymétrie marquée difficile à expliquer. Il fallut attendre de connaître bien mieux le globe lunaire et ses caractéristiques internes pour avoir une idée de ce qui pourrait justifier une telle différence.

**Les missions lunaires**

Les Russes ont inauguré en fanfare l'ère spatiale, en lançant avec succès, le 4 octobre 1957, le premier satellite artificiel de la Terre, Spoutnik 1. L'engin pesait 57 kg, et émettait un bip-bip caractéristique. Bien sûr, les Russes avaient tout préparé dans le plus grand secret, et le choc de cette nouvelle a été formidable, surtout sur les américains qui eux aussi prévoyaient quelque chose dans ce domaine, et pensaient arriver les premiers !

Ils ont eu toutes les peines du monde pour s'en remettre. Les tentatives qu'ils faisaient se soldaient toutes par de cuisants échecs, pendant que les Russes multipliaient les succès.

Les Américains ont finalement réussi à mettre un satellite sur orbite, une petite sphère de 500 grammes, vite surnommée Pamplemousse… mais ce n'était qu'un début. En 1961, le Président Kenedy a lancé un défi aux Soviétiques : les USA enverraient un homme sur la Lune avant la fin de la décennie, et le ramèneraient… Les Soviétiques se sont lancés dans cette course, mais avec des moyens et des méthodes différents. Il n'y a plus beaucoup de suspens, vous savez que ce sont les Américains qui ont remporté la course à la Lune, avec le premier alunissage (on doit dire maintenant atterrissage sur la Lune) le 10 juillet 1969.

De nombreuses missions automatiques avaient auparavant atteint la Lune, mais aucun engin n'en était revenu. La fusée Saturne V utilisée pour les missions humaines n'avait rien à voir avec l'actuelle navette. Il fallait une certaine dose de courage pour s'asseoir dans la minuscule cabine fixée au sommet de cette énorme bombe. Mais la conquête est à ce prix.

Les missions automatiques et habitées ont permis d'obtenir une très riche moisson scientifique sur notre satellite, sur son âge, sa composition, etc. Les résultats seront donnés plus bas.

Depuis longtemps, il n'y a plus eu de missions vers la Lune. On est passé de l'astronautique passion, de la découverte effrénée, à l'exploitation rationnelle (et commerciale…) de l'espace proche de la Terre. Le commerce n'est pas excitant comme la découverte, mais il a vite faitde prendre le dessus, car il rapporte au lieu de coûter.

Coûter ? L'exploration spatiale est parait-il coûteuse. Mais il faut relativiser les choses : la conquête de la Lune a représenté le prix d'un paquet de cigarettes par Américain et par an… et c'est meilleur pour la santé !

---

**Mers et continents**

Outre la dichotomie entre les deux faces de la Lune, on distingue deux types de sols :

- les continents élevés, brillants, cratérisés ;
- les mers basses, sombres, lisses.

La différence de couleur (d'albédo) entre les continents et les mers traduit une différence de composition. Les roches qui les constituent ne sont donc pas tout à fait les mêmes.

Les mers ont été nommées ainsi par analogie avec la Terre : si on regarde une côte marine, on peut constater que la mer est plus sombre que le continent. C'est cette remarque qui a fait penser que les parties sombres de la Lune étaient des mers.

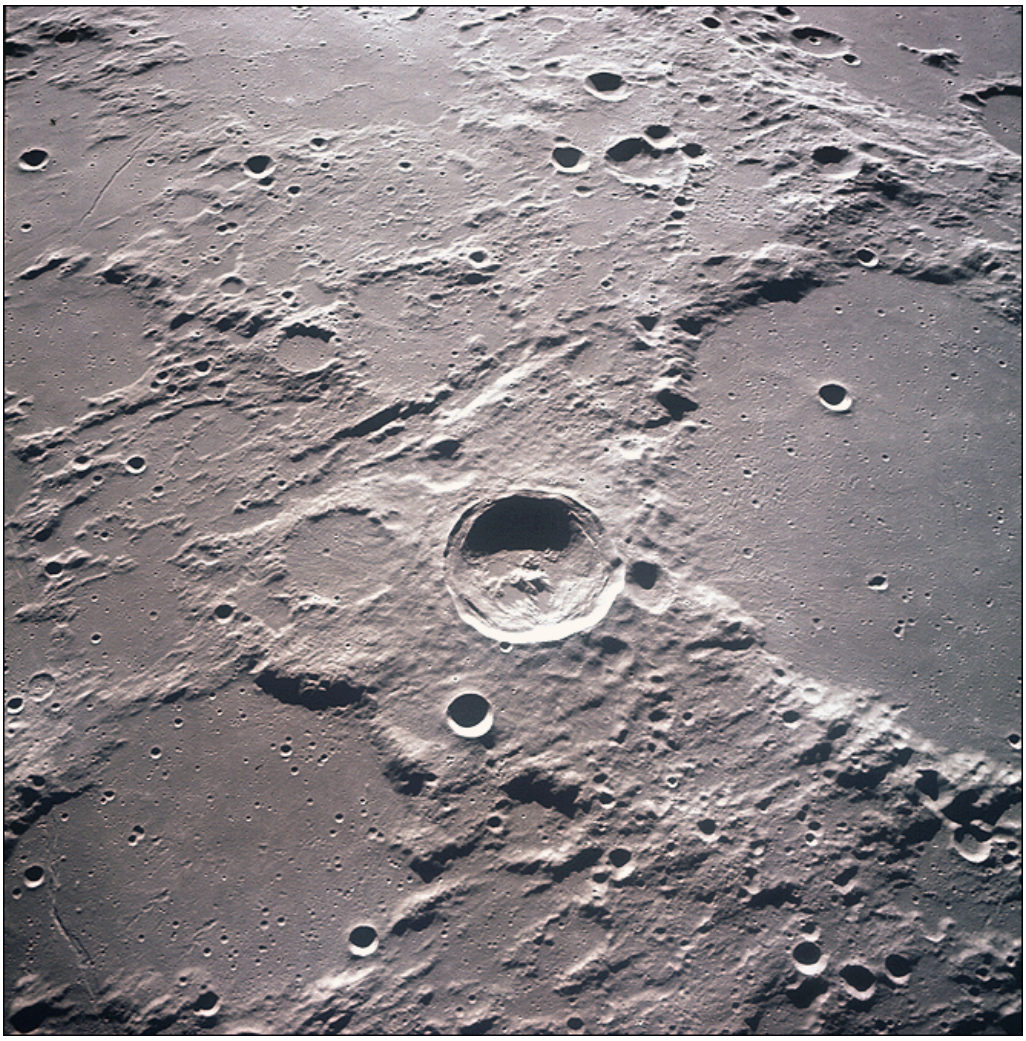
L'altitude plus faible pour les mers est due à une excavation : les mers ont été creusées par des impacts géants, produits par de très grosses météorites. L'énergie dégagée par l'impact chauffe la roche, et arrive à la liquéfier. Il se forme alors un océan de lave, qui prend la forme d'équilibre pour la gravitation, c'est la surface d'un lac. Par la suite, cette lave se refroidit, en conservant la forme d'équilibre. Elle forme donc un fond lisse pour les mers. Par la suite, si l'impact est ancien, d'autre météorites sont venues s'écraser sur le fond, en modifiant la surface. Plus l'impact qui a créé la mer est ancien, plus il restait de météorites dans le ciel, et plus le fond est cratérisé. Le comptage des cratères permet d'avoir une idée de l'âge.

Les plaines sont presque toutes sur la face visible de la Lune. La Lune est un ellipsoïde, dont le grand axe est orienté vers la Terre. Le noyau est étiré en direction de la Terre, ce qui a produit un amincissement de la croûte vers nous. La lave a donc plus de facilité à s'épancher de notre côté, que sur la face cachée où la croûte est beaucoup plus épaisse.

La croûte a une épaisseur de 3.500 m au centre de la Mer de la Sérénité ; de 5.000 m en moyenne dans la Mer des Pluies, avec des poches allant jusqu'à 8.000 m.

**Les mers**

Par spectroscopie, on a déterminé qu'elles sont couvertes de basaltes riches en fer. Leur apparence si plane est due à la très grande fluidité de la lave, qui ne permettait pas la construction d'un cône. La lave s'est épanchée au loin, le refroidissement ayant été lent.



Cratères Herschel et Ptolémée photo NASA Apollo 12, AS12-H-50-7431

Le cratère Herschel est au centre de l'image, prise depuis le module de commande Apollo 12, en orbite autour de la Lune. Son bord est bien marqué, indiquant un âge assez jeune. Il montre un beau piton central, et un rempart en terrasses. Le fond est assez irrégulier. A sa droite se trouve le cratère Ptolémée, bien plus vieux, et aux bords très érodés. On remarque que le fond est bien lisse, mis à part les petits cratères qui le jonchent.

Le cratère à gauche de Herschel est très vieux, si on en juge par l'érosion qu'il a subie, et celui situé en haut au-dessus de Herschel est encore plus vieux. On peut aussi noter des failles, à gauche en haut et en bas.

**Apollo 11**

Le LEM Appollo 11, première mission habitée sur la Lune, s'est posé à l'ouest de la Mer de la Tranquillité. Les roches qui ont été récoltées sont de deux sortes : des laves et des brèches. Les brèches sont des conglomérats de blocs brisés par des impacts météoritiques, soudés par de la la lave produite par l'impact. Les laves sont des basaltes, constitués de 40 % de silicium, 18 % de fer, 12 % de calcium, 10 % d'aluminium, et 10 % d'oxyde de Titane. Ce dernier est beaucoup plus abondant que sur la Terre. Les éléments volatiles, par contre, sont moins abondants que chez nous.

La datation a été faite par analyse isotopique, sur le potassium, l'uranium et le rubidium. Ces matériaux sont radiactifs, avec des périodes suffisament longues pour remonter sur les âges géologiques. Les roches à forte teneur en titane sont datées de 3,7 à 3,8 milliards d'années, les autres sont légèrement plus jeunes, avec seulement 3,6 milliards d'années.

**Apollo 12**

L'atterissage s'est fait au sud de l'Océan des Tempêtes. Le sol est constitué, au moins dans cette partie, de deux coulées différentes, présentant des densités de cratères différentes aussi. La partie la moins cratérisée est donc la plus jeune. Le site d'atterrissage est sur la plus ancienne, datée de 3,3 milliards d'années. L'autre partie est estimée à 2,7 milliards d'années.

Cette grande différence d'âge implique une formation différente aussi : si la coulée principale a été produite par l'impact, les autres sont très postérieures, et donc produites par un autre mécanisme. C'est une preuve de l'existence d'un vrai volcanisme sur la Lune.

La composition des roches est variée : on observe trois sortes de basaltes :

- quartzeux ; cristaux de pyroxène visibles ;
- basaltes à olivine ;
- un échantillon riche en aluminium.

La mission Apollo 12 a déposé sur le sol, sur le site d'atterrissage, une valise d'instruments comportant en particulier un sismomètre. Le but était d'étudier la constitution interne de la Lune, par la même méthode que celle utilisée sur Terre. La réflection des ondes sismiques sur des discontinuités internes, produit des détections successives sur des appareils situés à des distances assez importantes. L'instrument déposé par Appollo 12 était le premier d'une série. Il a permis de déterminer l'épaisseur de la croûte sous le site d'atterrissage : 200 mètres. Ailleurs dans l'Océan des Tempêtes, cette épaisseur s'élève à 1.000 mètres, et va jusqu'à 6.000 m dans les bassins les plus profonds.

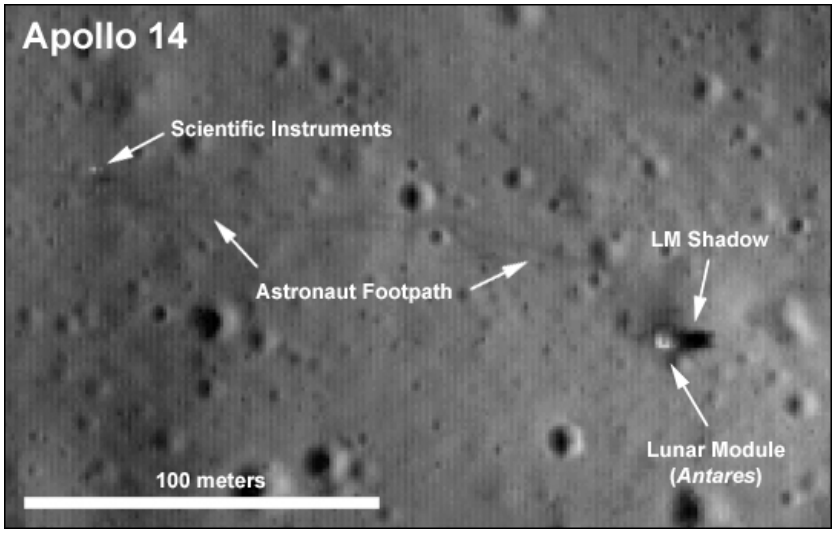
La fluidité de la lave lui a permis de s'épancher très loin, et de boucher la fissure par laquelle elle était sortie. L'éruption s'est faite à grande vitesse.

Ces dépôts sont comparables à ceux de la Terre, aux Indes (Deccan), en Sibérie, et sur la plateau de la rivière Columbia aux Etats-Unis.

**Apollo 14**

Le LEM s'est posé au pied des collines Fra Mauro. Il a montré qu'elles étaient constituées par des empilements de brèches.

La sonde *LRO* (*Lunar Reconnaissance Orbiter*) a photographié, autour du 12 juillet 2009, le site d'atterrissage d'Apollo 14. Cette photo est émouvante, car elle montre une trace de pas sur la Lune :




site d'Apollo 14 photo LRO, Nasa/Goddard Space Flight Center/Arizona State University

On distingue les traces des deux astronautes entre le LEM (à droite) et le site où ils ont déposé l'ALSEP (paquetage d'instruments scientifiques).

Comme disait Hergé, "on a marché sur la Lune…".

**Apollo 15**

Le site se trouve sur le bord est de la Mer des Pluies. Le but était l'étude de la faille Hadley.

Les failles font de 10 à 100 km de long et jusqu'à 3.000 m de largeur. La faille de Hadley mesure justement 100 km de long, 1.200 m de largeur plus ou moins tout le long, et de 300 à 400 m de profondeur. Depuis le bord de la faille, les astronautes ont observé le bord opposé qui montre des strates en relief comme des côtes.

Ils ont ramassé des échantillons sur le haut de la pente. Sur Terre, on trouve des tubes et des failles semblables sur les boucliers basaltiques (Hawai, la Réunion).

Les flots très importants coulent, se refroidissent en surface, ce qui forme un tube. Ce tube reste chaud, bien que solide, et protège l'intérieur du refroidissement. Ainsi, le flot peut aller très loin. La chaleur de la lave fait fondre le plancher du tube, dont la matière se mélange au flot et se trouve emportée. Si une faille se trouve sur le trajet de la lave, elle sera élargie et guidera le flot. C'est ce qui s'est passé à Hadley, le flot a suivi une faille qui ceinture le bassin.

Les asstronautes ont rapporté un roc du socle, daté de 4,5 milliards d'années. C'est de l'anorthosite. L'impact d'Imbrium qui a produit les montagnes de Hadley est daté de 3,85 milliards d'années (d'après les brèches). C'est l'époque de début du volcanisme : du basalte riche en aluminium est monté par les fractures dues à l'impact.

Le flot de la faille de Hadley date de 3,3 à 3,4 milliards d'années. C'est du basalte à pyroxène, et à olivine au sommet des strates. Un échantillon de sol est constitué de goutellettes de verre teintées par des métaux divers. Le magnésium donne une teinte verte. Ceci prouve l'existence passée de fontaines de feu sur la Lune.

**Apollo 16**

Descente dans les Highlands.

Relief agité : terrrain lisse, colines, cratères. Mais pas de trace du volcanisme attendu. Les astronautes ont trouvé seulement des brèches.

**Apollo 17**

Dernière mission, qui s'est posée dans la zone Taurus-Littrow, au bord est de la Mer de la Sérénité. Près du LEM, des roches semblables à celles d'apollo 11 ont été trouvées. Elles contiennent 10 % de titane, et sont âgées de 3,7 milliards d'années.

L'impact qui a creusé la Mer de la Sérénité a produit la chaîne nommée poétiquement South Massif ! Un éboulement sur ses flancs a amené des brèches dans la vallée, échantillonées par H. Schmitt.

**Cratère Shorty**. Ce point mérite une petite digression, car il est représentatif. H. Schmitt a découvert, du premier coup d'œil, un terrain volcanique oxydé (sol orange). Il a rapidement échantillonné ce sol, car les réserves en oxygène ne lui permettaient pas de faire mieux… Ils n'avaient qu'une demi-heure à passer sur ce site.

> Cette anecdote montre les différences entre l'exploration humaine et robotique. Si un robot ne peut pas rivaliser avec l'expertise d'un spécialiste, il a tout son temps pour explorer le site en détail, et il coûte infiniment moins cher !
>
> Le robot est beaucoup plus léger, car :
>
> - son alimentation se trouve sur place jusqu'à Jupiter (énergie solaire), nucléaire au-delà.
> - Il n'a pas besoin d'eau ni d'oxygène ;
> - la plupart de ses équippements ne nécessitent pas de protection contre le vide ;
> - il n'a pas besoin de la protection thermique, radiologique, et mécanique d'un scaphandre.
> - Enfin, on accepte facilement de l'abandonner sur place à la fin de la mission !
>
> Ce dernier point est capital, car pour ramener un homme sur Terre, il faut acheminer sur la planète une fusée de retour, avec son carburant. A titre d'exemple, la cabine Apollo qui a ramené les trois astronautes de la Lune, pesait 3 tonnes. Or elle avait été lancée par une fusée de 3.000 tonnes. Rapport de masse : 1.000.
>
> Si on abandonne une tonne de robot laissée sur la Lune, on économise 1.000 tonnes de fusée… Ce raisonnement est approximatif, mais indicatif. L'exploration robotisée des planètes permet, à coût égal, d'envoyer beeaucoup plus de sondes, qui exploreront donc de bien plus nombreux sites, et pendant un temps bien plus long. L'envoi d'hommes sur Mars ne présente donc pas beaucoup d'intérêt scientifique, des robots permettraient de faire aussi bien, et même plutôt mieux…
>
> A titre de comparaison, les deux robots MER (Spirit et Opportunity) ont été envoyés sur Mars à l'aide d'une fusée Delta IIS de 285 tonnes, pour une charge utile de 1 tonne. Le rapport de masse n'est "que" de 285, bien que Mars soit bien plus loin que la Lune !.

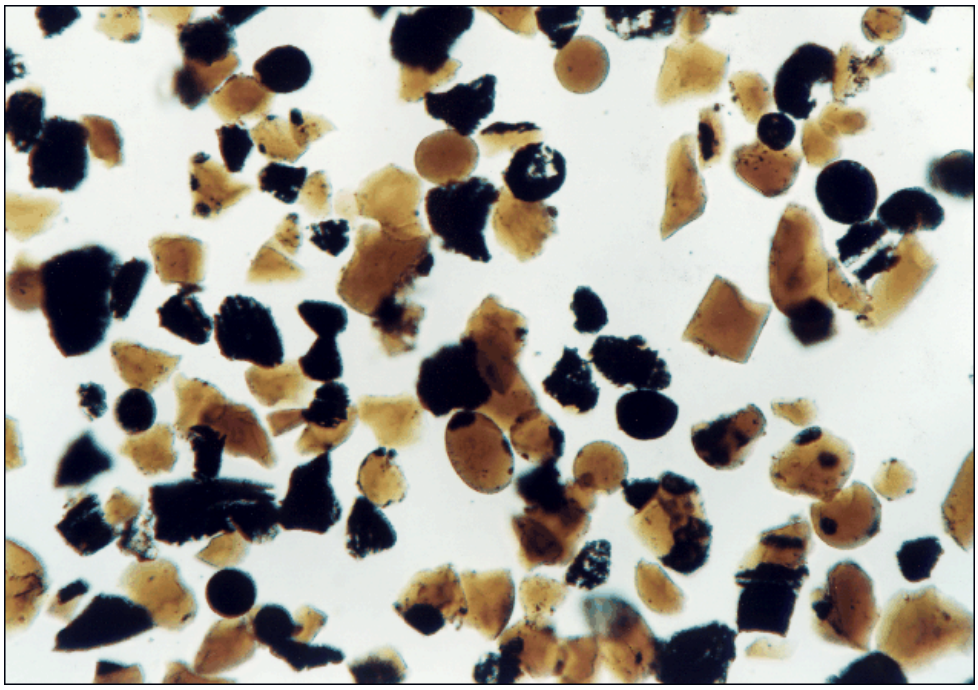
Le sol orange présente une base très nette : il s'est déposé brutalement sur un sol lisse.



Mission Apollo 17, Taurus-Littrow

Cette photo montre le sol orange découvert par Harisson Schmitt sur les pentes du cratère Shorty.

cliché NASA



Le sol orange est composé de goutelettes de verre, de la taille d'une tête d'épingle. Sa composition est basaltique, et il contient du titane.

Ces goutelettes se forment dans des fontaines de lave.

L'âge des verres est de 3,6 milliards d'années. Le problème est que les laves environnantes, celles qui les avaient recouvertes, sont âgées de 3,7 milliards d'années. Mais on peut déterminer un autre âge pour les verres : l'analyse de leur surface, et des modifications qu'elle a subi par les rayons cosmiques, montre qu'ils ne sont exposés que depuis 19 millions d'années. On en déduit alors un scénario possible : une fontaine de lave a déposé les goutelettes de verre sur une coulée alors âgée de 100 millions d'années, puis, rapidement, une autre coulée les a recouverts. Les verres sont restés ainsi protégés des rayons cosmiques. Enfin, récemment (il y a 19 millions d'années), un impact proche les a découverts.

Les roches lunaires sont essentiellement des basaltes, âgés de 3,2 à 3,8 milliards d'années. Les roches non basaltiques sont des brèches un peu plus vieilles.

Les basaltes lunaires sont pauvres en silice, et riches en fer, calcium et magnésium. Certains sont particulièrement riches en titane. Les basaltes sont des assemblages de critaux de feldspath et de pyroxène.

La Terre contient quelques 2.000 espèces minérales ; la Lune une centaine seulement. Précisons que 90 % des roches terrestres sont hydratées, et ne peuvent donc exister sur la Lune. Par contre, le milieu lunaire étant réducteur (celui de la Terre est oxydant), des espèces inconnues ici ont été découvertes. L'une d'elles est nommée *armalcolite*. L'alcool n'a rien à voir dans ce nom bizarre. Mais l'explication est pourtant simple : le minéral a été découvert dans un échantillon rapporté par l'équipe d'Apollo 11, **Arm**(strong), **Al**(drin) et **Col**(lins) ! C'est un oxyde de titane avec du fer et du magnésium.

Les basaltes lunaires sont très pauvres en sodium et potassium (éléments à point de fusion bas) et riches en titane (à point de fusion élevé). La teneur en titane varie de 2 à 12 %. Les basaltes les moins riches en titane semblent provenir de zones plus profondes du manteau lunaire.

On ne trouve pas sur la Lune d'andésites, de trachytes, ni de rhyolithes, roches ignées formées en présence d'eau.

Les plaines de lave recouvrent à peu près 17 % de la surface lunaire. 3 % supplémentaires sont des mélanges de laves et de terrains sous-jacents, produits par les impacts.

**Séismologie**

Les missions Apollo ont déposé des sismomètres sur la Lune. L'étude sismique permettrait de déterminer la structure profonde de notre satellite. Mais les tremblements de Lune sont rares, et de faible intensité. L'énergie qu'ils dissipent est cent milliards de fois plus faible que sur Terre !

Les épicentres sont situés en profondeur, entre 700 et 1.200 km.

**Les cratères**

Les cratères lunaires sont des cratères d'impact. Une longue discussion entre les astronomes n'a pas pu être tranchée, tant qu'on ne pouvait avoir des images de très bonne qualité et à courte distance. Vus de loin, les cratères pouvaient parfaitement être produits par des impacts ou par des volcans.

On trouve des cratères de toutes tailles. Les plus grands forment une transition avec les bassins d'impact. Sur la face visiblek, on observe les cratères Bally (284 km), Clavius (225), Maginus (163), Ptolémée (153), Babbage (143), 1bel (122)… sur la face cachée il y a l'immense cratère Apollo de 537 km de diamètre, Hertzsprung (591), Korolev (437), Lorentz (365)…

Les impacts les plus violents ont mélangé les matériaux superficiels et profonds.

On distingue des terrains d'âges divers, auxquels on a donné des noms analogues à ceux des ères géologiques sur Terre :

| système | âge | description |
|---|---|---|
| *copernicien* | aujourd'hui à 1 Ga | Copernic est un cratère jeune avec rayons. Il est entouré de petits cratères allongés |
| *eratosthénien* | 1 à 3,2 Ga | cratères sans rayons plus ancien ; Eratosthène |
| *imbrien* | 3,2 à 3,9 Ga | le bassin Imbrium en partie recouvert par la mer des Pluies ; âge de formation de la mer des Puies et de la mer Orientale |
| *nectarien* | 3,9 à 4,1 Ga | formation de la mer du Nectar ; forte cratérisation ; 4 fois plus cratérisée que l'imbrien, donc plus ancien |
| *pré-nectarien* | 4,1 à 4,6 Ga | formation de la Lune |

Ga signifie Giga années, soit milliards d'années.

La vallée des Alpes a été creusée par une météorite qui a rasé la Lune.

**La face cachée**

La face cachée est très différente de celle que nous connaissons bien. La sonde soviétique Luna 3 a pris la première photo, qui nous a montré une absence de mers. On voit de très nombreux cratères, de grands bassins d'impact, mais par d'épanchement de basalte.

Elle présente un énorme bassin ancien, plus vieux que les mers du côté visible (âge déduit de sa couleur). Les mers sont recouvertes de basaltes d'âges compris entre 3,8 et 3,3 milliards d'années. Les échantillons lunaires montrent dans tous les sites des formations vitreuses semblables à celles produites par les volcans Hawaïens.

**Noms des structures**

L'observation de la Lune ayant été faite un peu partout dès l'invention de la lunette, on a donné dans chaque pays des noms dans la langue locale. On trouve (et on utilise) les noms des mers en français par exemple. Les relations entre astronomes de tous les pays ayant été importantes, l'uniformisation s'est faite dès le début, mais chacun conservant sa langue. Alors, pour arriver à des noms universels, on a choisi (selon un usage bien établi en science) de donner des noms latins.

La nomenclature lunaire commence au XVII$^{e}$ siècle, par l'établissement des premières cartes. En 1645, Langrenus nomma les cratères, en leur donnant des noms de personnages illustres, et en les classant par ordre chronologique du nord au sud : les cratères du nord ont ainsi des noms de personnages de l'Antiquité. Les cratères ainsi nommés sont évidemment les plus gros, et les plus petits ont reçu des noms bien après.

Peu après, Hévélius a nommé *mer* les étendues les plus sombres de la Lune. Il leur a attribué des noms en fonction de l'influence que la Lune avait, prétendait-on, sur le climat de la Terre.

Puis Giovanni Riccioli, théologien et astronome italien, reprenant les deux travaux antérieurs, a donné la plupart des noms que nous utilisons encore. Il a dessiné une carte, et défini une méthode de construction des noms : noms symboliques, nom copiés sur la géologie terrestre (en particulier pour les montagnes), noms de personnes illustres.

Autour de 1800, Schröter a travaillé sur le sujet, en ajoutant une soixantaine de noms. En 1837, Beer et Mädler ont dessiné une carte regroupant le tout, plus 145 noms choisis par Mädler, et concernant des navigateurs. Enfin, ils se sont intéressés à de plus petites formations, attribuant aux petits cratères des lettres latines majuscules, et aux collines des lettres grecques minuscules.

La nomenclature lunaire définitive a été fixée par l'Union Astronomique Internationale en 1935. Tout ceci ne concernait bien sûr que la face visible. C'est dans les années soixante que l'UAI a commencé à nommer les formations de la face cachée.

Puis l'établissement de cartes bien plus précises, grâce à la photographie en orbite lunaire, a incité à donner des noms à de bien plus petites formations. Ainsi, la nomenclature par lettres latines ou grecques était évacuée. Mais plus tard, l'UAI est revenue sur cette décision, et l'on doit maintenant désigner ces formations avec le nouveau nom, suivi de l'ancienne désignation entre parenthèses). Comme on le voit, il n'est pas toujours facile de se mettre tous d'accord sur la façon de parler…

Voici une liste non exhaustive des principales formations lunaires, donnant la concordance entre les noms latins et français :

| | | | |
|---|---|---|---|
| *Lacus Somniorum* | Lac des songes | *Mare Serenitatis* | Mer de la Sérénité |
| *Lacus Temporis* | Lac du temps | *Mare Smythii* | Mer de Smyth |
| *Mare Australe* | Mer Australe | *Mare Spumans* | Mer Ecumante |
| *Mare Cognitum* | Mer de la Connaissance | *Mare Tranquilitatis* | Mer de la Tranquillité |
| *Mare Crisium* | Mer des Crises | *Mare Undarum* | Mer des Ondes |
| *Mare Fecunditatis* | Mer de la Fécondité | *Mare Vaporum* | Mer des Vapeurs |
| *Mare Frigoris* | Mer du Froid | *Oceanus Procellarum* | Océan des Tempêtes |
| *Mare Humboldtianum* | Mer de Humboldt | *Palus Epidemiarum* | Marais des épidémies |
| *Mare Humorum* | Mer des Humeurs | *Palus Somni* | Marais du sommeil |
| *Mare Imbrium* | Mer des Pluies | *Sinus Aestuum* | Golfe torride |
| *Mare Insularum* | Mer des Iles | *Sinus Iridum* | Golfe des iris |
| *Mare Marginalis* | Mer Mariginale | *Sinus Medii* | Golfe du centre |
| *Mare Nectaris* | Mer du Nectar | *Sinus Roris* | Golfe de la rosée |
| *Mare Nubium* | Mer des Nuées | | |

**Influence de la Lune**

La Lune a, paraît-il, énormément d'influence sur la Terre, le climat, la végétation, les Hommes… D'où vient cette influence ?

Deux possibilités s'offrent à nous selon qu'on s'appuie sur la physique connue, ou qu'on s'adresse à des phénomènes mystérieux.

En considérant les lois de la Nature connues, au mieux rien n'est prouvé, au pire il a été démontré que l'influence n'existait pas. Les études faites considèrent les divers paramètres en jeu (ignorés par le *bon sens* populaire, tel l'état de notre atmosphère par exemple), et ne trouve aucune corrélation entre la phase de la Lune et tel phénomène considéré.

La Lune rousse présente un intérêt particulier, car il y a un véritable lien statistique entre elle et le gel des cultures. Il s'agit d'une lunaison de printemps, qui se produit au moment où l'atmosphère commence à se réchauffer. Cette élévation de température entraîne une modification de l'hygrométrie, et donc de l'état physique de l'atmosphère. Cet état particulier (hygrométrie et température), produit à la fois un filtrage de la lumière lunaire qui apparaît rousse par diffusion du bleu, et le dépôt de givre sur les plantes. La même cause atmosphérique produit à la fois la couleur apparente de la Lune et le gel qui lui est attribué à tort. Mais si pendant ce temps-là on observe la Lune au-dessus de l'atmosphère, à l'aide d'un télescope spatial, on la verra inchangée…

Voilà un bel exemple de croyance populaire, totalement fausse, qui a la vie dure ! Elle possède une base statistique exacte, alors que l'interprétation qu'elle en donne est totalement fausse, parce qu'elle se fie aux apparences en l'absence de raisonnement. Il y a une cause commune entre l'apparence rousse de la Lune et le gel des plantes, ce qui explique la corrélation statistique, mais la cuase N'EST PAS la Lune !

Bien d'autres influences attribuées à la Lune ne présentent pas une telle correlation, et des statistiques correctes suffisent à les éliminer.

Le blanchissement du linge étendu sur l'herbe à la pleine lune a reçu aussi une explication : le sol dégage, par nuit claire, un peu d'amoniac, qui possède un pouvoir blanchissant. La Lune n'y est pour rien… On pourrait faire blanchir le linge en l'étendant par une nuit claire et sans lune, mais on n'y voit moins…

Dès qu'on considère des phénomènes biologiques, le nombre de paramètres est tel que la croyance populaire est totalement désarmée pour les maîtriser. Il suffit de penser aux moyens utilisés par les médecins pour comprendre les causes de certaines maladies pour mesurer la difficulté du problème.

Toutefois, nier toute influence de la Lune serait sans doute exagéré. Nous renvoyant la lumière du Soleil, elle nous permet de nous déplacer dans la nuit (au moins avant l'invention de l'éclairage). Elle est à la base de nos calendriers (le mois correspond peu que peu avec la durée de la lunaison). Une convergence de durée entre la lunaison et le cycle féminin ne semble pas fortuite, mais pourrait très bien être liée à l'éclairement nocturne variable.

Pour conclure sur ce point, la Lune peut nous influencer par le reflet de la lumière solaire qu'elle nous renvoie, et par sa gravité qui produit les marées. Considérer une autre force mystérieuse qui ne s'appliquerait qu'à elle n'est sans doute pas nécessaire…

> «…Restait en dernier lieu la classe superstitieuse des ignorants ; ceux-là ne se contentent pas d'ignorer, ils savent ce qui n'est pas, et à propos de la Lune ils en savaient long…»
>
> De la Terre à la Lune, chapitre VI

Jules Verne

---=OO=---




## Carte d'identité

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| diamètre | **6.794 km** | | demi grand-axe | **227,937 $10^6$ km** |
| | **0,5326 Terre** | | | **1,5236 UA** |
| diamètre angulaire max | 25,6" | | excentricité | **0,0934** |
| aplatissement | **0,006476** | | inclinaison de l'orbite | **1,85°** |
| période de rotation | **24 h 37 mn 22,6 s** | | année sidérale | **1 an 321 j 16 h 19 mn** |
| inclinaison axe de rotation | **25,19°** | | vitesse orbitale | **24,1309 km/s** |
| masse | **0,6419 $10^{24}$ kg** | | révolution synodique | **779,9361 j** |
| | **0,1074 Terre** | | jour solaire moyen | 24 h 39 mn 35 s |
| masse volumique | **3,94 g/$cm^3$** | | sens | rétrograde |
| | **0,6745** | | pression au sol | **0,007 - 0,010** |
| pesanteur | **3,71 m/s/s** | | température min | -120° |
| | **0,3786 Terre** | | température max | +10° |
| vitesse de libération | **5,02 km/s** | | albédo | **0,150** |
| nombre de satellites | 2 | | composition atmos. | $CO_2$, $N_2$, Ar, $O_2$, CO |

Les éléments en gras sont tirés du livre *Allen's astrophysical quantities*, quatrième édition

Carte intéractive de Mars réduite pour un écran 800 × 600, ou originale pour un écran de meilleure définition.

### Plan


- Mars express
- Géographie
- Cartes
- Cratères d'impact et hauts plateaux
- Volcans
- Valles Marineris
- Plaines du nord
- Calottes polaires
- Géologie
- L'atmosphère
- L'eau
- Les satellites
- La vie ?
- Comparaison


#### Mars *express*

Quatrième planète à partir du Soleil, dernière planète tellurique, Mars est bien plus petite que la Terre. Moitié du diamètre, 1/8$^e$ du volume de la Terre, sa densité inférieure (4 au lieu de 5,5) lui confère 1/10$^e$ seulement de la masse de la Terre. Du coup, la pesanteur n'est que le tiers de celle de la Terre. Ce fait sera important le jour où l'on voudra revenir vers la Terre. Le décollage de Mars sera bien plus facile, avec une fusée beaucoup plus petite que pour s'arracher à la Terre.

On peut continuer ce tour d'horizon par une analyse des données du tableau ci-dessus. Ceci permet de mettre en évidence les rapports qu'elles ont entre elles, et de comprendre certains aspects de la planète. Cette analyse est présentée ici pour Mars, mais elle peut être faite pour toutes les autres planètes.

Mars possède une atmosphère très légère, constituée essentiellement de gaz carbonique. Nous verrons que, malgré une pression au sol 100 fois plus faible que sur Terre, elle produit des phénomènes très importants (tempêtes de poussières), et une érosion éolienne.

L'étude de la géologie martienne est maintenant possible, grâce aux nombreuses sondes en orbite ou posées sur le sol. Les plus puissantes de ces dernières sont les rovers *MER* (***M**ars **E**xploration **R**over*) de la NASA, qui ont parcouru plusieurs kilomètres à la surface de la planète, permettant pour la première fois d'aller voir une roche aperçue sur une photo, et jugée intéressante. Ces engins ont montré qu'il y a eu de l'eau sur Mars, en observant des roches apparement sédimentaires.

Le dernier robot en date est *Curiosity*, qui s'est posé en août 2012. Il est bien mieux équippé d'instruments d'analyse des roches.

La sonde européenne *Mars Express*, de son côté, est restée en orbite, et nous a d'abord donné de nombreuses photos du sol, à une définition encore jamais obtenue. Ensuite, la sonde a déployé un radar capable de sonder les profondeurs du sol. Les premiers résultats ont prouvé l'existence d'eau, probablement sous forme de glace (pergélisol).

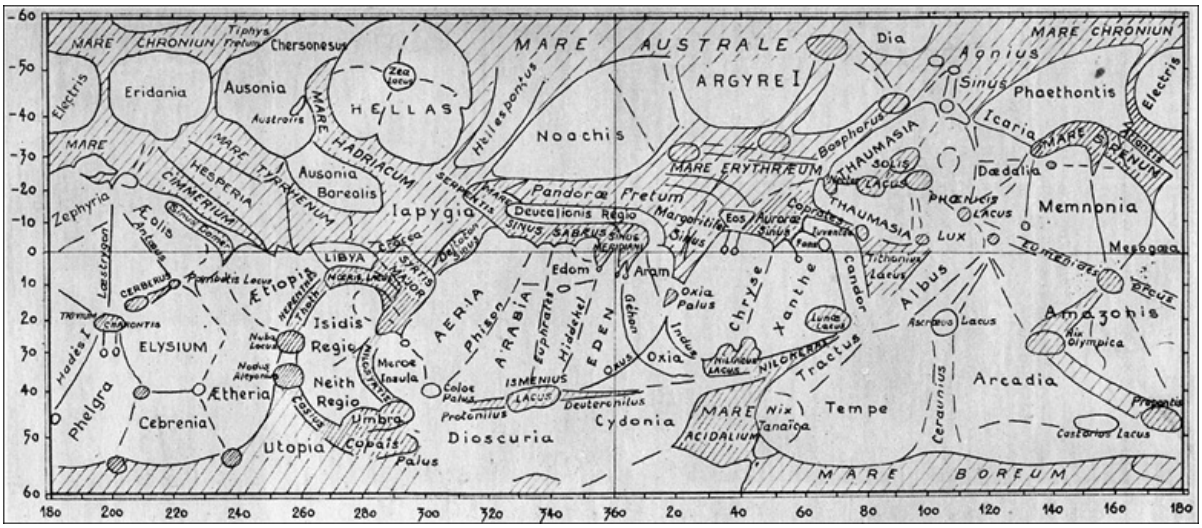
Le passé de Mars commence donc à apparaître au travers de la diversité des résultats obtenus. Il est évident que la pression atmosphérique a été plus élevée, que de l'eau liquide a coulé à la surface, parfois en abondance. Des flots de débacle (brefs et très violents), ont laissé de nombreuses traces. Il est probable qu'il y ait eu au moins des lacs, peut-être même des mers, mais les études doivent encore se poursuivre.

Géologiquement, les points essentiels sont les suivants :

- **dichotomie nord-sud** : l'hémisphère sud est constitué de hauts plateaux, très cratérisés (anciens), alors que le nord est une vaste plaine bien plus récente. La différence d'altitude entre les deux est de l'ordre de 5 kilomètres. Bien évidemment, lorsqu'il y avait de l'eau, elle a coulé du sud vers le nord. Cette dichotomie n'a pas d'explication à l'heure actuelle.
- **présence de grands volcans**. On trouve les plus grands volcans du système solaire, à côté desquels ceux de la Terre font figure de modèles réduits. Leur présence s'explique par les propriétés de la croûte martienne, comparée à celle de la Terre.
- **canyons immenses**. Le complexe de Valles Marineris est un immense canyon, le plus grand du système solaire, situé sur l'équateur de la planète, qui fait pâlir le canyon du Colorado.

## *Géographie martienne*

L'étude géographique et géologique de Mars est toute récente, car les meilleurs télescopes terrestres ne peuvent dévoiler la nature des taches colorées qu'ils montrent. On nomme maintenant ces taches *figures d'albedo*, pour indiquer qu'elles ne représentent pas la nature des terrains, mais parfois des associations de couleurs fortuites. On les voit sur les photos anciennes, ou même récentes mais prises depuis la Terre.



Figures d'albedo de Mars. Le sud est en haut.Extrait de Astronomie, Larousse, 1948

Remarquez *Nix Olympica* tout à droite de la carte, dont on tirera le nom d'un volcan. Les noms en gros caratères sont relativement conservés, car ils correspondent à de grandes structures, en général des plaines. Ainsi, *Hellas* et *Argyre* sont devenus *Hellas Planitia* et *Argyre Planitia*. *Noachis* est maintenant *Noachis Terra*. Certains noms ont totalement disparu ; ainsi, *l'Eden*, qui se trouve au centre de la carte, n'est sans doute plus de mise sur une planète désertique et froide…

Cette carte est indicative de ce que l'on pouvait faire à l'époque, mais n'en est pas représentative ! Pratiquement, chaque observateur réalisait sa propre carte, avec les noms qui lui convenaient  Beer et Mädler, puis Proctor, Giovanni Schiaparelli, et enfin Flammarion, se sont affrontés dans ce domaine.

L'excentricité de l'orbite provoque une grande variation de la distance de Mars à la Terre. Au périhélie, Mars est à 207,3 millions de km du Soleil, et à 249,8 millions de km à l'aphélie, soit une variation totale de plus de 42 millions de kilomètres. Lorsque les deux planètes sont les plus proches, au moment de l'opposition, leur distance dépend donc de la position de Mars sur son orbite (pratiquement pas de la position de la Terre, puisque l'orbite de celle-ci est pratiquement un cercle). Si Mars est à l'aphélie, au plus loin du Soleil, elle se trouve aussi loin de la Terre. Par contre, lors d'une opposition périhélique, la distance descend jusqu'à 56 millions de km. Ce fut le cas lors de l'oppostition du 27 août 2003. Ces oppositions très favorables ne se reproduisent qu'à de très grands intervalles de temps. La dernière datait de 70.000 ans…



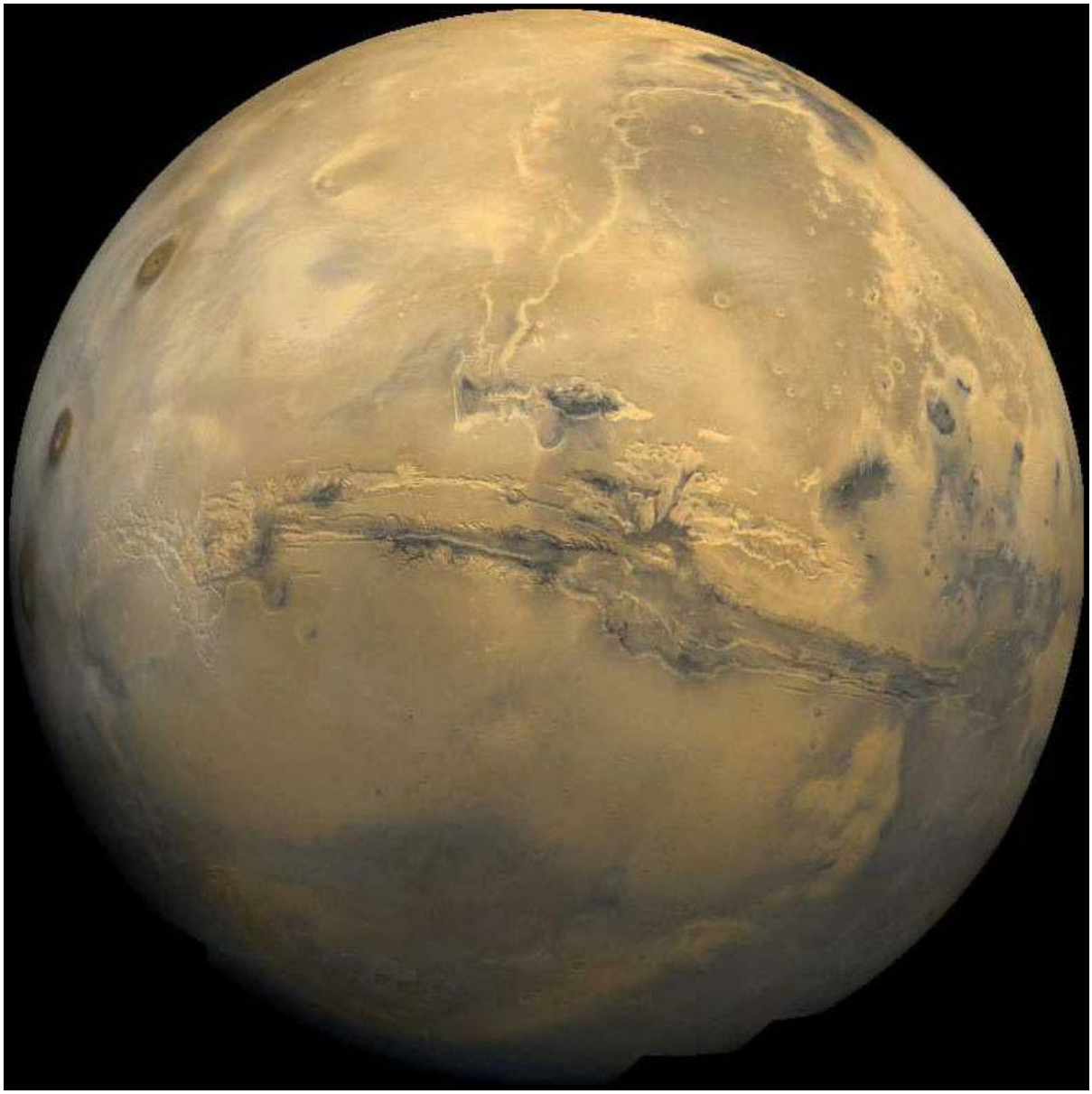
Opposition 27/08/03 photo S. Lisciandra

Photo prise au foyer d'un télescope de 260 mm de diamètre, à l'aide d'une caméra CCD. Il s'agit en fait de 15 clichés successifs, pris au 250$^{e}$, traités par masque flou, et additionnés. La CCD permet de capturer une image planétaire en une petite fraction de seconde, temps pendant lequel la turbulence atmosphérique n'altère pas vraiment les images. Les 15 clichés sont donc assez bons. Ensuite, un défaut produit par l'atmosphère, étant aléatoire, ne peut pas se produire identique sur plusieurs clichés. En moyennant les clichés, son importance relative est très fortement diminuée, puisqu'il ne se trouve que sur un quinzième des images. Enfin, le masque flou permet de diminuer encore l'importance relative des défauts.

Sur l'image, on distingue parfaitement la calotte polaire sud, et on voit des couleurs différentes traduisant grossièrement le relief de la planète. Ces dessins colorés sont les figures d'albedo. Il n'a pas été possible d'y voir les structures même les plus importantes de la planète. L'une des difficultés de la nomenclature martienne moderne à été de faire correspondre approximativement les figures d'albedo anciennes aux récentes photos.

Sur les anciennes photos, et dans les observations visuelles, on distinguait parfois une tache blanche, selon la saison, mais toujours au même endroit. La constance de la position a indiqué une liaison avec le sol, montrant qu'il s'agissait d'une struture géologique, une montagne. Et puisqu'en hiver elle était blanche, et perdait cette couleur en été, il était naturel de penser qu'on voyait le sommet couvert de neige d'une haute montagne. Cette explication, vrai et fausse à la fois, a valu à cette région de Mars le nom de *Nix Olympica* (les neiges de l'Olympe, visible sur la carte ci-dessus à droite). L'explication était vraie, car il s'agit bien d'une haute montagne, mais fausse en ce sens qu'elle ne se couvre pas de neige l'hiver, il n'y a pas assez d'eau dans l'atmosphère martienne pour cela. La coloration était due en fait à des nuages d'altitude qui s'accrochent au sommet à la mauvaise saison. Nous verrons que le nom a été légèrement transformé pour assurer une liaison entre les connaissances anciennes et les récentes.

Il a fallu donc attendre les sondes spatiales, qui sont allé faire des photos sur place, pour avoir la clé des mystères de Mars, et découvrir brutalement les caractéristiques essentielles de la planète :



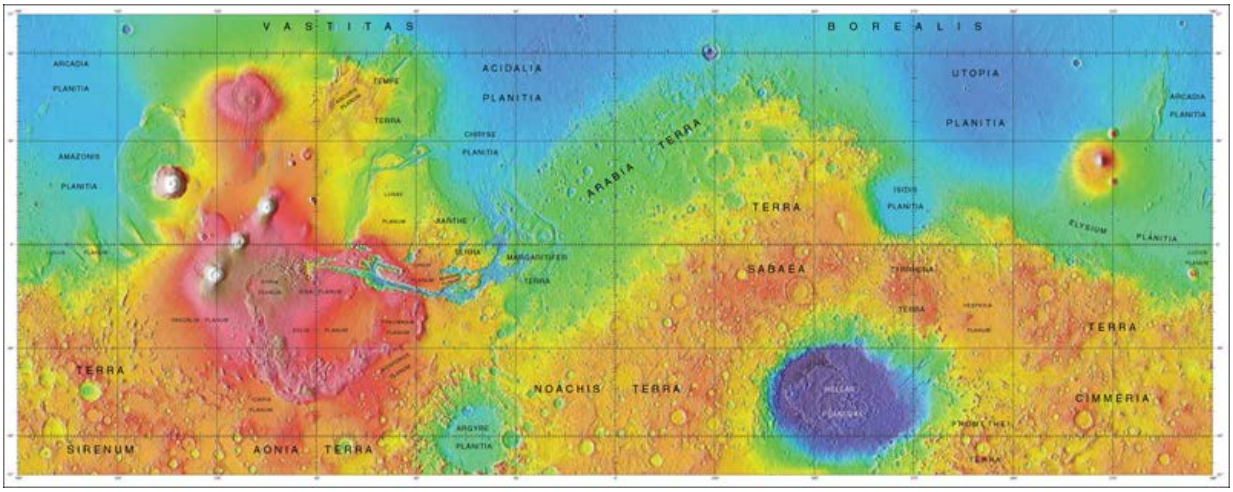
Mars, montrant Valles Marineris et les trois volcans de Tharsis photo Mars Global Surveyor NASA

On voit ici la planète dans son ensemble, avec l'immense cicatrice de *Valles Marineris*, à côté de laquelle le cañon du Colorado semble ridicule… Valles Marineris s'étend sur 3.500 km, atteint 300 km de largeur, et 7.000 mètres de profondeur ! Ceci n'est pas la première photo, qui montrait une région différente, située au sud de la planète.

On voit également à gauche les trois volcans du plateau de Tharsis, *Ascraeus Mons*, *Pavonis Mons*, et *Arsia Mons* (de haut en bas). Tharsis mesure 4.000 km de diamètre, et s'élève à 15.000 m.

Etant donné qu'il n'y a pas de mers sur Mars (comme sur Vénus), la mesure des altitudes pose un problème de niveau zéro. Le niveau zéro sur Mars est défini par une pression atmosphérique de 6,10 mb. Il correspond à un rayon moyen de 3.382,95 km. La dénivelée totale entre les dépressions et le sommet d'Olympus Mons est de 32 km, ce qui est nettement plus important que la dénivelée totale terrestre (fosse marine la plus profonde à -11.000 m, et sommet de l'Himalaya à +8.850 m, donc dénivelée totale de près de 20 km).

## *Cartes*



Carte de Mars, NASA

Les couleurs indiquent l'altitude. Le blanc est le plus haut, ensuite le rouge, puis l'orange, le jaune, le vert et le bleu.

Remarquez sur la carte :

- **la dichotomie entre le nord et le sud** : au nord se trouvent de vastes plaines, au sol particulièrement plat, sans cratères donc jeune, alors que le sud montre de hautes terres particulièrement cratérisées, donc vieilles ;
- les **grands bassins d'impact** *Hellas Planitia*, *Argyre Planitia* et *Isidis Planitia*, creusés par de gros impacteurs ; le fond d'*Hellas* est bleu foncé ce qui indique une grande profondeur ;
- **le bombement** du plateau de *Tharsis* (en rouge, donc de haute altitude) ;
- **les grands volcans** du plateau de *Tharsis* : la chaîne *Ascræus Mons* (au nord), *Pavonis Mons*, *Arsia Mons* ; *Olympus Mons* à gauche de cette chaîne, le plus haut volcan du système solaire ; *Alba Patera*, le plus vaste volcan du système solaire, moins haut qu'*Olympus Mons*, mais bien plus large. Sa base est plus importante et sa pente encore plus douce ;
- **l'immense canyon** *Valles Marineris*, juste au sud de l'équateur, et qui surpasse de loin ce qui se fait de mieux sur Terre dans ce domaine.

La figure d'albedo nommée *Nix Olympica* correspond au grand volcan situé à gauche sur la carte. Puisqu'il n'est pas couvert de neige, on enlève *Nix*, il reste *Olympica* (de l'Olympe). Qu'on transforme en *Olympus*, et on précise *Mons* pour montagne.

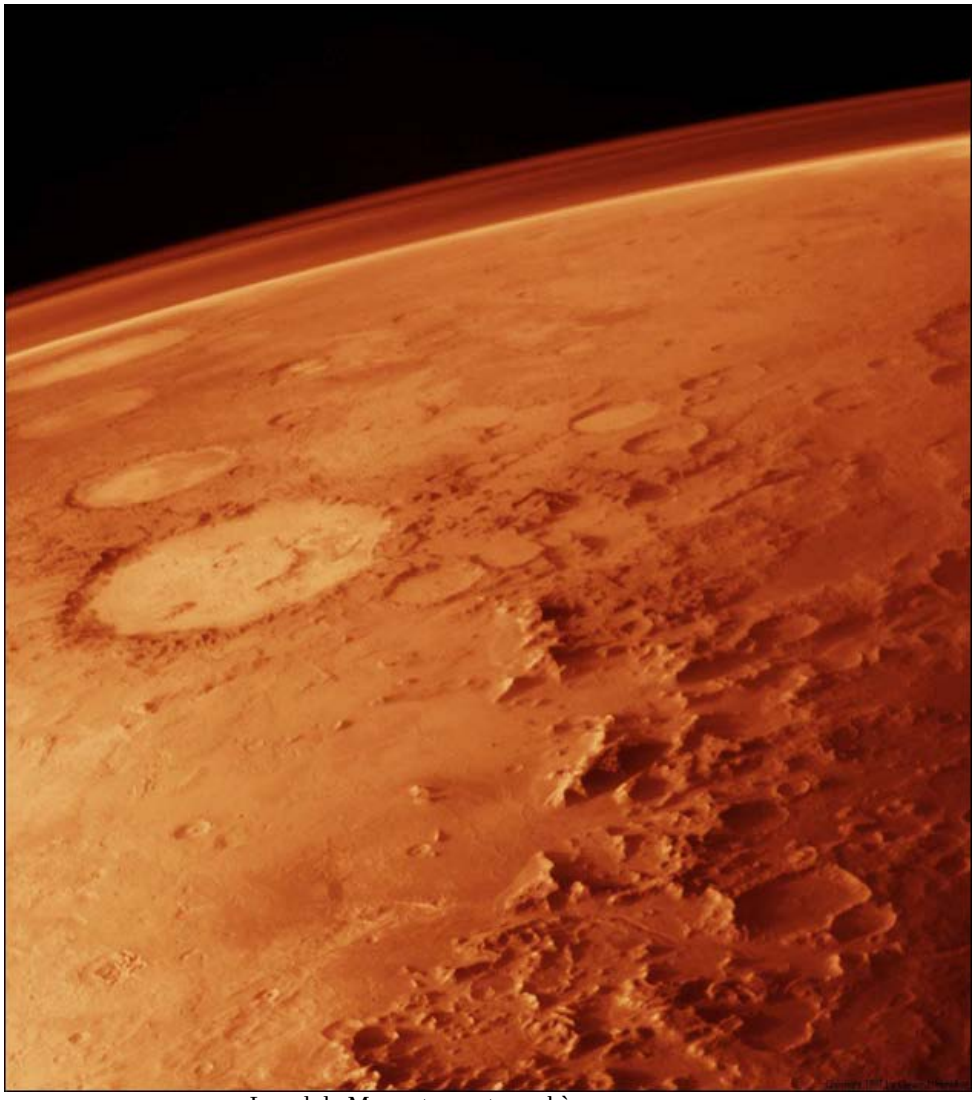
**Carte interactive**

Pour trouver un site de Mars, connaissant son nom ou ses coordonnées géographiques (qui accompagnent les images dans certains sites de la NASA), la carte précédente est intégrée à un logiciel interactif qui permet de le localiser facilement (438 sites référencés). Vous avez le choix entre deux options selon l'écran dont vous disposez : la carte réduite pour un écran 800 × 600, ou la carte originale si votre écran a une meilleure définition. **Les explications pour utiliser la carte** se trouvent dans la même page, dans un cadre que vous pouvez éventuellement agrandir pour pouvoir le lire.

## *Cratères d'impact et hauts plateaux*

Un rapide examen de la carte ci-dessus montre la différence évidente entre le nord et le sud de la planète. Le sud est fortement cratérisé, alors que le nord présente des plaines lisses, où les cratères sont très rares. L'abondance en cratères est un signe de son âge : si un terrain est jeune, les cratères qui s'y trouvaient ont été effacés.

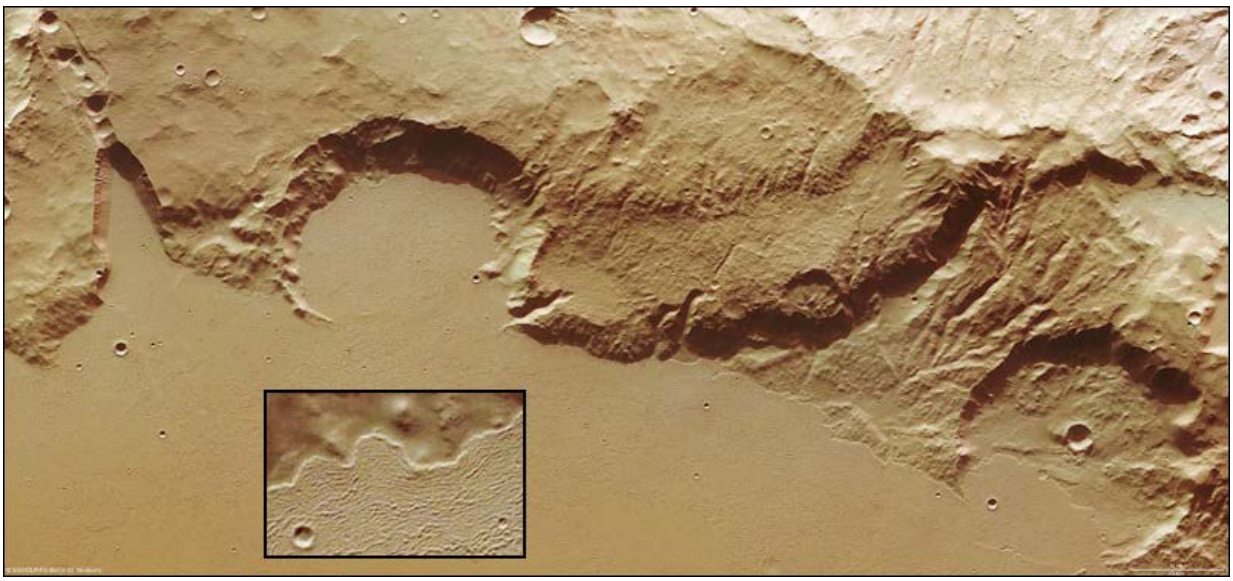
Les régions sud de Mars sont criblées de cratères d'impact. L'atmosphère étant très ténue, l'eau absente depuis longtemps, l'érosion est faible sur Mars (à part l'érosion éolienne saisonnière). La taille de Mars a permis un haut niveau d'activité, mais pas assez pour effacer les cratères d'impact (pas de tectonique des plaques). Les cratères y ont donc une très grande longévité, contrairement à ce qui se passe sur Terre (mais comme sur la Lune).



Le sol de Mars, et son atmosphère photo Viking NASA

Cette photo montre le relief accidenté de Mars, et en particulier de nombreux cratères d'impact. Envoyée par Viking, elle est l'une des premières que nous ayons eu de Mars. Elle a constitué une révolution de pensée concernant la planète, car on imaginait une planète chaude, avec de l'eau, et peut-être de la végétation, on a découvert subitement un désert glacé…

La limite entre les hauts plateaux et les plaines du nord est particulèrement nette. Elle montre que les plaines ont été recouvertes de laves très fluides, qui ont épousé le contour des pentes. On le voit particulièrement bien sur cette photo de *Mangala Fossae* prise par l'orbiteur Mars Express :



Mangala Fossae photo ESA/DLR/FU Berlin (G. Neukum)

Cette photo prise par Mars Express montre la "côte" de Mangala Fossae. On y voit parfaitement l'opposition entre les deux types de terrains, ceux des hauts plateaux cratérisés et accidentés, et ceux des plaines qui paraissent parfaitement lisses vus de loin. La photo originale a été réduite ici par un facteur 4 à peu près, pour tenir sur un écran raisonnable. Le petit encart montre, sans réduction d'échelle, le bord du plateau

situé juste au-dessus. On y reconnaît la découpe du bord, ainsi que le petit cratère et la colline. A cette échelle, le fond montre de petites rides.

**Chronologie**

Par analogie avec la Lune, qui n'a pas d'atmosphère, on détermine l'âge des objets du système solaire en déterminant la densité de cratères que présente leur sol. Plus un sol est cratérisé, plus il est ancien. Les vieux terrains lunaires sont criblés de cratères de toutes tailles alors que le plancher des mers est bien plus lisse. Les mers ont été formées par écoulement de laves, à la suite d'un impact. Cette lave s'est figée, et peu de météorites en ont touché le sol par la suite. Les mers sont donc des régions relativement jeunes. Cette méthode de comptage de cratères permet de déterminer des âges relatifs.

Lorsqu'on a les moyens d'étudier les roches, on détermine des rapports isotopiques, qui donnent des âges absolus, en fonction des périodes radioactives de ces éléments. Mais cette méthode directe n'est applicable que dans les cas où l'on possède des échantillons. C'est pour l'instant le cas de la Lune seulement.

Par analogie avec la Terre, on a déterminé pour Mars une échelle de temps géologiques. Elle comprend trois ères, par ordre d'ancienneté croissante :

- *Amazonien* : d'aujourd'hui à 3 milliards d'années ;
- *Hespérien* : de 3 à 3,5 milliards d'années ;
- *Noachien* : de 3,5 à 4,6 milliards d'années.

Toutes les datations martiennes sont faites aujourd'hui dans ce système, basé sur les comptages de cratères. Cette échelle est relative : un terrain réputé plus jeune qu'un autre doit l'être effectivement. Mais les âges donnés sont des indications, qui seront remises en question (affinées) lorsqu'on disposera d'échantillons de roches pour faire les analyses isotopiques. En particulier, la limite entre l'Hespérien et l'Amazonien est assez vague.

## *Volcans*

Mars s'est différenciée, comme la Terre, mais sa masse plus faible a produit une structure plus simple. Elle possède un noyau dense, plus petit relativement que celui de la Terre. Le chauffage par impacts, par contraction gravitationnelle et par radioactivité a joué ici comme sur notre planète, mais la masse de Mars étant 10 fois inférieure, la quantité de matériaux radioactifs y était aussi 10 fois plus petite. Aussi reste-t-il suffisamment de matériaux fissiles pour chauffer encore l'intérieur de la Terre, mais plus assez pour chauffer Mars.

Mars a donc présenté un volcanisme très actif, de même nature que le volcanisme terrestre, qui a construit les plus grands volcans de tout le système solaire. Mais elle est maintenant refroidie, et le volcanisme y est probablement définitivement arrêté.

**Olympus Mons**

Commençons par le plus spectaculaire des volcans de Mars. *Olympus Mons* surplombe la plaine environnante de 26.000 mètres, et mesure plus de 600 km à la base. Ces proportions impressionantes en font le plus haut volcan du système solaire ! (Le *Mona Loa*, plus grand volcan terrestre, mesure 150 km à sa base sur le fond océanique, et culmine 17.000 m au-dessus du fond océanique ; le volume d'Olympus Mons est presque cent fois supérieur à celui des grands volcans terrestres). Olympus Mons ferait, en France, un magnifique *Massif Central* :



Les environs du volcan sont visibles sur la photo ci-dessous. On voit la magnifique caldera, avec le détail de ses six cratères successifs (voir explications plus bas). Notez aussi les systèmes de vallées qui se sont formés par des écoulements formés probablement par la chaleur dégagée lors des éruptions, qui a fait fondre la glace et provoqué des écoulements de boues plus ou moins fluide.

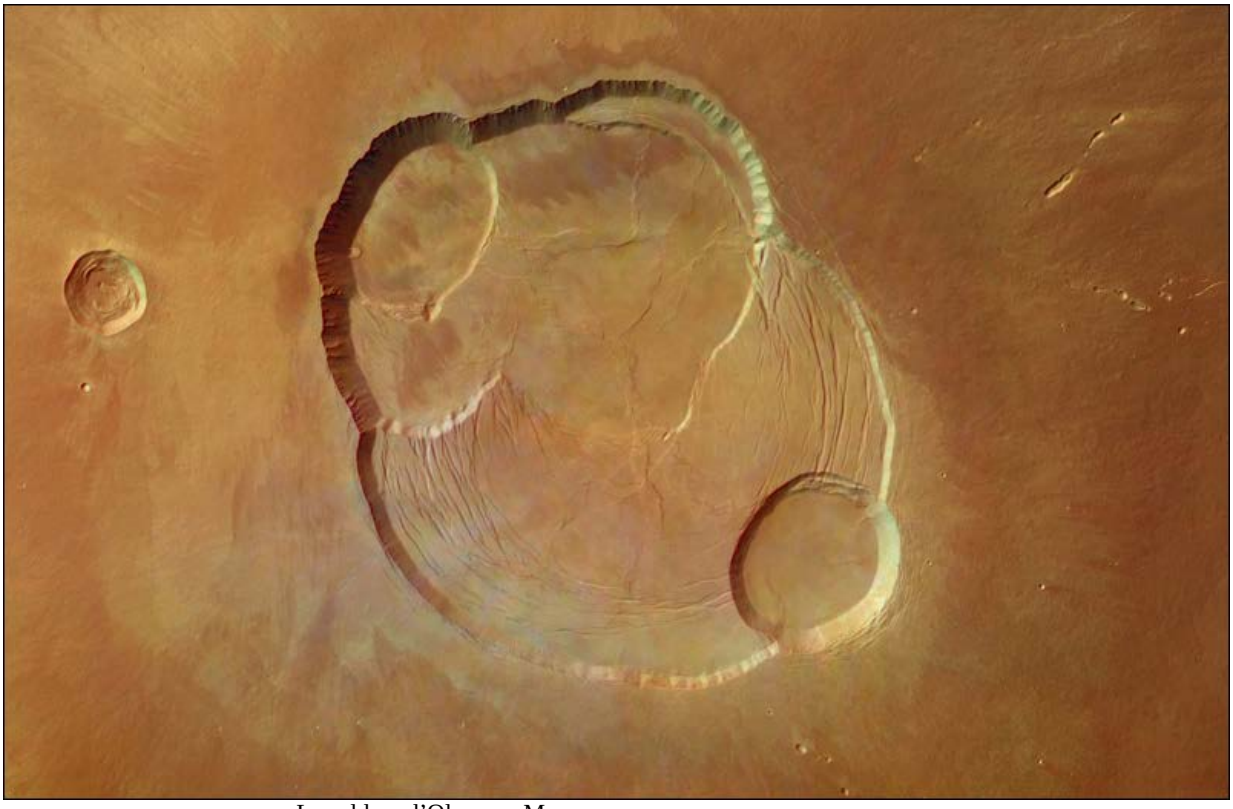


Olympus Mons photo Mars Global Surveyor NASA

On remarque, au pied du volcan, des falaises qui marquent la limite des coulées de lave, et forment un escarpement qui fait le tour du cône. Les coulées terrestres ne dépassent guère 100 km ; sur le plateau de Tharsis, certaines dépassent 1.000 km.

Les deux cratères d'impact d'Olympus Mons ont été produits après le bombardement massif. On compte les cratères dans les calderas, et on obtient une datation : 100 MA pour les coulées d'Olympus Mons, 1 GA (1 milliard d'années) à 100 MA pour Hecates Tholus. Mars est en train de mourir (faute d'éléments radioactifs pour entretenir la chaleur). L'activité volcanique s'est arrêtée il y a un milliard d'années.

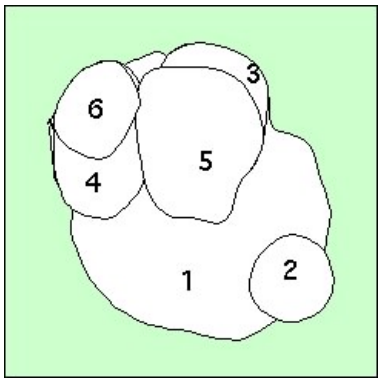
On remarque aussi que 26.000 mètres pour un rayon de 300 km représente une pente moyenne faible : 8 % seulement. Effectivement, l'allure générale le confirme. La pente se relève un peu vers le sommet, qui montre une magnifique caldera. Les petits cratères que l'on voit sur les flancs sont des cratères d'impact. Leur aspect est différent. L'escarpement au pied du volcan fait 8.000 mètres de hauteur.



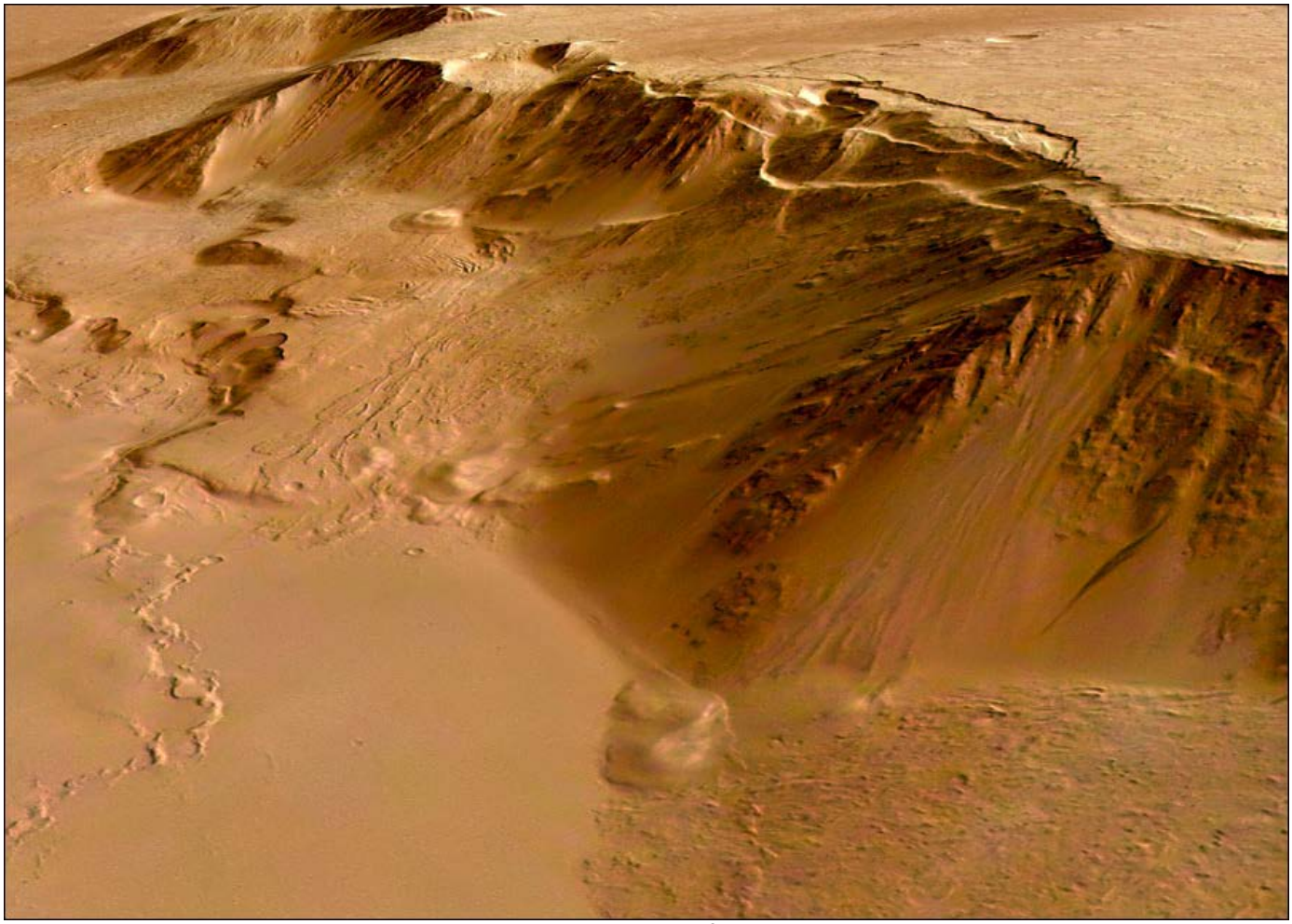
La caldera d'Olympus Mons photo Mars Express ESA/DLR/FU Berlin (G. Neukum)

La caldera mesure 90 km dans sa plus grande dimension. Le nord est à droite. La profondeur maximale est de l'ordre de 3.500 m. Les stries parallèles aux bords de la caldera sont des *graben* (un graben est un terrain effondré entre deux failles).

La finesse de cette image permet de distinguer de minuscules cratères d'impact sur les flancs du volcan. On remarquera aussi les bords de la caldera, qui montrent des traces d'effondrement. Enfin, en haut et à gauche de la caldera on note une coulée de matériaux, qui semble s'être produite par un apport d'eau. On pense que le sol de Mars contient de la glace gelée, comme le pergélisol terrestre, et que parfois une débâcle se produit, entraînant une coulée de boue. L'image originale est beaucoup plus grande. Elle a été réduite ici pour tenir dans un écran de taille raisonable.




La caldera s'est effondrée en six épisodes différents. Le schéma ci-dessus donne l'ordre chronologique.



Vue en perspective de la base d'Olympus Mons, région sud-ouest photo HRSC Mars Express ESA

Cette image montre l'escarpement qui borde Olympus Mons. On imagine la hauteur de l'escarpement, qui atteint 8.000 mètres par endroits ! La résolution de l'image initiale est de 11 m/pixel (elle est ici réduite pour tenir dans l'écran). Le plateau montre des coulées de lave longues de plusieurs kilomètres, et larges de quelques centaines de mètres. L'âge de ces coulées montre, par sa diversité, qu'il y a eu plusieurs épisodes d'activité sur Olympus Mons.

L'âge déduit des comptages de cratères place Olympus Mons dans l'Hespérien, jusqu'à l'Amazonien inférieur, c'est-à-dire entre 1,5 et 3 milliards d'années.

**Alba Patera**

Moins élevé qu'Olympus Mons, puisqu'il culmine à *seulement* à 6.000 mètres, *Alba Patera* est bien plus étendu, puisqu'on estime sa largeur à 1.150 km. Ce n'est qu'une estimation, parce que le pied d'Alba Patera est recouvert par des coulées plus récentes, et n'est donc pas visible. L'estimation se base sur la pente du volcan, et sur l'altitude de la plaine sur laquelle il repose.

La quantité de lave nécessaire pour édifier Alba Patera est du même ordre de grandeur que celle accumulée dans les trapps du Deccan sur Terre. Pour empiler tant de laves, on estime qu'il a fallu beaucoup de temps, et les comptages de cratères indiquent approximativement une activité dans la période entre 3 et 1,5 milliards d'années avant le présent. Alba Patera date de l'Hespérien.

Alba Patera est le volcan le plus vaste du système solaire… Mais sa hauteur relativement faible lui confère une pente extrêmement douce, inférieure à 1 % sauf dans la partie sommitale.

Les pentes du volcan sont par endroits sillonnées par des sortes de rivières, évoquant un ravinement dans un sol couvert de cendres volcaniques. Si c'est le cas, il doit y avoir eu de violentes éruptions dont les laves contenaient de la vapeur d'eau, capable d'exploser pour répartir des cendres sur une grande surface. Les éruptions devaient être de type pyroclastiques. Nous verrons un peu plus loin ce qu'il faut penser de ce type d'éruptions dans l'environnement martien.

La caldera d'Alba Patera est encore plus vaste que celle d'Olympus Mons. Elle atteint 130 km de diamètre. Elle est en deux parties : une dépression de 95 km sur 65, et l'autre de 65 par 55 km. Entre les deux, se trouve un dôme décoré d'un cratère.

Sur l'image, vue du nord, on remarque les grabens produits par la surrection du volcan. A droite de la caldera, *Alba Fossae* ; à gauche de la caldera, *Tantalus Fossae*, les deux s'étendant vers le nord, c'est-à-dire en bas de l'image ; au

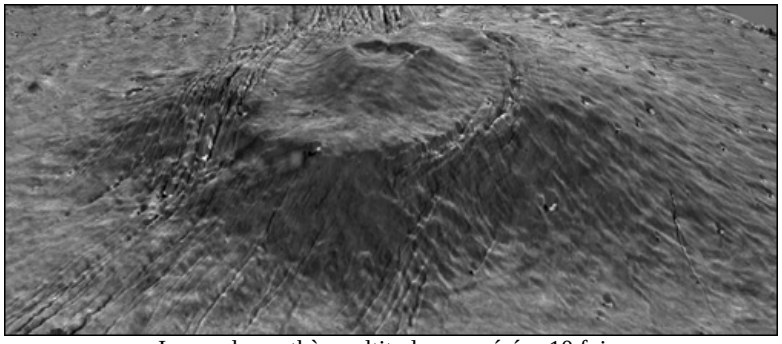


Image de synthèse, altitudes exagérées 10 fois.
Crédits : NASA/Mola science team

pied du volcan, en haut de l'image, on aperçoit *Ceraunius Fossae*.

En vraie vision, le volcan serait beaucoup plus plat, puisque les altitudes sont ici exagérées 10 fois.

Alba Patera se trouve au nord du plateau de tharsis, et n'en fait pas partie.

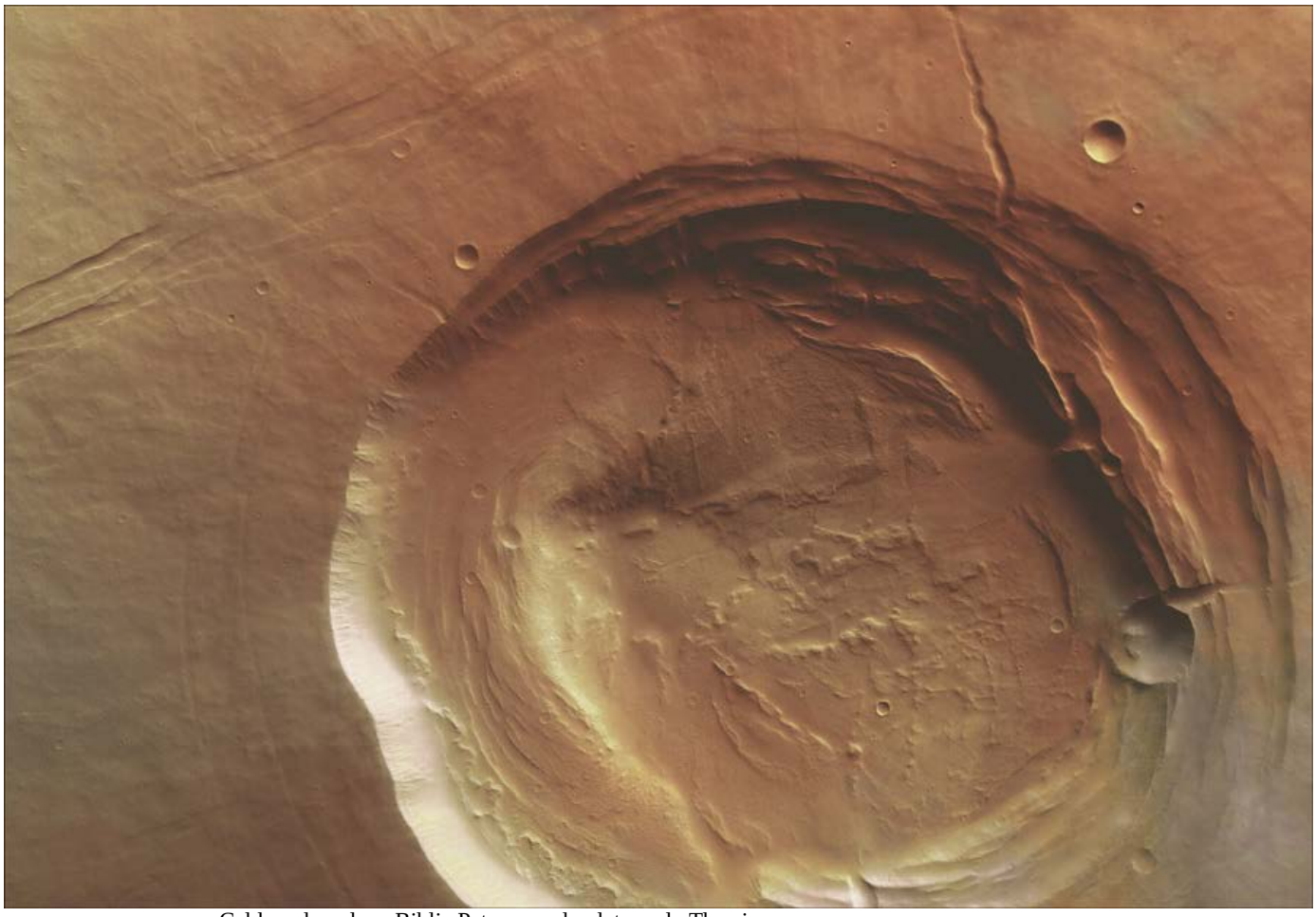
**Plateau de Tharsis**

La densité de volcans est particulièrement élevée sur le plateau de Tharsis. On y trouve les trois grands : *Ascraeus Mons* (18 km d'altitude, figure d'albedo *Ascraeus Lacus*), *Pavonis Mons* (14 km, du latin *pavonis = paon*) et *Arsia Mons* (16 km, de la figure d'albedo *Arsia Silva*, forêt légendaire à Rome). Ces trois volcans sont remarquablement alignés. Et en continuant un peu vers le nord, on trouve un ensemble de trois petits volcans : *Ceraunius Tholus*, *Uranius Patera*, et *Uranius Tholus*. Tout ces volcans, bien alignés, se sont sans doute formés le long d'une même faille dans la croûte martienne.

On note encore un couple de volcans entre Pavonis Mons et Olympus Mons : *Biblis Patera* et *Ulysses Patera*. Enfin, deux petits volcans sont isolés : *Tharsis Tholus*, à l'est du plateau, et *Jovis Tholus* à l'ouest. Ces volcans mineurs pour Mars seraient de bonne facture sur la Terre…

Les noms des volcans sont de deux sortes : *Patera* ou *Tholus*. Pourquoi cette différence ? Pour distinguer entre les volcans à forte pente, les *Tholi*, et ceux à pente très douce, les *Paterae*. Tholus veut dire *colline*, et patera signifie *coupe*.

Les petits volcans montrent une grande caldera perchée sur un cône de faible largeur. Tout porte à croire qu'il s'agit en fait du sommet de volcans dont la base a été noyée dans des flots de laves provenant d'autre sources plus tardives et plus productives.



Caldera du volcan Biblis Patera, sur le plateau de Tharsis photo Mars Express ESA/DLR/FU Berlin (G. Neukum)

Cette image, prise le 8 novembre 2004 par la caméra Stéréo à haute résolution (résolution de 10,8 m par pixel), montre la caldera de Biblis Patera, à l'ouest du plateau de Tharsis. Elle est ici réduite pour tenir sur l'écran. Le nord est à droite.

Biblis Patera mesure 170 × 100 km, et s'élève de 3.000 m au-dessus de la plaine environante. La caldera mesure 53 km de diamètre, et atteint 4.500 m de profondeur… Elle s'est formée à la suite de l'effondrement de la cheminée volcanique, en fin d'éruption, suite à la décompression de la chambre magmatique. La forme des murs indique qu'il y a eu plusieurs effondrements successifs.

Arsia Mons possède une caldera de 100 km de diamètre, profonde de 1.500 m. Le fond de la caldera est très plat, mais on y voit tout de même des coulées de lave, et de tout petits cratères d'impact. C'est un magnifique volcan de 11.700 m de hauteur au-dessus de la plaine, bien qu'il paraisse petit à côté des deux géants précédents. Les comptages de cratères lui assignent un âge de l'Amazonien supérieur, entre 700 et 40 millions d'années.

**Formation du dome de Tharsis**

Pourquoi tant de volcans se sont-ils formés dans une région si petite ?

Le premier élément de réponse est bien sûr le fait qu'il n'y a pas de tectonique des plaques sur Mars. Mais encore faut-il que la lave pour former tous ces édifices soit disponible ! Ceci se conçoit par l'existence d'un diapir (panache de lave provenant du manteau) à l'échelle de la région. Une quantité énorme de magma est remontée sous la plaine de Tharsis, a provoqué son bombement, et a perçé la croûte en de nombreux endroits, formant les divers volcans.

La nature de la lave, peut-être sa composition chimique, a dû être un peu différente selon les endroits. Par exemple, la lave a dû être un peu plus fluide à la latitude d'Alba Patera qu'à celle d'Arsia Mons. De ce fait, elle a pu couler plus loin, et former un édifice plus vaste et moins haut.

La quantité de lave qui s'est épanchée dans cette région produit une pression énorme sur les terrains alentour. Le dôme de Tharsis dépasse le million de $km^2$ en surface et 5 km d'altitude.

**Elysium**

La région d'Elysium est le second site volcanique martien en importance. Bien moins impressionant que la plateau de Tharsis, il comprend tout de même trois volcans comparables aux plus grands volcans terrestres. Le plus grand est *Elysium Mons*, qui culmine à 14.000 mètres au-dessus de la plaine. Il est entouré par un réseau de grabens, *Stygis Fossae* et *Zephirus Fossae*, produits par les déformations de la croûte sous le poids du volcan. Les flancs du volcan ne présentent pas beaucoup de cratères, ce qui en fait un édifice d'âge moyen, évalué à un à deux milliards d'années.

A peu de distance, on trouve vers le nord-est *Hecates Tholus*, dont la partie sommitale est couverte de fines cendres volcaniques. Leur présence indique que les éruptions étaient explosives, propulsées par des gaz dont la vapeur d'eau devait être l'un des constituants principaux. Dans la faible atmosphère de Mars, lorsque les gaz sortent de la cheminée volcanique, ils subissent une brutale décompression, et propulsent la lave pulvérisée à haute altitude. On voit également des chenaux d'écoulement dans la cendre, indiquant que de l'eau a coulé pour les creuser. Au sommet se trouve une caldera de 13 km de diamètre, et seulement 400 m de profondeur (les autres volcans nous ayant habitué au gigantisme, celui-ci paraît peu important). Le volcan s'élève à 6.600 m au-dessus de la plaine. Il date de la fin de l'Hespérien, et de l'Amazonien (1,7 milliards à 500 millions d'années).

Enfin, vers le sud-est se trouve le troisième grand volcan de la région : *Albor Tholus* est un bouclier assez bas, mais possédant une grande caldera à son sommet.

Les volcans de la région sont très peu cratérisés, on n'y trouve pas de grands impacts. Ceci prouve qu'ils sont relativement jeunes, et permet de leur attribuer un âge de un à deux milliards d'années. Mais au sud de ce domaine, on voit des coulées importantes, qui n'ont pas subi d'altérations. Elles sont parmi les terrains les plus jeunes de Mars. Si des éruptions se produisaient encore sur cette planète, ce pourrait être à cet endroit.

Au sud-est d'Elysium, à la limite entre les hauts plateaux du sud et les terres basses du nord, on trouve un beau volcan isolé, *Apollinaris Patera*. Il s'élève à 5.000 m et sa circonférence atteint 200 km. Sa situation particulière pourrait s'expliquer par un remplissage de la zone l'entourant, qui aurait dissimulé d'autres volcans plus petits, ainsi que les fractures lui ayant donné naissance.

**Hellas**

Troisième et dernière grande région volcanique de Mars, *Hellas Planitia* a été formée par un impact géant, qui a creusé le grand bassin. Probablement à la suite de ce choc, un volcanisme important s'est produit sur les bords fortement fracturés. On trouve au nord-est : *Tyrrena Patera* et *Hadriaca Patera*, et au sud *Amphitrites Patera*. Ces volcans sont des boucliers peu élevés. Mais la caldera qui les couronne est importante, et leurs flancs sont striés de crevasses radiales descendant depuis le sommet.

On ne trouve pas de coulées de laves. L'édification des cônes a donc dû se faire par accumulation de cendres, et donc les éruptions ont été violentes, explosives. Le sol y est donc friable, et des coulées d'eau chargées de cendres ont creusé les chenaux visibles.

Hadriaca Patera possède une belle caldera de 77 km de diamètre, profonde de 700 m. Autour de la caldera partent radialement des chenaux profonds et larges, probablement creusés par de l'eau. Le volcan ne s'élève pas à plus de 1.100 m au-dessus de la plaine. A sa base, il s'étend sur 400 km de diamètre en moyenne. Il est daté de la fin du Noachien, début de l'Hespérien (2 à 3 milliards d'années).

## *Caractéristiques du volcanisme martien*

Il fallait expliquer pourquoi les grands volcans bouclier ont tellement profité là-bas :

- Il s'agit de volcans de type hawaïen, à la lave très fluide, liquide, qui s'écoule très loin. C'est l'explication de leur extension.

Mars est une planète à une seule plaque, qui couvre toute sa surface. Il n'y a pas de tectonique des plaques (dérive des continents) comme sur Terre. S'il y a un point chaud, il se trouvera donc toujours à l'aplomb du même point en surface, et les matériaux qu'il remonte vont donc s'accumuler au même endroit. Chaque coulée s'empile sur la précédente. Les volcans se construisent sur une longue durée.

- Sur Terre, un tel volcan ne peut pas exister, parce que la croûte terrestre est trop fragile pour en supporter le poids. On a constaté que la lithosphère de Mars (la croûte plus le manteau supérieur rigide) est plus épaisse que celle de la Terre, et peut donc supporter un poids de volcan plus grand.

Mars étant plus petite que la Terre s'est reforidie plus rapidement, et la croûte s'est bien plus épaissie. C'est probablement ce qui a bloqué une tectonique des plaques, et conduit à la situation actuelle.

Les volcans hawaïens terrestres, tel le *Mauna Loa*, sont des volcans de point chaud : un panache de magma chaud du manteau remonte en-dessous, et la lave brûlante perce la croûte terrestre. Mais la plaque tectonique ainsi percée se déplace, entraînant le volcan un peu plus loin. Lors d'une nouvelle remontée de magma, la croûte sera donc percée là où elle surplombe le point chaud. C'est ainsi que les volcans hawaïens forment un chapelet d'îles. Le volume de laves cumulé de tous les volcans d'une telle ligne correspond au volume d'un grand volcan martien, ce qui renforce l'hypothèse d'accumulation.

**Formation d'une caldera**

La formation d'une caldera s'explique en considérant la formation du volcan lui-même. On considère ici des volcans de point chaud, produits par la remontée d'un diapir. Une masse de magma profond et chaud s'élève dans le manteau, et adapte petit à petit sa pression à la pression environnante. La pression diminuant, le magma se liquéfie. Lorsque la lave ainsi formée arrive près de la surface, elle constitue une chambre magmatique, où elle s'accumule petit à petit sous la pression du diapir. Enfin, une faille va permettre l'éruption, libérant une grande quantité de lave et diminuant d'autant la pression à l'intérieur de la chmabre magmatique. Pendant toute la durée de l'éruption, la pression sera maintenue par la remontée de magma profond, qui remplace la lave échappée. Mais finalement, le magma chaud se tarit, et la pression sous la chambre magmatique baisse. L'éruption s'arrête donc, la lave dans la cheminée se fige, mais la pression interne n'est pas encore stabilisée, et continue de baisser un peu. Alors, le contenu de la cheminée s'effondre sous son propre poids, et produit la caldera.

Un volcan aussi grand qu'Olympus Mons ne s'est pas constitué en une seule éruption. Et à chaque fois, le même scénario a pu se produire, avec un effondrement final. Ceci peut expliquer la forme complexe parfois de la caldera, qui retrace donc l'histoire du volcan.

Les calderas martiennes sont plus grandes que celles de la Terre. L'explication tient dans la faible gravité de la planète, qui est de l'ordre du tiers de la gravité terrestre. La lave étant plus légère, monte plus facilement et constitue de plus grandes chambres magmatiques. Les calderas qui résultent de leur effondrement en sont elles aussi plus grandes.

**Fluidité de la lave**

Les volumes de laves étant plus grands à cause de la faible gravité, la lave se refroidit plus difficilement. Et donc, restant fluide, elle peut aller plus loin. Voilà pourquoi les volcans martiens s'étendent parfois sur de si grandes distances.

**Caractère explosif**

Les éruptions sont explosives lorsque des gaz en grande quantité sont dissous. Lorsque la lave arrive en surface, les gaz s'échappent violemment et provoquent les explosions. Mais sur Terre, il faut beaucoup de gaz pour compenser la pression atmosphérique : les fontaines de lave ne peuvent se produire qui si le contenu volatil atteint 1 %. Mais pour faire éclater la lave et produire les nuages de cendres (nuées ardentes, éruptions explosives ), il faut jusqu'à 4 % de volatils. Ces conditions sont donc assez fortes, et limitent ce type d'éruption, fort heureusement car elles sont très dangereuses.

Sur Mars, la pression étant plus de 100 fois plus faible, l'atmosphère pèse bien moins sur la lave, et les gaz dissous s'échappent d'autant plus facilement (imaginez décapsuler une bouteille d'eau gazeuse dans le vide…). Aussi, seulement 0,03 % de volatils sont suffisants pour provoquer une fontaine de lave, et 0,2 % pour produire les nuages de cendre. Il est donc logique de trouver de nombreux cônes de cendre sur cette planète.

La quantité de volatils dissous dépend de la nature chimique de la lave : le taux de volatils est directement lié au taux de silice. Ce sont donc les volcans à forte teneur en silice qui peuvent présenter ce type d'éruption sur Terre, donc les volcans des zones de subduction, à lave andésitique. Mais sur Mars, le taux de silice peut être bas, sans empêcher ces phénomènes. La présence de cendre n'implique donc pas que la lave soit de nature siliceuse, et cette remarque interdit de conclure sur la chimie des volcans : des laves basaltiques peuvent parfaitement produire des cendres.

Les explosions sont très fortes, et la cendre projetée plus loin que sur Terre. Par contre, les bombes volcaniques sont plus petites, car le gaz est trop raréfié, à cause de la très faible pression, et ne peut les propulser bien loin.

**Analyse du sol**

L'analyse a pour but de connaître les roches qui constituent le sol. Les roches sont des mélanges de minéraux en diverses proportions, et cristallisés plus ou moins finement. La détermination des minéraux raconte l'histoire de la roche : elle indique si elle est d'origine volcanique (ex : *basalte*, *andésite*…), plutonique (magma solidifié lentement en profondeur, ex : *granit*), métamorphique (*schistes*, ex : *talc*), ou sédimentaire (ex : *calcaire*).

> Les *roches éruptives* sont produites par les volcans. Elles se refroidissent à l'air libre, très rapidement. Leur point de fusion est lié à leur PH : plus une roche est acide, plus bas est son point de fusion. C'est la silice contenue qui donne l'acidité : les andésites contiennent entre 57 et 63 % de silice, elles sont donc acides, leur point de fusion est bas, leurs laves sont visqueuses ; les basaltes contenant entre 45 et 53 % en masse de silice sont basiques, leur point de fusion est élevé, leur la lave est très fluide.
>
> Les *roches plutoniques* sont remontées du manteau, mais s'arrêtent dans la chambre magmatique où elles

se refroidissent et cristallisent. Le temps de refroidissement est bien plus long qu'en surface. Les cristaux ont le temps de se développer. La taille des cristaux permet donc de différencier les roches éruptives des roches plutoniques, qui ont même origine et donc même composition.

Les *roches métamorphiques* sont des sédiments qui ont été enfouis par la subduction, et qui ont été portés à pression et température élevées. Les minéraux qui les composent subissent des transformation de cristallisation, parfois sont refondus. Très souvent, la recristallisation provoque l'apparition de plans de clivage bien marqués, et la roche se sépare facilement en feuilles (ex : *schistes*, *ardoises*).

Les *roches sédimentaires* proviennent d'altérations de roches de l'écorce terrestre. Elles se sont formées dans des conditions très variées ; elles sont très diverses, et leur nature chimique permet de savoir si elles se sont formées dans un milieu sec, humide ou immergées dans l'eau, et dans ce cas on peut donner une limite inférieure du temps d'immersion

La détermination des roches commence par leur aspect physique : densité, dureté, transparence (en lame mince), cassure, grosseur des cristaux, couleur, forme… Tout ceci est facile à faire sur Terre, mais plus délicat dans une sonde automatique. Pour l'instant, les sondes n'ont pas embarqué de mécanismes capables de mesurer les paramètres de densité, dureté, transparence. Mais une caméra ne pèse plus grand chose, et peut être munie d'un objectif ce courte focale pour faire des photos rapprochées. On a donc accès à l'aspect visuel de la roche. De plus, si la roche est altérée en surface par les conditions atmosphériques, on peut disposer d'un abrasif rotatif qui enlève la pellicule transformée, et fait apparaître la surface de la roche. Les cristaux, leur taille, leur dimension et leur couleur sont alors visbles sur les photos.

Ensuite, il faut faire une analyse chimique de chacun des minéraux composants pour arriver à une connaissance correcte. Pour cela, l'analyse chimique s'impose. On appelle *analyse élémentaire* la composition d'un échantillon en proportion de chacun des éléments chimiques : 23 % d'oxygène, 6 % de magnésium…

L'analyse élémentaire ne suffit pas pour connaître les molécules concernées. Si toutes les molécules de l'échantillon étaient identiques, les proportions indiqueraient immédiatement leur formule. Mais on est souvent en présence de mélanges. Et l'analyse élémentaire dépend alors des proportions des différentes molécules, donc des différents minéraux. Le problème n'a pas toujours une solution unique, et il faudra souvent d'autres analyses, par d'autres moyens pour trancher.

**Méthodes d'analyse physique**

Ces méthodes sont basées sur la photographie, prise à l'aide d'objectifs de focale de plus en plus courte. On en est maintenant à utiliser de véritables microscopes embarqués pour transmettre sur Terre des microphotographies de particules de sol. Un microscope fournit de précieux renseignements sur la couleur, la texture, la taille des cristaux.

**Méthodes d'analyse chimique**

Actuellement, et pour un certain temps encore, il n'est pas possible d'analyser directement des échantillons de roches provenant d'une autre planète. Seule la Lune a été échantillonnée, permettant de faire des analyses de laboratoire de toutes sortes.

On peut distinguer deux façons générales de faire cette analyse :

- par voie chimique, consistant à transformer certaines molécules en d'autres qui sont reconnaissables. Les réactifs colorés, les précipités de toutes sortes sont des indicateurs de présence de divers éléments chimiques. On peut aussi déterminer le PH d'une solution pour connaître son caractère acide ou basique. Mais toutes ces manipulations de liquides sont difficiles à mettre en œuvre par un robot expédié à des millions de km.
- par des méthodes physiques, qui consistent en gros à détruire l'échantillon pour examiner ses débris, les atomes qui le constituaient. Ces méthodes s'appliquent à sec, ce qui est bien avantageux dans ce contexte.

Lorsqu'on étudie une roche en laboratoire, on commence par isoler physiquement les différents cristaux qui la composent, et on les analyse chacun à son tour. On connaît donc la composition minéralogique de la roche, et la composition chimique de chacun des minéraux composants. Par exemple, le granit montre des cristaux de *quartz*, de *feldspath alcalin* et de *mica*. Le quartz est de la *silice* $SiO_2$, le feldspath est un silicate double complexe, dans le cas du granit il s'agit *d'orthose* de formule $KAlSi_3O_8$, et le mica est encore plus complexe, formé en partie de *phlogopite* de formule $KMg_3AlSi_3O_{10}(OH, F, Cl)_2$.

Sur une autre planète, il n'est pas possible de séparer les cristaux avant analyse. C'est donc la roche entière qu'on analyse. On détruit l'échantillon, et on en fait l'analyse élémentaire. Une fois les résultats acquis, il faut déterminer quel mélange de minéraux, et en quelles proportions, explique les résultats. Dans ces conditions, il ne faudra pas s'étonner que des ambiguïtés puissent subsister. Il est assez courant de faire des mélanges en laboratoire, et de les tester dans les mêmes conditions que la roche étudiée, pour comparer les résultats. Les résultats les plus approchants indiqueront le mélange le plus probable.

Pour étudier la minéralogie d'une planète, le problème se complique encore par la variété des régions. Une région est globalement volcanique, ou sédimentaire, ou métamorphique. Localement, on peut trouver des différences très importantes. Que doit-on faire ? Des études locales ou globales ?

Bien sûr, les deux présentent des intérêts. Selon l'échelle à laquelle on va s'intéresser, on optera pour une analyse à distance, à l'aide d'orbiteurs, ou au contraire à une analyse de très près à l'aide d'une sonde posée au sol. Dans le premier cas, on étudie de grandes régions globalement, en mélangeant tout ce qui s'y trouve. Dans le second, on risque de ne voir que le petit détail, passant à côté des phénomènes essentiels. C'est ainsi que se pratique la minéralogie sur Mars depuis 1976.

Il y a deux façons de procéder pour déterminer quelle est la chimie du sol :

- par des méthodes directes, semblables à celles que l'on utilise sur Terre dans les laboratoires. Des analyses chimiques de toutes sortes (réactions avec des acides, des bases…) permettent de déterminer la composition chimique des échantillons (analyse élémentaire, qui

consiste à détruire les molécules, puis à déterminer la proportion de chaque élément chimique ; chauffage qui dégage les volatils contenus dans l'échantillon ; diverses réactions qui permettent de connaître la structure des molécules) ;
- par des méthodes indirectes, qui consistent à analyser une émission produite par la roche, et portant sa signature spectrale. Par ce moyen, on obtient aussi l'analyse élémentaire. Pour que ces méthodes soient applicables, il faut que la roche soit coopérative, et veuille bien émettre quelque chose… Tout le spectre électromagnétique est envisageable pour cela.

    - L'excitation peut se faire par le rayonnement solaire. Le rayonnement résultant est dans l'infra-rouge. Un spectromètre infra-rouge convient donc pour faire l'analyse. Cette technique a été utilisée depuis l'orbite par Mars Global Surveyor, et en visible et IR par Mars Express.
    - Elle peut provenir de rayonnements gamma, plus énergétiques. C'est *l'effet Mössbauer* qui est utilisé. Les interactions entre le noyau et les électrons modifient la structure hyperfine du spectre. Au lieu d'utiliser des raies d'émission, on détecte les raies d'absorption. On place un émetteur gamma derrière l'échantillon à étudier. L'échantillon absorbe les fréquences correspondant à ses caractéristiques. Cette technique est bien adaptée à la mesure du degré d'oxydation des minéraux, en particulier riches en fer. Des spectromètres Mössbauer ont été installés sur Spirit et Opportunity.
    - Les rayons cosmiques peuvent devenir nos complices. En frappant le sol d'une planète (si l'atmosphère le permet), ils bousculent les neutrons de certaines molécules
    - Elles ne sont pas toujours très compréhensives. Alors, il suffit de les convaincre ! Par exemple en les bombardant avec des particules alpha, qui vont leur communiquer de l'énergie, et placer les atomes et molécules dans des états excités. Après une irradiation de quelques instants, on place devant un détecteur, qui analyse les raies spectrales émises. L'analyse élémentaire s'en déduit.
    - La calcination d'un échantillon dans un four permet d'en extraire les volatils, qui vont constituer un gaz. Il est facile d'illuminer ce gaz par une source bien calibrée, et de disposer un spectromètre pour analyser la lumière filtrée par ce gaz. Du spectre obtenu se déduira facilement la composition du gaz. En répétant l'expérience à des températures de plus en plus élevées, on analyse des substances de moins en moins volatiles.

| **méthode** | | | **utilisée sur** |
|---|---|---|---|
| **directe** | | analyse chimique directe | |
| | | calcination et analyse des gaz émis selon la température | Viking |
| | | évaporation par laser et spectrométrie | Mars Science Laboratory |
| **indirecte** | par réflection | spectrométrie visible et infra-rouge du rayonnement solaire réfléchi | Mars Express, Mars Global Surveyor |
| | | réflection d'ondes radar émises par la sonde,<br>sur différentes couches du sol. | Mars Express |
| | par excitation | excitation par rayons gamma ;<br>effet Mösbauer (transitions hyperfines entre le noyau et les électrons) | Spirit, Opportunity |
| | | excitation par rayons cosmiques, spectroscopie gamma | |
| | | excitation par rayons cosmiques, spectroscopie de neutrons | MGS |

**Spectroscopie gamma**

Les rayons cosmiques frappent le sol de Mars. Leur énergie leur permet de provoquer des réactions de spallation sur les atomes de la surface, ce qui produit des neutrons énergétiques. Ces neutrons ont diverses destinées : certains quittent directement le sol, et seront détectés comme neutrons rapides ; d'autres vont produire des réactions de spallation sur des noyaux voisins, qui s'en trouvent excités. La désexcitation produit des rayons gamma. D'autres encore sont freinés par chocs, et sortent comme neutrons de faible énergie. Le photon gamma produit caractérise l'élément qui l'a émis. On peut ainsi déterminer quels éléments sont émeteurs, mais aussi dans quelles proportions.

Au bout du compte, on peut observer soit des rayons gamma, soit des neutrons d'énergie moyenne. Les neutrons sont produits d'autant plus facilement que les noyaux concernés sont légers. Le plus léger d'entre eux, l'hydrogène, est donc le principal pourvoyeur. Or l'hydrogène se trouve très souvent sous forme de molécule d'eau. Donc, la spectroscopie de neutrons est un indicateur de la présence d'eau.

**Spectroscopie neutronique**

L'analyse des roches constituant un sol planétaire peut se faire par des méthodes d'analyse directe, si on est capable de rapporter des échantillons (ce qui fut fait seulement pour la Lune), ou par des méthodes indirectes.

Ces dernières sont basées sur le rayonnement qu'une roche peut émettre lorsqu'elle a été excitée par une source d'énergie suffisante. Ces méthodes indirectes peuvent s'appliquer à très courte ou à très grande distance, selon le mode d'excitation :

- le bombardement artificiel de particules alpha nécessite d'être au contact, donc ne peut se faire qu'au sol ;
- l'analyse de la lumière ou des neutrons produits par des causes naturelles doit se faire depuis une orbite.

Donc, ces méthodes sont complémentaires, et peuvent être combinées pour une analyse globale depuis un orbiter, et pour une analyse fine au sol, réalisée par un atterisseur (au mieux par un rover, capable de se déplacer vers les roches potentiellement intéressantes).

Depuis l'orbite, il s'agit d'observer la lumière reçue en provenance du sol. On peut observer dans le visible, c'est alors la lumière du Soleil, bien connue dans ses propriétés, réfléchie par les minéraux superficiels. Ceux-ci vont y laisser leur empreinte spectrale, qui permettra de remonter à leur nature. C'est aussi dans l'infra-rouge que ces signatures apparaissent nettement. L'infra-rouge n'est pas majoritairement celui du Soleil, mais l'émission propre de la planète dont le sol chauffé par le soleil réémet à plus grande longueur d'onde.

Analyse au sol. Une technique nouvelle va être mise en œuvre sur la prochaine sonde martienne de la NASA. Il s'agit de vaporiser une roche à très haute température, et d'analyser le gaz produit à l'aide d'un spectromètre. La sonde *Mars Science Laboratory* devrait être lancée en 2009. C'est un véhicule de 750 kg qui emporte divers instruments scientifiques. Au sommet d'un mat se trouvera un laser français, fourni par le CNES, capable de délivrer sur une roche à 9 mètres, une puissance de 1 GW par $cm^2$. Ce tir vaporisera la roche à une température de 10.000° C, produisant un plasma. Un spectromètre donnera la composition des gaz émis, ont les atomes rayonneront en se recombinant avec les électrons.

**Age des volcans**

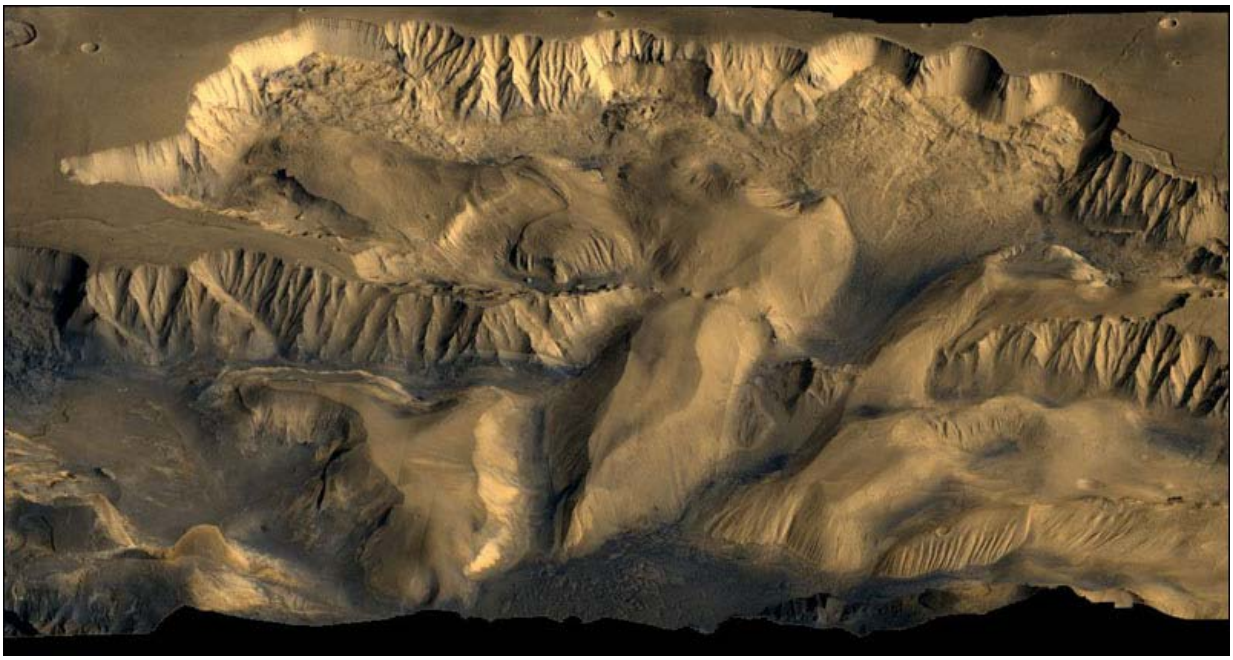
## *Valles Marineris*

Le nom a été donné en référence à la sonde *Mariner 10* qui a envoyé les photos permettant de découvrir cet immense cañon de 3.000 km de long, et atteignant 10 km à sa plus grande largeur. Sa profondeur dépasse les 6 km.

Un seul phénomène tectonique (sans glissement de plaque) s'est produit sur Mars : le bombement de *Tharsis*. Le soulèvement de la croûte, qui n'est pas élastique, entraîne une augmentation de la surface, donc un étirement de la croûte. Il s'ensuit forcément une rupture, qui crée des failles d'extension (si vous tirez sur une feuille de papier, vous la déchirez). Ces failles sont radiales par rapport au bombement, ce sont des grabens.

Cette extension de la croûte qui a suivi la formation de *Tharsis* a initié le creusement de *Valles Marineris*, lequel s'est poursuivi de proche en proche. Des remontées de magma ont dû fondre la glace qui imbibait le sous-sol, formant une boue et des écoulements.

On observe, à l'extrémité de *Valles Marineris* du côté de *Tharsis*, la présence d'un chaos nommé *Noctis Labyrinthus*. On y voit la fragmentation de la croûte sous une force suffisante pour la briser ainsi.



Glissements de terrain dans Valles Marineris photo Viking NASA

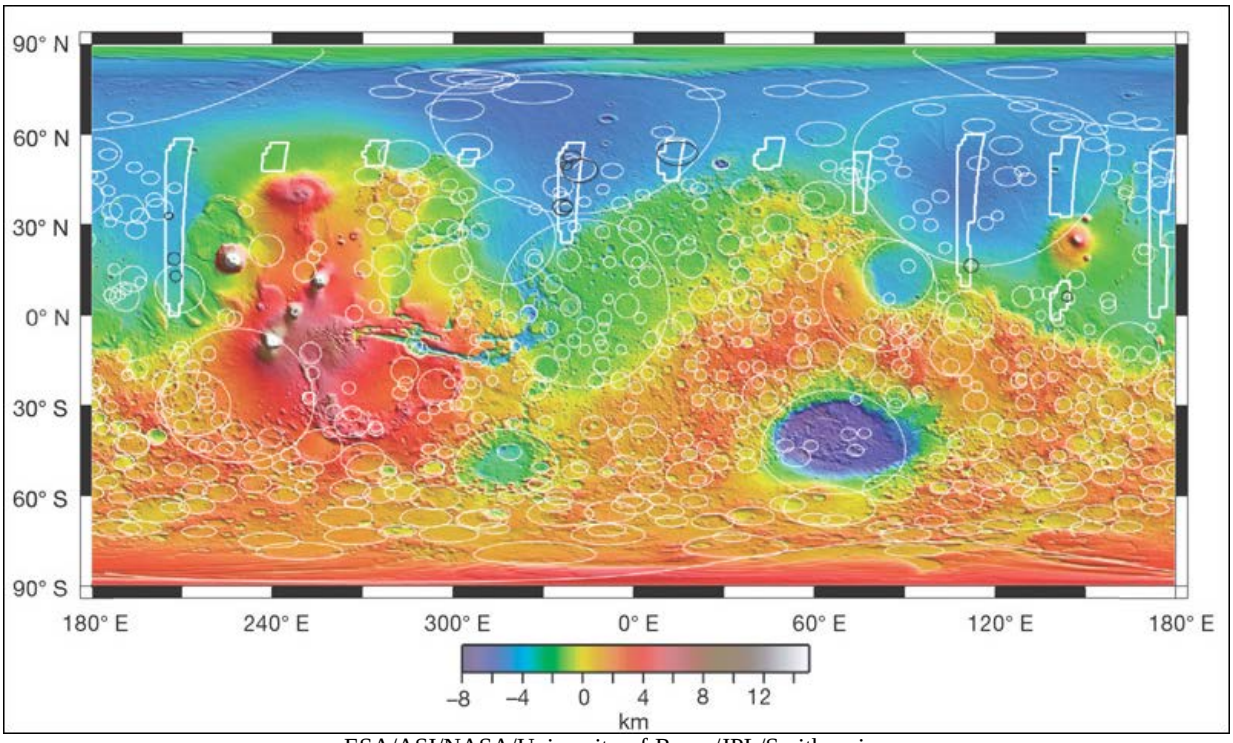
La photo montre la partie centrale de Valles Marineris, et les effondrements sont bien visibles. Par contre, on ne voit pas de cratères d'impact, ce qui prouve que la formation de cette vallée est récente.



Traces d'effondrements et de coulées photo Viking NASA

## *Plaines du nord*

Simultanément à la création de *Tharsis*, s'est produit le remplissage des plaines du nord par des laves. L'aspect visuel de ces plaines ne permet pas de décider de quoi elles sont faites. L'absence de cratères montre qu'elles sont jeunes, et que les cratères qui ont dû s'y former ont été soit détruits par l'érosion, soit remplis par un matériau qui peut être sédimentaire ou éruptif.




ESA/ASI/NASA/University of Rome/JPL/Smithsonian

Cette carte, reprise de la précédente, montre les résultats de l'expérience *Marsis*, sur la sonde européenne *Mars Express*. *Marsis* est un radar capable de sonder la croûte de la planète en envoyant une onde vers le sol, et en analysant l'écho reçu. Selon les propriétés radioélectriques des terrains rencontrés, l'onde va subir des transformations diverses. Leur exploitation théorique permet de reconstruire les bassins d'impact, en mesurant la profondeur à laquelle les propriétés physiques changent brutalement.

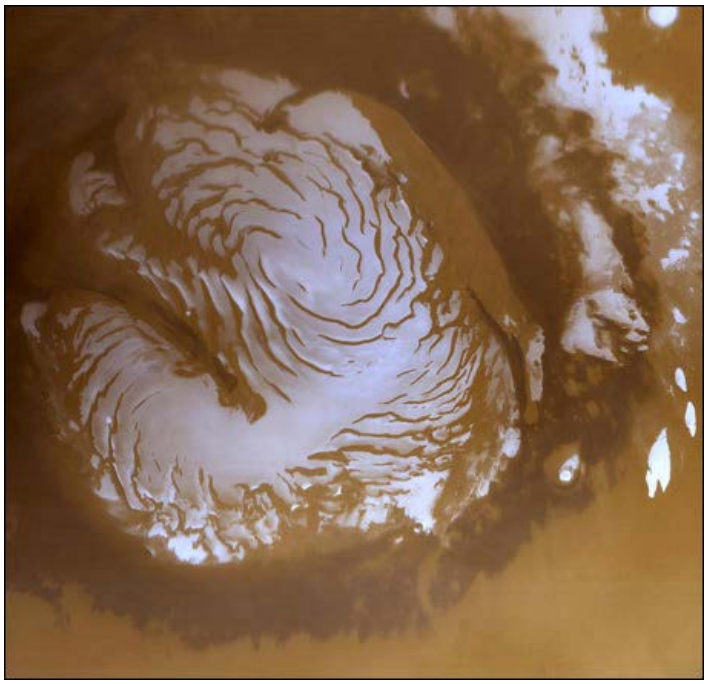
On note sur la carte que Marsis a détecté les bassins visibles, Hellas et Argyre. C'est le moins qu'on pouvait en attendre, mais c'est une preuve de bon fonctionement, et un indice de confiance pour l'existence de ceux qu'on ne voit pas. Et ils sont nombreux ! En fait, il y a de très nombreux bassins et impacts dans le nord de la planète, qui sont cachés par un dépôt.

La nature de ces dépôts ne peut être déterminée avec certitude que par l'analyse des roches elles-mêmes. Mais il s'agit très probablement de laves qui se sont épanchées depuis le plateau de Tharsis, avant la formation des grands volcans.

## *Calottes polaires*

Mars présente des calottes polaires, comparables à la calotte Antarctique.

La calotte polaire nord est circulaire, et s'étend sur 1.200 km : 1.000 km pour la glace elle-même, et un anneau de 100 km de sédiments tout autour. Son épaisseur est de l'ordre de 1 km, mais elle atteint 3 à 4 km vers le centre. Elle est constituée de glace d'eau, mais en hiver, elle se recouvre d'une couche de neige carbonique, lorsque l'atmosphère se condense.



Calotte polaire nord de Mars photo NASA/JPL/Malin Space Science System

Cette photo a été prise par la sonde américaine *Mars Global Surveyor* en mars 1999, au début de l'été martien. Il reste un peu de glace carbonique, mais la masse de la calotte est constituée de glace d'eau. On distingue parfaitement un système de vallées arrondies, formant une sorte de spirale autour du centre de la calotte. L'origine de cette forme n'est pas connue. Elle pourrait être en relation avec le régime des vents. Les vallées tournent dans le sens des aiguilles d'une montre au sud, et en sens inverse au nord. Une fois les vallées ébauchées, leur orientation renforce leur creusement : le versant côté équateur est chauffé, puisque le soleil éclaire dans cette direction, donc la glace se sublime. Par contre, sur l'autre versant, le froid a tendance à cristalliser du gaz carbonique, qui piège des poussières. Ce versant a donc tendance à se renforcer.

La bande sombre qui entoure la glace est un dépôt de sédiments, constitués sans doute d'un mélange de glace et de poussières. Ces dépôts sont creusés de profondes vallées dont les flancs montrent des niveaux alternativement clairs et sombres : ils sont stratifiés. La hauteur de ces niveaux est de l'ordre de 10 à 50 m. On imagine que ces niveaux sont les témoins de changements climatiques important survenus sur la planète, qui seraient dus à des oscillations de l'orbite.

On note de plus que le pôle nord est entouré de dunes.

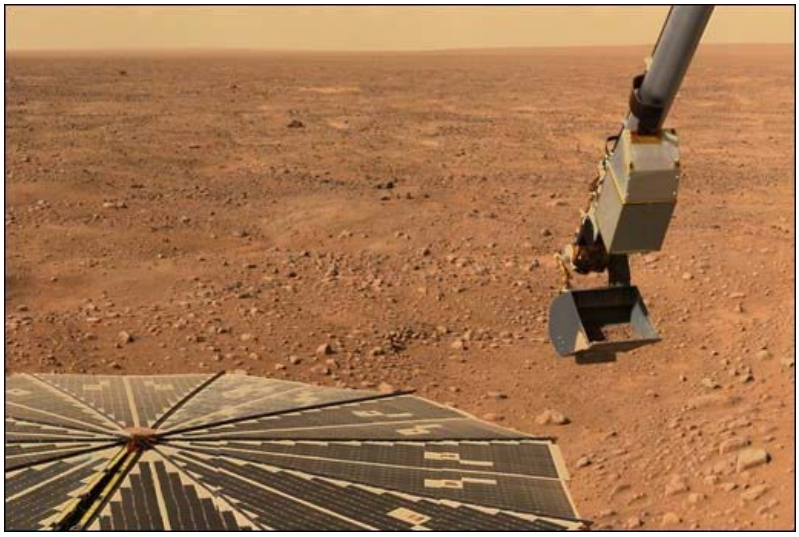
La calotte de glace polaire sud est à peu près quatre fois plus petite que la calotte nord. Mais si on compte les dépôts autour, elle est beaucoup plus grande. De plus, elle n'est pas centrée au pôle sud… probablement à cause du Bassin Polaire Sud, creusé par un ancien impact. Ce bassin est entouré de montagnes.

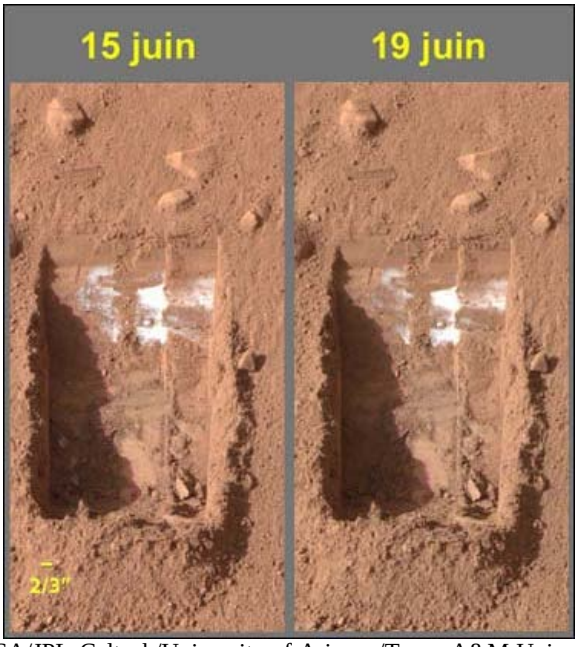
La quantité d'eau fixée dans les deux calottes polaires pourrait correspondre à un océan global de 20 à 30 mètres de profondeur, si cette eau était répartie régulièrement sur toute la planète. La répartition de l'eau dans le sol a été mesurée, sur le premier mètre de profondeur, par un détecteur de neutrons à bord de Mars Odyssey.

Les deux calottes sont les terrains les plus jeunes de Mars. Les dépôts du nord ne présentent aucun cratère, donc leur surface est vraiment très jeune (moins de 10 millions d'années). Ceux du sud montrent quelques cratères, et devraient être légèrement plus anciens. Les calottes elles-même sont très jeunes et totalement exemptes de cratères.

**Phoenix**

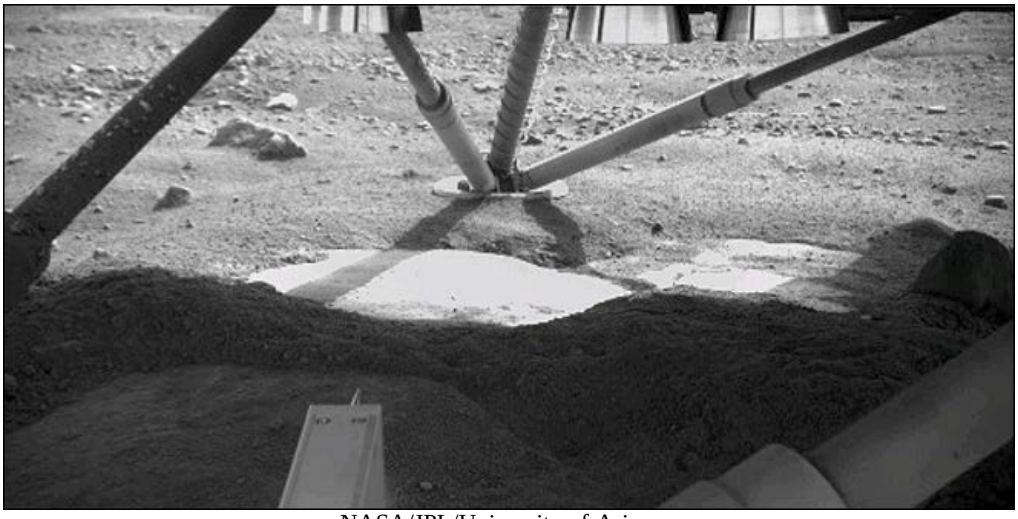
Une sonde américaine, *Phoenix*, s'est posée le 25 mai 2008 (fin du printemps martien) près de la calotte polaire nord de Mars, par 68° de latitude nord, et 233° de longitude est. La sonde est fixe, n'ayant aucun moyen de se déplacer. La seule partie mobile est un bras articulé porteur d'une petite pelle mécanique, destinée à creuser le sol, y recueillir des échantillons, et les déposer dans divers instruments. La caméra a montré un paysage globalement plat, mais pavé de structures hexagonales, faisant penser à celles que l'on voit sur Terre dans les zones polaires.






NASA/JPL-Caltech/University of Arizona/Texas A&M University

Deux photos, prises à 4 jours d'intervalle, de deux tranchées creusées par la petite pelle équipant la sonde. Sur la première photo, on voit des traces blanches, qui pourraient être de la glace d'eau, de la glace carbonique, ou des sels. Mais sur la seconde photo, on note une légère diminution des dépôts blanc. Ceci exclu des sels. Il reste les glaces, d'eau ou carbonique. Mais la tempértaure maximum a été de - 26° C dans la journée. De la glace carbonique, dont la température de solidification est de -40°, se serait sublimée. La seule possibilité restante est la glace d'eau.

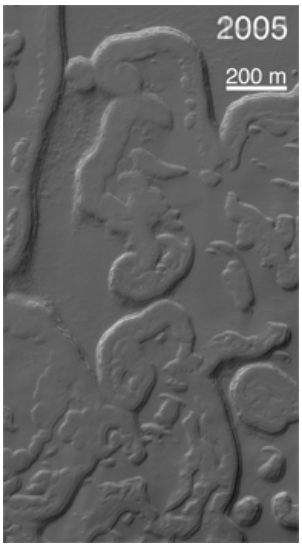


NASA/JPL/University of Arizona

Cette photo, faite par la sonde Phoenix elle-même, montre le sol situé au-dessous. Il faut se souvenir que la sonde s'est posée en utilisant des retro-fusées, qui ont soufflé un gaz chaud vers le sol. Et la tache blanche visible ici est probablement de la glace d'eau, débarrassée des poussières qui la recouvraient avant. Ces poussières ont été chassées par le souffle des fusées.

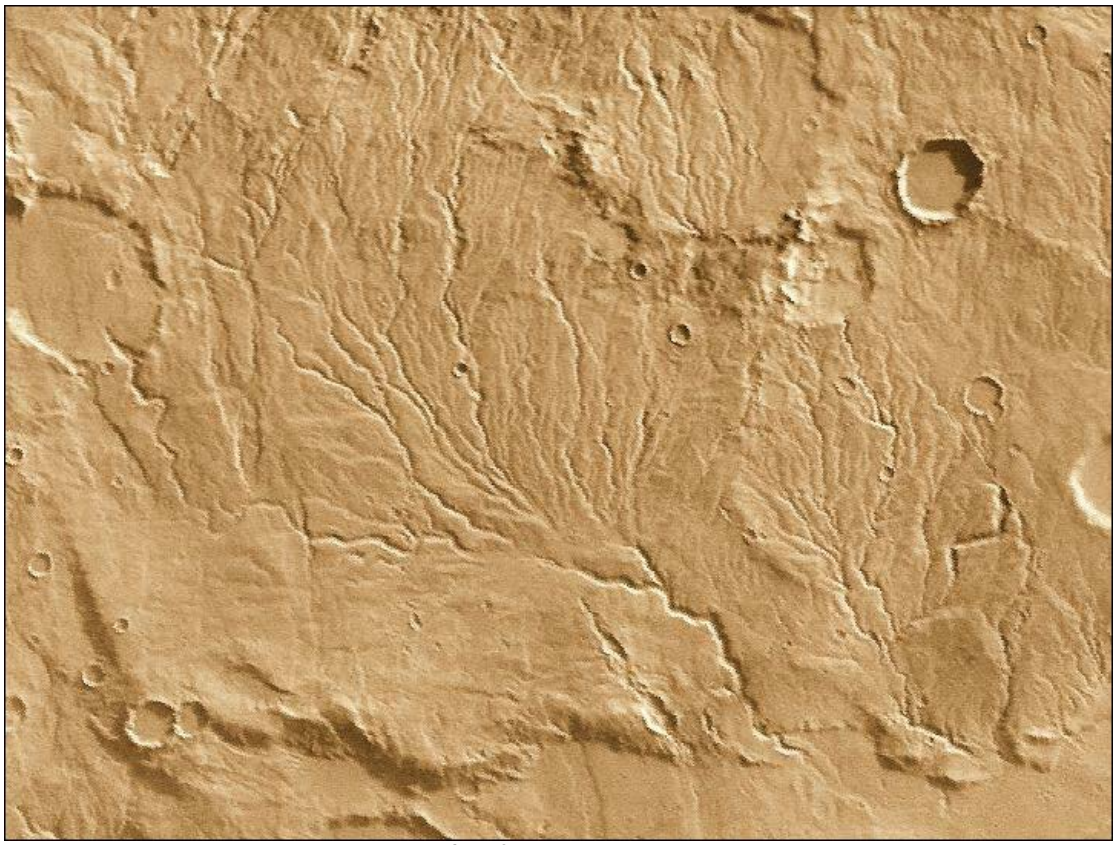
**MGS**

Mars Global Surveyor a pris des photos de Mars, dans les régions polaires, pendant plusieurs années. Les images d'une même région montrent des différences significatives de l'évolution des dépôts dans la zone résiduelle de la calotte polaire sud. L'animation ci-dessous le montre :



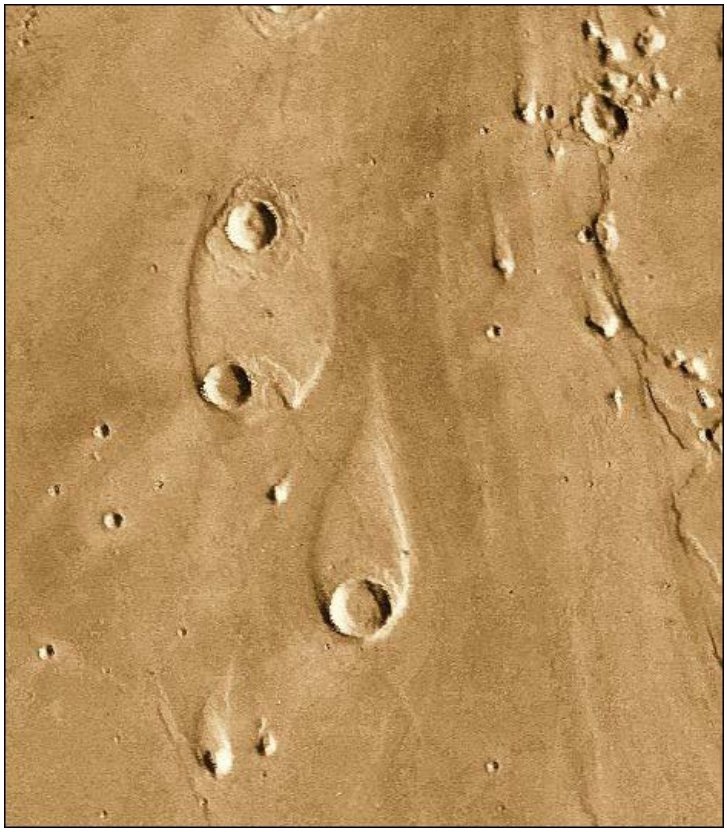

## *Géologie*

Les noms qui ont été donnés aux sites martiens sont en général très jolis : Syrtis Major, Chryse Planitia, Elysium, Utopia Planitia, Cydonia, Sinus Meridiani, Lunæ Lacus, Tharsis, Isidis Regio… Ces noms cachent des réalités géologiques variées.



Rivières fossiles photo Viking NASA

Les régions montrant des rivières fossiles sont associées à des terrrains cratérisés. Leur âge est donc d'au moins 4 milliards d'années. Donc, il y a eu de l'eau qui coulait avant cette époque, pas après.



Ecoulements photo Viking orbiter NASA/JPL

Embouchure d'Ares Vallis dans Chryse Planitia. Les deux zones fusiformes au centre de l'image sont en surélévation : le bord de celui du bas domine de 600 m, l'autre de 400 m. Ces formations ont été évidemment produites par un flot important venant du sud (en bas). On trouve des buttes semblables dans le fond des oueds sahariens.

Ces zones élevées ont été formées par les éjecta lors de la formation des cratères d'impact. On distingue les éjectas, autour des trois principaux cratères. Le plus au nord est intact, on voit parfaitement les éjectas en couronne tout autour. Il a été préservé de l'érosion par celui qui se trouve juste en dessous, qui a détourné le flot. Les deux autres ont conservé la partie nord de leurs éjectas, le sud ayant été emporté.

Autour des cratères, le sol a été décapé par un violent flot. Les terrasses visibles à doite montrent ce sol ancien.



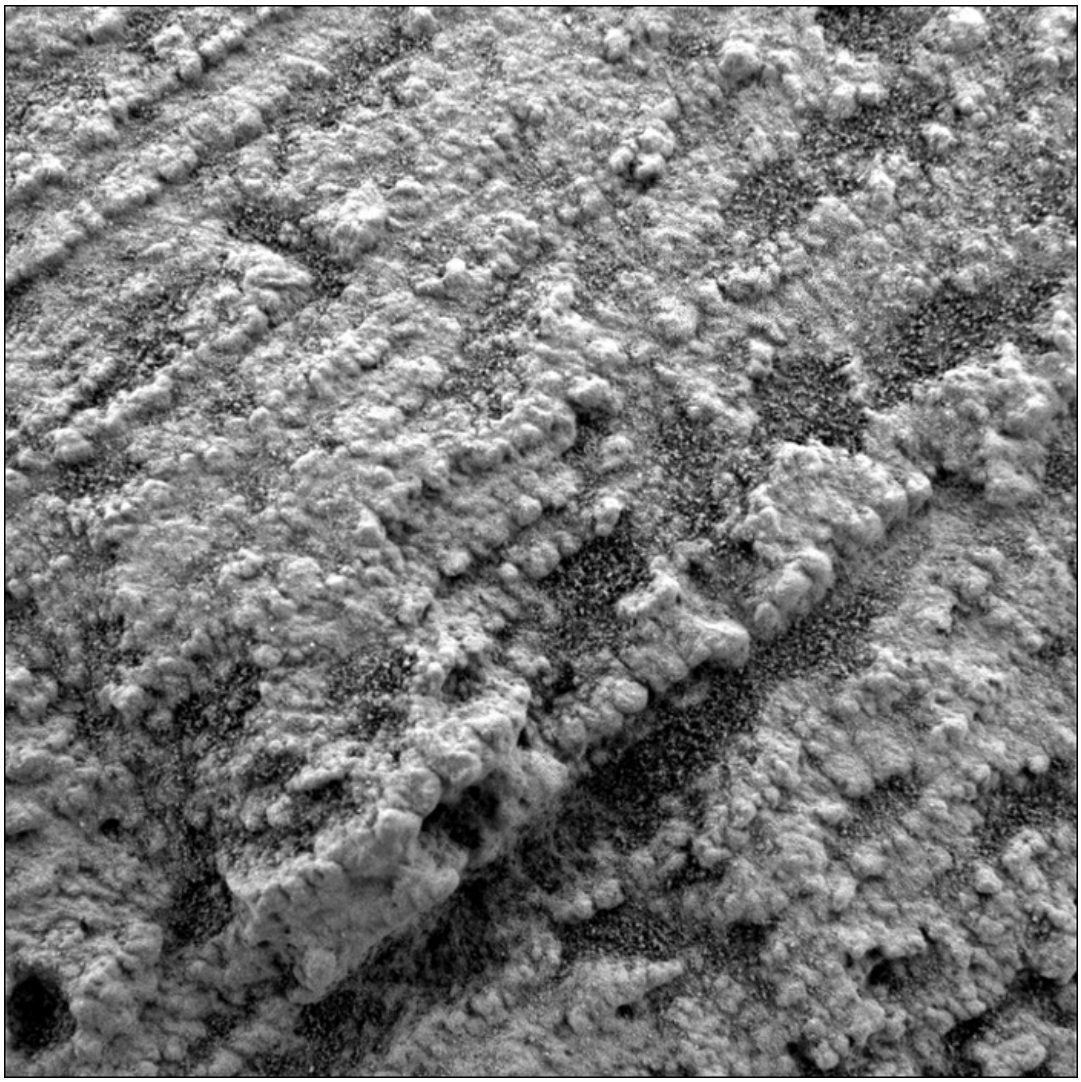
Paysage martien vu par Mars Pathfinder Twin Peeks photo Mars Pathfinder NASA



Rocky en train de *flairer* un rocher (Yogi) photo Mars Pathfinder NASA

La pièce ronde brillante qui se situe à l'avant du rover, contre le rocher, est le capteur permettant l'ananlyse de la roche. Il contient une petite source radioactive de Curium 244, qui est un émetteur de particules alpha. Celles-ci sont produites avec une énergie cinétique assez constante, et sont donc projetées contre la roche. Diverses réactions sont produites dans les atomes de la roche, qui vont réagir en émettant certaines radiations. Bien évidemment, les émissions sont quantifiées, et donc caractéristiques des atomes qui les produisent.

L'analyse du spectre des rayonnements émis par la roche après excitation permet de déterminer de quels atomes elle est constituée, et en quelles proportions. C'est ce qu'on appelle une *analyse élémentaire*. Connaissant les proportions de chaque élément chimique, des comparaisons avec les roches connues, terrestres, lunaires ou météoritiques, permettent de reconstruire la composition minéralogique de la roche. C'est ainsi que l'on connait la nature des roches martiennes.



Microphoto prise par Opportunity le 6 mars 2004 photo NASA/JPL/Cornell/USGS

Les grains que l'on voit sont de la taille d'un grain de sable moyen. On remarque la stratification parallèle de la roche. Les grains dans chaque strate sont de tailles assez voisines, alors qu'il y a une certaine variabilité entre les couches. Le diamètre des grains varie entre 0,3 et 0,8 mm.

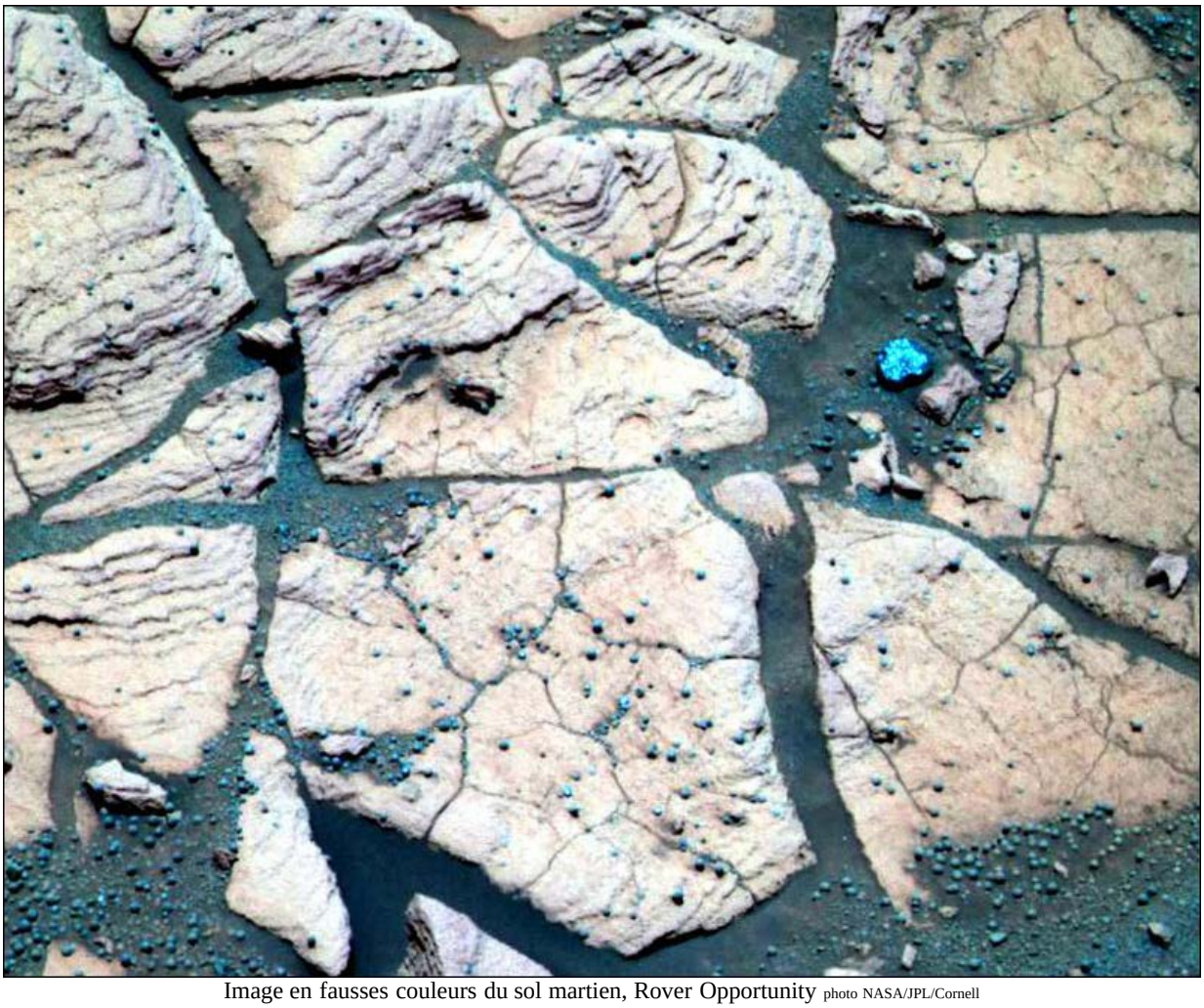
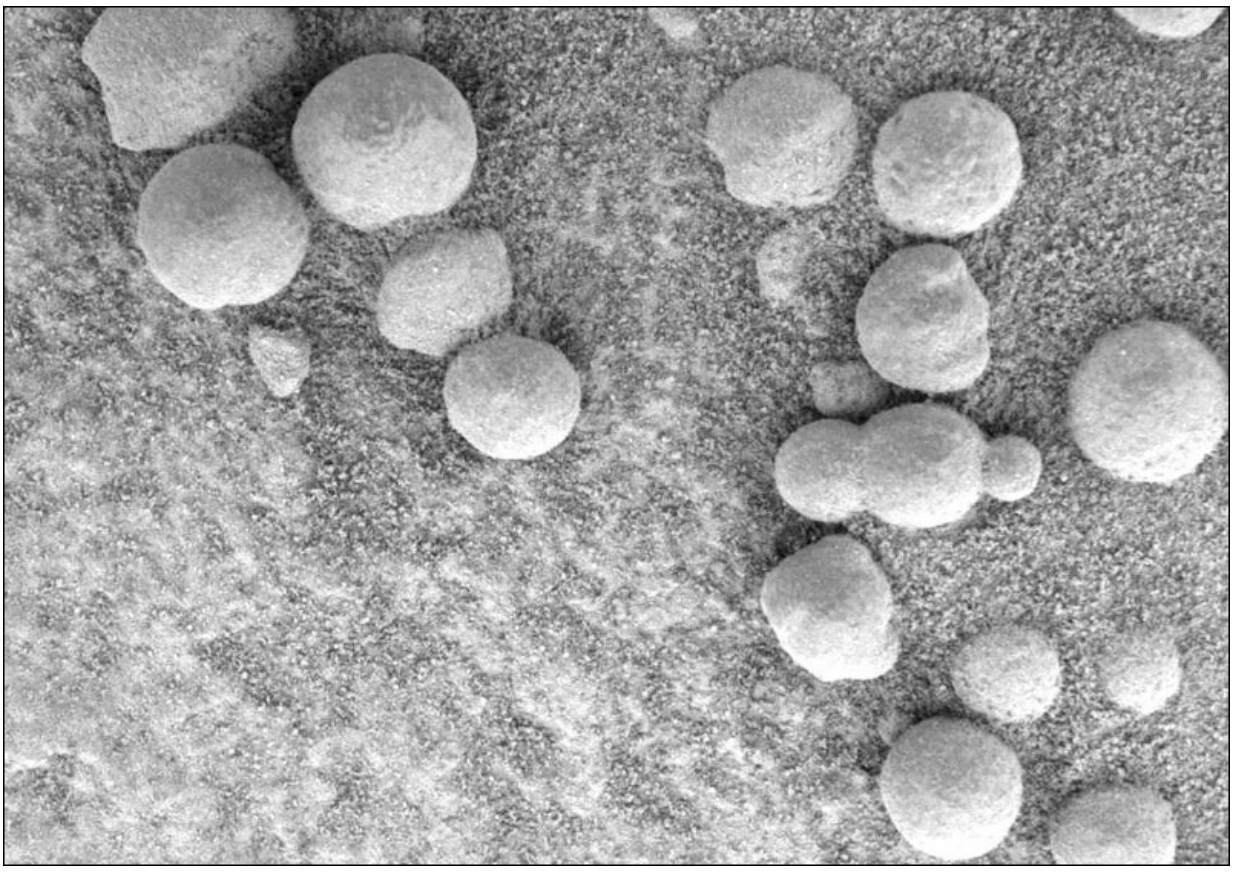


Image en fausses couleurs du sol martien, Rover Opportunity photo NASA/JPL/Cornell

On voit ici des rochers finement stratifiés. Les couches ont été ciselées par l'érosion, ce qui les met en évidence. Les grains tapissent le sol, à tous les niveaux de couches. Ceci montre qu'il s'agit de concrétions qui se sont formées dans des sédiment humides. Des sphérules volcaniques, ou d'impact, seraient localisées dans un seul niveau. L'image a été composée à l'aide des données provenant des filtres infrarouge, vert et violet. Ces grains ont été nommés *myrtilles*, en raison de leur formen de leur taille et de leur couleur. Ils sont constitués d'hématite.



Microphoto prise par le Rover Opportunity photo NASA/JPL/Cornell/USGS

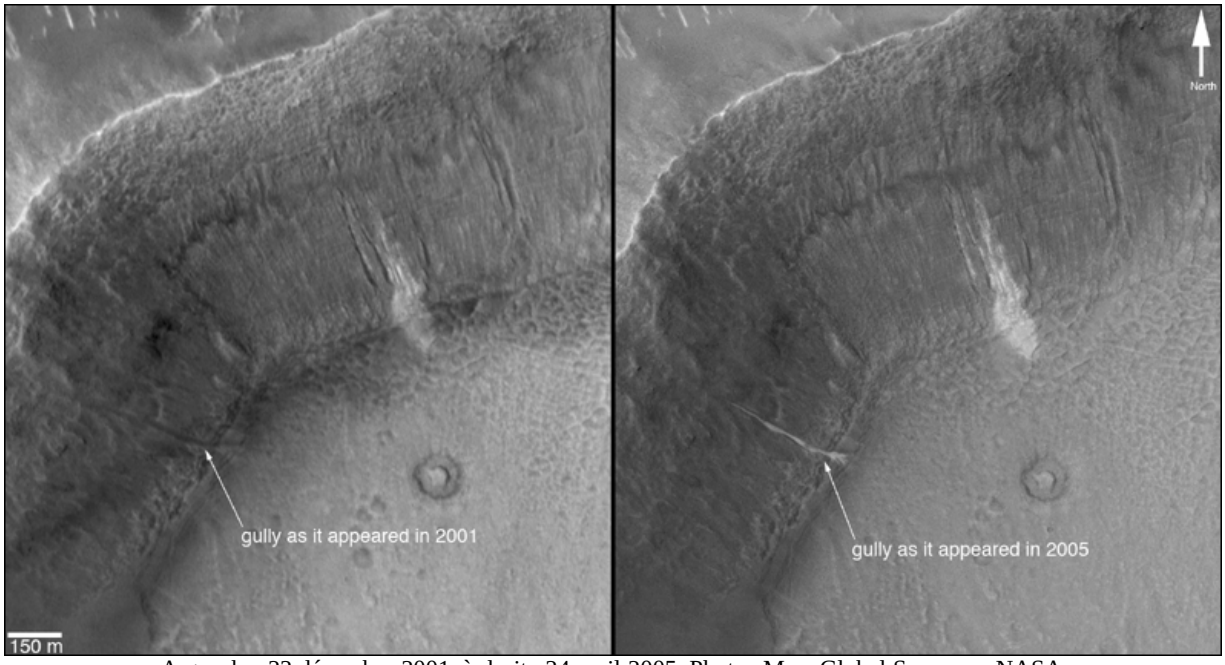
Cette image montre le centre d'une petite cuvette, dans laquelle sont accumulées de petites sphères. L'assemblage de trois d'entre elles, qui sont collées par un ciment naturel, semble indiquer qu'elles se sont formées dans un milieu humide.

**Magnétisme**

Il n'existe plus aujourd'hui de champ global, mais un champ rémanent dans la croûte du sud cratérisée. Ceci implique qu'il y avait un champ magnétique lorsqu'elle s'est formée. Par contre, on ne mesure aucun magnétisme dans les plaines du nord. Il avait donc déjà disparu avant leur remplissage.

**Mars vivante : l'érosion**

Il ne s'agit pas ici des petits hommes verts, mais de l'activité de la planète elle-même. Le sol est surveillé presque en permanence par des satellites placés autour de la planète, et on commence à obtenir des vues de bonne qualité d'un même lieu à quelques années d'intervalle. Ces vues montrent quelques exemples d'évolution, qui ressemblent à de l'érosion.

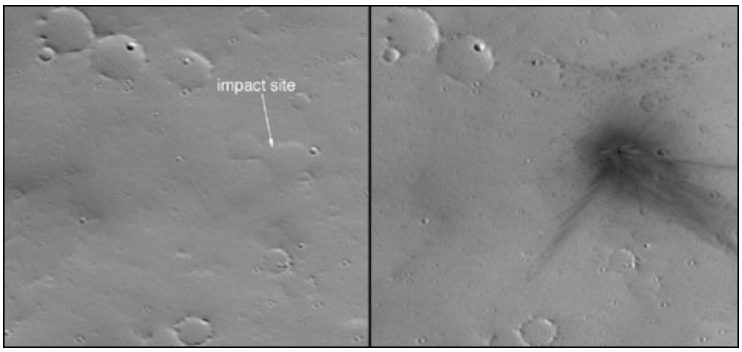



A gauche, 22 décembre 2001, à droite 24 avril 2005. Photos Mars Global Surveyor, NASA

Ces deux photos ont été prises sur la pente d'un cratère sans nom, situé dans Terra Sirenum à 36,6° sud, 161,8° ouest. La pente est de 25° à peu près. La rupture de pente au fond du cratère est assez brutale. Les photos ont été prises dans des conditions d'éclairement semblables, afin de ne pas confondre un écoulement avec un artefact.

Le chenal qu'on voit sur la photo de gauche, apparaissant en sombre, a été rempli par des matériaux qui ont raviné le long de la pente. L'image de droite montre un dépôt de faible épaisseur, car celle-ci n'est pas mesurable sur des photos de définition 1,5 m par pixel. On distingue des dépôts dans la pente, puis un élargissement lorsque le fond du cratère est atteint. La fluidité du liquide qui a coulé dans ce chenal est compatible avec un mélange de sédiments et d'eau liquide. La longueur de l'écoulement est de l'ordre de 300 mètres.

Apparemment, l'eau est apparue au milieu de la pente, jaillissant du sous-sol et entraînant des matériaux solides. Le chenal n'a pas été creusé par cet écoulement, il existait avant, mais a été réactivé. Ces photos prouvent l'existence d'une érosion encore active de nos jours sur Mars. D'autres couples de photos présentent également des écoulements.




Un nouvel impact sur Mars photo MGS, NASA

MGS a permi aussi de déterminer le taux actuel d'impacts sur Mars. On disposait d'une couverture photographique de 98 % de la planète en 1999, et MGS a rephotographié 30 % de la surface. Ceci a montré 20 nouveaux cratères d'impact, compris entre 2 et 148 mètres de diamètre. Le taux d'impact est donc élevé encore, et par conséquent les terrains qui présentent très peu de cratères doivent être vraiment très jeunes.

On constate donc que l'érosion est encore active sur Mars, sous trois formes :

- éolienne (tempêtes de sable, tornades…) ;
- aqueuse (chenaux remplis récemment) ;
- impacts.

**Hydrothermalisme**

L'étude des écoulements dans Dao Vallis semble indiquer un thermalisme ancien, qui aurait provoqué les écoulements. Photo de Mars Express

**Roches sédimentaires**

Photographiées dans le cratère Schiaparelli.

## *L'atmosphère*

La planète rouge est une petite planète, un peu plus grosse que la Lune (voir tableau). Circulant à 220 millions de km du Soleil, soit 220/150 = 1,5 fois plus loin que nous, elle reçoit $1,5^2 = 2,25$ fois moins d'énergie du Soleil (un peu moins de la moitié). L'application de la formule générale donne :

$$E_{Mars} = E_{Terre} \left( \frac{d_{Terre}}{d_{Mars}} \right)^2 = E_{Terre} \left( \frac{150}{220} \right)^2 = E_{Terre}\ 0,68^2 = 0,46\ E_{Terre}$$

On peut en déduire que la température à la surface sera relativement basse. Mais Mars possède une atmosphère, qui amorti un peu les variations de température. La masse de la planète étant faible, l'atmosphère ne doit pas être très dense. C'est bien le cas, elle est ténue et la pression au sol n'est que de 8 millibars, alors que sur Terre elle dépasse un peu 1.000 mb. Elle ne produit pas d'effet de serre notable ; la température moyenne est de -120 au pôle sud descendant parfois jusqu'à -140 , -50 en moyenne à l'équateur. A midi, à l'équateur, en été, on peut parfois atteindre des températures positives allant jusqu'à 20 .

L'atmosphère est essentiellement composée de gaz carbonique. Aux pôles, il fait tellement froid que l'atmosphère gèle, et se dépose sous forme de neige carbonique ! Lorsque le printemps revient, la calotte se sublime et le gaz carbonique est recyclé dans l'atmosphère. Il se passe parfois un phénomène analogue sur Terre : la vapeur d'eau est un constituant de notre atmosphère, et le brouillard givrant n'est rien d'autre que le gel d'une partie de celle-ci ! L'atmosphère de Mars contient 95,6 % de $CO_2$, 2,7 % d'azote, 1,6 % d'argon, des traces d'oxygène (0,13 %) et d'eau (0,03 %).

Le rapport entre le gaz carbonique et l'azote (96/3) est caractéristique. Il est le même sur Vénus, et il a été le même probablement sur Terre après sa formation. Si on considère la quantité de $N_2$ dans notre atmosphère, et la multiplie par 96/3 on obtient la quantité de $CO_2$ qu'il devait y avoir dans notre atmosphère après dégasage. Si on attaque les calcaires par un acide, on obtient une quantité de $CO_2$ du même ordre. Le fait que le $CO_2$ ait disparu seul (l'azote est resté) sur Terre prouve que c'est un mécanisme chimique qui l'a détruit. Par contre, la conservation de ce rapport sur Mars montre que l'atmosphère a disparu par un processus physique, indépendant des propriétés des gaz.

La pression indiquée plus haut de 8 mb est en fait variable, car lorsque l'atmosphère gèle, la pression diminue forcément. La sonde américaine Viking 1 a observé des variations entre 6,8 et 9,0 mb ; Viking 2 entre 7,3 et 10,8 mb. L'atmosphère étant légère, l'inertie thermique est faible, et on constate de brusques écarts de température (un peu comme dans les déserts terrestres, où la quantité de vapeur d'eau est très faible).

Bien qu'il n'y ait que très peu d'eau dans l'air, celle-ci arrive parfois à former des nuages et des brumes dans les vallées, qui ont été observés par les sondes martiennes. Sur le site de Viking 2, il se dépose du givre en hiver. Mais en règle générale, il fait beau temps.

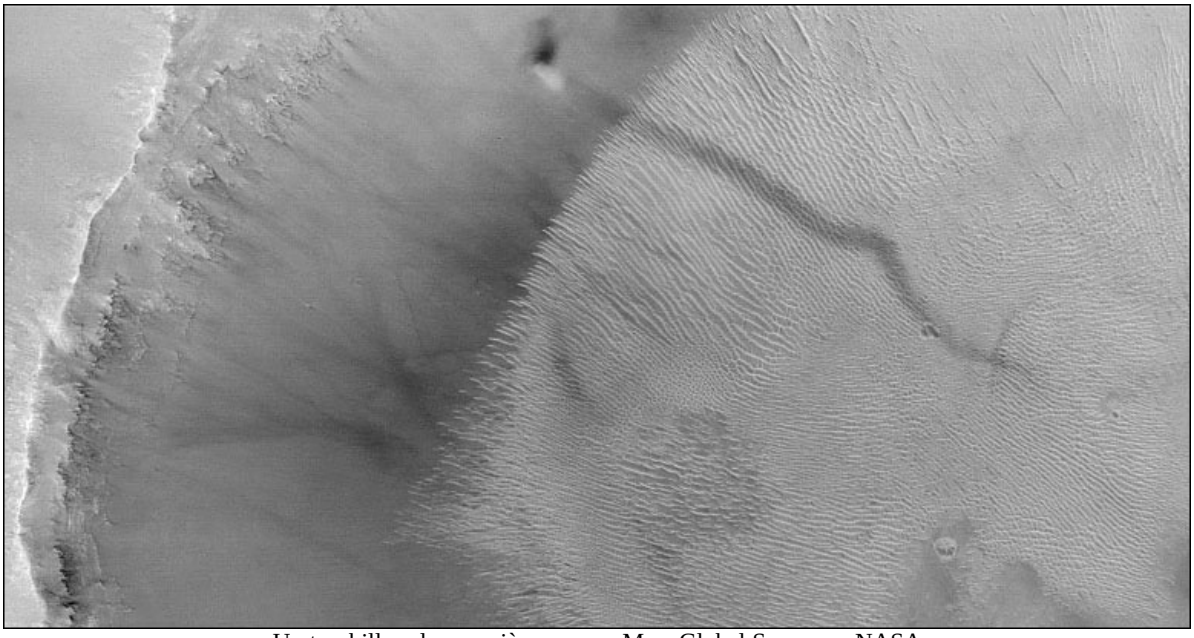
Les variations de température à la surface de Mars produisent des effets semblables à ceux qu'on observe sur Terre dans les régions désertiques : des tornades se forment et soulèvent la poussière. Certaines ont été observées par la sonde américaine Mars Pathfinder : la sonde a même été balayée par une tornade, sans dommages grâce à la légèreté de l'air.



Tourbillons de poussière sur le site de Mars Pathfinder. Il y en a deux sur cette photo, qui a été traitée pour les rendre mieux visibles !

Le premier se trouve au-dessus du sommet de gauche à l'horizon, le second est à droite de l'image. On distingue seulement un léger obscurcissement de l'atmosphère, produit par les poussières en suspension dans le tourbillon.

Photo Mars Pathfinder, NASA



Un tourbillon de poussières vu par Mars Global Surveyor, NASA

On distingue sur cette photo trois éléments :

- le tourbillon de poussière lui-même, qui apparaît en clair et forme une petite forme allongée tout en haut de la photo ;
- l'ombre du tourbillon, au même endroit, mais en sombre et dirigée vers le haut ;
- la trace du tourbillon sur le sol, qui est la longue traînée plus sombre s'étendant sur une grande distance, celle parcourue par le tourbillon depuis sa formation.

Le tourbillon se forme comme sur Terre, lorsque le sol est surchauffé. L'air chaud, de moindre densité, a tendance à s'élever. Si un point du sol est un peu plus chaud que les environs, l'air va converger vers ce point. Alors, provenant de toutes les directions, il va se mettre à tourner (entraîné par la force de Coriolis). Etant plus chaud, il va aussi s'élever, et le tourbillon se forme. Ensuite, le vent local va le pousser un peu plus loin. Passant sur des sites encore très chauds, il se renforce et s'accélère. Le vent, au pied du tourbillon, est très fort, et entraîne la poussière qui recouvre le sol. C'est cette poussière qui va faire de l'ombre, et rend le tourbillon visible depuis l'espace.

Des tourbillons de poussière sont passés sur la sonde Mars Pathfinder, sans l'endommager. Mais une analogie avec les tourbillons terrestres peut faire craindre des difficultés pour les futures sondes : sur Terre, on a mesuré des champs électriques de 10.000 volts par mètre dans les tourbillons ! Si c'est la même chose sur Mars, l'électronique d'une sonde pourrait être détruite par le passage d'un tel phénomène.

La hauteur est une différence essentielle entre les tourbillons terrestres et les tourbillons martiens : sur Terre, dans les déserts, ils atteignent au maximum quelques centaines de mètres de hauteur, alors que sur Mars ils montent jusqu'à 8.000 mètres. Ces tourbillons sont des phénomènes locaux.

**Saisons**

Mars présente des saisons très marquées, pour deux raisons :

- son axe est incliné de 25° (presque comme celui de la Terre : 23° 26' ; chez nous, l'inclinaison est responsable des variations climatiques saisonnières).
- l'orbite présente une forte excentricité, contrairement à celle de la Terre. Il s'ensuit une variation importante de la distance Mars-Soleil, et donc de l'énergie reçue par la planète. Les variations d'ensoleillement atteignent 20 %. Ces écarts expliquent probablement, en partie au moins, les tempêtes de poussières.

Les saisons très marquées de Mars ont une conséquence dramatique : sur Terre, il neige ; la neige est produite par le gel de la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère. Mais l'atmosphère de la Terre n'est pas constituée de vapeur d'eau, elle en contient une petite partie (petite par rapport à la pression de l'atmosphère). Sur Mars, il n'y a pratiquement pas d'eau, donc pas de neige au sens ou nous l'entendons. Mais c'est le gaz carbonique qui gèle. Or il est le constituant majeur de l'atmosphère !… C'est donc carrément l'atmosphère qui gèle l'hiver. Ainsi, plusieurs mètres de neige carbonique se déposent à la surface de la calotte côté hiver, correspondant à une baisse de pression globale de 25 %.

**Tempêtes de poussières**

On observe de mini tempêtes quotidiennes. La sécheresse de l'air provoque de brusque variations de température, plus contrastées encore que dans les déserts terrestres. Des poussières sont soulevées par les vents, malgré la très faible densité de l'atmosphère. Quelques tempêtes plus importantes se produisent, avec une fréquence plus faible : quelques dizaines par an atteignent la dimension régionale, plusieurs milliers de kilomètres d'extension. Les plus grandes tempêtes sont globales, et peuvent durer plusieurs mois. Dans ces conditions, il est impossible d'observer la surface de la planète, entièrement recouverte de poussières en suspension dans l'air.

Dans l'hémisphère nord, le printemps et l'été constituent une saison calme, sans tempêtes. L'automne et l'hiver sont au contraire agités, avec les grandes tempêtes globales. Pendant le printemps et l'été, les observations permettent maintenant de constater que les tempêtes sont locales, faibles, et relativement répétitives d'une année à l'autre. Par contre, les grands événements sont très variables dans le temps, et donc imprédictibles.

Une ou deux fois par année martienne, des tempêtes se produisent. Elles débutent par un renforcement des vents, qui soulèvent des poussières.

Celles-ci absorbent une partie du rayonnement solaire, ce qui a pour effet d'échauffer l'atmosphère et de renforcer la tempête. La planète est alors recouverte de poussières. Au bout de quelques semaines, le vent cesse et la poussière retombe. Ce phénomène provoque une érosion éolienne, et un brassage des éléments légers de surface. C'est pourquoi la totalité de la planète est recouverte de la même poussière ocre.

A l'arrivée de la sonde Viking, une tempête de poussières s'est déclenchée, et la sonde n'a absolument rien vu ! Les photos montraient une surface absolument uniforme, qui représentait la partie supérieure des nuages de poussières. De telles tempêtes se déclenchent sur Terre, à une échelle bien plus modeste, dans le Sahara. Ce sont les vents de sable, qui soulèvent à quelques dizaines de centimètres, voire quelques mètres, les particules de sable à proprement parler. Elles retombent aussitôt, car leur poids les entraîne très vite vers le sol. Par contre, le sable contient aussi de très fines poussières, micrométriques, qui sont entraînées jusqu'à la stratosphère. Elles y restent longtemps, assez pour être entraînées par les vents et retomber dans les cristaux de neige en Europe. Une partie de ces poussières arrive même jusqu'en Amérique. Cette analogie aide à comprendre ce qui se passe sur Mars.

**PathFinder**

Le ciel de Mars est rose pale, comme nous le montrent les photos prises au sol par les atterisseurs Viking, Mars Pathfinder, et maintenant les expériences Spirit et Oportunity. Par contre, les couchers de soleil virent au bleu !

La couleur rose est due à la présence de poussières très fines en suspension dans l'atmosphère. Sur notre Terre, dans le Sahara, il y a des vents de sables qui expédient la fine poussière dans la stratosphère. Elle y stagne assez longtemps, jusqu'à plusieurs semaines. Elle est entraînée par les vents, et donne les pluies roses que l'on constate de plus en plus souvent dans le midi de la France. Il se passe le même phénomène sur Mars, les tempêtes de poussières sont régulières et alimentent la stratosphère en particules. Ces particules contenant beaucoup de fer, comme le sol d'où elles viennent, sont de couleur rose et leur densité importante arrive à colorer le ciel.

Par contre, au coucher du soleil, l'épaisseur d'atmosphère traversée est beaucoup plus importante, et la plus grande diffusion de la lumière, qui colore le ciel en rouge chez nous, le colore en bleu là-bas.

Le froid en hiver est tel que 20 à 30 % de l'atmosphère gèle, formant une épaisse couche de neige carbonique sur la calotte polaire !

Les températures matinales variaient rapidement avec la hauteur au-dessus du sol : des capteurs situés sur un mât de la sonde, à 25 cm, 50 cm et 1 mètre au-dessus de la sonde donnaient des résultats différents : celle mesurée au sommet du mât étant 20° plus froide que celle de la base ! Ceci montre que l'air froid de la nuit est progressivement chauffé au contact du sol, qui absorbe l'énergie venue du Soleil. Il n'y a pas de tel phénomène sur Terre.

La sonde n'a pas mesuré de phénomène semblable l'après-midi. Par contre, elle a mesuré de très brusques chutes de pression, dues à des tourbillons de poussière qui l'ont traversée. Ces tourbillons pourraient être de grands pourvoyeurs de poussières dans l'atmosphère.

Les vents mesurés soufflaient à moins de 36 km/h.

La nomenclature des sites géologiques de Mars (mons, patera, sinus…) a été proposée par Eugenio Antoniadi en 1930. C'est celle qui est toujours usitée

## *L'eau*

Après sa formation, Mars a eu une atmosphère beaucoup plus dense, et beaucoup plus d'eau. En observant les photos du sol, on distingue en certains endroits des vallées d'érosion, sinueuses. Ailleurs, on voit des buttes de forme oblongue, rondes à une extrémité et pointues à l'autre, qui ont été formées par un écoulement d'eau autour d'elles. C'est un de ces sites qui a été choisi pour l'atterrissage de Mars Pathfinder, au bord de Chryse Planitia (en espèrant que le flot aura charrié des matériaux des régions élevées environnantes).

La recherche de l'eau sur Mars est l'un des buts essentiels des sondes actuelles. Les américains ont ainsi montré qu'il y avait de l'eau dans les calolttes polaires, et en recherchent ailleurs.

On pense qu'il puisse y en avoir dans le sous-sol, sous forme de pergélisol (boue gelée). Mais le radar Marsis de la sonde européenne Mars Express ne semble pas en trouver. Il a balayé la calotte polaire nord, dont il a bien vu la glace, ainsi que le socle. Cette observation valide son fonctionnement. S'il y avait du pergélisol, il devrait y en avoir autour de la calotte. Or Marsis n'en a pas trouvé. La possibilité de trouver de l'eau, en grandes quantités, dans le sous-sol, semble s'éloigner.

Pour rechercher de l'eau, il y a un autre moyen : rechercher des minéraux qui ne se forment qu'en sa présence. Les américains ont trouvé de l'hématite, mais celle-ci peut parfois se former sans eau. La sonde Mars Express (instrument OMEGA), a montré la présence de sulfates en certains endroits de la planète. Mais pas où on les aurait attendus. Loin de se trouver dans les lits de rivière, ils sont sur les pentes de Marwth Vallis (à côté d'Ares Vallis). La recherche de sédiment serait peut-être plus profitable dans ces zones. Comment se fait-il que les sulfates, qui se forment dans l'eau, soient perchés ? La réponse est peut-être qu'ils ont été lessivés dans les parties basses, et entraînés plus loin dans la plaine, où ils sont dispersés ; ne subsistent que ceux qui étaient au-dessus du ravinement. Le ravinement par des oueds violents a sans doute emporté tous les sels dans le fond des rivières.

OMEGA a montré par ailleurs que les parties rouges de la planète sont couvertes d'oxydes ferriques, non hydratés. Ces terrains datent de 3,5 milliards d'années. Donc pas d'eau depuis. Le rouge est constitué d'oxydes ferriques anhydres, produits par interaction avec l'atmosphère peroxydante. C'est un processus très peu efficace, très lent, qui s'est étalé sur des milliards d'années.

**OMEGA a détecté des minéraux hydratés**, sulfates et argiles.

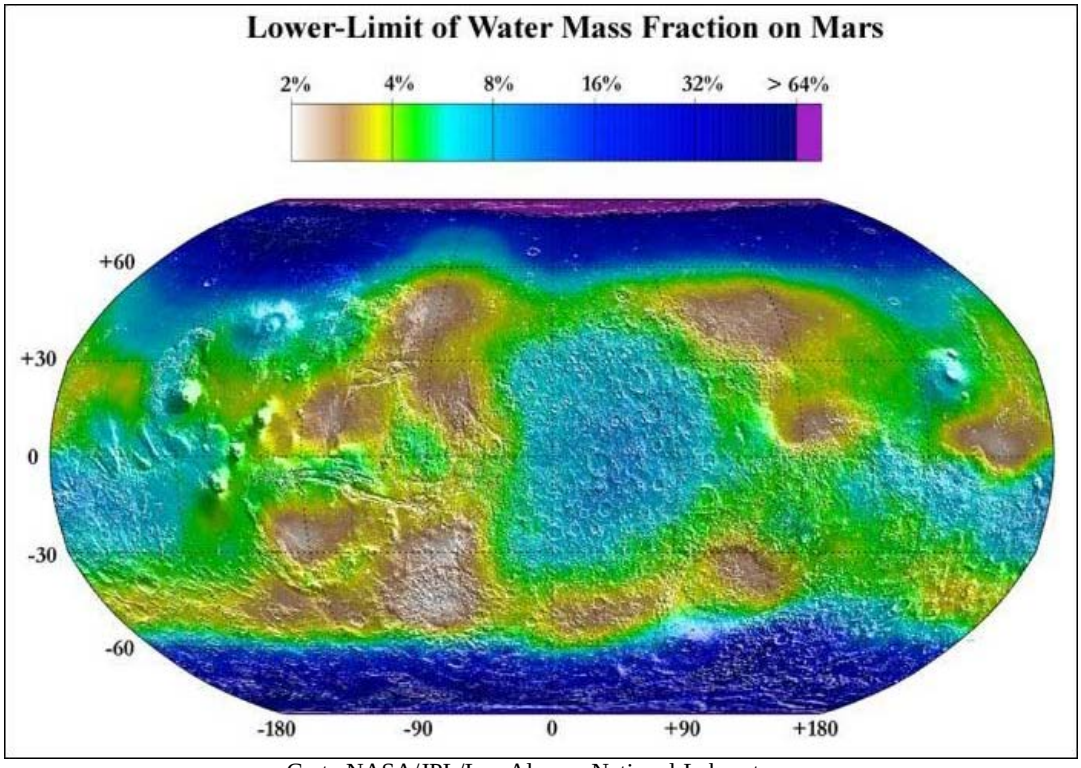
Les sulfates se trouvent dans :

- dépôts stratifiés de Valles Marineris ;
- Terra Meridiani (Opportunity) ;

- dunes sombres de la calotte polaire nord.

On trouve des oxydes ferriques anhydres, des sulfates hydratés, et des phylosilicates.

Dans Valles Marineris, il existe du gypse hydraté, idem dans Candor Chasma.




Carte NASA/JPL/Los Alamos National Laboratory

Les couleurs indiquent la concentration en eau des terrains dans le premier mètre sous la surface. La sonde s'est posée au nord d'Alba Patera, qui se distingue nettement. Elle est dans des terrains où la concentration en eau est comprise entre 30 et 60 %. La présence d'eau en abondance dans le sol de Mars est connue depuis déjà longtemps.



Image prise par la caméra à haute résolution de la sonde Mars Express. Elle montre une surface morphologiquement semblable à une banquise fracturée par des mouvements de houle. Le sol de cette région pourrait bien être constitué de glaces qui se seraient gelées à la surface d'une mer, la température baissant. La glace a ensuite été recouverte de poussières lors des grandes tempêtes qui secouent régulièrement la planète aujourd'hui.

Le problème que pose cette interprétation est celui de la stabilité de la glace. Dans les conditions de pression actuelle, la glace pourrait se sublimer. Mais la couche de poussières volcaniques la protégerait et la stabiliserait. Toutefois, on peut envisager que la glace se soit effectivement sublimée, et que les plateaux restant ne seraient que les restes du processus. Mais cette idée ne résiste pas à une analyse simple : tout d'abord, les cratères sont peu profonds, ils le seraient davantage si la glace en avait disparu ; ensuite, si les plaques ne contennaient plus de glace, lors de la sublimation, des mouvements se seraient produits, qui auraient modifié l'inclinaison de la surface. Or il est visible que ces plaques sont bien horizontales

La photo montre peu de cratères, indiquant un âge très faible pour cette région, évalué à moins de 5 millions d'années.

La zone photographiée mesure quelques dizaines de kilomètres. Elle se trouve dans la plaine Elysium Planitia (5° N 150° E).

**Les carbonates**

Jusqu'ici, on a donc trouvé des sulfates, mais pas de carbonates (presque pas). Or sur Terre, il y en a en abondance : les collines de Provence par exemple en sont constituées. Ces carbonates terrestres proviennent de la précipitation de sels formés dans l'eau avec l'acide carbonique (gaz carbonique dissous). Puisque l'atmosphère de Mars contenait beaucoup de gaz carbonique à l'époque de sa formation, et qu'il y a eu de l'eau liquide à la surface, pourquoi n'y a-t-il pas de carbonates ? La réponse est peut-être dans l'activité volcanique, que l'on n'avait pas considérée suffisamment juqu'à maintenant. Si le taux de dioxyde de soufre $SO_2$ est assez élevé, il peut produire dans l'eau de l'acide sulfurique, plus fort que l'acide carbonique, et former des sulfates préférentiellement.

Sur Terre, ce mécanisme semble avoir joué aussi, car les carbonates sont rares dans les roches anciennes, datées de l'Hadéen. Ce n'est que lorsque les volcans ont diminué leur activité, laissant baisser le taux de dioxyde de soufre, que les carbonates ont pu se former à leur tour. Mars n'a pas eu le temps de réaliser cette reconversion, l'atmosphère légère ayant fait disparaître l'eau avant.

**Les robots MER, Spirit et Opportunity**

MER signifie *Mars Exploration Rover*. Deux exemplaires se sont posés sur Mars, enveloppés d'air-bags amortisseurs, dont ils se sont rapidement débarrassés pour rouler librement sur la planète. *Spirit* a atterri dans le cratère Gusev, situé près de l'équateur entre les vieux terrains élevés du sud, et les vastes plaines basses du nord. Il est de plus sur le trajet de la vallée *Ma'adim Vallis*, qui a drainé des écoulements depuis les hauteurs, et devrait donc être géologiquement très interessant. L'autre rover, *Opportunity*, s'est posé le 25 janvier 2004 dans *Terra Meridiani*, également dans la zone équatoriale.

Les deux rovers sont destinés à l'étude géologique du sol de Mars, et le choix de la zone équatoriale se justifie par la dichotomie entre les deux hémisphères, les terres hautes du nord provoquant des écoulements de sédiments vers les plaines basses du nord. Alors, ces sédiments se déposent tout naturellement à la limite des deux zones, là où les écoulements se calment. Sur une surface réduite, il est donc possible de trouver des roches provenant de régions relativement lointaines, accumulées par les crues. Le but profond de ces sondes est la recherche des traces de l'eau à la surface dans le passé martien, dans les effets qu'elle a eu sur l'apparence des roches, sur leur composition chimique.

**Spirit**

Spirit s'est posé le 3 janvier 2004 dans le cratère Gusev. Il s'est enlisé dans des sables en janvier 2010, et la NASA a renoncé à le récupérer. Le contact radio a été perdu le 22 mars 2010. Ce rover a fonctionné 2.158 sols (jours martiens), au lieu des 90 prévus… et a parcouru près de 8 km sur la planète.

**Opportunity**

Posé près du cratère *Eagle*, Opportunity a pris la direction du sud, en direction du cratère *Victoria* qu'il a analysé depuis le rempart, puis de l'intérieur. Il est ensuite ressorti du cratère, pour poursuivre sa route toujours cap au sud, en direction du cratère *Endeavour* qu'il a atteint le 9 août 2011.

Dès son atterrissage, le robot nous a transmis une photo extrêmement intéressante, car pour la pemière fois on voyait un affleurement de roches du sous-sol martien, et non un éparpillement de cailloux.

## *Les satellites*

Mars possède deux satellites, Phobos (la crainte) et Deïmos (l'épouvante).

**Troyens de Mars**

Les Troyens sont des astéroïdes situés aux points de Lagrange L4 ou L5. Pour une explication du nom, voir le chapitre concernant Jupiter, le nom des Troyens venant de cette planète.

Après avoir donc trouvé des astéroïdes troyens de Jupiter, on a observé quelques troyens de Mars. Le plus important est 5261 Eureka, qui a été découvert en 1990 au point L5, c'est-à-dire sur la même orbite que Mars, mais en retard de 60° par rapport à la planète.

## *La vie ?*

Si Mars est sèche en surface, on suppose qu'il puisse rester de l'eau dans le sous-sol, sous forme de pergélisol (de la boue gelée). Ceci sera à vérifier par une analyse du sol *in situ*, travail d'une future mission martienne.

Les sondes Viking, qui se sont posées sur Mars, ont fait des prélèvements de sol, et les ont analysés automatiquement. Le résultat est négatif, avec toutefois un doute, qui a été levé depuis : sur 5 expériences destinées à trouver de la vie, 4 ont donné un résultat franchement négatif, mais la cinquième était douteuse ; elle montrait un dégagement gazeux qui pouvait s'interpréter comme une manifestation d'une vie microbienne. Depuis, la connaissance du sol martien a progressé, et la chimie en est maintenant assez bien connue. Les composés de fer qui donnent à Mars sa couleur rouge expliquent, par des phénomènes de chimie minérale ordinaire, le dégagement gazeux observé par Viking. Donc jusqu'à nouvel ordre, il n'y a pas de vie observée sur Mars.

Toutefois, on ne désespère pas, car la biologie a aussi beaucoup progressé sur Terre, et l'exploration de notre planète aussi. On a récemment découvert de la vie dans les océans, sur les dorsales (montagnes sous-marines qui partagent par exemple l'océan Atlantique en deux dans le sens nord-sud, par lesquelles l'océan se forme suite à la dérive des continents) à 3.000 m de profondeur, là où pas le moindre photon de lumière solaire ne peut parvenir. Il n'y a donc pas de photosynthèse. Or toute la vie que l'on connaissait sur Terre était basée là-dessus pour la fourniture d'énergie : les plantes directement, les herbivores en mangeant les plantes, et les carnivores en mangeant les herbivores. La vie sur les dorsales se confine autour de sources hydrothermales, qui jaillissent à 300 , et dont les eaux sont chargées de soufre ! La vie s'est développée et organisée pour tirer son énergie du soufre… Bien que basée sur le carbone comme nous, il s'agit d'une forme de vie très différente de ce que l'on connaissait, et de ce que l'on imaginait.

D'autre part, l'exploration de l'Antarctique ayant progressé aussi, on y a découvert des vallées très sèches (car il n'y neige presque jamais) et froides (ça, on s'en doutait…). La surprise a été de trouver là de la vie, sous forme de bactéries bien sûr mais tout de même… Or ce sont là des conditions voisines de celles qui règnent sur Mars.

On réunit tous ces organismes sous le vocable très parlant *d'extrémophiles* (qui aiment l'extrême).Ce sont ceux qui vivent dans un environnement difficile à cause de :

- la température (basse dans l'Antarctique, ou élevée dans les déserts chauds) ;
- la pression faible ou élevée (élevée sur Terre, dans les fonds océaniques) ;
- les conditions chimiques (milieu acide près des souffleurs océaniques) ;
- l'absence d'eau (vallées sèches de l'Antarctique).

On constate que certains milieux terrestres (Antarctique, océans) peuvent combiner plusieurs de ces difficultés. Il en sera de même sur Mars.

Avec ces analogies, on peut donc imaginer que des processus biologiques se soient développés sur Mars, malgré les conditions climatiques.

Enfin, on a trouvé dans l'espace de nombreuses molécules qu'on croyait caractéristiques de la vie : acide formique, formaldéhyde, hydrazine, acétylène, acide cyanhydrique… Ces molécules ont été trouvées dans des comètes, dans des astéroïdes, et même dans des nuages de gaz très loin dans notre galaxie. Puisque les briques de la vie semblent exister un peu partout, pourquoi n'auraient-elles pas construit une vie ailleurs que sur Terre ?

Actuellement, donc, plus rien n'interdit de penser que la vie puisse exister ailleurs, mais restons scientifiques : tant qu'on ne l'a pas effectivement observée, on ne peut rien affirmer.

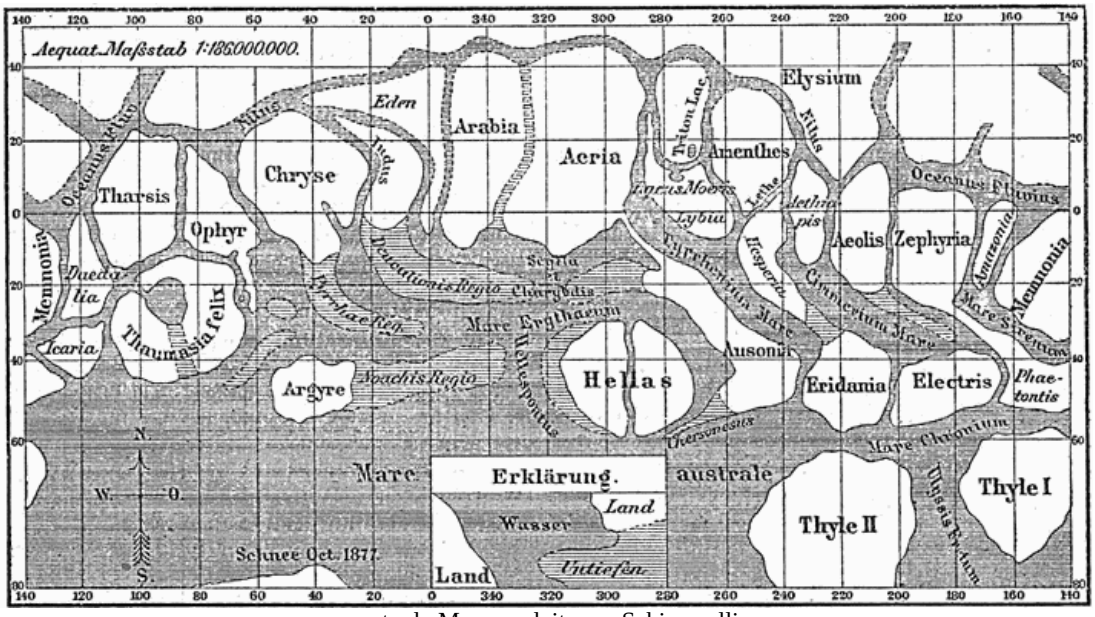
Puisque la vie sous forme de plantes n'existe pas sur Mars, il reste à expliquer les variations saisonnières de couleur qu'on a mentionnées plus haut. Les sondes ont montré que ce sont les tempêtes de poussières qui en sont responsables. Ces tempêtes voilent parfois une grande partie de la planète. Elles sont provoquées par des transferts d'énergie entre les hémisphères, comme ce qui se passe ici pour équilibrer les températures entre l'équateur et les pôles.

A la suite de ces observations, on a commencé à s'intéresser à la climatologie des planètes, et maintenant l'étude de leurs atmosphères prend une grande importance en astronomie. Elle peut de plus avoir des retombées pour notre vie quotidienne, car en disposant de plusieurs atmosphères à étudier, on peut obtenir des lois plus générales, et perfectionner de ce fait notre connaissance de l'atmosphère terrestre, avec des conséquences sur la prévision météorologique (ceci intéresse au plus haut point les astronomes observateurs…).

La recherche de la vie sur Mars est très active actuellement. Mais elle prend une forme un peu différente. La question principale est : la divergence d'évolution entre la Terre et Mars s'est-elle produite *avant* ou *après* l'apparition de la vie sur Mars ? Si la réponse est *avant*, les conditions seront devenues impropres à l'apparition de la vie.

**Les petits hommes verts**

L'histoire commence dès les premières observations de Mars à l'aide d'une lunette. Mais la très mauvaise qualité de celles-ci a laissé libre cours à l'imagination des observateurs, qui devinaient ce qu'il ne parvenaient pas à voir vraiment ! (Il ne faut pas trop en rire, car à l'heure actuelle aussi nos moyens d'investigation ont des limites, et lorsqu'on les atteint, on est exactement dans la même situation…). Les premiers ont donc vu des structures linéaires sur Mars. Mais c'est le grand astronome italien Schiaparelli qui a donné le véritable coup d'envoi de la course aux canaux. Il a vu sur Mars des lignes droites, qui constituaient un réseau. En italien, il les a nommés *canali*. Le mot italien *canale* désigne, selon le contexte, un canal creusé de main d'homme, ou un chenal naturel. Une mauvaise traduction, ignorant le second dens, en a fait des canaux creusés par des être intelligents. Ajoutant à ça les changements de couleur de la planète au fil des saisons, il était facile d'imaginer qu'il y avait une végétation sur Mars, et que les lignes droites étaient des canaux d'irrigation creusés par des Martiens.



carte de Mars produite par Schiaparelli

Dès que Schiaparelli a vu ça, d'autres l'ont vu aussi, et en ont rajouté. C'était à qui verrait le plus de canaux… On en était presque à dire la couleur des yeux des Martiens.

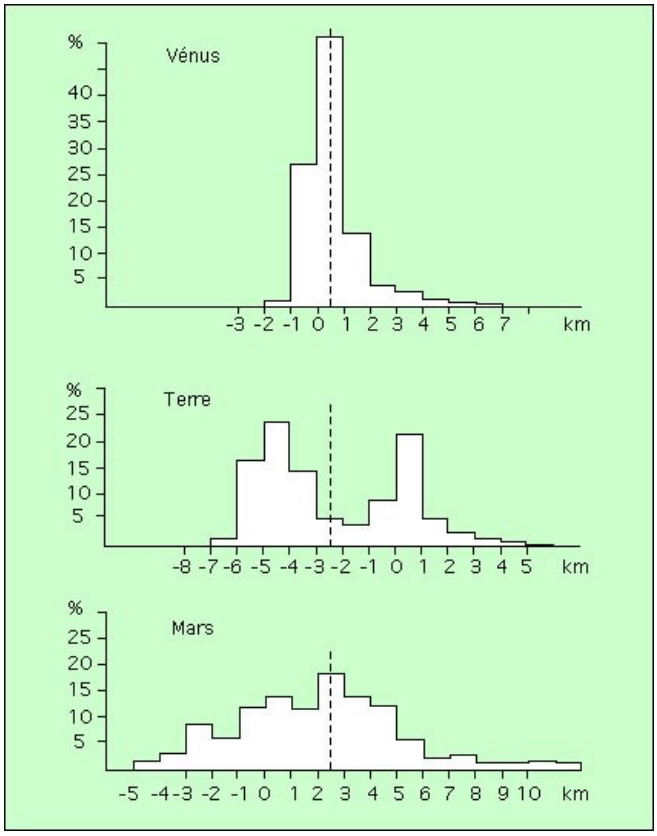
Puis, les instruments s'améliorant réellement, on s'est aperçu que certains canaux étaient en fait des tâches, distinctes les unes des autres, mais grossièrement alignées. Avec un faible pouvoir séparateur, elles se confondaient en des lignes. Cependant, au début du XX$^{e}$ siècle encore, on croyait qu'il y avait tout de même quelques canaux. Les sondes spatiales ont définitivement tordu le cou à cette légende, mais le mythe des petits hommes verts reste tenace. On peut rêver…

## *Comparaison*

Maintenant que nous avons étudié les planètes telluriques, il est temps de les comparer.

Un critère intéressant se trouve dans la comparaison des altitudes. Pour cela, on peut construire un histogramme donnant le pourcentage des terres en fonction de leur altitude. Sur le schéma ci-dessous, on a porté le pourcentage des terres situées entre deux altitudes particulières. Par exemple, sur le premier schéma, correspondant à Vénus, on peut voir que plus de 60 % des terrains se trouvent entre -1 et 1 km d'altitude. Ceci signifie que la plupart des sols vénusiens sont concentrés vers l'altitude 0. A gauche de ce pic, on voit une décroissance progressive : il reste un peu moins de 15 % de terres entre 1 et 2 km d'altitude ; les terres situées plus haut sont très rares. De l'autre côté du pic, il y a plus de 25 % de terres entre 0 et -1 km et rien au-dessous de 2 km sous le niveau zéro.

Si vous observez maintenant l'histogramme de la Terre, vous verrez deux bosses (la ligne pointillée montre aussi la médiane : autant de creux à droite que de bosses à gauche) : 25 % de fosses marines entre 4 et 5.000 mètres, et 20 % de régions d'altitude comprise entre 0 et 1.000 mètres.




Pour Mars, le schéma ressemble un peu à celui de Vénus : il présente un seul pic.

Dans les trois histogrammes, la ligne verticale en pointillés représente l'altitude médiane : il y a autant de terres plus hautes que de terres plus basses.

Seule la Terre présente un histogramme à deux bosses. Ceci est dû à l'histoire des planètes : la Terre a subi une érosion beaucoup plus importante que les deux autres, ce qui explique que beaucoup de terrains aient été nivelés, autour de l'altitude moyenne. Ce phénomène ne s'est pas produit avec la même ampleur sur les autres planètes.

Sur Vénus :

- Atalanta Planitia est la plus vaste plaine. Elle s'étend à 1,4 km au-dessous du niveau moyen.
- basses terres = croûte fine, faible densité ;
- hautes terres = Ishtar Terra (grande comme l'Australie), Aphrodite Terra (grande comme l'Afrique), Beta Regio.

**Evolution**

La différence d'évolution entre Mars et la Terre tient essentiellement dans leur différence de masse. Lors de la formation, les deux planètes étaient chaudes (impacts et contraction gravitationnelle). Mais elle ont commencé à se refroidir immédiatement par rayonnement dans l'espace. Toutefois, la radioactivité vient produire une énergie interne, qui ralentit le refroidissement. Il est facile de comprendre que cette énergie est proportionnelle à la masse de la planète, donc au cube de son rayon. Par contre, le refroidissement n'est proportinnel qu'à la surface, c'est-à-dire au carré du rayon. Par conséquent, l'énergie produite par radioactivité croît plus rapidement que les pertes de chaleur par la surface. Si la planète est assez massive, le refroidissement sera très lent. Ainsi, la Terre est encore chaude, alors que Mars est presque froide. Elle est tectoniquement en train de mourir. La Lune, plus petite encore, est morte depuis longtemps.

On ignore combien de temps la radioactivité a maintenu une température compatible avec la vie sur Mars.

## *Bibliographie*

Ch. Frankel *Worlds on fire*, Cambridge University Press

---

## *Dernière nouvelle*

On vient de découvrir une trace de vie évoluée sur Mars !

Une sonde spatiale vient d'y observer l'inscription suivante :

$$5x^2 - 50x + 125 = 0$$
$$x = 5 \qquad x = 8$$

Combien les martiens ont-ils de doigts ?

Réponse…

---=OO=---




**Les découvertes**

Dans le chapitre sur les planètes, nous avons présenté la loi (empirique) de Titius-Bode, qui représente les distances des planètes au Soleil, et nous avons vu qu'il y avait une lacune à la distance 2,8 UA. Bien que la loi de Titius-Bode soit empirique, elle représente remarquablement les distances des 7 planètes connues à la fin du XVIII$^{e}$ siècle. Cet accord entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées lui donnait beaucoup de poids, et renforçait la croyance en l'existence d'une planète à la distance de 2,8 UA du Soleil.

La planète recherchée ne pouvait pas être très brillante, sinon on l'aurait déjà découverte. Or le nombre d'étoiles visibles augmente très rapidement quand on en considère de moins brillantes. Dans un télescope, on voit dans certaines régions du ciel un véritable fourmillement. Une planète de petite taille, qui n'apparaît que comme un point brillant, ne se distingue pas des étoiles. La seule façon de la repérer consiste à observer son déplacement parmi les étoiles. Mais voilà, celui-ci est très lent... Il faut plusieurs jours pour constater une variation de position. Alors, par simple observation visuelle, il faut connaître à la perfection le ciel, et être capable de repérer un intrus. Une telle méthode n'est pas à la portée de n'importe qui, et de toute façon est très aléatoire et pénible.

Une collaboration d'astronomes a été constituée, qui se sont partagé le zodiaque en 24 partie, une dédiée à chacun des observateurs. Cette tentative a échoué.

Pourtant, l'abbé Piazzi à Palerme, a découvert dans la nuit du 1$^{e}$ janvier 1801, une nouvelle planète qu'il a nommée Cérès. Lorsque son orbite a été déterminée, on s'est aperçu qu'elle se plaçait à 2,8 UA du Soleil ! Le trou semblait comblé. Pourtant, à cette distance-là, une planète de taille normale (disons la taille de la Terre ou de Mars) devrait être plus brillante, et présenter un disque visible dans les télescopes. Or elle ne montrait qu'un petit point faiblement lumineux. Il a bien fallu admettre que cette planète était minuscule, ce qui compliquait un peu le problème.

Puis, le 28 mars 1802, Olbers découvre une autre planète, à peu près à la même distance du Soleil. Il la nommera Pallas. Le 1$^{e}$ mars 1804, nouvelle découverte, par Harding : Junon. En 1807, Olbers encore découvre Vesta... Cette prolifération commence à faire désordre. On cherchait une planète de taille standard, on en a trouvé 4 petites… Et ce n'était pas fini ! Les moyens d'observation s'améliorant, les découvertes se sont multipliées, surtout grâce à la photographie.

Aujourd'hui, on connait plus de 15.000 petites planètes. Le satellite IRAS qui observait dans l'infrarouge en a découvert plusieurs milliers.

Cérès mesure 910 km de diamètre, Pallas 520, Vesta 530. Ce sont les trois plus grosses. 34 ont plus de 100 km de diamètre. On estime qu'il y en a plusieurs millions de taille supérieure à 400 m. Il doit y en avoir de plus petites encore, de toutes les tailles…

Malgré leur grand nombre, ces petites planètes ne totalisent pas une grande masse. Pour considérer les gros comme les petits, et sachant que le nombre est d'autant plus petit que la taille est plus grande, considérons que la taille moyenne d'un astéroïde est de l'ordre de 2 km.

Si on considère 10 millions d'objets de 2.000 mètres de diamètre (r = 1.000 m), on peut faire le calcul approximatif suivant :

volume d'un objet = $4\,\pi\,r^3 / 3 = 4 \times 3{,}1416 \times 1.000^3 / 3 = 4{,}19 \times 10^9 = 4{,}19\ 10^9\ m^3$

Pour 10 millions d'objets : $4{,}19\ 10^9 \times 10^7\ m^3 =$ **$4{,}19\ 10^{16}\ m^3$**

Le volume de la Terre est de $4\,\pi\,R^3 / 3 = 4\,\pi\ 6.379.000^3 / 3 = 4\,\pi \times 2{,}59694072\ 10^{20} / 3\ m^3 =$ **$10^{21}\ m^3$**

Le rapport entre le volume total des astéroïdes et celui de la Terre est donc de l'ordre de :

$10^{21}\ m^3 / 4{,}19\ 10^{16}\ m^3 = 0{,}24\ 10^{21-16} = 0{,}24\ 10^5 = 24.000$.

Le volume total de ces astéroïdes est de l'ordre de 24.000 fois plus petit que celui de la Terre.

Ils n'auraient donc pas pu former une planète. En admettant qu'ils se soient tous condensés en un objet unique, on peut calculer son rayon :

$V = 4{,}19\ 10^{16}\ m^3 = 4\,\pi\,r^3 / 3$ ; d'où $r^3 = 3 \times 4{,}19\ 10^{16} / (4\,\pi) = 10^{16}\ m^3$ ; d'où $r = 2{,}15\ 10^5 = 215.000$ m = 215 km.

Ce ne serait qu'un gros astéroïde, quatre fois plus petit que Céres, bien insuffisant pour être considéré comme une planète.

**Noms**

Les plus gros de ces objets sont quelquefois nommés *petites planètes*. Tous, quelle que soit leur taille, sont qualifiés d'*astéroïdes* (du grec *aster*

astre, et *eidos* forme). Ce mot a été proposé par William Herschel.

Les astéroïdes sont nommés et numérotés dans l'ordre de leur découverte. Cérès est donc exactement 1 Cérès. On doit parler de 2 Pallas, 3 Junon, 4 Vesta etc. L'ordre des découvertes ne correspond pas à l'ordre des tailles décroissantes : Junon a été découverte avant Vesta qui est pourtant deux fois plus grosse. Les conditions de la découverte sont importantes (plus grande proximité).

Vous trouverez dans les fiches la liste des 275 premières découvertes.

**Situation et orbites**

Les astéroïdes forment une ceinture répartie grossièrement entre Mars et Jupiter, à la distance moyenne de 2,8 UA du Soleil. On la nomme maintenant *ceinture principale*. Les orbites dans la ceinture principale sont presque circulaires, mais les inclinaisons sont parfois assez fortes (Pallas 35°).

Malgré un nombre très élevé, leur masse totale est certainement très faible, quelques millièmes de celle de la Terre seulement. Ils ne perturbent donc en rien le mouvement des planètes principales. Au moment de la formation du système solaire, ils étaient certainement beaucoup plus nombreux. Ils ont été progressivement capturés par les planètes en formation, auxquelles ils se sont agglomérés.

Ce sont donc les restes de la formation du système solaire, qui n'ont pas pu s'agglomérer pour former une planète, à cause de la forte gravitation de Jupiter qui est proche. Les effets de marée qu'elle impose dans cette région ont interdit la création d'un objet de dimensions importantes.

En dehors de la ceinture principale, il existe des astéroïdes dont les orbites sont paradoxales. Leurs excentricités sont parfois très fortes, leur imposant des variations de distance au Soleil très importantes. On les classe en familles, auxquelles on donne le nom de l'un des membres.

**Composition**

Leur composition est mal connue, car aucune mesure n'a été faite. On sait seulement qu'ils contiennent des silicates, du carbone et des métaux. On soupçonne que certains d'entre eux soient de même nature que les comètes.

**Tas de gravas**

Un tas de gravas est un astéroïde reconstitué : de petite taille, ayant subi un choc très violent, il a été totalement détruit, et ses débris ont poursuivi leur course sur des orbites très voisines (vitesse relative faible au moment du choc). La gravité, et les hasards des rencontres entre ces débris, les ont petit-à-petit regroupés. La faible gravitation les maintient maintenant ensemble. La cohésion d'un tel astéroïde est évidemment très faible, mais paradoxalement, il résiste mieux qu'un autre à un nouveau choc. Un astéroïde qui viendrait le percuter passerait entre les débris, serait freiné, et s'agglutinerait à l'ensemble sans y faire de dégats.

**Observation**

Par des méthodes d'occultations d'étoiles, on a pu obtenir des renseignements sur les astéroïdes : connaissant le mouvement de l'un d'entre eux, donc sa vitesse, il suffit de mesurer le temps pendant lequel il cache une étoile pour avoir une idée très correcte de son diamètre. Son diamètre ? Il est apparu que des mesures diverses d'un même objet ont donné des valeurs différentes ! Erreurs de mesure ? Non ! Toutes ces mesures étaient correctes, seulement elles s'appliquaient à différents axes de l'objet, qui ne sont pas égaux. En un mot, les petits astéroïdes ne sont pas ronds. Bien sûr, les plus grandes de ces planètes sont à peu près sphériques, comme les grosses. Mais les petits corps ne possèdent pas une gravité suffisante pour atteindre la forme sphérique, qui est une figure d'équilibre. Ce sont plutôt de grosses cacahuètes ! ou des patatoïdes…

Les occultations ont réservé une autre surprise : il est arrivé qu'une étoile disparaisse deux fois, à quelques secondes d'intervalle. L'explication est simple, certains de ces petits corps possèdent malgré tout des satellites ! C'est le cas de Ida, qui mesure 56 km × 21 km, et de Dactyle son satellite, qui ne fait que 1,5 km. Il orbite à 100 km de distance d'Ida. En mythologie, Ida est la nymphe qui a élevé Zeus. Des détails sont donnés plus loin sur certains astéroïdes.

Les orbites des astéroïdes ne sont pas toutes dans le plan de l'écliptique. Certaines s'en écartent même beaucoup. Par contre, le demi-grand axe de l'orbite est fortement contraint par la présence proche de Jupiter, qui par les perturbations qu'il produit interdit certaines orbites.

La sonde spatiale européenne, Rosetta, lancée le 2 mars 2004, à destination de la comète Churyumov-Gerasimenko, devait visiter au passage deux astéroïdes. Elle a photographié 2867 Steins en 2008. Mais on avait déjà des photos obtenues par la sonde américaine Galileo, qui en a croisé deux en allant vers Jupiter, Ida et Gaspra. Leur surface est cratérisée, malgré leur petite taille, prouvant que eux aussi ont reçu d'autres astéroïdes.

**Types d'astéroïdes**

L'observation spectroscopique a permi de séparer les astéroïdes en trois classes, correspondant à leur composition mnéralogique.

| type | composition | albedo | proportion |
|---|---|---|---|
| S | Fe Ni + silicates Mg Fe | 0,10 à 0,22 | 17 % |
| C | chondrites carbonnées | 0,03 | 75 % |
| M | Fe Ni | 0,10 à 0,18 | 8 % |
| ???? | ???? | ???? | ??? % |

**Les plus grosses petites planètes**

| nom | diamètre km | demi grand axe UA | excentricité | inclinaison sur l'écliptique ° |
|---|---|---|---|---|
| 1 Cérès | 910 | 2,77 | 0,097 | 10° 30' |
| 2 Pallas | 520 | 2,77 | 0,180 | 35° |
| 4 Vesta | 530 | 2,36 | 0,097 | 7° |
| 10 Hygeia | 430 | 3,14 | 0,136 | 4° |
| 511 Davida | 336 | 3,18 | 0,171 | 16° |
| 704 Interamnia | 330 | 3,06 | 0,081 | 17° |
| 52 Europa | 310 | 3,10 | 0,119 | 7° 30' |
| 15 Eunomia | 270 | 2,64 | 0,143 | 11° 45' |
| 87 Sylvia | 270 | 3,49 | 0,051 | 10° 45' |
| 16 Psyché | 265 | 2,92 | 0,10 | 3° |
| 31 Euphrosyne | 250 | 3,16 | 0,099 | 26° 15' |
| 65 Cybèle | 245 | 3,43 | 0,129 | 3° 30' |
| 3 Juno | 245 | 2,67 | 0,218 | 13° |
| 324 Bamberga | 240 | 2,68 | 0,285 | 11° |
| 107 Camilla | 240 | 3,49 | 0,084 | 10° |

Vesta présente des coulées de lave, et des bassins d'impact.

**Les résonnances**

Les Troyens sont objets circulant sur la même orbite qu'une planète, mais en avance ou en retard de 60°. On montre que de telles orbites sont stables : si l'objet s'en écarte un peu, les perturbations que lui fait subir la planète le ramènent à son point de départ.

Les premières planètes de ce type ont été découvertes sur l'orbite de Jupiter, et on leur a donné des noms de héros de la guerre de Troie. Ceux qui sont en avance sur Jupiter portent les noms des héros Grecs, alors que ceux qui sont en retard portent des noms de Troyens. Depuis, on a pris l'habitude de désigner sous le nom générique de troyens tous les objets qui circulent à 60° sur l'orbite d'une planète. Les troyens forment, avec leur planète et le Soleil, un triangle équilatéral.

5261 Eurêka est un Troyen de Mars à l'orbite stable.

En septembre 2004, Toutatis est passé à 0,0466 UA de la Terre, *i.e.* à peu près 7 millions de kilomètres, ou encore 18 fois plus loin que la Lune.

**Familles de Hirayama**

Les *familles de Hirayama* sont des groupes d'astéroïdes ayant une même origine. Ils proviennent de la fragmentation, due à un choc violent, d'un astéroïde parent. Les débris, ayant une faible vitesse relative, ne s'éloignent guère les uns des autres. Ils parcourent donc des orbites semblables autour du Soleil, et possèdent évidemment la même composition minéralogique.

3 sont identifiées avec certitude, car les éléments orbitaux sont identiques, et leurs compositions minéralogiques égales. Ce sont les familles de 24 Thémis, 221 Eos et 158 Koronis. Ida est de la famille Koronis.

| nom de famille | nombre de membres | type | demi grand axe | taille de la planète mère |
|---|---|---|---|---|
| Thémis | une centaine | C | 3,13 UA | 300 km |
| Eos | une centaine | S | | 150 km |
| Koronis | une cinquantaine | S | | 90 km |

**Où la différence s'amenuise...**

L'astéroïde 2060 Chiron est devenu la comète 95/P Chiron le jour où on lui a découvert une petite coma. Phaéton a du être une comète dans le passé. 107P/ Wilson-Harrington, comète en 1949, était un astéroïde en 1979…

On connait des comètes peu actives qui se déplacent sur des orbites d'astéroïdes dans la ceinture principale, et des astéroïdes qui ont des orbites cométaires très allongées. La distinction entre comètes et astéroïdes est donc de plus en plus difficile à faire. La logique tendrait d'ailleurs à l'atténuer, car lors de la formation du système solaire, il est bien évident que les glaces se sont accumulées en plus grande quantité loin du Soleil, et ceci sans transition brusque. Il est donc naturel qu'en considérant des objets de plus en plus loin du Soleil, on passe insensiblement des astéroïdes rocheux aux comètes glacées.

**Les Centaures**

Après la découverte de Chiron, avec ses propriétés surprenantes, on a trouvé d'autres astéroïdes, même plus gros que lui, et qui se situent dans la même région du système solaire. On leur a donné des noms qui les associent à Chiron : Chiron était, dans la mythologie grecque, un Centaure ; on nomme alors maintenant *Centaures* tous les astéroïdes qui croisent entre Jupiter et Neptune. Ils sont en général sur des orbites assez fortement elliptiques, dont la stabilité ne saurait excéder quelques milliers d'années avec la proximité inquiétante des grosses planètes. Voici les trois plus importants :

| numéro | nom | diamètre (km) | demi grand axe UA | excentricité | découverte |
|---|---|---|---|---|---|
| 10199 | Chariklo | 210 | 15,8 | 0,17 | 1997 |
| 5145 | Pholus | 175 | 20,2 | 0,57 | 1992 |
| 2060 | Chiron | 170 | 13,6 | 0,38 | 1977 |

Chiron, le premier découvert, n'est pas le plus gros. Ceci s'explique très bien car le diamètre intervient moins, dans l'éclat de l'objet, que la distance au Soleil et à la Terre (laquelle vue de Chiron, ne s'éloigne jamais beaucoup du Soleil). Les éléments orbitaux, assez variables, sont données avec une précision modérée. On remarque que les excentricités sont assez disparates : de 0,17 à 0,57, cette dernière étant extrêmement forte ! Les Centaures ne forment donc pas un groupe très homogène. Par contre, leur composition doit être assez semblable, à base de silicates et de beaucoup de glaces. Chiron, catalogué d'abord comme astéroïde, est peut-être la plus grosse comète connue à ce jour, bien que son activité cométaire soit particulièrement limitée à cause de sa grande distance au Soleil. Imaginons le spectacle que Chiron nous donnerait s'il s'approchait du Soleil !…

**Les géocroiseurs**

Ce sont les astéroïdes qui coupent plus ou moins l'orbite de la Terre. On les classe en trois sous-groupes, selon leurs caractéristiques orbitales :

- le groupe de **1221 Amor**. Ces astéroïdes coupent l'orbite de Mars, et s'approchent de celle de la Terre, sans l'atteindre. Bien évidemment, une perturbation minime peut l'amener à couper l'orbite terrestre.
- le groupe **2062 Aten**. Leurs orbites sont entièrement à l'intérieur de celle de la Terre. Ils s'en approchent donc par en-dessous, et là encore des perturbations sont nécessaires pour les mener jusqu'à nous.
- le groupe **1862 Apollo**. Ceux-là coupent réellement l'orbite de la Terre : leur aphélie se situe vers Mars, et leur périhélie vers Vénus.

Le principal astéroïde de chaque groupe lui a donné son nom, et on remarque que ce nom commence par un A ! On appelle alors l'ensemble des géocroiseurs les *AAA*.

Si on considère des astéroïdes 10 fois plus petits, on en observe 100 fois plus !

L'albédo moyen des astéroïdes diminue quand on s'éloigne du Soleil. Ceci ne signifie pas qu'ils sont moins éclairés par le Soleil, ce qui est évident, mais bien que leur pouvoir réfléchissant diminue. Ils sont de plus en plus sombres quand on s'éloigne du Soleil. Cette diminution de brillance est probablement liée à l'apparition à leur surface d'une couche d'hydrocarbures (goudrons...).

Les astéroïdes sont souvent recouverts de régolithe (poussière) produit par les impacts des météorites.

**Les lacunes de Kirkwood**

Ce sont des zones annulaires autour du Soleil dans lesquelles on trouve très peu d'astéroïdes. Si l'un d'entre eux s'y risque, il va subir des perturbations telles de la part de Jupiter (et un peu moins de Saturne), qu'il va être rapidement propulsé sur une orbite plus interne, ou sur une orbite plus externe. Puisqu'il passe un temps très bref dans cette zone, il y a peu de chances de l'y observer. C'est pourquoi cette zone apparaît comme une lacune.

Les lacunes de Kirkwood sont analogues, pour la ceinture des astéroïdes, aux divisions de Cassini et d'Encke dans les anneaux de Saturne.

**Satellites**

Un satellite peut rester en orbite stable autour d'un astéroïde si sa distance est inférieure à 100 fois son diamètre. Cette hypothèse théorique a trouvé une magnifique confirmation lorsque la sonde Galileo a survolé 243 Ida et découvert un petit satellite qui fut nommé *Dactyl* (Dactyl était, dans la mythologie, un magicien métallurgiste du mont Ida). Sa présence a permi de mesurer sa densité ; elle est de 2,7 comme les roches de l'écorce terrestre. Ida doit être de type S.

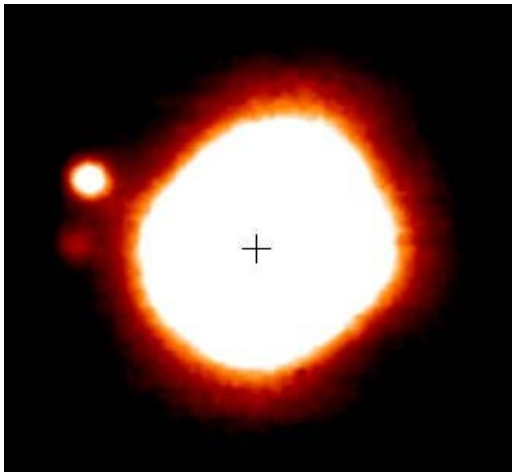
Depuis, on a trouvé de nombreux autres satellites d'astéroïdes.

Les astéroïdes de type C ont probablement une densité < 1.

Chaleur de différenciation produite par Al 26, et Fe 60 à courte période.

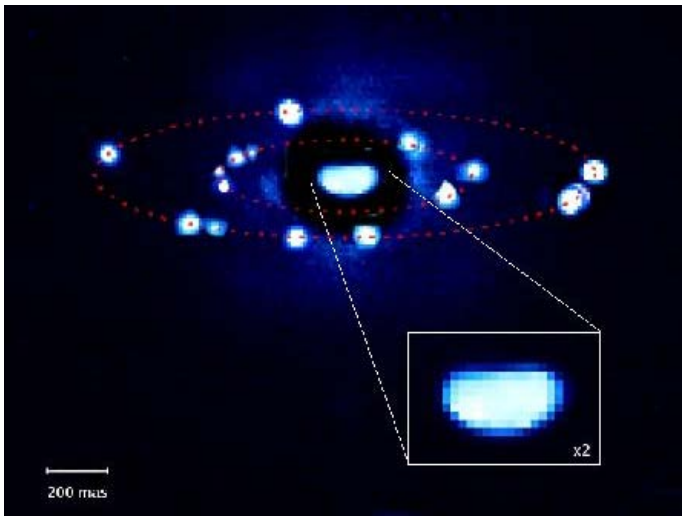
## *87 Sylvia*

87 Sylvia est un tas de gravas, c'est-à-dire un astéroïde reconstitué. C'est l'un des plus gros de la ceinture principale, avec 280 km de diamètre. On lui connaissait déjà un satellite, mais on en a découvert un second dans la deuxième moitié de 2005.



Sylvia, image de la découverte
photo Marchis et al., 2005, Nature, UCB/IMCCE-Observatoire de Paris

Sylvia est la mère mythique de Rémus et Romulus, il a donc été facile de trouver des noms pour ces deux nouveaux astéroïdes. Romulus, le plus brillant, découvert au télescope Keck en 2001, mesure 18 km. Il tourne à 1.360 km de Sylvia, en 87,6 heures. Rémus a été observé en août 2005 par le télescope Yepun (VLT), grâce à l'optique adaptative qui y est installée. Il orbite à 710 km seulement, en 33 heures. Son diamètre est estimé à 7 km d'après sa magnitude apparente et un albedo estimé.




Sylvia, orbites des deux satellites
photo Marchis et al., 2005, Nature, UCB/IMCCE-Observatoire de Paris

La présence de satellites est très importante, car l'analyse des orbites permet de déterminer la masse de l'objet central. Et, mesurant ses dimensions, d'où son volume, on en déduit facilement la masse volumique, qui donne une indication précieuse sur la constitution interne. La masse volumique ainsi mesurée de Sylvia est de 1,2 g $cm^{-3}$, ce qui est très faible. C'est ce qui permet d'affirmer que l'astéroïde est poreux, et donc qu'il n'est qu'un tas de gravas. Il a été pulvérisé par un impact très violent, sans que les débris ne soient dispersés. Continuant sur des orbites très voisines, leur attraction gravitationnelle mutuelle a fini, tout doucement, par les réunir. L'ensemble tient aujourd'hui sous l'effet de cette gravité, mais la force de liaison est vraiment faible.

## *951 Gaspra*

L'astéroïde 951 Gaspra tient son nom d'une ville de Crimée. Il fait partie de la famille Flora : son périhélie est à 1,8 UA, et son aphélie à 2,6 UA (excentricité 0,17), son année s'étend sur 3 ans et 3 mois. Trop petit, il est loin de la sphère, et mesure 19 × 12 × 11 km. Il a été survolé par la sonde Galileo le 29 octobre 1991, et nous en avons maintenant des photos raprochées. Gaspra tourne sur son axe en à peu près 7 h. L'axe de rotation est perpendiculaire à la grande dimension de l'objet, et le pôle nord se trouve en haut et à gauche de l'image ci-dessous. La rotation se fait dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, ce qui veut dire que sur l'image, la pointe qui se trouve à droite s'éloigne.



Gaspra, vu à 5.300 km, résolution 54 m par pixel photo Galileo, NASA

C'est un astéroïde de type S. La surface est couverte de nombreux cratères, mais ne présente pas de cratère énorme, comme par exemple Phobos, satellite de Mars (cratère Stickney). On dénombre plus de 600 cratères de 100 à 500 m de diamètre. La nature et le comptage des cratères lui assignent un âge de l'ordre de 200 millions d'années.

La forme irrégulière de l'astéroïde suggère qu'il a été produit par un impact sur un corps plus important, dont il serait un débris.

On voit également deux réseaux de rainures, qui devraient correspondre à des fractures. Sous la force de l'impact qui aurait arraché l'astéroïde à un corps parent bien plus gros, il est tout à fait concevable que de telles fractures se soient produites. Elle mesurent de 100 à 300 mètres de large, et quelques dizaines de mètres de profondeur. Les deux systèmes n'ont pas exactement la même morphologie. De telles rainures n'étaient connue, jusque là, que sur Phobos. Encore une particularité qui renforce l'idée que Phobos serait un astéroïde capturé par Mars.

## *243 Ida*

Le nom de cet astéroïde est celui de la nymphe qui a élevé Zeus. Mais c'est aussi une montagne dans une grotte de laquelle Zeus a vécu enfant. Et sur cette montagne vivaient des êtres mythologiques nommés Dactyli, qui l'ont protégé.



Ida et Dactyl, photo Galileo, NASA

La photo ci-dessus a été prise le 28 août 93 par la sonde Galileo, en route pour Jupiter.

L'orbite d'Ida est caractérisée par : demi grand-axe 2,86 UA, excentricité 0,046, aphélie à 2,99 UA, périhélie à 2,73 UA, période 4 ans et presque 10 mois. Comme ces données l'indiquent clairement, Ida appartient à la ceinture principale. Il mesure 56 km dans sa longueur, 23 dans l'autre dimension. Sa période de rotation est de 4h 38 minutes.

C'est un astéroïde de type S, ceux qui donnent les chondrites ordinaires.

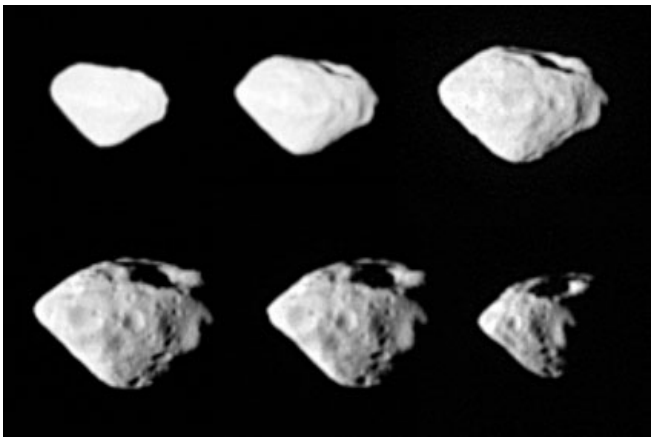
Ida possède un petit satellite, nommé Dactyl (pour la raison exposée plus haut). Il ne mesure que 1,4 km de diamètre (remarquez que malgré sa taille minuscule, il est pratiquement rond). Dactyl orbite autour d'Ida à un peu moins de 100 km.

Ida fait partie de la famille de Koronis (famille de Hirayama). Cette appartenance limite l'ancienneté du système. En effet, l'attraction gravitationnelle entre les éléments de la famille est bien trop faible pour qu'ils restent liés à long terme. Lors de la collision, les vitesses d'éloignement initiales sont déterminantes. Si elles sont faibles, le groupe s'éparpillera lentement. Mais petit à petit, ces objets sont destinés à s'éloigner les uns des autres. Et leur groupement ne peut donc se manifester que peu de temps après la formation, quelques centaines de millions d'années. Donc, Ida et Dactyl se sont formés il y a peu de temps. Pourtant, leur surface est fortement cratérisée. L'explication pourrait être dans le bombardement des débris, juste après l'impact qui a arraché Ida à un corps plus gros.

### *2867 Steins*

La sonde européenne Rosetta, en route vers la comète Churyumov-Gerasimenko, a croisé l'astéroïde Steins, et nous en a transmis des photos. Elle en est passé, au plus près, à 800 km. C'est la première fois qu'on s'approche d'un astéroïde de ce type rare. 18 des instruments de Rosetta et de l'atterrisseur, Philae, ont été conçus, totalement ou en partie, par des laboratoires français.

Steins fait 5,4 km dans sa plus grande dimension. Il est reconnaissable à sa forme qui évoque un diamant. Il appartient à la ceinture principale interne. On y remarque un énorme cratère (par rapport à sa propre dimension), qui a été produit par l'impact d'un objet de quelques 200 m de diamètre. Ce choc a presque détruit l'astéroïde. Au-dessous de ce gros cratère, on voit un chapelet de petits cratères, qui sont plutôt des effondrements que des cratères d'impact. Ils ont dû se former à la suite du choc. L'aspect de sa surface, aux bords nets, indique qu'il a été produit par un choc qui l'a arraché à un autre corps.



Steins photo Rosetta, ESA ©2008 MPS for OSIRIS Team MPS/UPM/LAM/IAA

De plus, le choc a expédié beaucoup de poussières dans l'espace, et une partie est retombée. Cette poussière est composée d'enstatite, silicate très pauvre en métaux, avec quelques composés soufrés. Cette pauvreté est confirmée par l'absence de champ magnétique, notée par Rosetta. La surface est très homogène. La formation du grand cratère de cet astéroïde est datée d'à peu près 100 millions d'années. La présence de ce minéral définit le type E (pour enstatite) donné à ces astéroïdes exceptionnels. Ce type est représenté par seulement 0,02 % (1 pour 5.000) des astéroïdes. C'est donc une cible extrêmement intéressante à observer.

Tout comme les astéroïdes de type S correspondent aux chondrites ordinaires, les astéroïdes de type E correspondent sans doute aux aubrites : leur composition est très semblable.

### *433 Eros*

Encore un astéroïde de type S. Eros a un demi grand-axe de 1,46 UA, mais avec une forte excentricté de 0,22 qui le fait errer entre 1,14 et 1,78 UA du Soleil. Au périhélie, il est donc assez proche de la Terre, ou tout au moins de son orbite (20 millions de km tout de même). Cette orbite en fait un NEA.

### *253 Mathilde*

### *25143 Itokawa*

L'astéroïde Itokawa a été pris pour cible par les japonais (JAXA) pour la première mission de retour d'échantillons depuis un astéroïde. La sonde qu'ils ont développée pour cela se nomme *Hayabusa* (*le faucon pélerin* en japonais, c'est l'oiseau au vol le plus rapide). Hayabusa a été lancée le 9 mai 2003, la capsule est retournée le 13 juin 2010. Elle s'est approchée automatiquement de l'astéroïde, guidée par un système utilisant une caméra et un lidar. Enfin, la sonde emportait également un imageur et un spectromètre infrarouge. La sonde est destinée à se poser sur le sol, pour y faire des analyses en divers endroits.

Cette sonde est avant tout un prototype technique, servant à tester de nombreux principes et dispositifs. La propulsion est mixte, avec des moteurs chimiques réservés aux manœuvres rapides, et des moteurs ioniques pour la propulsion. Les moteurs ioniques sont bien plus performants que les chimiques, leur rendement est 11 fois supérieur. La sonde était propulsée par un moteur ionique au xénon, ce qui n'est pas

courant non plus. Elle a emporté 50 kg de xénon, qui lui ont donné une accélération de 3,5 km/s. Des panneaux solaires fournissaient l'énergie nécessaire à ce moteur ionique. Cette énergie limite l'usage de panneaux solaires pour alimenter le moteur, à des régions assez proches du Soleil.

Une autre performance a été la rentrée dans l'atmosphère terrestre directement depuis sa trajectoire interplanétaire, sans freinage actif auparavant, même si elle ne concernait que la capsule d'échantillons.

La récupération des échantillons se fait de la manière suivante : la sonde atterrit à très faible vitesse (quelques centimètres par seconde) ; un cornet placé en-dessous entre en contact avec le sol de l'astéroïde ; une bille est tirée de l'intérieur à 300 m/s et son impact au sol provoque une éjection de poussières. Ces poussières sont canalisées par le cornet, et piégées dans le système de récupération. La sonde s'élève aussitôt, son contact avec le sol n'ayant duré que quelques secondes. Plusieurs atterrissages sont prévus. La sonde se comporte ainsi comme un faucon, qui attaque ses proies en piquant, les attrape dans ses serres, et repart aussitôt, ce qui justifie son nom.

Elle emportait un mini atterrisseur nommé *Minerva*, mais celui-ci, largué lors d'un atterrissage, n'a pu se poser sur le sol et a disparu dans l'espace. Malgré ce petit échec les japonais ont résolu de nombreux problèmes pour assurer le succès de leur expérience, et en ont certainement tiré de nombreux enseignement pour l'avenir.

Hayabusa a connu de nombreux problèmes ; chacun aurait pu compromettre la mission. Mais les japonais avaient conçu une sonde suffisamment flexible pour s'adapter à certaines situations. Par exemple, ils ont pu, par télémétrie, associer les composants intacts de deux moteurs ioniques en panne, pour reconstituer un moteur en état de marche ! Ceci est impensable avec des moteurs chimiques, la plomberie n'autorisant pas la flexibilité de l'électricité. Les phases d'atterrisage ont aussi été difficiles. Elles se produisaient en mode automatique (distance et délais de transmission obligent), et les difficultés sont grandes. Mais après plusieurs tentatives interrompues, deux atterrisages ont réussi. La première fois, la sonde s'est posée sur le côté, impossible de récupérer des échantillons. Mais la seconde a réussi. Beaucoup de problèmes de moteurs aussi, qui ont retardé le retour. Mais finalement, la sonde est revenu vers la Terre, a largué la capsule d'échantillons, puis s'est désintégrée (comme prévu) dans l'atmosphère.

Le principe de l'expérience est tout à la fois simple et hasardeux. La simplicité est un gage de réussite, car plus le système est compliqué, plus on multiplie le risque de pannes. Mais avec une technique trop simple, les risques de ne pas maîtriser tous les paramètres sont grands. Les japonais ont été capables de trouver le juste milieu, pour construire une sonde assez simple pour éviter les pannes techniques, et assez sophistiquée pour résoudre les problèmes avec un bon niveau de confiance. C'est un grand exploit d'avoir réussi cette expérience, et maintenant nous pourrons, après étude approfondie des échantillons, faire un lien direct, certain, entre les astéroïdes et les météorites. Les dernières proviennent des premiers, c'est bien évident, mais leur composition est-elle représentative ? Les études des astéroïdes faites depuis le sol sont spectroscopiques, les analyses des météorites sont chimiques et physiques. Maintenant, un même objet a été étudié par les deux méthodes.




Itokawa photo Hayabusa, JAXA

Itokawa est un tout petit astéroïde de 535 × 294 × 209 mètres seulement. C'est une chondrite de type S. La densité des chondrites est de 3,2 g $cm^{-3}$ et celle d'Itokawa mesurée par la sonde n'est que de 1,9 g $cm^{-3}$. Ceci montre que l'astéroïde n'est pas plein, mais bien poreux. Il existe en son sein 40 % de vide, et par conséquent l'astéroïde n'est qu'un tas de gravas. On voit bien sur les images qu'il est constitué de deux parties accolées, grossièrement sphériques et de surface accidentée par des blocs atteignant 50 m. Entre les deux, un terrain bien plus lisse, constitué de régolithe. La particularité est le très petit nombre de cratères.



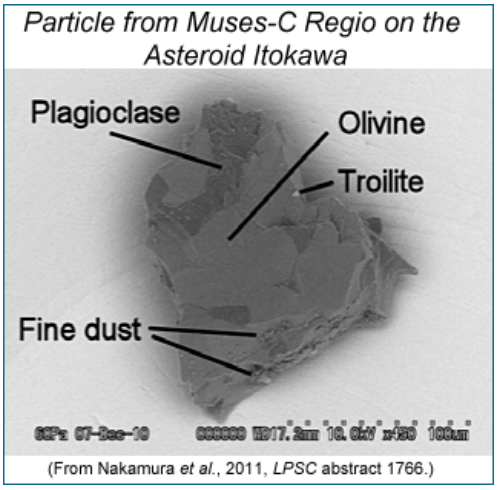

Itokawa photo Hayabusa, JAXA

C'est un NEA (Near Earth Asteroid) Apollo, dont l'apogée est légèrement au-delà de l'orbite martienne, et le périgée en-deça de l'orbite terrestre. Sa rotation s'effectue en 13 h 8 mn, et son axe est pratiquement perpendiculaire à l'écliptique. Un si petit corps a une gravité extrêmement faible (1/100.000$^{e}$ de celle de la Terre), ce qui complique la tâche au lieu de la simplifier. La moindre force exercée à la surface suffit à expédier le responsable dans les étoiles ! Et l'atterrissage doit être entièrement automatique, la sonde étant bien trop loin de la Terre pour autoriser un pilotage.



Surface de l'astéroïde Itokawa photo Hayabusa, JAXA

Les détails de surface visibles ici sont encore exceptionnels. On voit un sol de graviers poussiéreux, d'une taille centimétrique ou plus petits. La poussière est du régolithe, provenant de la fracturation des roches par les impacts de gros ou petits objets. Nous disposons aujourd'hui de photos équivalentes pour la Lune bien sûr (Apollo NASA, diverses sondes soviétiques), mais aussi pour Mars (Spirit et Opportunity, NASA), pour Titan (Huygens, ESA).




Poussière d'Itokawa, microscope électronique photo Hayabusa, JAXA

Avant Hayabusa, le seul corps céleste dont nous ayons récupéré des échantillons est la Lune, toute proche. Les astronautes américains en ont recueilli, mais aussi le robot soviétique Lunokhod, qui a tout fait automatiquement.

Les poussières récupérées sont triées en trois catégories, selon la façon de les obtenir. La capsule de retour en contenait quelques 1.500. Les premières ont été prélevées sur une spatule en téflon. Bien que d'une taille inférieure à 40 µm, elles ont permi de faire des analyses chimiques et pétrologiques. Le tiers de ces poussières est constitué d'olivine, un autre tiers de pyroxènes, feldspath et sulfures, et le reste d'un mélange assez complexe (détails ci-dessous). La sonde avait déterminé sur place, par fluorescence X et analyse IR, une composition de type chondritique. Ceci est donc confirmé par l'analyse des poussières. Celles-ci sont anguleuses, et proviennent de la cassure de roches plus grosses.

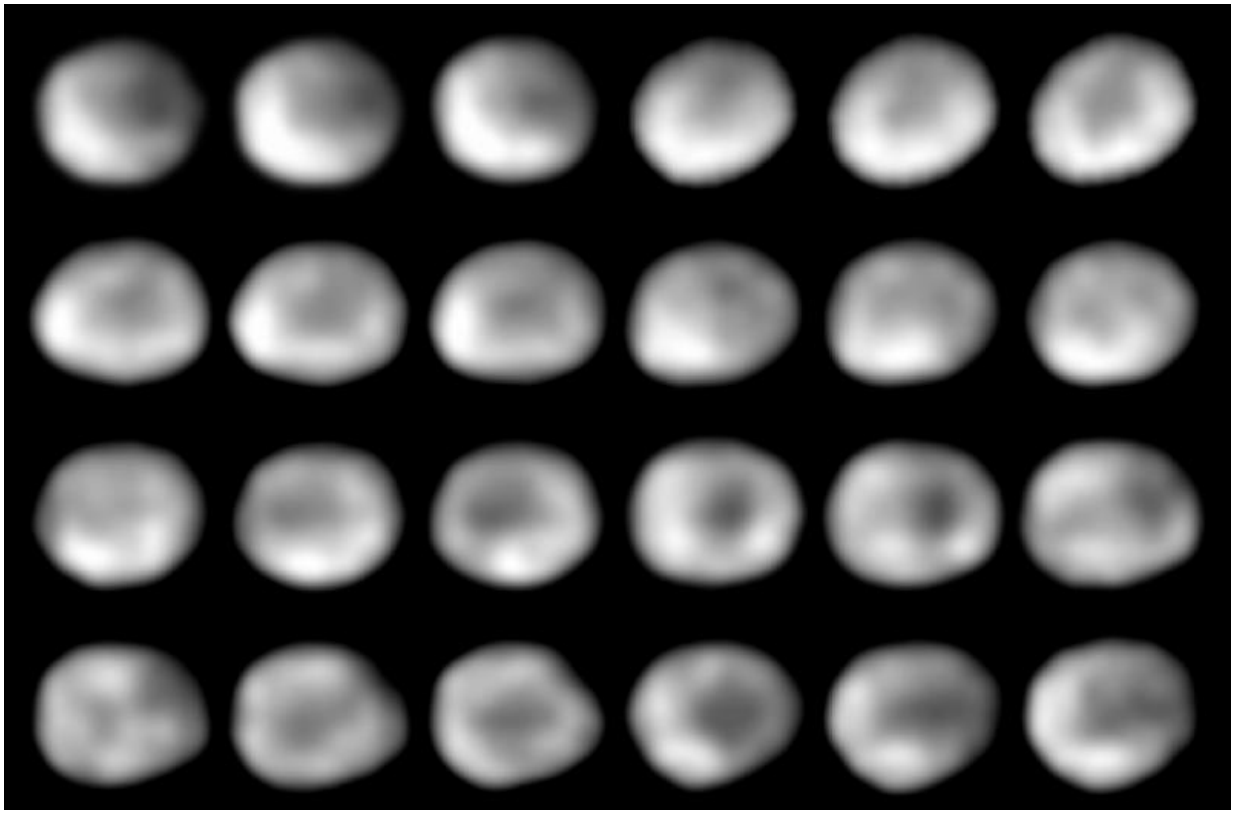
| nb. de particules | composition |
|---|---|
| 580 | olivine |
| 118 | pyroxène pauvre en Ca |
| 56 | pyroxène riche en Ca |
| 172 | fledspath plagioclase |
| 14 | fledspath potassique |
| 113 | sulfure de fer |
| 13 | chromite |
| 10 | phosphate de calcium |
| 3 | alliage FeNi |
| 447 | mélanges |

Le sulfure de fer est probablement de la troïlite. Les particules de FeNi contiennent les deux espèces kamacite et taénite. Toutes ces particules sont caractéristiques d'une composition chondritique de type LL. Les silicates présentent une composition homogène.

D'autres particules ont été récupérées sur le plancher de la capsule, et leur taille est supérieure à 100 µm. Ces particules n'ont pas encore été étudiées en détail, mais elles sont assez semblables aux précédentes.

## *4 Vesta*

Vesta est le second astéroïde par la taille, et se trouve dans la ceinture principale entre Mars et Jupiter. Mais malgré sa (relativement) grande taille, on ne peut pratiquement pas voir de détails depuis la Terre, sauf les plus grandes structures ; et encore ne peut-on pas distingueur ce qu'elles sont. Le télescope spatial a produit la suite d'images ci-dessous, qui montre que l'astéroïde n'est pas vraiment sphérique, et présente quelques taches à la surface.



Vesta photo B. Zellner (Georgia Southern University) and NASA

C'est le mieux qu'on puisse faire depuis la Terre actuellement. Le télescope Keck, avec ses 10 mètres d'ouverture, donne la même résolution en utilisant l'optique adaptative (sans elle, on n'obtient qu'une grosse tache ronde floue).

Les astéroïdes étant des objets assez primitifs, inutilisés dans le processus de formation des planètes, sont intéressants pour apporter des données sur les briques qui ont constitué les planètes. Selon leur taille et leur localisation dans le système solaire (distance au Soleil), ils ont plus ou moins évolué. Vesta est un astéroïde ayant beaucoup évolué, grâce à sa taille importante. C'est donc une cible de choix pour une étude approfondie, et elle justifie la réalisation d'une sonde adaptée. C'est maintenant chose faite avec la sonde Dawn qui est en orbite autour et nous transmets des images de très bonne qualité. Un nouveau chapitre est consacré à Vesta, et évoluera à mesure des résultats scientifiques qui paraîtront.

### *21 Lutetia*

---=OO=---

# 4 Vesta




## Carte d'identité

| | | | |
|---|---|---|---|
| dimensions | 578 × 560 × 458 km | demi grand-axe | 354 $10^6$ km |
| | 0,042 Terre | | 2,361 UA |
| diamètre angulaire | 0,20" à 0,64" | excentricité | 0,0987 |
| aplatissement | 0,19 | inclinaison de l'orbite | 6,4° |
| période de rotation | 5 h 21 mn | année sidérale | 3 ans 39 j 6 h 21 mn |
| inclinaison axe de rotation | 29° | vitesse orbitale | 19,34 km/s |
| masse | 2,7 $10^{20}$ kg | révolution synodique | 538,54 j = 1,47 ans |
| | 0,000047 Terre | jour solaire moyen | 5 h 21 mn 4 s |
| masse volumique | 3,44 g/$cm^3$ | sens | direct |
| | 0,62 Terre | pression au sol | 0 bars |
| pesanteur | 0,25 m/s/s | température min | 85° |
| | 0,024 Terre | température max | 270° |
| vitesse de libération | 0,36 km/s | albédo | 0,423 |
| nombre de satellites | 0 | atmosphère | - |

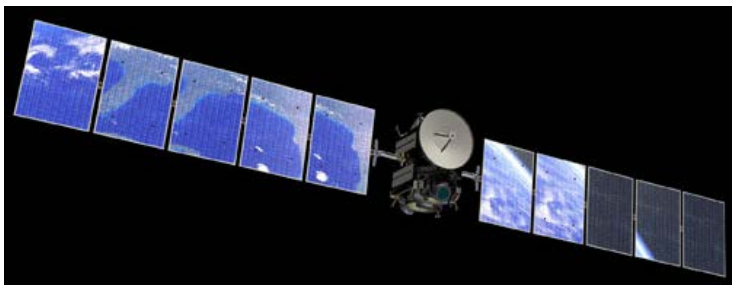
Vesta est le quatrième astéroïde découvert (par Olbers le 29 mars 1807). Par la taille, il est le second, surpassé seulement par Cérès. C'est un corps assez grand pour avoir une forme pratiquement sphérique. Mais vu depuis la Terre, c'est un tout petit corps non résolu par les télescopes traditionnels. Seul le télescope spatial a permi d'en avoir une image floue, mettant en évidence quelques taches, et une dépression dans la région sud. Mais il fallait une sonde à proximité pour en obtenir des renseignements scientifiquement exploitables. C'est chose faite depuis le mois de juillet 2011, lorsque la sonde américaine Dawn s'est placée en orbite autour de Vesta. On dispose maintenant d'images à haute résolution. L'acquisition est encore en cours, et les résultats scientifiques devront attendre encore un peu.

Le 24 août 2006, l'Union Astronomique Internationale a décidé de modifier la définition d'une planète, à la suite de la découverte de nombreux corps de taille semblable ou supérieure à celle de Pluton, et circulant sur des orbites comparables. Avec cette nouvelle définition, les plus gros astéroïdes sont maintenant nommés *planètes naines*. Pour avoir ce titre, un corps doit être sphérique. Or il est difficile de vérifier cette propriété, et c'est pourquoi Cérès est le seul astéroïde de la ceinture principale a avoir déjà reçu ce titre. Pour les autres, dont Vesta, la décision est suspendue. Mais on sait déjà que Vesta n'est pas vraiment sphérique ; cependant, il a reçu un fort impact qui l'a évidemment déformé. On pourrait donc admettre cette exception à la stricte sphéricité des planètes naines.

Les images de Vesta données par Dawn permettront de trancher prochainement. La sonde, au mois de juillet 2012, quittera Vesta pour se diriger vers Cérès qu'elle explorera à son tour. Avec la sonde New Horizons qui arrivera près de Pluton en 2015, les planètes naines seront bien mieux connues. Cette connaissance est bien précieuse car ces objets sont les restes inutilisés de la formation des planètes, mais contrairement aux tout petits objets, elles sont différenciées, ayant connu une phase chaude par l'énergie d'accrétion et de désintégration radioactive.

Dans la mythologie romaine, Vesta est la fille de Saturne et Rhéa. Elle est la sœur de Jupiter, Neptune, Pluton et Cérès. La déesse correspondante grecque est *Hestia*.

**Dawn**



NASA/JPL-Caltech/UCLA/McREL

Lancée en septembre 2007, la sonde Dawn s'est mise en orbite autour de Vesta le 15 juillet 2011. Elle emporte quatre instruments :

- Une caméra fonctionnant dans la gamme visible à proche infrarouge. Cette caméra utilise 7 filtres, permettant d'obtenir des images dans divers domaines, afin de déduire des données concernant le sol en analysant les réflectances dans ces divers domaines. La photographie des mêmes régions sous des angles différents permet aussi de déterminer les altitudes, pour obtenir une reconstruction en relief de l'astéroïde. La résolution maximale sur Vesta est de 25 m par pixel.
- Un spectromètre visible et infrarouge. En complément des images, il donne des spectres des différentes régions.
- Un spectromètre à rayons gamma et neutrons. Il permet la mesure des abondances des éléments à la surface.
- La sonde elle-même constitue un quatrième instrument, par les perturbations gravitationnelles qu'elle reçoit des corps qu'elle approche. Ces perturbations modifient légèrement la vitesse de la sonde, ce qui se traduit par un effet Doppler sensible sur la porteuse des ondes radio émises par la sonde vers la Terre. Des décalages ainsi mesurés, on déduit les vitesses, et par là les accélérations dues à la gravité de ces corps. Ceci permet en particulier de mesurer la masse des objets approchés.

**4 Vesta**

**Généralités**

Vesta n'étant pas parfaitement sphérique, ses dimensions sont : 578 × 560 × 458 km. Elle tourne sur elle-même en 5 h 20 mn. La surface est constituée de basalte, probablement épanché par volcanisme peu après la formation de Vesta. Cet astéroïde est en effet assez gros pour avoir contenu, lors de sa formation, assez de matériaux radioactifs pour que son intérieur fonde, et produise du volcanisme. Vesta est un astéroïde essentiellement rocheux.

Vesta montre une montagne gigantesque par rapport à sa taille : elle est trois fois plus haute que l'Everest ! C'est l'une des plus hautes du système solaire. Autour des cratères, l'imagerie en différentes longueurs d'onde met en évidence une grande diversité de composition minéralogique. Le premier regard surprend par un aspect plus rugueux de la surface, comparée à celle des autres astéroïdes. De plus, les comptages de cratères, qui permettent de se faire une idée de l'âge des terrains, indiquent que l'hémisphère sud a un âge de 1 à 2 milliards d'années, tandis que l'hémisphère nord est plus vieux.

Les premières analyses semblent montrer que les sillons présents dans les deux hémisphères sont probablement dûs à des impacts violents.

**Vue d'ensemble**

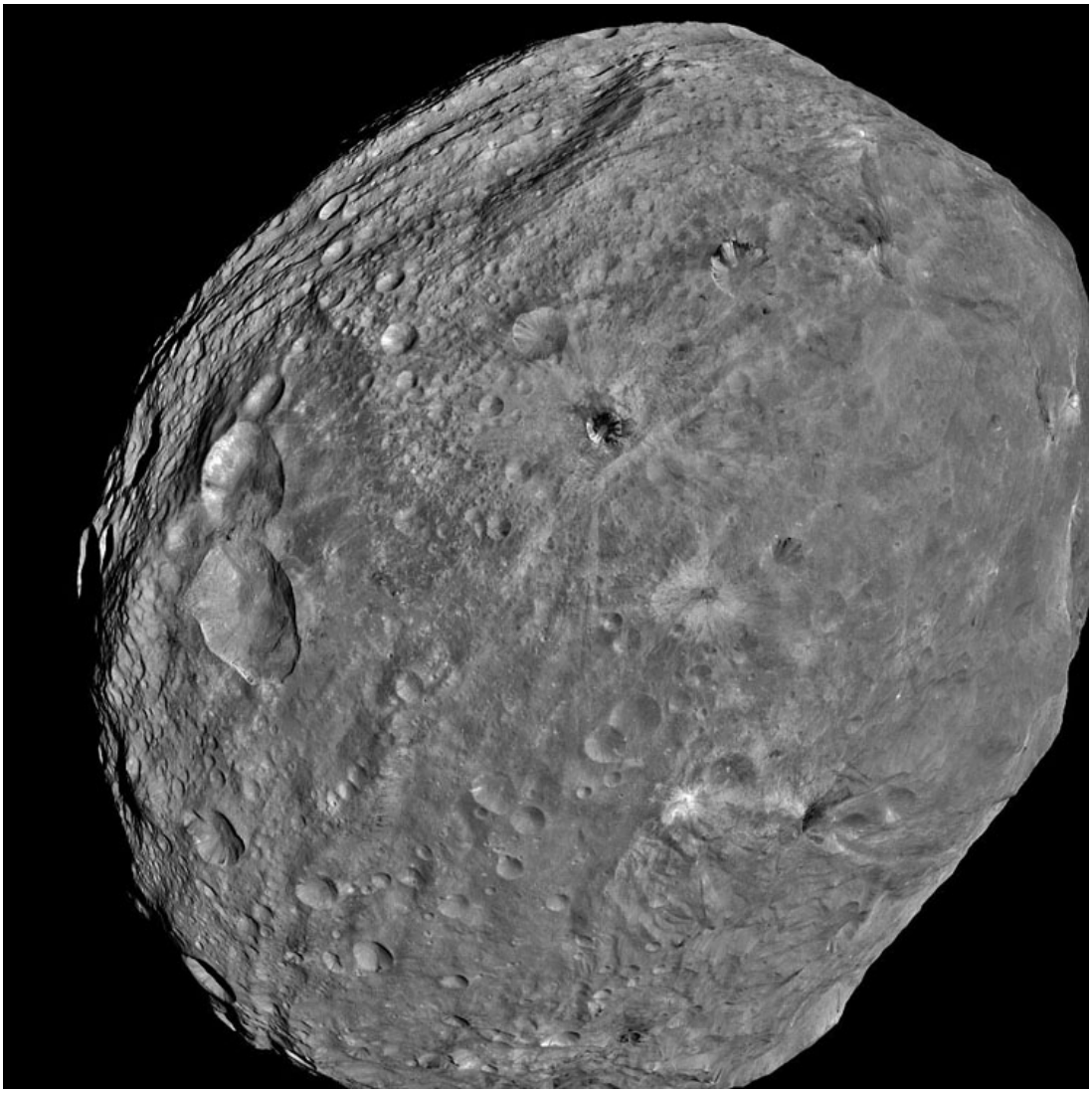


photo NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington

Vue d'ensemble

Prise le 24 juillet 2011, cette photo d'ensemble montre l'astéroïde d'une distance 5.200 km.

La région équatoriale est la zone striée située en haut et à gauche de l'image, tandis que le pôle sud se trouve en bas et à droite. Cette image montre que Vesta n'est pas vraiment sphérique, et ne mérite donc pas à strictement parler le titre de planète naine.

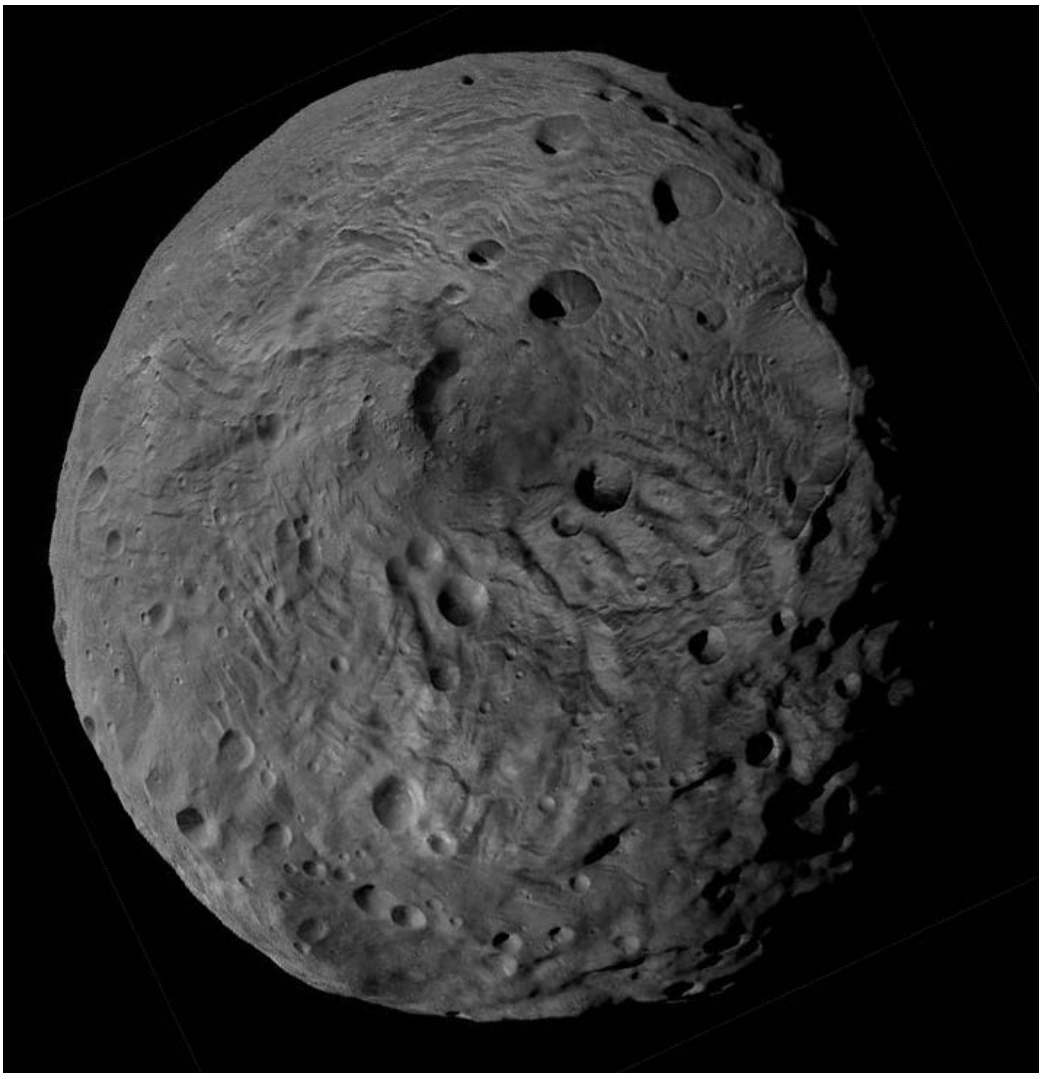
**Hémisphère nord**



photo NASA
Hémisphère nord

La surface de Vesta est très cratérisée, comme celle de tous les petits corps n'ayant pas d'atmosphère. Mais on y voit également un système de cannelures parallèles, qui se trouvent au niveau de l'équateur. Vesta fait un peu penser, par cet aspect, à Japet. C'est l'hiver dans l'hémisphère nord de Vesta, et le pôle nord est dans la nuit.

**Pôle sud de Vesta**



Pôle sud de Vesta photo NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington

Le pôle sud de Vesta est extrêmement accidenté, et montre donc une histoire géologique complexe, qui n'est pas encore comprise évidemment, puisque la mise en orbite de la sonde est trop récente. La structure la plus importante est un grand bassin d'impact, qui n'est pas très facile à distinguer ici. On voit, sur le bord gauche de la photo, une coupure abrupte de l'image, due à l'ombre portée d'une grande falaise : la partie sombre est celle qui est à l'ombre.

Le grand bassin d'impact que l'on devine recouvre toute la région polaire. Il est nommé *Rhéasilvia* (Rhéa Silvia, mère de Romulus et Rémus, était une Vestale), et mesure 460 km de diamètre. De plus, sa profondeur atteint 13 km au-dessous de la plaine environnante, et le rempart s'élève jusqu'à 12 km au-dessus… Le pic central culmine à 18 km au-dessus du plancher du bassin. Ceci donne un dénivellé de 25 km entre le point le plus haut et le point le plus bas… Une telle structure ne serait pas stable sur Terre, où la gravité est beaucoup plus forte. L'impact qui l'a excavé a éjecté 1 % de la masse de l'astéroïde ! Ces matériaux ont été placés sur des orbites autour du Soleil, sur lesquelles on les retrouve aujourd'hui : ils forment la famille (de Hirayama) de Vesta. Certains débris ont été perturbé par d'autres astéroïdes, peut-être choqués, et ont changé d'orbite. Ce faisant, ils peuvent un jour tomber sur la Terre où l'on a parfois la chance de les trouver. Ce sont alors des météorites, et elles sont de trois types différents : les eucrites, les diogénites et les howardites (groupe HED). Les diogénites sont des roches plutoniques, profondes. Excavées probablement du pôle sud par l'impact qui a creusé Rhéasilvia, elles permettent d'estimer l'épaisseur de la croûte à une dizaine de kilomètres.

L'impact seul n'explique peut-être pas toutes ces structures. Il est possible qu'une activité ancienne y ait participé.

La photo a été prise d'une distance de 2.700 km, et sa résolution est de 260 m / pixel.

**Carte du pôle sud**

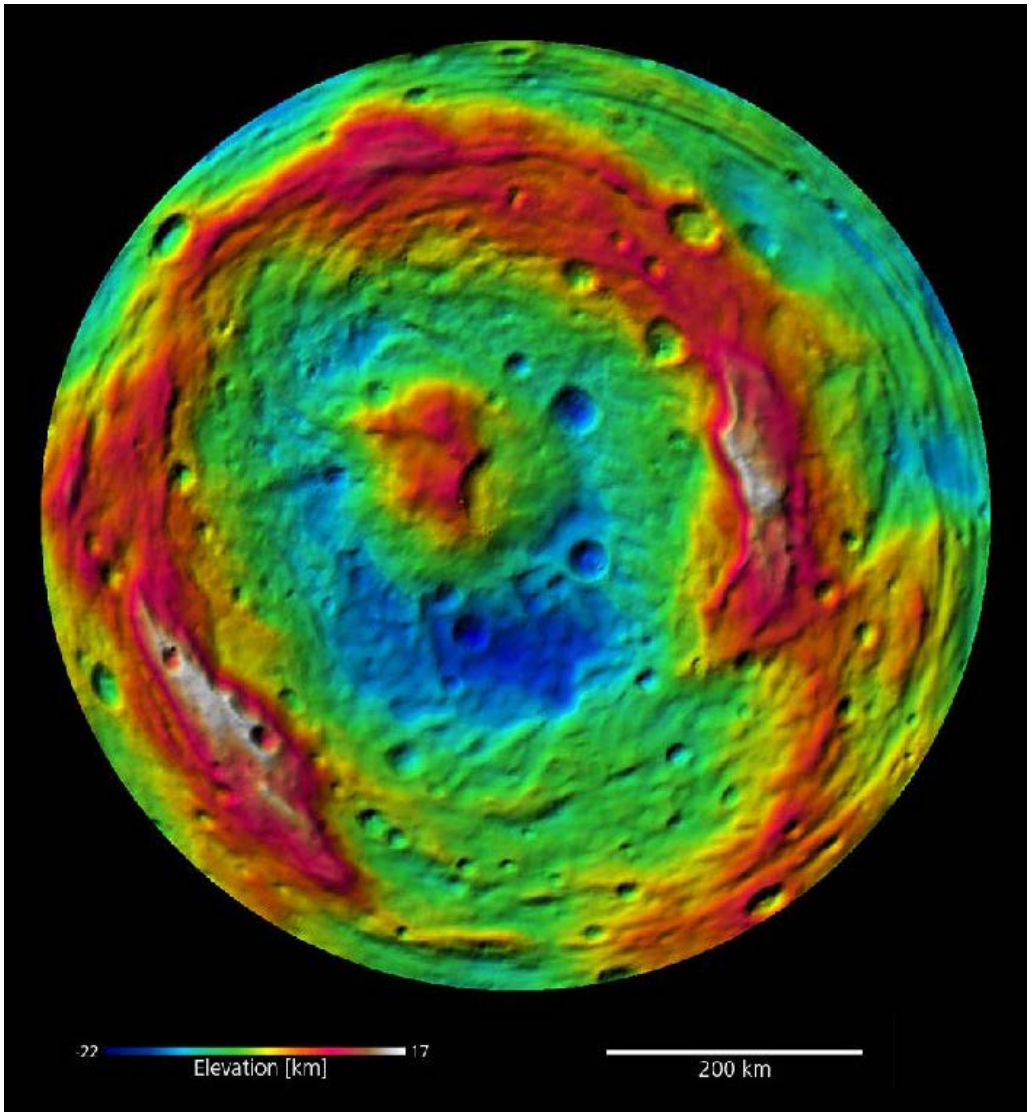



photo NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington

Carte du pôle sud de Vesta

Cette carte en fausses couleur montre les altitudes. Le bleu est assigné aux zones les plus basses, et le rouge et le blanc aux plus élevées.

La résolution horizontale est de l'ordre de 750 m / pixel. On voit une structure annulaire de 500 km de diamètre, dont le rempart s'élève de 15 km au-dessus du fond. Cette dépression était connue avant l'arrivée de la sonde, car son importance l'avait rendue accessible au télescope spatial.

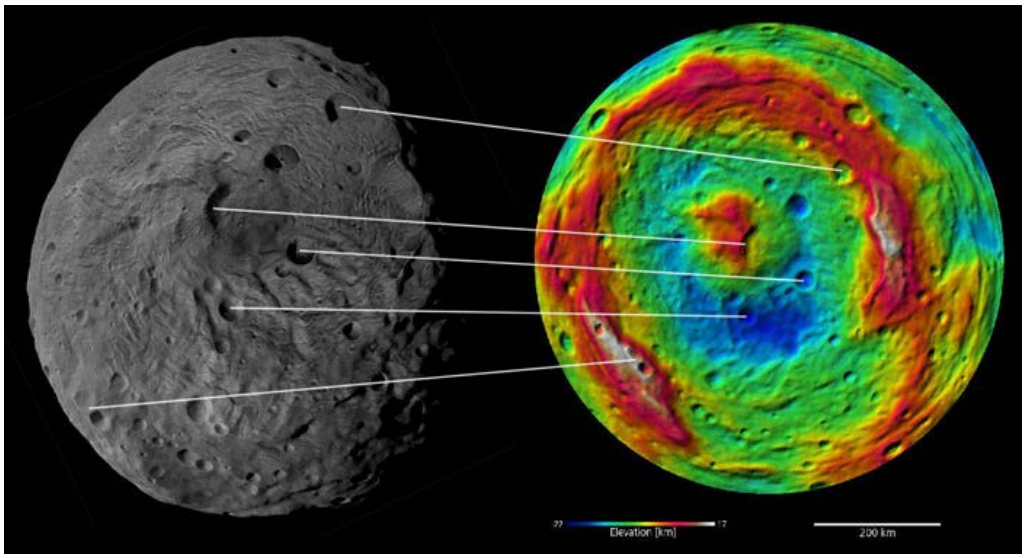



Photo et carte réduites, montrant les correspondances.

**Cratères enterrés sur Vesta**

Cette photo est l'une des premières enregistrées depuis l'orbite basse. Elle montre plusieurs cratères enterrés dans la région équatoriale criblée de creux.

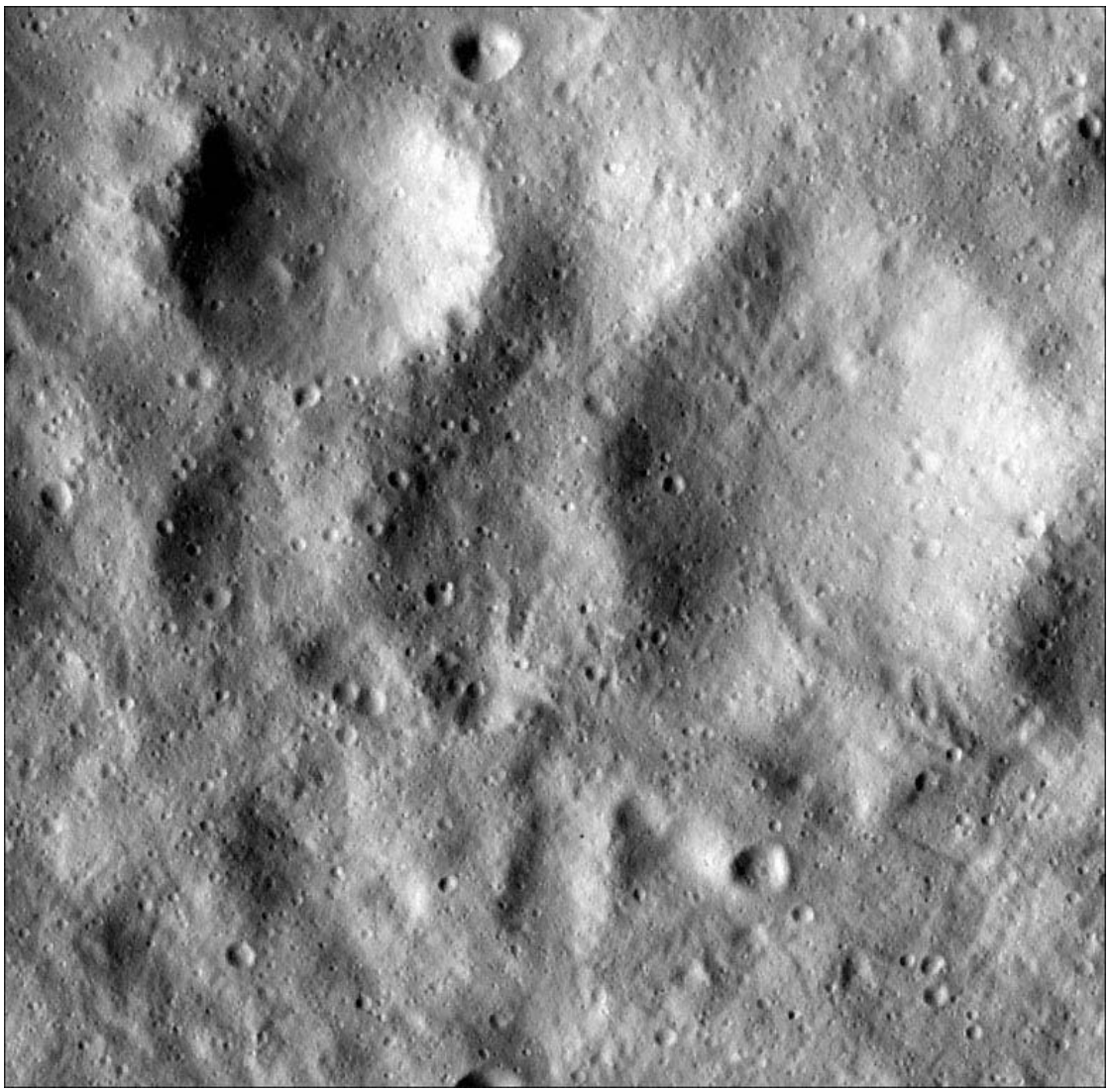


photo NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington

Cratères recouverts

Cette zone porte les traces d'éjection de matériaux par l'impact qui a créé le bassin Rhéasilvia dans la région polaire sud. On y voit également des structures linéaires de tailles et de formes diverses. L'image est centrée autour de -15°de latitude, et 50° de longitude. Elle a été prise le 13 décembre d'une altitude de 189 km. Elle couvre une surface de 88 × 18 km.

**Creux en clair et sombre**

Cette photo montre une partie de l'un des creux équatoriaux. Le plancher de l'un de ces creux est le dépôt le plus clair au bas de la photo, par contraste

avec la bande sombre de son bord. Prise le 13 décembre autour de -6° de latitude et 60° de longitude, depuis une altitude de 185 km. Elle couvre une surface de 18 × 18 km.

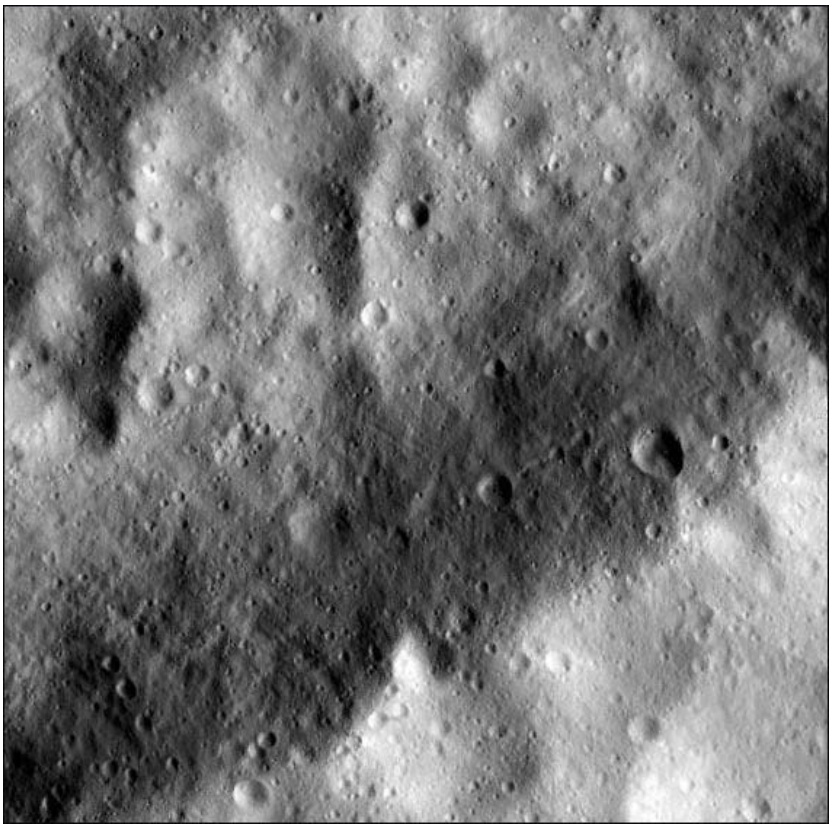


photo NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington

Creux en clair et sombre

Cette photo montre une zone où des terrains jeunes rencontrent des terrains plus vieux. Une couverture sombre et jeune de matériaux provenant d'un impact est à gauche, alors qu'une zone de dépôts plus clairs, granitée, marquée par des cratères, est à droite. Cette région se trouve à l'intérieur du bassin Rhéasilvia (pôle sud).

**Dépôts contrastés**

Région à l'intérieur de Rhéasilvia, montrant une zone jeune et sombre de matériaux éjectés, en contact avec une zone plus claire et accidentée, marquée de cratères.

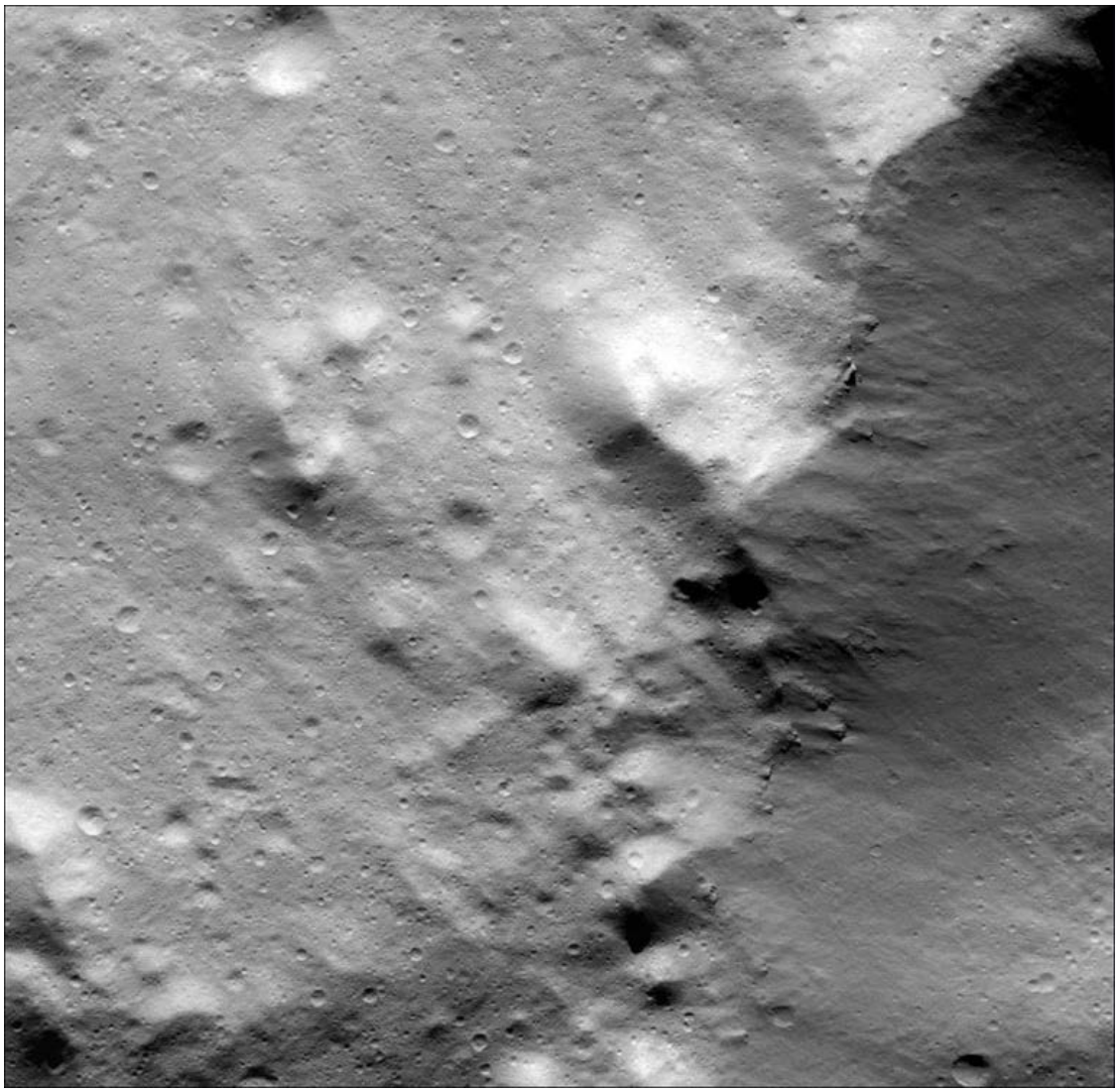


photo NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington
Dépôts contrastés dans Rhéasilvia

Le terrain plus clair, qui paraît plus vieux, montre aussi des structures linéaires qui se croisent. Latitude -78° , longitude 298°, altitude 204 km, 20 × 20 km.

**Vue oblique de la région polaire**

Cette image est reconstruite par ordinateur.

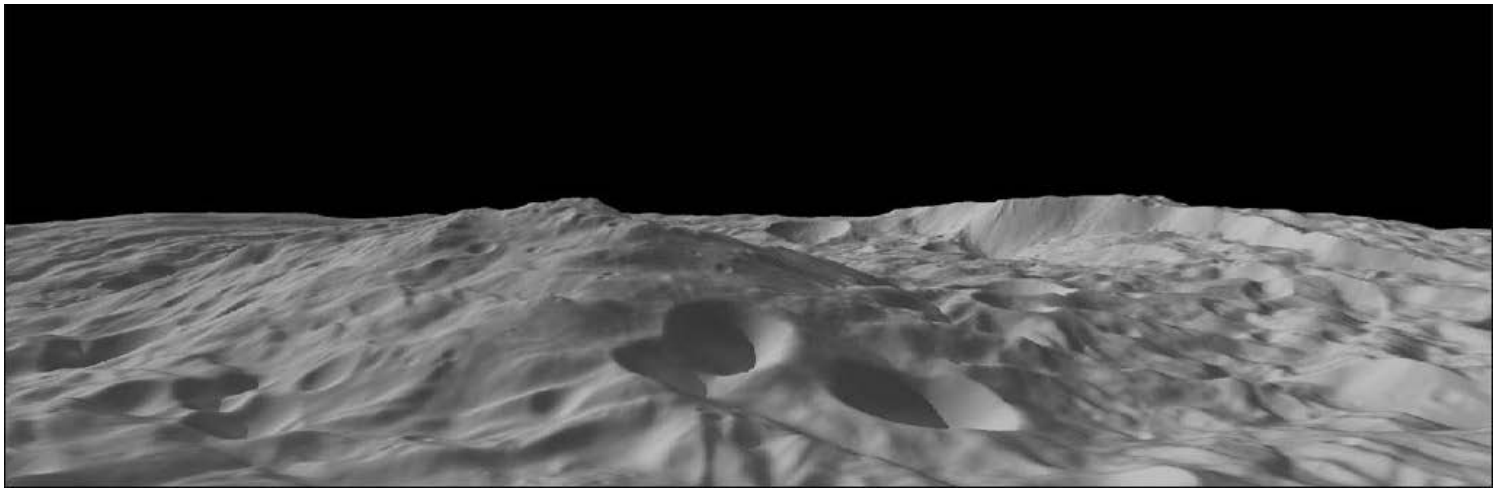


photo NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington
Survol du pôle sud de Vesta

Elle montre la région polaire sud de Vesta remise à plat, c'est-à-dire en supprimant la courbure due au petit diamètre de l'astéroïde. En effet, sans cela, une région bien plus petite serait seule visible, le reste étant sous le très proche horizon. De ce fait, il ne serait pas possible de voir une telle image si nous étions dans un vaisseau en orbite autour de Vesta. Résolution 300 m par pixel.

**Cratères ombrés sur Vesta**

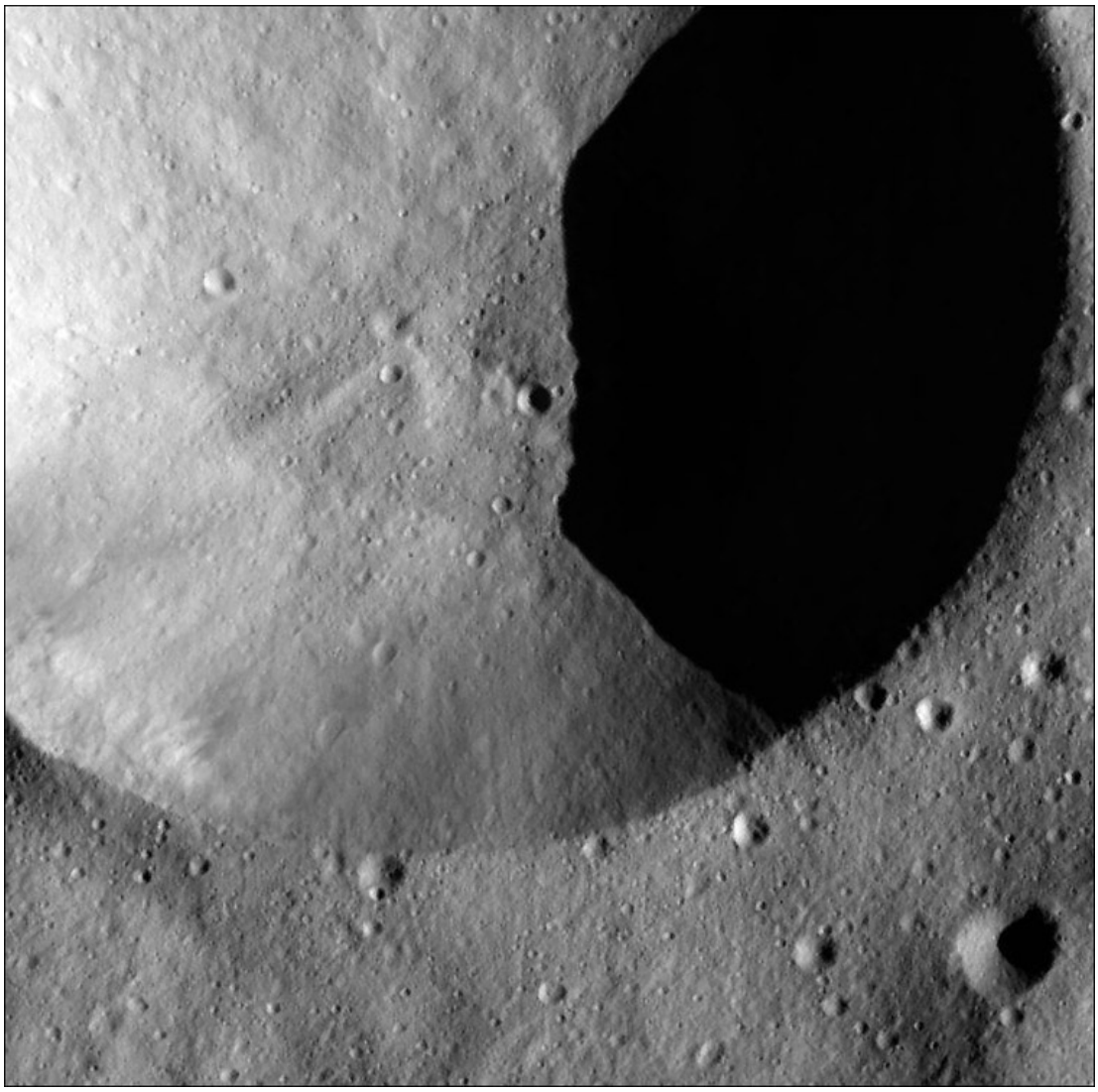


photo NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington

Cratère ombré

Ce jeune cratère se trouve dans la zone nommée *hevealy cratered terrain* de l'hémisphère nord. L'ombre dans le cratère est totalement noire par manque d'atmosphère. On remarque le bord très net du cratère. Latitude 17°, longitude 77°, altitude 191 km, 18 × 18 km.

**Escarpements**

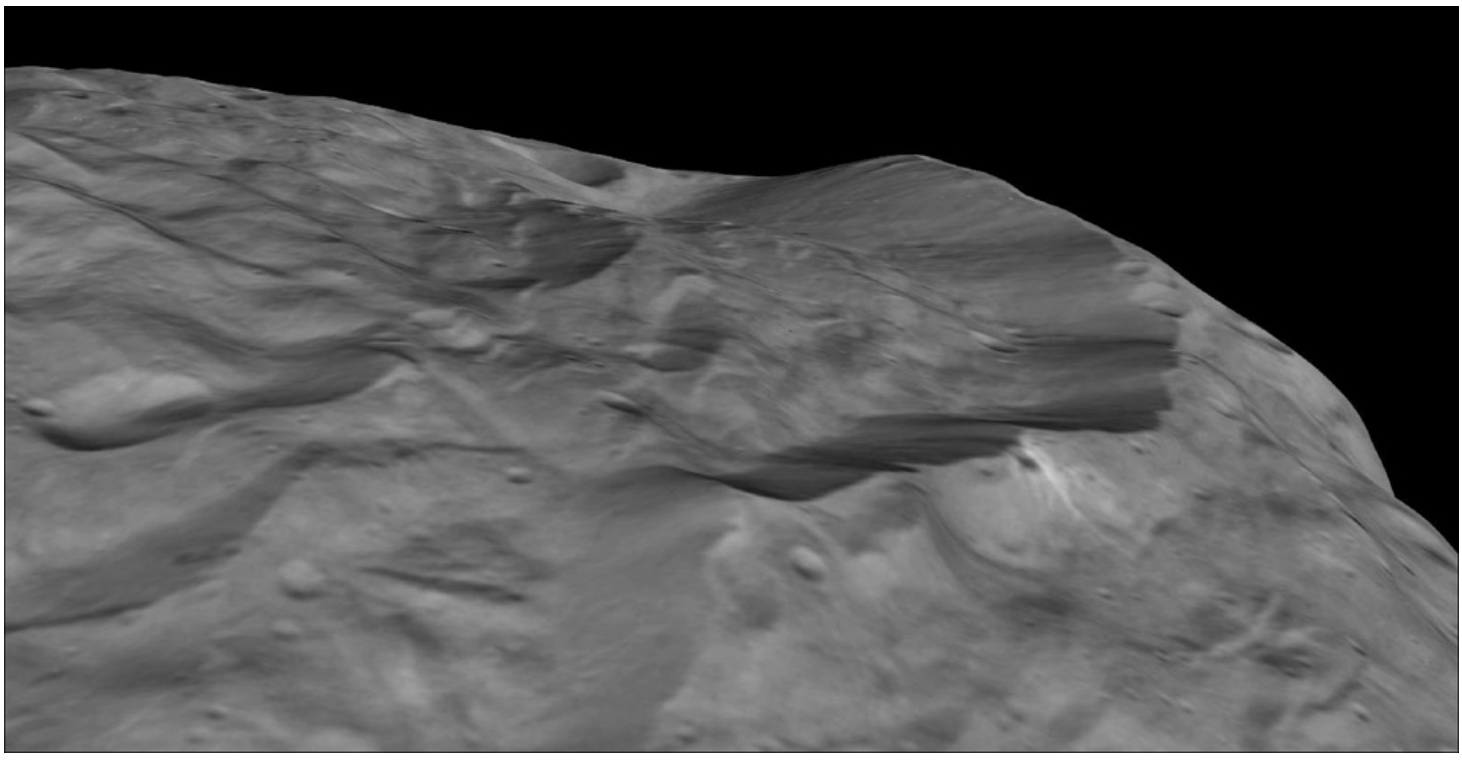


photo NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington
Escarpements

La région polaire sud de Vesta montre des falaises hautes de plusieurs kilomètres (ceci ne doit pas surprendre, les montagnes sur un astre peuvent être d'autant plus hautes que l'astre est plus petit, car il présente alors une gravité moindre). On voit aussi des sillons et des cratères. La formation de cette région accidentée n'est pas encore comprise. L'importance du bassin Rhéasilvia indique un impact violent. D'autres collisions ont certainement joué également un rôle. Mais il est possible qu'une activité interna ait participé à ces formations dans une phase ancienne, peu de temps après la formation du système solaire.

Les photos qui ont permi la reconstitution de ce panorama ont été prises d'une altitude de l'ordre de 2.700 km. La résolution est de 260 mètres par pixel.

**Méridien origine**

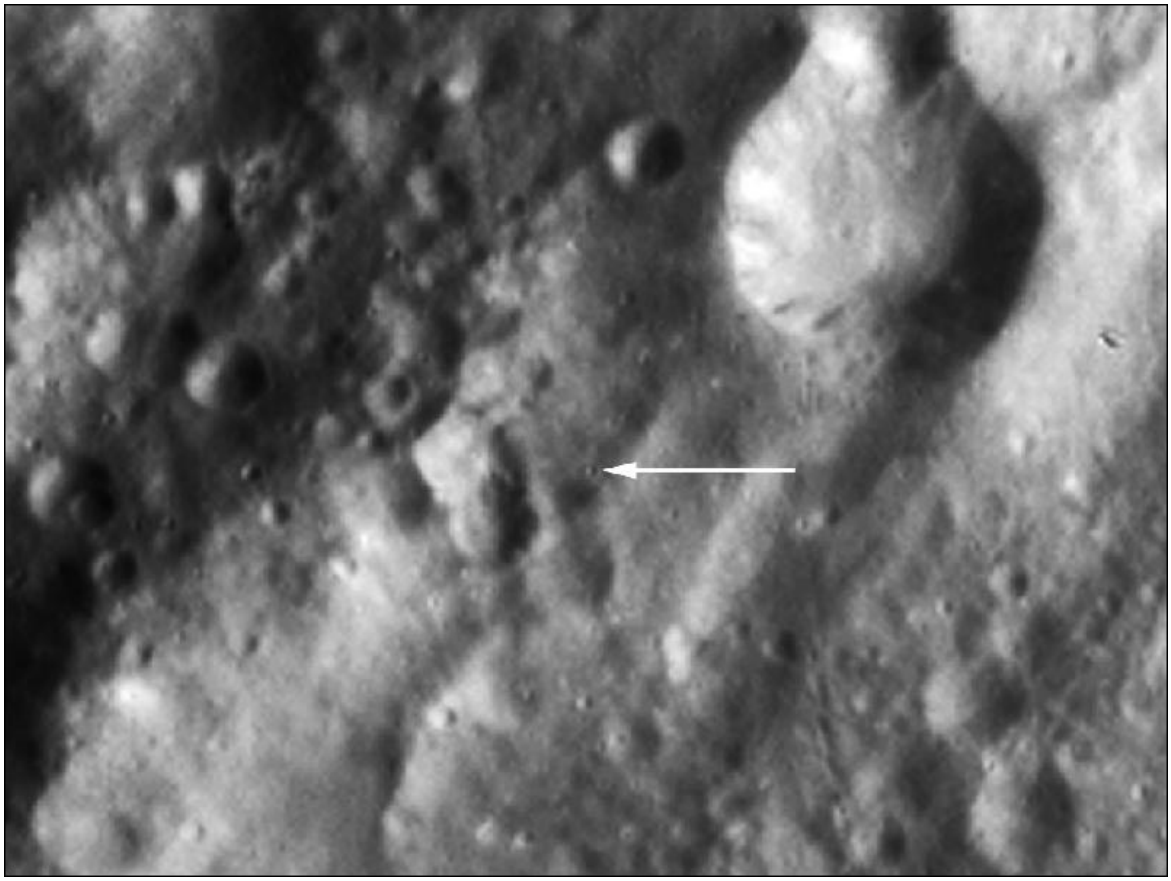


photo NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington
Méridien origine

Pour étudier la surface d'un astre, il faut définir un système de coordonnées, donc aussi une origine. Pour fixer l'origne des longitudes sur Vesta, un tout petit cratère a été choisi, sa petite dimension (500 m de diamètre) permettant une précision assez grande.

Le petit cratère marqué d'une flèche est nommé Claudia. Le premier méridien passe par son centre, et rejoint les deux pôles.

Photo prise d'une altitude de 2.700 km, avec une résolution de 260 m / pixel.

**Pôle sud**

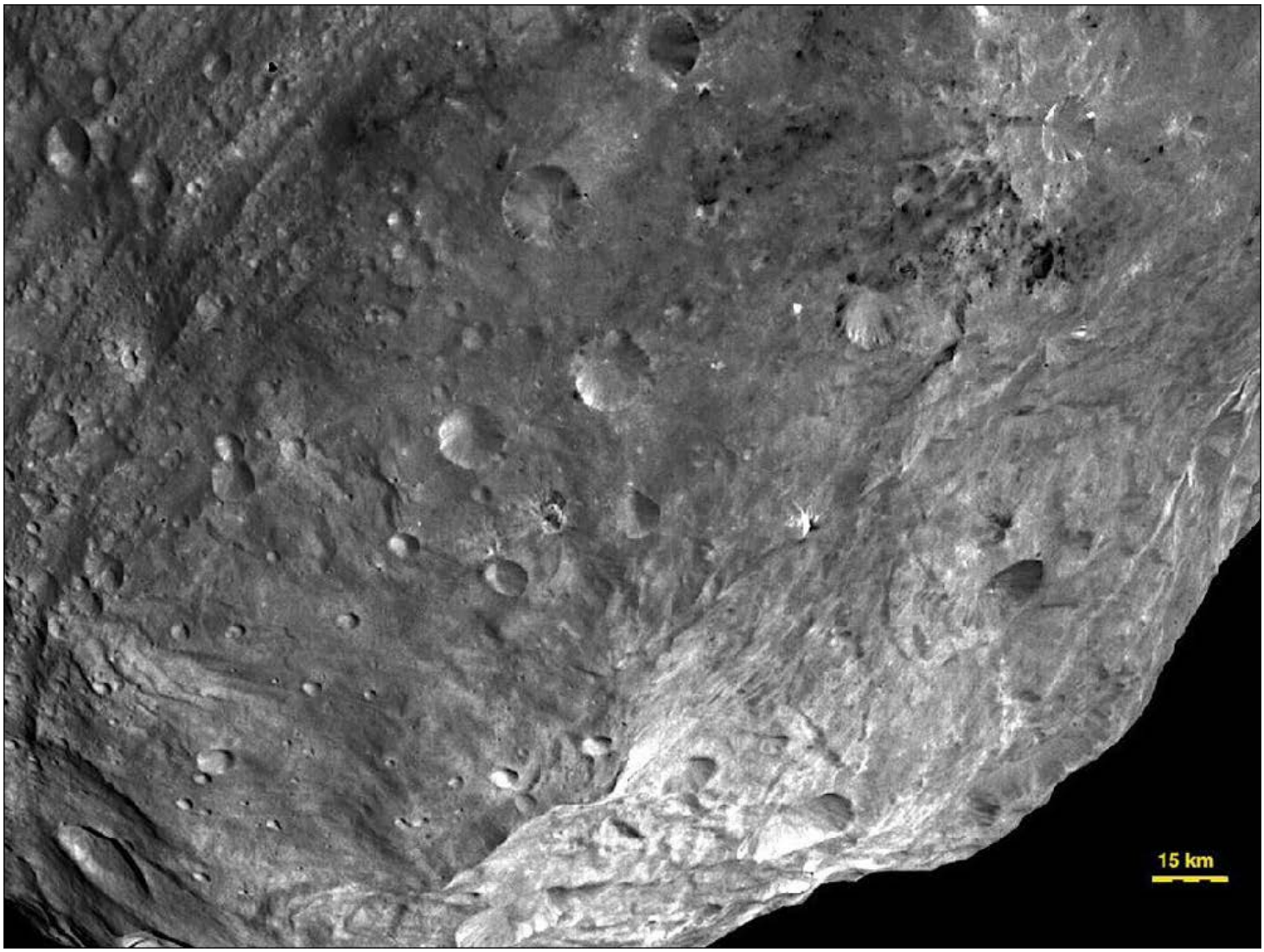


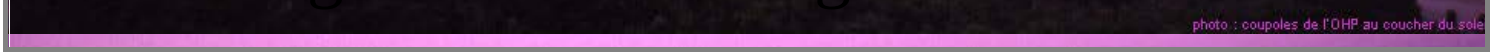

photo NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington

Vue d’ensemble

Cette photo montre à la fois la région équatoriale (en haut à gauche) et le pôle sud (en bas à droite). Les sillons visibles dans la région équatoriale sont profonds de 10 km. Image prise à une distance de 5.200 km.

---=OO=---

# Données générales sur les géantes




Les 4 planètes géantes se subdivisent en deux sous-ensembles :

- Jupiter et Saturne, qui contiennent de l'hydrogène métallique
- Uranus et Neptune qui n'en contiennent pas.

On classe aujourd'hui Jupiter et Saturne comme *géantes gazeuses*, et Uranus et Neptune comme *géantes glacées*. En effet, ces deux dernières contiennent beaucoup plus de matériaux solides que les deux autres, et à la distance à laquelle elles se trouvent du Soleil, ces matériaux sont des glaces (eau, $CO_2$, azote…).

Jupiter et Saturne possèdent très certainement un noyau de la taille de la Terre. De plus, ce noyau doit être différencié : rocs au centre, surmontés de glaces. Bien sûr, aux températures et pressions qui règnent au centre de ces planètes, ces matériaux sont fondus. Saturne, dont la densité est plus faible, possède probablement moins de rocs que Jupiter.

Au-dessus du noyau, on trouve de l'hydrogène métallique. Cette couche s'étend jusqu'à 0,9 $R_J$ pour Jupiter, et seulement 0,1 $R_S$ pour Saturne. Il faut une pression énorme pour mettre l'hydrogène dans cet état.

Une telle quantité de matière conductrice de l'électricité est à l'origine des champs magnétiques des deux planètes.

Au-dessus de l'hydrogène métallique se trouve une couche d'hydrogène et d'hélium liquides, non conducteurs. Cette couche s'élève jusqu'à l'endroit où la pression est suffisamment faible pour permettre l'évaporation. On passe alors à l'atmosphère à proprement parler. La température et la pression donnent au gaz une consistance proche de celle du liquide, et la transition se fait sans changement brusque de phase.

A une altitude où la pression tombe à 1 bar, des nuages se forment. Ceux de Jupiter et Saturne sont constitués de cristaux de glace d'ammoniac, ceux d'Uranus et Neptune de cristaux de méthane.

Les vents soufflent parallèlement à l'équateur. Autour de la Grande Tache Rouge et de la Grande Tache Sombre de Neptune, des vents s'écartent de cette direction générale, mais seulement localement ne s'éloignant guère en latitude.

La vitesse des vents en fonction de la latitude, présente une symétrie plus ou moins grande par rapport à l'équateur. Par contre, la vitesse est très stable dans le temps, comme l'attestent les observations anciennes de Jupiter et Saturne. Ces vents ne sont pas influencés par la direction du Soleil, pâle et peu efficace à ces distances. Ils sont produits par la rotation. Même sur Uranus, qui roule sur son axe, la rotation définit la direction des vents. On a toutefois observé une turbulence plus importante sur le côté ensoleillé.

**Anneaux**

L'anneau de Jupiter est poussiéreux. Il est alimenté en particules par les impacts météoritiques sur les trois satellites les plus internes, Métis, Adrastée et Amalthée. L'anneau Gossamer s'étend de chacun de ces satellites vers la planète.

Jupiter a trois anneaux. L'anneau principal est le plus étroit et le plus brillant. Certaines poussières qui le composent doivent être électriquement chargées, soit par interaction avec le champ de radiations de Jupiter, soit par photoionisation des atomes de surface. Si la charge électrique devient suffisante par rapport au poids de la poussière, celle-ci peut être entraînée vers des latitudes plus élevées. Ce mécanisme pourrait être la source du halo qui s'étend de l'anneau Gossamer vers le nord et vers le sud.

L'anneau de Saturne est de loin le plus important des 4 planètes géantes. La division de Cassini, connue depuis longtemps, le sépare en deux parties principales. L'anneau à l'extérieur de la division de Cassini est nommé A, celui à l'intérieur est nommé B. Un anneau à l'intérieur de B a été découvert au début du XIX$^{e}$ siècle, et nommé C. Ensuite, un anneau a été trouvé bien au-delà de l'anneau A, et s'étendant jusqu'à l'orbite de Rhéa.

---=OO=---



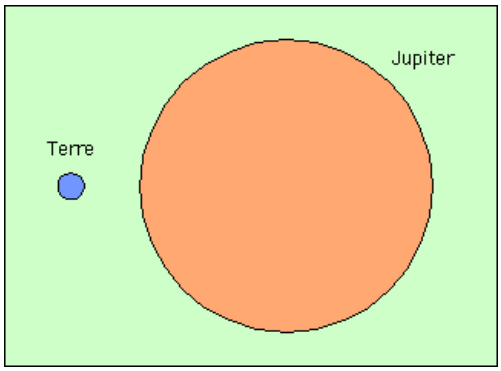

## Carte d'identité

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| diamètre | **142.984 km** | | demi grand-axe | **778,412 $10^6$ km** |
| | **11,2092 Terre** | | | **5,203 UA** |
| diamètre angulaire max | 49,8" | | excentricité | **0,09341** |
| aplatissement | **0,06487** | | inclinaison de l'orbite | **1,3053°** |
| période de rotation | **9 h 55 mn 30 s** | | année sidérale | **11 ans 312 j 20 h 18 mn** |
| inclinaison axe de rotation | **3,12°** | | vitesse orbitale | **13,0697 km/s** |
| masse | **1.898,7 $10^{24}$ kg** | | révolution synodique | **398,884 j** |
| | **317,8 Terre** | | jour solaire moyen | 9 h 50 mn 31 s |
| masse volumique | **1,33 g/cm$^3$** | | sens | rétrograde |
| | **0,241 Terre** | | pression au sol | - |
| pesanteur | **23,12 m/s/s** | | température min | -150° |
| | **2,359 Terre** | | température max | -150° |
| vitesse de libération | **59,54 km/s** | | albédo | **0,52** |
| nombre de satellites | 63 | | composition atmos. | H, He, $CH_4$, $NH_3$, $C_2H_2$, $C_2H_6$ |

Les éléments en gras sont tirés du livre *Allen's astrophysical quantities*, quatrième édition

**Une géante…**

Vue de la Terre, Jupiter a une magnitude atteignant -2,5 ; elle est très brillante, c'est l'objet le plus brillant après Vénus. Première des planètes géantes, Jupiter est la plus grosse : son diamètre atteint 140.000 km, ce qui fait 11,2 fois celui de la Terre.




**…gazeuse !**

Son volume est $11{,}2^3$ = 1.400 fois plus grand (le volume étant proportionnel au cube du diamètre). La première idée serait que la planète doit contenir 1.400 fois plus de matière que la Terre, donc que sa masse doit être 1.400 fois plus grande. Ce n'est pas le cas, elle n'est que 318 fois plus élevée… Ceci nous montre que la matière est moins condensée dans Jupiter que dans la Terre : la masse volumique de cette planète n'est que de 1,33 g/cm$^3$ (contre 5,52 g/cm$^3$ pour la Terre). Cette donnée montre clairement que Jupiter est d'une nature différente des quatre planètes telluriques. Si elle était constituée de cailloux, comme la Terre, sa masse volumique serait beaucoup plus élevée, au-dessus de 5. Pour être si légère, elle doit être constituéeessentiellement de gaz légers, hydrogène et hélium. Cette idée sera confirmée, et on dit que Jupiter est une planète gazeuse.

Soit V le volume, r le rayon : $V = 4/3\ \pi\ r^3$



Soient $V_j$ et $V_t$, $r_j$ et $r_t$ les volumes et rayons de Jupiter et de la Terre : $V_j / V_t = (4/3\ \pi\ r_j^3) / (4/3\ \pi\ r_t^3) = r_j^3 / r_t^3 = (r_j / r_t)^3$

Le rapport des volumes est le cube du rapport des rayons.

Soient M la masse, et ρ la masse volumique moyenne : $\rho = M / V$

$\rho_j / \rho_t = M_j / V_j \times V_t / M_t = M_j V_t / M_t V_j = M_j r_t^3 / M_t r_j^3 = (M_j / M_t) \times (r_t / r_j)^3$

**Un poids lourd…**

Elle contient plus de matière que toutes les autres planètes réunies : 70 % de la masse du système solaire, Soleil exclu. Les 30 % restant se partagent entre toutes les autres planètes, les astéroïdes, la ceinture de Kuiper…

**…lointain, froid…**

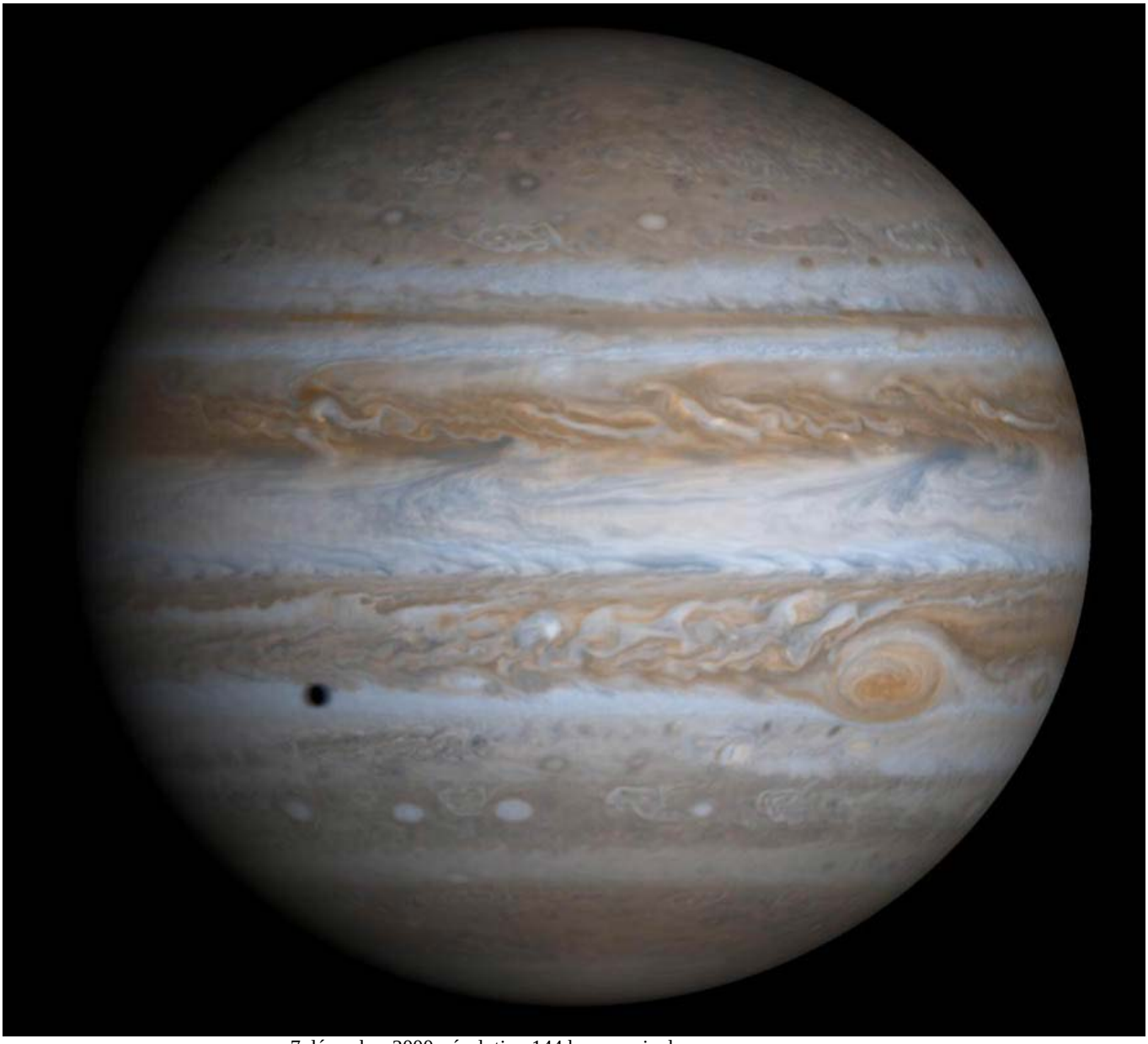
Située à 778 millions de km du Soleil (5,2 UA), donc 778/150 = 5,2 fois plus loin que la Terre, elle reçoit donc $5,2^2 = 27$ fois moins d'énergie que nous. Il doit s'ensuivre une température beaucoup plus basse que chez nous. Mais le problème est un peu plus compliqué, on le verra plus loin.

**…et pudique**

Jupiter est entièrement recouverte de nuages, comme Vénus. Ce que nous voyons de la planète n'est que la couche supérieure de nuages, le sommet de son atmosphère. Mais la comparaison s'arrête là : le sol de Vénus apparaît quelques dizaines de kilomètres plus bas, alors que celui de Jupiter, s'il existe, se trouve très près du centre. Comme pour le Soleil, c'est la partie où l'atmosphère devient transparente. Dans un petit télescope d'amateur, on voit distinctement des bandes parallèles à l'équateur, claires ou sombres, et avec un instrument de 200 mm de diamètre au moins, on distingue la Grande Tache Rouge. Celle-ci est connue depuis très longtemps (elle a été découverte par Robert Hooke en 1664) ; elle est permanente, visible depuis qu'on dispose d'instruments pour l'observer. La Terre pourrait y être contenue deux fois…

La Grande Tache Rouge permet très facilement de mesurer la rotation de la planète. On voit qu'elle fait un tour complet sur elle-même en un peu plus de 10 heures, donc beaucoup plus vite que la Terre. Mais ceci n'est qu'une estimation grossière, qu'il conviendra d'affiner par la suite. Toutefois, cette rapide rotation a une conséquence importante : Jupiter n'est pas ronde.

Dans un modeste instrument, on parvient à distinguer que le diamètre équatorial est plus grand que le diamètre polaire : 142.000 km, contre 134.700 km seulement. La planète est gazeuse, donc fluide. Sous l'effet de la force centrifuge, les régions équatoriales auraient tendance à s'échapper ; mais en s'amassant à l'équateur, elles augmentent la quantité de matière en ces régions, donc la gravité augmente aussi, et on atteint un équilibre. La fluidité de la planète, et sa grande vitesse de rotation, justifient l'aplatissement observé.



7 décembre 2000, résolution 144 km par pixel NASA/JPL/University of Arizona

Cette image a été composée à partir de 4 clichés pris par la sonde Galileo, et reconstruite pour simuler une caméra à grand angle. On voit en bas à gauche l'ombre d'Europe sur les nuages de Jupiter.

Il faut remarquer les **bandes sombres**, les **zones** plus claires qui s'alternent ; les marbrures montrent une forte turbulence générale dans l'atmosphère de la planète. Elles ont reçu des noms, du nord au sud :

| sigle | nom anglais | nom français |
|---|---|---|
| *NPR* | **N**orth **P**olar **R**egion | Région polaire nord |
| *NTB* | **N**orth **T**emperate **B**elt | Bande tempérée nord |
| *NTZ* | **N**orth **T**ropical **Z**one | Zone tropicale nord |
| *NEB* | **N**orth **E**quatorial **B**elt | Bande équatoriale nord |
| *EZ* | **E**quatorial **Z**one | Zone équatoriale |
| *SEB* | **S**outh **E**quatorial **B**elt | Bande équatoriale sud |
| *STZ* | **S**outh **T**ropical **Z**one | Zone tropicale sud |
| *STB* | **S**outh**T**emperate **B**elt | Bande tempérée sud |
| *SPR* | **S**outh **P**olar **R**egion | Région polaire sud |
| *GRS* | **G**reat **R**ed **S**pot | Grande Tache Rouge |
| *WOS* | **W**hite **O**val **S**pots | Tache blanche ovale |

Enfin, la **Grande Tache Rouge** (à droite) est l'objet le plus spectaculaire sur Jupiter ; mais on voit également de nombreuses petites taches blanches, qui ont le même aspect global, mais en plus petit et moins coloré.



La Grande Tache Rouge photographiée par Voyager 1 à 9,2 millions de km
le 25 février 1979, résolution 160 km photo NASA

On voit bien ici l'allure tourbillonnante de la Tache Rouge. Egalement remarquable, la différence entre les côtés gauche et droit de la tache : un certain calme règne à droite, tandis que le côté gauche est particulièrement agité. L'aspect de ces régions est très changeant. Des nuages blancs sont pris dans des mouvements turbulents.

On voit aussi que la Tache Rouge se fait une place dans l'atmosphère en écartant les bandes qui l'entourent. La bande en-dessous montre une structure très turbulente, spécialement à gauche de la tache blanche. On voit plus bas quelques taches blanches (*WOS* ou *White Oval Spots*).

**Bilan énergétique**

Jupiter possède une particularité importante : on sait déterminer exactement la quantité de chaleur qu'elle reçoit du Soleil (27 fois moins qu'ici). On en déduit par conséquent l'énergie que la planète doit rayonner pour rester en équilibre thermique : si elle rayonne moins, elle se réchauffe, si elle rayonne plus elle se refroidit. Donc, elle doit rayonner exactement autant d'énergie qu'elle en reçoit du Soleil. Or elle en rayonne davantage ! Les mesures de l'énergie émise par Jupiter vers l'espace ont montré qu'elle était 2,5 fois supérieure à celle reçue du Soleil ! Etant donné qu'elle ne se refroidit pas, il doit y avoir une autre source d'énergie. D'où vient donc le supplément d'énergie émis par Jupiter ?

A priori, cette propriété caractérise les étoiles. Mais celles-ci produisent l'énergie par deux mécanismes différents :

- la contraction gravitationnelle dans la phase T Tauri ;
- la fusion nucléaire pendant la vie adulte de l'étoile (Séquence Principale pour l'hydrogène, géante rouge pour les autres éléments).

La fusion est totalement exclue pour Jupiter, dont la masse est bien trop faible pour la produire (à peu près 100 fois trop faible). La contraction gravitationnelle est une source possible, si la planète n'est pas encore parfaitement en équilibre. Cette contraction serait très lente (quelques millimètres par an), mais suffisante pour produire l'énergie mesurée. Une autre explication est possible, en supposant que l'énergie gravitationnelle produite au cours de la formation de la planète n'est pas encore totalement évacuée.

La théorie communément adoptée jusqu'à quelques années en arrière était que la planète continuait à se contracter, et rayonnait donc par énergie gravitationnelle. Mais il semble que ce ne soit pas le cas, ou tout au moins que ce ne soit pas suffisant. Une nouvelle théorie indique que

l'hélium dont elle est composée en partie constituerait de petites gouttelettes qui, plus lourdes que l'hydrogène dans lequel elles baignent, tomberaient vers les profondeurs de la planète. C'est une pluie d'hélium dans son atmosphère. En tombant, les gouttes perdraient de l'énergie gravitationnelle qu'elles communiqueraient à l'atmosphère en la chauffant. Cette théorie indiquerait que l'atmosphère de Jupiter serait donc enrichie en hydrogène (appauvrie en hélium) par rapport aux proportions que l'on attendrait par sa formation. Il semble que ce soit effectivement le cas. C'est une forme de différenciation qui se poursuit donc. L'énergie envisagée ici est encore de nature gravitationnelle, mais par le biais de la différenciation, **sur un seul composant**.

En résumé, l'énergie produite pourrait provenir de :

- la contraction gravitationnelle non achevée (Jupiter ne serait pas encore totalement en équilibre) ;
- chaleur résiduelle provenant de la contraction lors de la formation de la planète, mais non encore évacuée ;
- une pluie d'hélium, d'origine gravitationnelle également.

L'équilibre thermique de Jupiter se fait donc entre la somme de l'énergie reçue du Soleil et de l'énergie produite par cette pluie, et l'énergie rayonnée.

Cette énergie maintient les couches basses de l'atmosphère à des températures bien plus élevées que ce qu'on pourrait penser.

La variation de température entre les pôles et l'équateur est faible ; il n'y a donc pas de transport d'énergie comme sur Terre (vents alizés et courants marins). La circulation atmosphérique est plutôt gouvernée par l'énergie interne (alors que sur Terre, elle est gouvernée par l'énergie solaire).

**L'atmosphère visible**

Les nuages existent jusqu'aux altitudes où la pression atteint 1 bar. Plus bas, ils ne peuvent se former. Ils sont constitués de cristaux de glace d'ammoniac.

Les vents soufflent parallèlement à l'équateur. Autour de la Grande Tache Rouge, des vents s'écartent de cette direction générale, mais seulement localement, ne s'éloignant guère en latitude.

La vitesse des vents, en fonction de la latitude, présente une symétrie assez grande par rapport à l'équateur. Leur vitesse est très stable dans le temps, comme l'attestent les observations anciennes. Ces vents ne sont pas influencés par la direction du Soleil, pâle et peu efficace à ces distances. Ils sont produits par la rotation.

Outre la Grande Tache Rouge, l'atmosphère de Jupiter présente un autre type de formations, nommées *WOS* (*white oval spots*). De même forme mais plus petites et blanches, elles n'en ont pas la stabilité, ni dans l'espace ni dans le temps. Elles se déplacent par rapport à elle, on en voit parfois plusieurs, elles apparaissent et disparaissent et dernièrement on a observé la fusion de deux d'entre elles.

La Grande Tache Rouge et les WOS tournent sur elles-même dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère nord. C'est le sens inverse des perturbations à la surface de la Terre. Ceci est dû au fait que ces formations ne sont pas des dépressions, mais au contraire des zones de forte pression. Ce sont des anticyclones.

Il s'y produit de fortes décharges électriques. Enfin, elles montrent des variations de teinte importantes. Quelle est la nature de ces formations rondes ?

Depuis la Terre, il n'était pas possible de préciser davantage les propriétés physiques de l'atmosphère de Jupiter. Par spectroscopie, on a pu déterminer la composition moyenne du sommet des nuages, et on a montré que l'hydrogène y était dans la proportion de 88 % et l'hélium 11% ; les autres éléments chimiques ne sont présents qu'à l'état de traces. Ils sont sous forme de méthane ($CH_4$), d'ammoniac ($NH_3$), de gaz carbonique ($CO_2$), d'eau ($H_2O$)… L'abondance de l'hydrogène s'explique par deux arguments :

- la forte gravité de la planète, qui implique une vitesse d'évasion élevée ;
- le froid qui règne au niveau de son orbite, qui implique une faible vitesse d'agitation thermique des gaz.

Dans ces conditions, une atmosphère est stable, même pour les gaz légers. La composition moyenne de Jupiter est donc très proche de celle de la nébuleuse qui lui a donné naissance.

L'atmosphère de Jupiter contribue pour une part importante à la masse totale de la planète. C'est le cas pour les 4 planètes géantes, alors que les atmosphères des planètes telluriques ont une masse négligeable comparée à la masse totale (quand il y a une atmosphère).

Les nuages sont constitués essentiellement d'ammoniac et de méthane. Avec cette composition, ils devraient être blancs, et non orangés. Ils contiennent donc des composés colorés, qu'on n'a pas encore découverts. Leur surface visible est à une température de -130 à -150 , et la pression de l'atmosphère à leur sommet n'est que de 50 millibars (1.000 millibars à la surface de la Terre). Mais bien sûr, la pression augmente vite lorsqu'on descend dans l'atmosphère, et contrairement à une planète tellurique, cette augmentation n'a pas de limite précise, puisqu'il n'y a pas de sol.

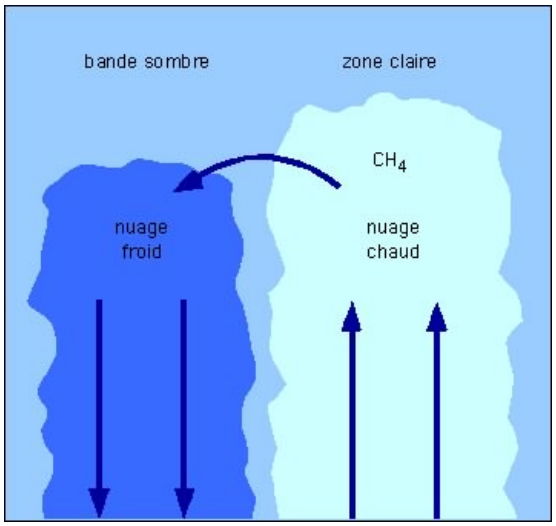
L'arrivée des premières sondes près de Jupiter a montré la nature des bandes et de la Tache Rouge. Ce sont des phénomènes atmosphériques, leur aspect est différent, leur origine aussi :

- Les bandes sont des nuages de couleurs différentes. Ils s'expliquent, car la rotation de l'atmosphère de Jupiter est différentielle : elle tourne plus vite à l'équateur qu'aux pôles. Les bandes et zones matérialisent cette différence de rotation, et des successions de photos rapprochées, formant un film, montrent nettement les frottements entre bandes voisines, qui provoquent des turbulences. La permanence des bandes trouve donc une explication dans la rotation différentielle.
- les parties claires sont nommées *zones*, ce sont des nuages chauds ascendants, alors que les parties plus sombres sont constituées de nuages plus froids et descendants, nommés *bandes*. La coloration des nuages provient de molécules formées de combinaisons d'hydrogène avec du soufre, et d'autres éléments. L'air ascendant des zones est chargé de composés chimiques condensables. Arrivés à haute altitude, ces composés se condensent, et produisent les nuages brillants que nous voyons. Les bandes sont plus profondes dans l'atmosphère, et

sont constituées de gaz privé des condensables.

- Les bandes et les zones tournent à des vitesses différentes : des vents plus ou moins rapides les animent. Ces différences de vitesses sont stables dans le temps, donnant toujours le même aspect général à la planète. Entre bandes et zones, soufflent les alizés et les jet stream.
- La Grande Tache Rouge est de nature différente. Les photos prises par les sondes spatiales ont montré que les gaz y sont en rotation rapide, puisqu'elle effectue un tour complet en 6 jours. Sa coloration est variable : parfois très rouge, il arrive qu'elle devienne rose pâle. Ces formations tournent dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémipshère nord, et dans le sens inverse dans l'hémisphère sud. Ceci prouve qu'il s'agit de zones de hautes pressions (sur Terre, les cyclones sont des dépressions). Les prises de vue latérales mettent en évidence un trou dans les nuages : ce sont des fenêtres ouvertes sur des couches plus profondes de l'atmosphère. Sur Terre, les cyclones ne durent que quelques jours. Aussi, on ignore toujours comment la Grande Tache Rouge peut se maintenir depuis plusieurs siècles… L'explication est peut-être reliée à la provenance de l'énergie : sur Terre, l'énergie qui alimente l'atmosphère provient du Soleil, alors que sur Jupiter, une partie conséquente provient de l'intérieur même de la planète. Ce moteur thermique pourrait entretenir la circulation atmosphérique et la Tache Rouge.

La coloration de la Grande Tache Rouge pourrait provenir de composés phosphorés, mais on n'a pas encore d'explication sûre.




L'énergie interne produite par la planète entraîne un échauffement des gaz, qui se dilatent et montent sous l'effet de la poussée d'Archimède. Ces nuages arrivent à une altitude où ils perdent leur force ascendante. C'est là que nous les voyons, et ils nous apparaissent sous l'aspect des bandes claires. Les nuages ascendants contiennent de l'ammoniac, dont on n'a pas observé la signature spectrale dans les nuages descendants. L'ammoniac ne se détruit sûrement pas en passant des nuages ascendants aux nuages descendants, mais on ignore pourquoi on ne le détecte que dans les premiers.

video
(approche de Jupiter filmée par la sonde Galileo, NASA)

Les gaz s'écoulent alors vers les régions adjacentes, et se refroidissent. Ils y forment les bandes sombres. Plus froids, ils ont alors tendance à descendre, car leur densité a augmenté. Ainsi, les bandes claires sont des nuages ascendants, alors que les zones sombres sont leur contrepartie descendante. De plus, la rotation différentielle de l'atmosphère entraîne un cisaillement entre zones et bandes, qui produit la forte turbulence observée.

Lors de leur ascension, les nuages subissent un refroidissement et une diminution de pression. Les conditions physico-chimiques changeant, des réations chimiques se produisent. De nouveaux composés se forment, au détriment des anciens ; ceci entraîne un changement de coloration.

Des nuages d'ammoniac se forment dans les gaz qui montent des couches inférieures. L'ammoniac a été détecté par sa signature spectrale seulement dans les nuages ascendants, qui représentent 1 % de la haute atmosphère jovienne.

Dans la partie supérieure visible de l'atmosphère, les nuages sont rouges ou blancs. Il pourrait y avoir des flocons de neige d'ammoniac. Cette couche doit avoir une épaisseur de 30 km. Plus bas, on pense trouver des nuages d'hydrosulfure d'ammonium. Plus bas encore, les nuages doivent être bleutés, contenant des gouttes d'eau et des flocons de neige (d'eau).

Il est imaginable que des molécules organiques existent également dans ces zones. Et certains vont jusqu'à penser qu'une forme de vie très primitive pourrait s'y développer. Mais le brassage des nuages par la chaleur interne pourrait bien ruiner cet espoir.

Tout le reste de la planète, y compris l'atmosphère elle-même, ne peut pas être observé depuis la Terre, et les renseignements que nous avons sont indirects, fragmentaires et forcément approximatifs. Mais à force de construire des modèles et de les confronter avec les observations, on finit par obtenir un bon degré de confiance. Un vrai travail de bénédictin…

Le petit module de descente de la sonde Galiléo est arrivé sur l'atmosphère de Jupiter à la vitesse de 47 km/s. Il a fonctionné jusqu'à la pression de 22 atmosphères, et la température de 150 . Ce niveau correspond à 130 km sous le niveau 0, où la pression est d'un bar. Il est évident que 130 km rapportés au rayon de Jupiter ne représentent pas grand chose. Pourtant, c'est la seule mesure directe que nous ayons de l'intérieur de la planète. Au cours de la descente, la sonde a mesuré la luminosité, le flux de chaleur, la pression, la température, la vitesse et la direction des vents, et la composition de l'atmosphère.

Jupiter possède probablement un noyau de la taille de la Terre. Comme la Terre, ce noyau doit être différencié : rocs au centre, surmontés de glaces. Bien sûr, aux température et pression qui règnent au centre de Jupiter, ces matériaux sont fondus.

Au-dessus du noyau, on trouve de l'hydrogène métallique. Cette couche s'étend jusqu'à 0,9 $R_J$. Il faut une pression énorme pour mettre

l'hydrogène dans cet état. On parvient en laboratoire à reproduire cet état de l'hydrogène grâce à la cellule à enclumes de diamant.

Une telle quantité de matière conductrice de l'électricité est à l'origine du fort champ magnétique de Jupiter.

Au-dessus de l'hydrogène métallique se trouve une couche d'hydrogène et d'hélium liquides, non conducteurs. Cette couche s'élève jusqu'à l'endroit où la pression est suffisamment faible pour permettre l'évaporation. On passe alors à l'atmosphère à proprement parler. La température et la pression donnent au gaz une consistance proche de celle du liquide, et la transition se fait sans changement brusque de phase.

**Vitesse des vents**

Les bandes parallèles à l'équateur sont très stables dans le temps. Elles montrent de violents vents zonaux permanents. La GTR est en interaction constante avec les vents zonaux, et produit des structures turbulentes extrêmement complexes.

**Orages et aurores**

Des éclairs très lumineux se produisent vers le sommet des nuages, et émettent des ondes radio. Ils sont assez rares, mais 1.000 fois plus énergétiques que sur Terre. On les appelles *siffleurs* (*whistler*) car leur fréquence est descendante comme la fréquence d'un sifflement.

La nuit, dans les régions polaires, on voit des émissions visibles et ultraviolettes probablement produites par les particules chargées émises au voisinages de l'orbite de Io, et canalisées par le champ magnétique de Jupiter. Le mécanisme est semblable à celui qui produit les aurores polaires sur la Terre, excitées par les particules du vent solaire.

La face éclairée brille fortement dans l'UV, ce qui indique une température de la très haute atmosphère supérieure à 1.000 K.

**Constitution de Jupiter**

La difficulté première pour étudier l'intérieur de Jupiter réside dans les conditions extrêmes qui y règnent. Il est très difficile, sinon impossible, de les reproduire en laboratoire, et les propriétés de la matière dans ces conditions resteraient théoriques. Mais un travail de physique fondamentale a été développé récemment : il consiste à placer deux diamants taillés pointe contre pointe. La minuscule surface des pointes délimite entre elles un volume extrêmement petit (une petite fraction de $mm^3$), mais dans lequel on peut placer, avec des joints spéciaux, une petite quantité d'hydrogène liquide. Ensuite, on appuie fortement sur les diamants à l'aided'un levier : la force est transmise sur une surface minuscule, résultant en une pression considérable. On arrive ainsi au million d'atmosphères ! Ceci permet d'étudier l'hydrogène dans les conditions qui règnent au sein des planètes géantes. De plus, le diamant est transparent ; on peut le traverser par un rayon laser, qui va apporter de l'énergie à l'hydrogène.

Cet outil a permi de tester les modèles d'intérieur des planètes gazeuses, et nous a appris beaucoup de choses à leur sujet. En particulier, on a pu mesurer la pression à laquelle l'hydrogène devient métallique (il est liquide, mais à haute température, donc ionisé). Etant donné leur masse, Jupiter et Saturne possèdent une couche d'hydrogène métallique. Par contre, Uranus et Neptune sont trop peu massives pour que l'hydrogène y atteigne cet état (pression trop faible).

Sur Jupiter, il n'existe pas de sol au sens où nous l'entendons pour les planètes telluriques. Pour les planètes géantes, on considère que l'atmosphère s'étend depuis l'espace jusqu'à la zone où la pression atteint 1 bar (à peu près la pression de l'atmosphère terrestre). En-dessous, c'est l'intérieur de la planète, même si c'est toujours gazeux.

Nous avons vu que le sommet de l'atmosphère était constitué essentiellement d'hydrogène et d'hélium. Il en est de même pour la totalité de la planète, qui est faite pour 90 % en masse d'hydrogène et 10 % d'hélium (en négligeant les autres éléments en première approximation).

La partie gazeuse de Jupiter, dont l'atmosphère est le sommet, représente le premier tiers du rayon de Jupiter. La pression n'y est pas assez forte pour liquéfier le gaz.

Au-dessous de ce premier tiers, l'hydrogène est liquide. A une pression de 1 million de bars (1 million de fois la pression atmosphérique terrestre), l'hydrogène est atomique et non moléculaire. Un peu plus bas, la pression est telle qu'il est ionisé : les électrons sont libres, et peuvent donc se déplacer sous l'effet d'une différence de potentiel. Cette matière conduit donc l'électricité (et la chaleur), et pour cette raison on l'appelle *hydrogène métallique*. Cet océan d'hydrogène de plusieurs dizaines de masses terrestres produit, dans sa rotation, un champ magnétique 17.000 fois plus fort que celui de la Terre. Il s'agit également d'un champ dipolaire, et s'il y avait des marins sur cet océan, ils n'auraient aucune difficulté à s'orienter avec une boussole… Mais attention, car le nord magnétique est au pôle sud de la planète !

En étudiant la rotation de Jupiter, et son moment d'inertie, on a montré qu'il doit y avoir au centre un noyau plus lourd, rocheux, d'une dizaine de masses terrestres. A densité égale à celle de la Terre, son volume serait 10 fois plus grand que celui de la Terre, donc son diamètre serait 2,15 fois plus grand. Il devrait faire un peu moins que 30.000 km de diamètre. Il pourrait y avoir aussi des glaces qui surnagent, et augmentent le diamètre.

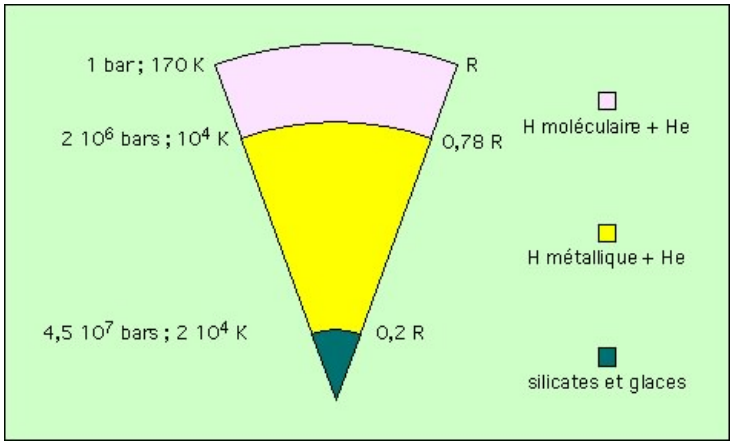



Schéma de l'intérieur de Jupiter

Ce schéma montre un intérieur en trois parties. La température et la pression sont portées à gauche. Elles croissent fortement vers le centre.

L'hydrogène métallique pourrait représenter 75 % de la masse totale de la planète.

**Le champ magnétique**

En 1955, les radiotélescopes permirent de découvrir que Jupiter était une source extrêmement puissante d'ondes radio. On eut pour la première fois la preuve qu'une planète autre que la Terre possédait un champ magnétique. Depuis, les observations radio à partir de la Terre et les mesures effectuées par les sondes Pioneer, Voyager et Ulysse ont permi de mieux connaître ses caractéristiques.

Jupiter possède un fort champ magnétique. Ceci se conçoit aisément, si on songe que la planète contient énormément d'hydrogène à l'état métallique, c'est-à-dire conducteur de l'électricité. Les mouvements de cette matière engendrent forcément un champ magnétique ; la question est de savoir quelle est exactement sa forme. Y répondre donnerait des indications sur la circulation des charges électriques à l'intérieur de la planète.

Il s'agit d'un champ, en première approximation, dipolaire comme le champ terrestre, et son axe est incliné d'environ 10° par rapport à l'axe de rotation de la planète. L'étude des différentes émissions radio a permis de préciser la période de rotation de Jupiter, leur période donnant directement accès à la période de rotation de l' intérieur planétaire où le champ magnétique est produit (l'observation des détails visibles ne donnaient que la période de rotation des nuages).

Le champ magnétique de Jupiter piège les particules du vent solaire. Comme la Terre avec les ceintures de Van Allen, la planète est entourée d'une ceinture de radiations mais beaucoup plus intense : elle est 25 fois suffisante pour tuer un homme.

Par ailleurs, la densité et la vitesse du vent solaire étant environ 25 fois plus faible au niveau de l'orbite de Jupiter qu'au niveau de l'orbite de la Terre, il en résulte que la magnétosphère jovienne est environ 100 fois plus étendue (si sa surface était lumineuse elle serait vue de la Terre comme un astre de dimension supérieure à la Lune et présentant une queue beaucoup plus longue que celle des plus belles comètes). Une autre différence avec la magnétosphère terrestre qui n'est peuplée que par les particules chargées du vent solaire, celle de Jupiter est également alimentée par Io dont le volcanisme, comme nous le verrons plus loin, éjecte une grande quantité de gaz et de poussières qui sont ionisés par le rayonnement UV du Soleil et se répartissent en un énorme tore de plasma entourant tout Jupiter au niveau de l'orbite de Io. La magnétosphère jovienne est donc un immense accélérateur de particules et on s'est aperçu que Jupiter est une des principales sources de rayons cosmiques de moyenne énergie observés dans le milieu interplanétaire jusqu'au voisinage de la Terre.

Tout comme sur Terre, les particules du vent solaire sont piégées dans ce champ magnétique, et en suivent les lignes en spiralant. Se concentrant dans les régions polaires, elle produisent au contact de l'atmosphère de magnifiques aurores polaires. Certaines ont été photographiées par les sondes en orbite.

**Les anneaux de Jupiter**

Jupiter possède des anneaux, comme Saturne, mais très ténus. Ils contiennent très peu de matière. De ce fait, ils sont totalement transparents pour un observateur terrestre. Il a fallu attendre qu'une sonde spatiale s'approche pour les photographier, et encore faut-il qu'elle détourne ses objectifs de la grande lumière réfléchie par Jupiter pour que les anneaux apparaissent.

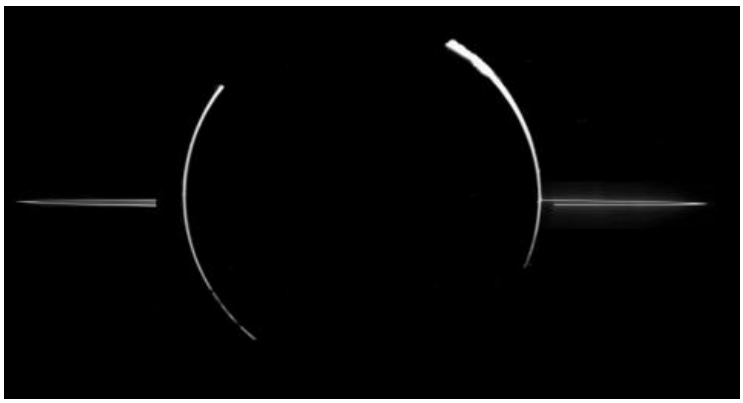


photo sonde Galileo, NASA

Les anneaux de Jupiter ne contiennent pas de glace. Ils sont probablement constitués de poussières de silicates, dont la taille est autour de 1 µm. Ces particules de poussière proviennent des impacts de micrométéorites sur les satellites proches, Méthis, Adrastée, Amalthée et Thébée. Métis et Adrastée approvisionnent l'anneau principal, Amalthée approvisionne l'anneau interne de Gossamer, et Thébée l'anneau externe de Gossamer. A l'intérieur de l'anneau principal, on observe un halo, probablement constitué de particules chargées électriquement et donc soumises au champ magnétique de Jupiter.

Un anneau principal, le plus brillant, orbite entre 51.000 et 57.000 km au-dessus des nuages. Une extension arachnéenne de cet anneau s'étend jusqu'à l'orbite d'Amalthée (109.000 km au-dessus des nuages), tandis que vers le bas, l'anneau s'étend jusqu'à 20.000 km, mais ce sont sans doute des particules échappées de l'anneau principal.

Les particules constituant les anneaux ont une taille typique de quelques micromètres, plus fines que celles de la fumée de cigarette. Etant donnée leur faible dimension, elles diffusent la lumière vers l'avant et non vers l'arrière. C'est pourquoi les anneaux de Jupiter sont pratiquement indétectables depuis la Terre.

Certaines poussières qui composent l'anneau principal doivent être électriquement chargées, soit par interaction avec le champ de radiations de Jupiter, soit par photoionisation des atomes de surface. Si la charge électrique devient suffisante par rapport au poids de la poussière, celle-ci peut être entraînée vers des latitudes plus élevées. Ce mécanisme pourrait être la source du halo qui s'étend de l'anneau Gossamer vers le nord et vers le sud.

**Les planètes Troyennes**

Ce sont deux groupes d'astéroïdes qui circulent sur la même orbite que Jupiter, aux points de Lagrange L4 et L5, en avance ou en retard de 60° ; de ce fait, les deux groupes de planètes troyennes et Jupiter forment toujours les sommets d'un immense triangle équilatéral. Cette configuration est stable. Elle constitue une solution particulière du difficile problème des trois corps : on ne considère que le Soleil, Jupiter, et une particule de masse négligeable, incapable d'influencer les deux corps principaux, qui obéissent donc au problème des deux corps.

On connait 1.018 objets au point L4, et 626 au point L5. Voici quelques uns des plus gros ; ceux de gauche (les Troyens) sont situés au point L4, ceux de droite (les Grecs) en L5 :

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 588 | Achilles | | 617 | Patrocles |
| 624 | Hector | | 884 | Priam |
| 659 | Nestor | | 1172 | Enée |
| 911 | Agamemnon | | 1173 | Anchises |
| 1143 | Odyssée | | 1208 | Troilus |
| 1404 | Ajax | | 1867 | Deiphobus |
| 1437 | Diomedes | | 1870 | Glaukos |
| 1583 | Antilochus | | 1871 | Astyanax |
| 1647 | Menelaus | | 1872 | Helenos |
| 1749 | Telamon | | 1873 | Agenor |
| 1868 | Thersites | | 2207 | Antenor |
| 1869 | Philoctetes | | 2223 | Sarpedon |

**Satellites**

Jupiter possède de nombreux satellites, certains formés en même temps que la planète, d'autres, plus petits, capturés par la suite.

**Observation**

Du fait du grand éclat de Jupiter, on peut la photographier au foyer d'un télescope avec l'oculaire en posant l'appareil sur pied fixe juste devant l'oculaire. La pose de l'ordre de 1 seconde permet cette manip avec une pellicule de 400 ISO.

Jupiter était au début de l'année 97 dans le Sagittaire, puis est passée dans le Capricorne.

---=OO=---




## Carte d'identité

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| diamètre | **120.536 km** | | demi grand-axe | **1.426,73 $10^6$ km** |
| | **9,449 Terre** | | | **9,537 UA** |
| diamètre angulaire max | 20,8" | | excentricité | **0,054150** |
| aplatissement | **0,097962** | | inclinaison de l'orbite | **2,4845°** |
| période de rotation | **10 h 39 mn 22 s** | | année sidérale | **29 ans 154 j 16 h 34 mn** |
| inclinaison axe de rotation | **26,73°** | | vitesse orbitale | **9,6724 km/s** |
| masse | **568,51 $10^{24}$ kg** | | révolution synodique | **378,092 j** |
| | **95,161 Terre** | | jour solaire moyen | 10 h 13 mn 24 s |
| masse volumique | **0,70 g/$cm^3$** | | sens | rétrograde |
| | **0,1269 Terre** | | pression au sol | - |
| pesanteur | **8,96 m/s/s** | | température min | -170° |
| | **0,9143 Terre** | | température max | -170° |
| vitesse de libération | **35,49 km/s** | | albédo | **0,47** |
| nombre de satellites | ≥ 31 | | composition atmos. | $H_2$, He, $CH_4$, $NH_3$ |

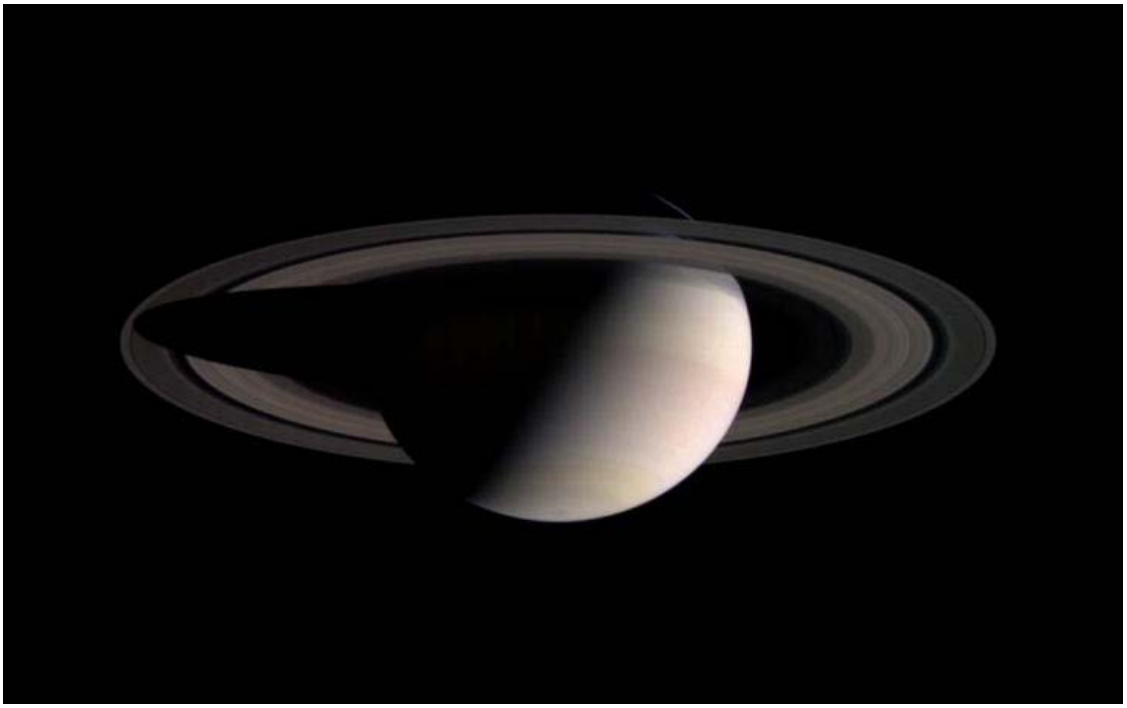
Saturne est particulière à plus d'un titre : tout d'abord, avec la première lunette fabriquée, elle montrait des oreilles ! Bien sûr, le pouvoir séparateur de cet instrument étant médiocre, il était impossible de voir l'espace entre l'anneau et la planète, et cet aspect aberrant a disparu avec des moyens meilleurs. Ceci pour l'aspect visuel. Mais si on étudie maintenant la densité de la planète, on la trouve de 0,7. Pardon ? 0,7 est inférieur à 1, donc sa masse volumique est inférieure à celle de l'eau... Un litre de la matière de Saturne ne pèserait que 700 grammes ! Il s'ensuit que si l'on disposait d'une grande baignoire (vraiment très grande) on pourrait y faire flotter Saturne...

Atmosphère composée essentiellement d'hydrogène (89 %), d'hélium, d'ammoniac et de méthane.

Le niveau zéro des altitudes est défini par l'endroit où la température s'inverse. La température, comme sur Terre, elle diminue avec l'altitude. Et comme sur Terre également, elle recommence à croître à partir d'une certaine hauteur : sur Terre, c'est vers 30 km d'altitude dans la stratosphère. Normalement, la température devrait continuer à chuter en se diluant dans l'espace, mais les gaz de la très haute atmosphère absorbent l'utraviolet du Soleil (et nous protègent), ce qui les chauffe. Plus bas, il n'y a plus d'UV, donc plus de chauffage et la température baisse, jusqu'à ce que l'effet de serre la fasse croître à nouveau.

Sur Saturne, c'est le méthane qui fait augmenter la température dans la stratosphère. Il produit également des brumes d'hydrocarbures.

Le méthane est à l'état gazeux, car la température est trop élevée pour qu'il soit liquide.



NASA/JPL/Space Science Institute

Les nuages sont composés de cristaux d'ammoniac, qui lui donnent sa teinte jaunâtre. Son atmosphère est en rotation rapide en 10h 40 mn, donc elle montre un aplatissement très marqué. On y voit des bandes parallèles à l'équateur. Le Mistral est violent sur Saturne, puisque les vents atteignent 1.800 km/h à l'équateur ! La circulation s'étendrait jusqu'à 1.000 ou 2.000 km de profondeur.

Saturne tournant autour du Soleil à la distance respectable de 1.400 millions de km, il lui faut 30 ans pour en faire un tour, donc 30 ans pour parcourir 360° sur le ciel. Elle parcours donc 360/30 = 12° à peu près chaque année. Ceci correspond grossièrement à la taille d'une constellation, ce qui fait que Saturne en visite ainsi une par an. Elle reçoit $(1.400 / 150)^2 = 9,33^2 = 87$ fois moins d'énergie que la Terre. Sa température moyenne est de -125°.

De magnitude 1, on peut envisager de la photographier de la même manière que Jupiter.

Saturne émet 2 fois plus d'énergie qu'elle n'en reçoit du Soleil, et elle brille en infrarouge. L'origine de cette énergie n'est pas connue à l'heure actuelle.

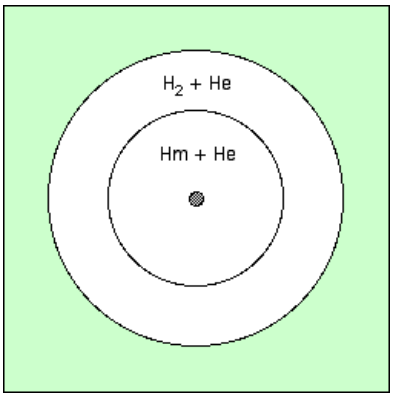



Schéma de l'intérieur de Saturne

Dans la zone d'hydrogène métallique, des goutelettes d'hélium se forment, et tombent en pluie !

L'axe de rotation de la planète est incliné de 27° sur le plan orbital ; elle nous présente donc les anneaux sous des aspects changeants ; ils sont parfois vus de dessus, parfois de dessous, et il arrive tous les quinze ans que la Terre passe par le plan des anneaux, qui disparaissent alors à notre vue pendant quelques temps. Ceci prouve que les anneaux sont très minces. Ce sont de véritables lames de rasoir : ils s'étendent de 12.000 à plus de 300.000 km de la surface de la planète, mais n'ont que 200 mètres d'épaisseur !

**Les aurores**

Saturne présente une magnétosphère importante, car elle a un champ magnétique important (un peu moins que celui de la Terre). Le vent solaire interagit avec cette magnétosphère, exactement comme avec celle de la Terre, et produit également des aurores polaires. Les sondes spatiales qui voyagent dans le secteur sont capables de les enregistrer :



Crédit : NASA/JPL/University of Colorado

**Les anneaux**

L'anneau de Saturne est divisé en 8 régions. Cassini a observé deux anneaux distincts, séparés par un espace vide nommé par la suite division de Cassini. L'anneau le plus externe est désigné par la lettre A, le plus interne par B. Ensuite, on a découvert un anneau plus interne encore, qui a été désigné anneau C. Puis les sondes spatiales ont montré un anneau plus interne encore, qui a tout naturellement été désigné par D. Enfin, des anneaux extérieurs ont été mis en évidence, et nommés F, G et E, dans l 'ordre de leur éloignement croissant. L'histoire de la découverte explique une incohérence apparente dans les noms des anneaux.

Les anneaux sont constitués de milliards de petits satellites, dont la taille est très variable : les plus petits sont de minuscules poussières, comparables à de la fumée de cigarette, alors que les plus gros atteignent les 10 mètres. Tous ces fragments constituent la matière dont sont formées les planètes, ils auraient donc pu s'agglomérer pour former un corps plus gros. Ceci n'a pas été le cas, à cause des forces de marées : nous avons vu que la vitesse de rotation autour du Soleil ou d'une planète est d'autant plus élevée que l'on tourne plus près, ceci pour équilibrer une gravité plus intense. Prenez un corps (satellite) de 100 km de diamètre, et considérez son point le plus proche de Saturne, et son point le plus lointain (au centre de la face opposée à Saturne) ; entre ces deux points, la différence de distance à la planète est donc de 100 km, et par conséquent ils ne devraient pas tourner à la même vitesse. Il s'ensuit une force qui tend à les séparer ; si cette force est plus importante que la force de cohésion du matériau, il va se briser. La distance minimale à laquelle un corps de taille importante peut exister autour d'un astre central est nommée limite de Roche, du nom de celui qui a compris ce mécanisme au 19$^{ème}$ siècle.



NASA/JPL/Space Science Institute

Des travaux très importants ont été faits au début du siècle par de grands mathématiciens (Poincaré...) pour définir théoriquement la forme des anneaux de Saturne. Mais lorsque la sonde Voyager 1 est arrivée à proximité de la planète, on a vu que les formes prévues n'étaient pas les bonnes ; il a donc fallu expliquer pourquoi, et c'est la présence de satellites proches ou au sein même des anneaux qui a donné la réponse à ce problème : par leur attraction, les satellites provoquent des résonances dans les orbites des poussières, et les obligent à suivre certaines trajectoires particulières.

Les désignations indiquées plus haut se rapportent à l'aspect global des anneaux, mais vus de plus près, les anneaux ne sont pas 8, mais des milliers, séparés par des lacunes, espaces vides où un objet ne peut se maintenir, étant rapidement chassé par les perturbations dues aux satellites.

Les anneaux A et B sont contitués essentiellement de glace d'eau. Les glaçons vont de la taille d'une poussière (1mm), jusqu'à celle d'une maison, mais la plupart sont de taille centimétrique. On connait mal la taille des particules qui circulent dans les anneaux C, D et F. Les anneaux G et E sont faits de particules micrométriques, de composition inconnue.

Les anneaux A et B présentent, de près, une riche structure radiale, probablement d'origine gravitationnelle, due aux satellites proches. Mais on y observe aussi des ombres en forme de doigt, évanescentes, et alignées à peu près radialement. L'analyse de ces structures dans le temps montre qu'elles sont plus stables que la rotation des anneaux ne le permettrait. La partie d'un doigt proche de Saturne tourne beaucoup plus rapidement autour de la planète que la partie la plus éloignée. Il devrait en résulter un effilochement du doigt, qui se déformerait rapidement en s'allongeant en spirale. Ce n'est pas le cas. Donc, les doigts ne sont pas des concentrations de matière, mais une transformation provisoire qui s'applique

lorsque les particules passent dans cette région. Il s'agit donc sans aucun doute d'une perturbation magnétique des poussières. Il reste à savoir quelle est l'origine de ce champ. On est tout de même à l'intérieur de la magnétosphère de la planète, mais la compréhension des phénomènes n'atteint pas encore ce niveau de finesse.

**Les satellites de Saturne**

Saturne compte 48 satellites, allant du plus gros Titan, au plus petit Télesto qui ne fait que 28 km de diamètre. Ce nombre est susceptible d'évoluer encore, car des structures présentées par les anneaux s'expliqueraient bien par la présence de petits satellites non encore observés. Ce sera la tâche de futures sondes spatiales. Des pages sont consacrées à Encelade et aux petits satellites.

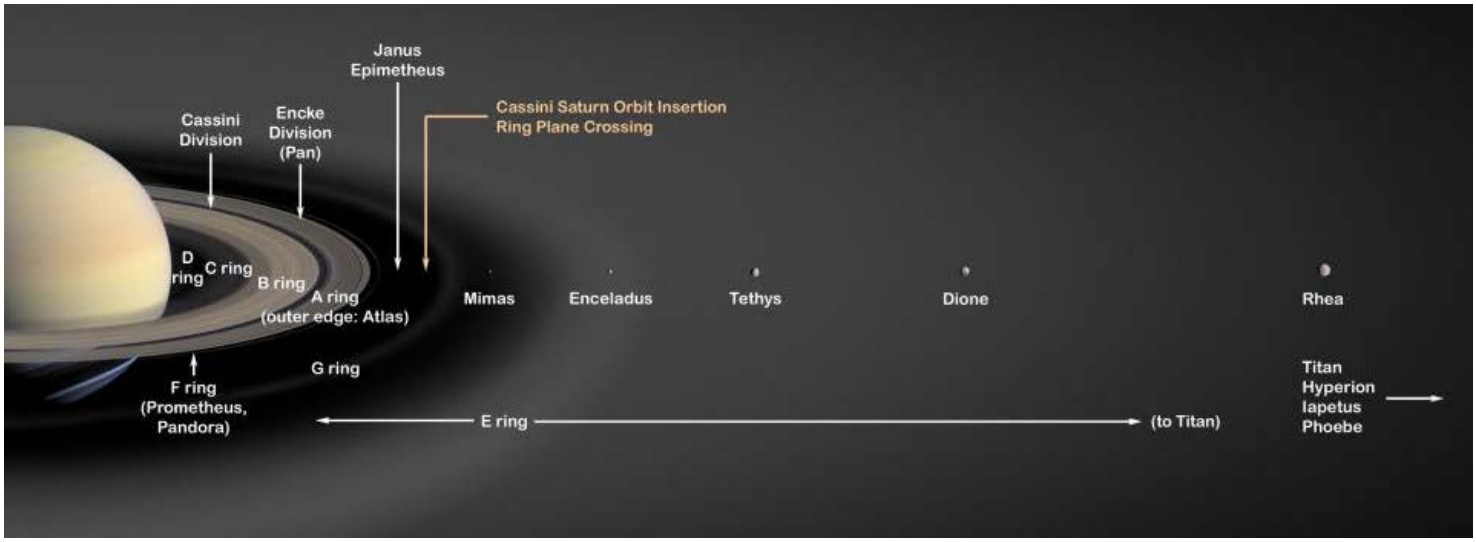



schéma NASA

---=OO=---




## Carte d'identité

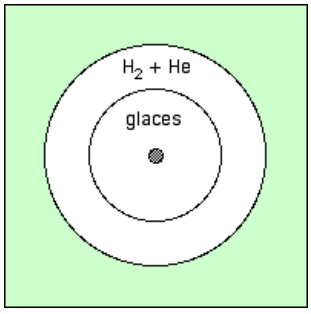
| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| diamètre | **51.118 km** | | demi grand-axe | **2.870,97 $10^6$ km** |
| | **4,007 Terre** | | | **19,1912 UA** |
| diamètre angulaire max | 3,7" | | excentricité | **0,04717** |
| aplatissement | **0,0229** | | inclinaison de l'orbite | **0,76986°** |
| période de rotation | **17 h 14 mn 23 s rétrograde** | | année sidérale | **83 ans 272 j 23 h 46 mn** |
| inclinaison axe de rotation | **97,86°** | | vitesse orbitale | **6,8352 km/s** |
| masse | **86,849 $10^{24}$ kg** | | révolution synodique | **369,656 j** |
| | **14,537 Terre** | | jour solaire | très variable |
| masse volumique | **1,30 g/$cm^3$** | | sens | - |
| | **0,2357 Terre** | | pression au sol | - |
| pesanteur | **8,69 m/s/s** | | température min | -213° |
| | **0,887 Terre** | | température max | -213° |
| vitesse de libération | **21,29 km/s** | | albédo | **0,51** |
| nombre de satellites | ≥ 27 | | composition atmos. | $H_2$, He, $CH_4$ |

Les éléments en gras sont tirés du livre *Allen's astrophysical quantities*, quatrième édition

Uranus est invisible à l'œil nu, elle n'était donc pas connue des Anciens...

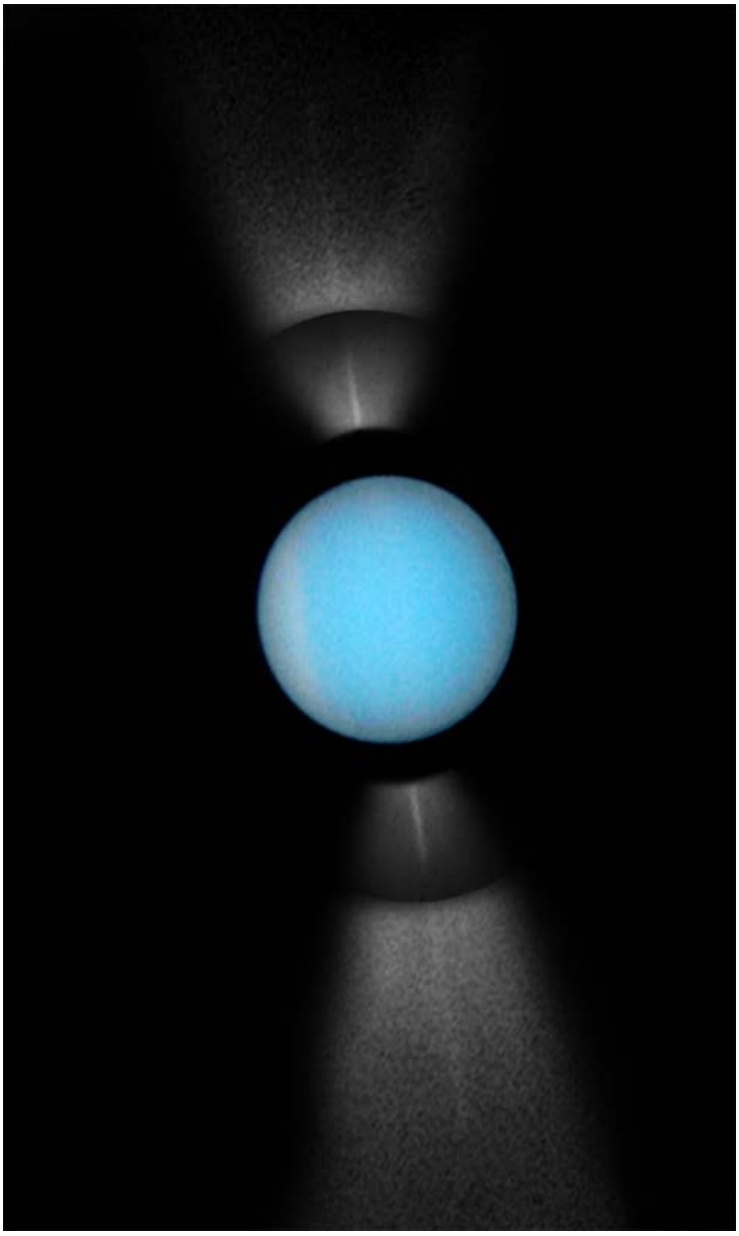
Il a donc fallu la découvrir, c'est ce qu'a fait William Herschel en 1781. La nouvelle planète étant très lointaine, se déplace très lentement. Aussi, pour observer des positions suffisament éloignées pour calculer une orbite précise, il faudrait attendre très longtemps. Bode l'a compris et, immédiatement après la découverte, a recherché des observations antérieures. Ceci est assez facile, car on peut calculer une orbite approximative, puis remonter le temps, et chercher sur des photos d'archive une "étoile" anormale non repérée. Il en a trouvé sur plus d'une orbite, ce qui lui a permi de calculer des éléments orbitaux de très bonne qualité peu de temps après la découverte. La grande surprise a été de constater que la planète s'éloignait significativement de l'orbite calculée. Ce dévalage pouvait provenir soit de la loi de la Gravitation Universelle, qui était quelque peu fausse, soit d'une perturbation produite par une nouvelle planète, encore plus lointaine et inconnue. L'Histoire montrera que c'est cette seconde solution qui était la bonne.

Cette planète est nettement plus petite que Jupiter et Saturne, puisqu'elle ne mesure que 52.000 km de diamètre. Etant très loin de nous, il est très difficile d'y voir des détails, même dans les grands instruments. Il a donc fallu attendre Voyager 2 en 1986 pour avoir une idée un peu précise de cette planète. Mais il reste encore beaucoup à découvrir, car les planètes géantes ont toutes une atmosphère très épaisse, et on n'en voit que la couche supérieure de nuages ; même les sondes qui se sont approchées de très près n'ont pu que détailler cette couche haute de l'atmosphère. A partir des photos, on peut obtenir une quantité impressionnante d'information, car les astronomes sont des gens très astucieux. Mais il est hasardeux d'extrapoler la composition et la dynamique de la basse atmosphère. Il faudra des sondes descendant dans l'atmosphère, comme pour Vénus, pour que les ambiguïtés soient levées.



On ne sait donc pas grand chose d'Uranus elle-même, si ce n'est la composition de l'atmosphère supérieure : hydrogène essentiellement, hélium, et autres composés comme le méthane. Les nuages les plus hauts sont en effet constitués de cristaux de méthane solide, qui donnent à la planète sa couleur bleue. La température de ces nuages est de l'ordre de -220°...

On a pu déterminer qu'Uranus tourne sur elle-même en à peu près 17 heures, mais on dit qu'elle roule sur son orbite, car l'inclinaison de son axe de rotation est de 82°, autrement dit, il est presque contenu dans le plan de l'orbite. Les anneaux étant dans le plan équatorial de la planète, sont donc perpendiculaires à l'orbite, donc en gros à l'écliptique. Dans ces conditions, selon le point de l'orbite où se trouve Uranus, nous voyons depuis la Terre ses anneaux de face, ou bien de profil, avec toutes les positions intermédiaires. Dans la période actuelle, nous les voyons de face, comme des cercles entourant la planète. Bien entendu, nous voyons de ce fait l'un des pôles d'Uranus.



Uranus et ses anneaux photo NASA, ESA, and M. Showalter (SETI Institute)

Les anneaux d'Uranus sont beaucoup plus faibles que ceux de Saturne ; on en avait cependant trouvé 9 par l'observation depuis le sol, et Voyager en a trouvé un dixième. Mais contrairement à Saturne, les anneaux ne contiennent que très peu de poussières, car celles-ci ne peuvent y séjourner très longtemps : les anneaux sont trop près de la planète, ils baignent dans les couches hautes de l'atmosphère (exosphère), et subissent un freinage qui les amène à descendre. Les grosses particules ne sont pas sensibles à ce freinage très léger.

Uranus possède, comme les autres planètes géantes, beaucoup de satellites. Les plus gros d'entre eux ont été découverts par l'observation télescopique depuis la Terre, les autres par Voyager 2.

**Les anneaux**

Les anneaux d'Uranus ont été découverts depuis la Terre, par l'observation d'une occultation. Lorsqu'une étoile brillante passe derrière une planète, sa lumière est affectée par l'atmosphère de la planète, et son analyse spectrale permet d'obtenir des renseignements sur les gaz qui la composent. Ces expériences ont donc été très utiles pour découvrir la composition des atmosphères à distance. Les mesures de la quantité de lumière reçue donnent des indications sur la densité et la profondeur de l'atmosphère. Au cours d'une telle occultation par Uranus, la lumière de l'étoile a chuté brièvement avant que la planète ne l'occulte. Ceci s'est même produit plusieurs fois, et s'est reproduit de manière symétrique de l'autre côté de la planète. Un tel phénomène s'explique par la présence d'anneaux qui interceptent la lumière de l'étoile.

A partir du centre de la planète, ils sont désignés par des chiffres ou des lettres grecques : 6, 5, 4, $\alpha$, $\beta$, $\eta$, $\gamma$, $\delta$, $\lambda$, $\varepsilon$. Cette nomenclature hétéroclite s'explique pour des raisons historiques. L'occultation a été observée par deux équipes différentes, qui ont détectés rapidement des

ensembles d'anneaux différents : la première a numéroté les anneaux de 1 à 6 de l'extérieur vers l'intérieur, alors que l'autre les a nommés avec des lettres grecques, naturellement dans l'autre sens ! Ayant reconnu l'identité des anneaux 1, 2 et 3 avec ε, γ et β, on est arrivé à la liste indiquée au début

Ces anneaux sont tellement légers, qu'aucune étude sérieuse ne pouvait être menée depuis la Terre. Voyager en a donné des images, qui permettent d'en comprendre l'essentiel. Ils sont encore différents de ceux de Jupiter et de Saturne. C'est un ensemble d'anneaux étroits, sombres, constitués de particules de glace de méthane.

**Jour solaire**

Supposons qu'on se trouve sur l'équateur d'Uranus. Imaginons de plus que nous ayons le soleil au zénith à midi. Le Soleil va décrire en 18 heures un tour complet dans le ciel en passant bien au-dessus de nos têtes. Il refera ce même parcours, à très peu près, pendant quelques semaines. Mais pendant ce temps-là, la planète se déplace légèrement autour du Soleil, et comme elle roule sur son orbite, le Soleil se rapproche du pôle nord. Vu de l'équateur, nous le verrons donc se déplacer de jour en jour très lentement, vers le nord. C'est un peu ce qui se passe chez nous aux latitudes tempérées au printemps, mais la différence est que sur Uranus (et à l'équateur) le Soleil se lève et se couche verticalement et non sous un angle de 45°.

Petit à petit, le Soleil se déplace vers le nord. En 21 ans, il atteindra le pôle. Et là, toujours de l'équateur, nous le verrons en permanence (Soleil de minuit), à l'horizon nord.

Puis, pendant les 21 années suivantes, il se déplacera vers le sud, pour atteindre à nouveau le zénith. Ensuite, il continuera sa course folle (mais lente) vers le sud, pour atteindre la pôle sud 21 ans plus tard... Là, on le verra en permanence à l'horizon sud pendant quelques temps. Puis ce cycle se continuera par un retour du Soleil vers le nord.

Si on se place en un autre point de la planète, au pôle nord par exemple, on verra le Soleil de minuit pendant la moitié de l'année, donc 42 ans. Supposons le Soleil d'abord au zénith (eh oui, sur Uranus, on a le Soleil au zénith au pôle...), le Soleil descendra vers l'horizon, qu'il atteindra au bout de 21 ans. Là, on plongera dans la nuit pôlaire, qui durera 42 ans...

**Soleil de minuit à l'équateur, Soleil au zénith aux pôles**, c'est décidément une bien étrange planète !




## Carte d'identité

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| diamètre | 44.990 km | | demi grand-axe | $4.505\ 10^6$ km |
| | 3,39 Terre | | | 30,06 UA |
| diamètre angulaire max | 2,1" | | excentricité | 0,01 |
| aplatissement | 0,017 | | inclinaison de l'orbite | 1° 46' |
| période de rotation | 19 h 6 mn | | année sidérale | 164 ans 285 j |
| inclinaison axe de rotation | 29° 35' | | vitesse orbitale | 5,4 km/s |
| masse | $1,024\ 10^{26}$ kg | | révolution synodique | 367,49 j |
| | 17,13 Terre | | jour solaire moyen | 19 h 6 mn 1 s |
| masse volumique | $1,64$ g/cm$^3$ | | sens | rétrograde |
| | 0,3 Terre | | pression au sol | - |
| pesanteur | 11 m/s/s | | température min | -215° |
| | 1,12 Terre | | température max | -215° |
| vitesse de libération | 23,3 km/s | | albédo | 0,66 |
| nombre de satellites | 13 | | composition atmos. | $H_2$, He, $CH_4$ |

Neptune a une histoire très intéressante. Plus loin encore qu'Uranus, elle est plus faible, donc très largement invisible à l'œil nu. Il a fallu la découvrir par des moyens télescopiques. Mais les chances de la découvrir pas hasard sont très faibles, et si on s'était fié à la chance, on ne la connaîtrait peut-être pas encore.

La théorie de la gravitation universelle de Newton a été appliquée au mouvement des planètes, avec plus ou moins de succès. Dans le cas d'Uranus, le mouvement ne correspondait pas à ce que l'on attendait en tenant compte des perturbations de Jupiter et Saturne. Urbain Le Verrier a supposé qu'il existait une autre planète plus lointaine, encore inconnue, et a analysé le mouvement d'Uranus avec cette hypothèse. En modifiant la masse supposée de la planète inconnue, ainsi que sa distance au Soleil, il a fini par trouver un accord très satisfaisant, et a publié ses résultats à l'académie des sciences. Il a rencontré un certain scepticisme, et a fini par convaincre Galle, astronome à Berlin, de pratiquer cette recherche. La planète a été rapidement trouvée en 1846, à peu de distance de l'endroit calculé (1°). Cette découverte a été l'un des grands succès de la théorie de Newton.

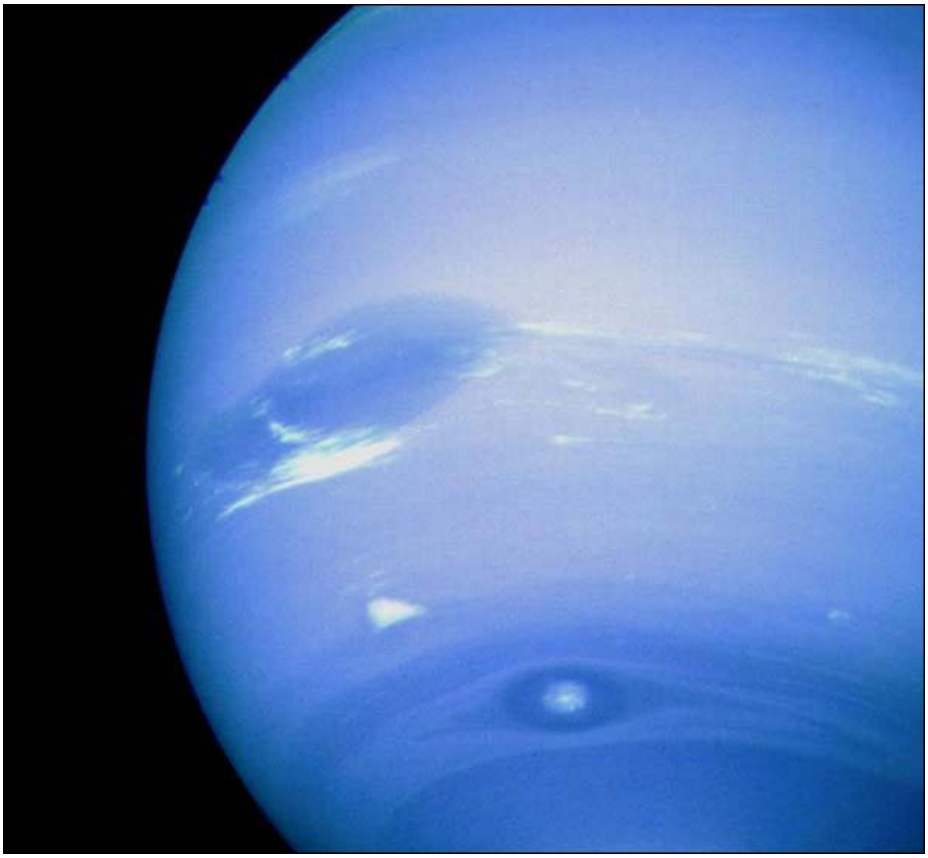
Il faut dire qu'un autre astronome, l'anglais Adams, avait fait le même genre de calculs, et trouvé une solution approchante. Mais il n'a jamais pu convaincre ses collègues de rechercher la planète...

**Curiosité**

Trente fois plus loin du Soleil que la Terre, Neptune est un monde assez sombre. La luminosité à midi ne dépasse pas celle d'un crépuscule sur Terre. Le diamètre apparent du Soleil vu de Neptune dépasse à peine une minute d'arc, autant dire que son disque n'est pas discernable à l'œil nu ! Il a donc un aspect stellaire... Mais une étoile extraordinairement brillante toutefois (voir page particulière).

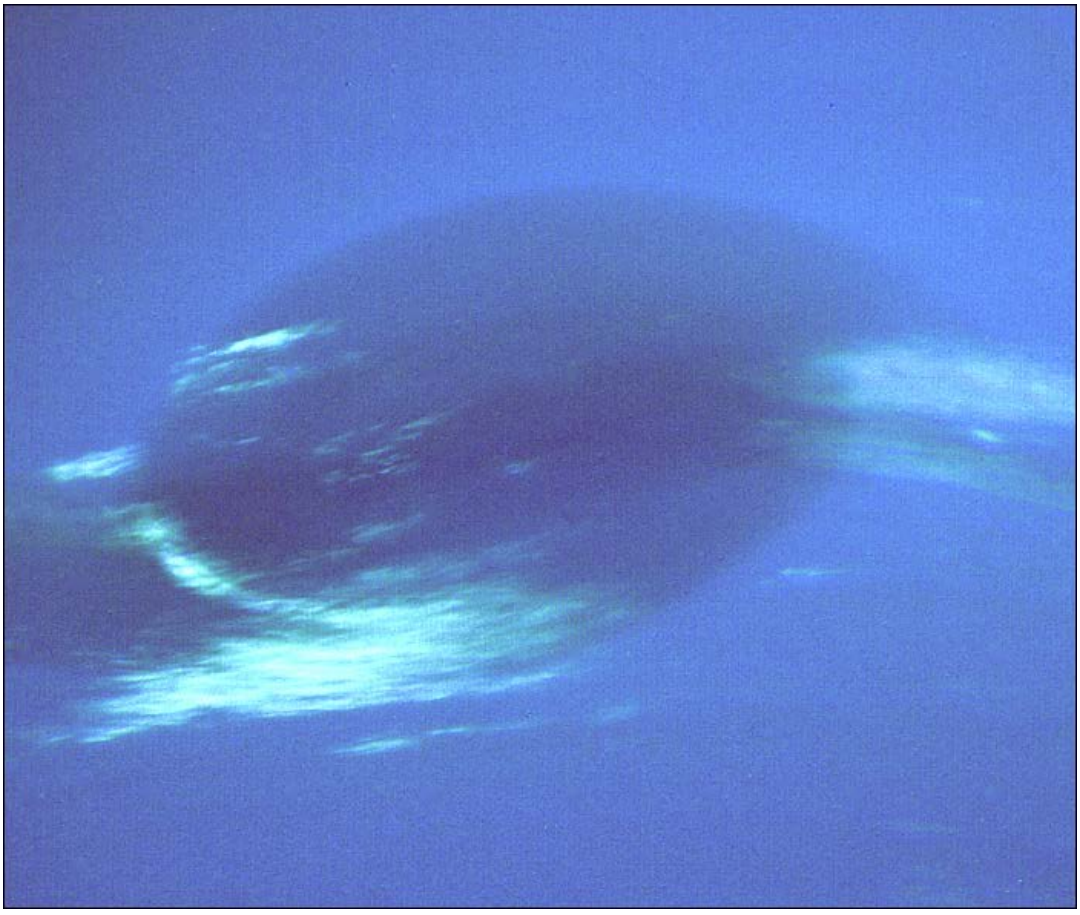
**L'apparence**

Neptune est pratiquement de la même taille qu'Uranus ; elle est aussi de teinte bleutée. Les seules images détaillée de Neptune sont celles envoyées par la sonde Voyager 2 en 1989. Elles ne montrent pas beaucoup de détails, et là encore ce sont les couches supérieures de nuages que nous voyons. Deux objets sont remarquables : le premier est une Grande Tache Sombre bleu foncé, ornée de blanc (des nuages de composition différente), qui se déplace lentement avec le reste de l'atmosphère et a été appelée la Limace. L'autre objet est une tache plus petite, qui se situe dans les latitudes élevés, et tourne plus vite que les autres formations nuageuses, qu'elle double donc périodiquement. A cause de sa vitesse, elle a été nommée le Scooter !



Neptune, avec la Grande Tache Sombre et les cirrus, photo Voyger 2 NASA/JPL

La Grande Tache Sombre avait disparu sur les photos prises par le télescope spatial en 1990. Elle n'a donc nullement la permanence de la Grande Tache Rouge de Jupiter. Il serait intéressant de la voir réapparaître. Ce serait une indication sur l'existence d'une cause permanente.

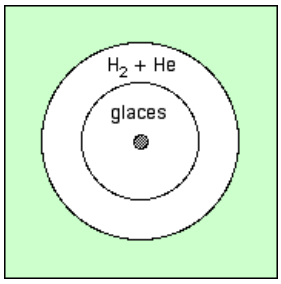


la Grande Tache Sombre photographiée par Voyager 2 JPL

**Energie**

Les vents à l'équateur atteignent 1.000 km/h.

Neptune émet trois fois plus d'énergie qu'elle n'en reçoit du Soleil. Si cette proportion est plus importante que pour les autres planètes géantes, c'est parce que, étant beaucoup plus loin du Soleil, elle en reçoit moins d'énergie ; donc sa propre énergie par comparaison apparaît plus importante.




**Les anneaux**

Neptune possède 5 anneaux. L'histoire de leur découverte est intéressante. L'expérience d'occultation ayant donné de bons résultats our Uranus, André Brahic l'a reprise sur Neptune. Le résultat a été surprenant ! Il a observé des extinctions avant et après l'occultation elle-même, ce qui ressemble à ce qui s'est passé pour Uranus, mais avec une très grosse différence : les extinction ne sont pas symétriques...

Ceci indique qu'il y a un objet d'un côté de la planète, et pas de l'autre. Or un annneau est symétrique. Reste la possibilité d'occultation par des sqtellites. Les satellites sont très petits, et la probabilité que l'un d'eux passe exactement devant une étoile est très faible (elle est déjà très faible pour la planète Neptune elle-même). Cette explication ne semble pas très convaincante.

Alors, André Brahic a pensé que la planète pourrait être entourée, non pas d'anneaux comme tout le monde, mais d'arcs. Des portions d'anneaux, où la matière serait condensée sur certains secteurs autour de la planète, et absente ailleurs.

Cette interprétation s'est avérée exacte lorsque la sonde Voyager est parvenue auprès de Neptune. Mais elle a aussi montré que certains anneaux étaient complets. La dénomination d'un objet nouveau est le privilège du découvreur : il propose un nom, et l'Union Astronomique Internationale l'accepte (ou le rejette). La découverte d'André Brahic a été faite l'année 1989, bicentenaire de la Révolution Française. Neptune ayant été découverte par ailleurs grâce aux travaux théoriques de Le Verrier et d'Adams, André Brahic a voulu commémorer tout cela à la fois. Il a proposé les cinq grands astronomes qui ont le plus œuvré pour la découverte de cette planète.

C'est ainsi que les anneaux de Neptune se nomment, depuis l'intérieur vers l'extérieur : Galle, Le Verrier, Lassel, Arago, Adams. Galle et Lassel sont relativement larges et flous, les trois autres étroits et nets.

L'anneau Adams n'est pas homogène ; c'est lui qui présente les arcs détectés par l'occultation. Ce sont de véritables condensations de matière. A l'origine, on en comptait trois, qui devaient prendre pour noms Liberté, Egalité et Fraternité.

A un petit problème près, au lieu de trois, il y en a cinq. Alors, ils sont nommés Courage, Liberté, Egalité1, Egalité2 et Fraternité.

**Triton**

Le sol de Triton est très jeune, il ne présente pratiquement pas de cratères : c'est une surface glacée, d'aspect varié.

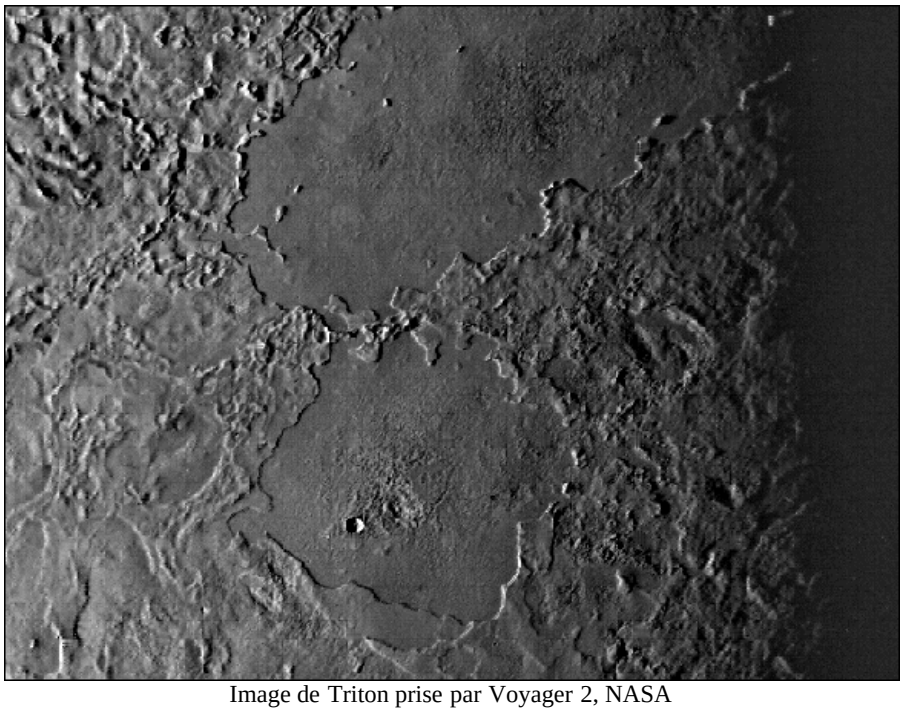
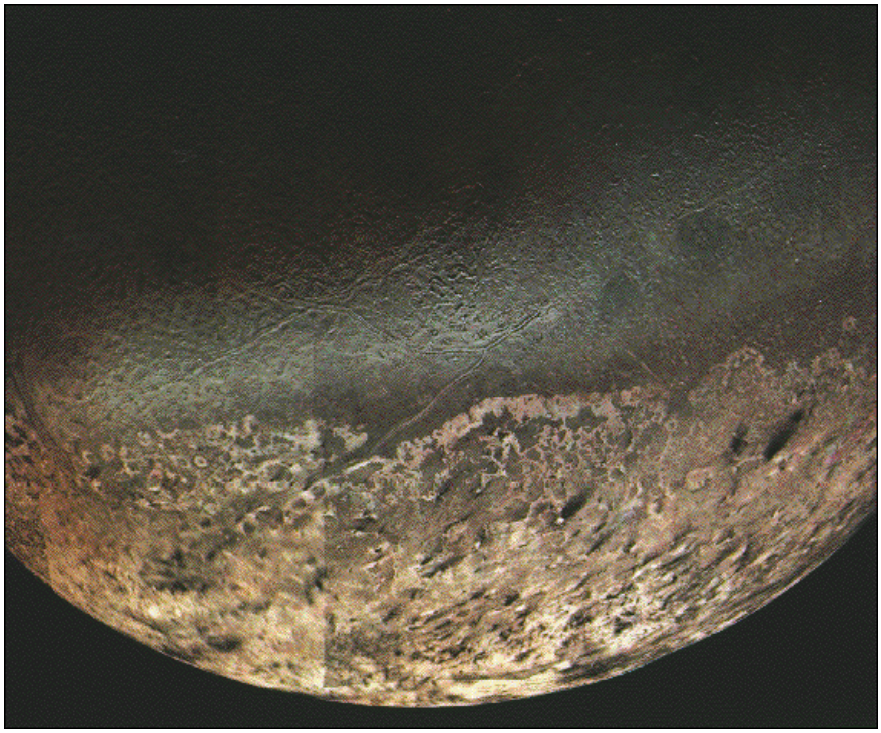


Image de Triton prise par Voyager 2, NASA

Des plaines de glace sur Triton, d'une centaine de km de large. Le cratère d'impact dans la plaine du bas a approximativement 13 km de diamètre. Les collines ont une altitude inférieure à 1000 m.



Les geysers de Triton, vus par Voyager 2, NASA/JPL

Les geysers crachent des matériaux sombres qui s'élèvent à la verticale jusqu'à 8 km d'altitude, puis sont balayés par un vent violent, qui les étale sur des kilomètres. Le mécanisme d'éjection n'est pas celui de Io ; les marées n'existent plus sur Triton, car son orbite est circulaire, et il tourne toujours la même face vers Neptune. Les éruptions sont probablement dues à la sublimation de l'azote congelé, qui se sublime au soleil, provoquant une augmentation de pression.

**Capture de Triton**

Il est très difficile de concevoir la capture directe d'un astéroïde ou d'une comète. Mais si l'objet est double, l'événement se trouve bien facilité.

En effet, considérons deux corps de masses semblables et orbitant autour de leur centre de gravité commun. Le centre de gravité tourne autour du Soleil, et la vitesse de chacun des deux objets autour de leur centre de gravité s'ajoute (ou se retranche) à la vitesse autour du Soleil. Si le couple passe à proximité d'une planète, la vitesse du plus proche peut se trouver inférieure à la vitesse d'évasion de la planète, qui capture l'objet. Bien sûr, la vitesse de second membre du couple est bien plus élevée, donc il est éjecté.

Sans une telle situation, il serait très difficile d'admettre qu'un corps de la taille de Triton soit capturé par Neptune. Les différents mécanismes invoqués pour cela ne peuvent s'appliquer qu'à des objets de masse bien plus faible. De plus, les objets de la ceinture de Kuiper que l'on connait maintenant sont souvent doubles (50° %). Il semble donc tout à fait raisonnable de penser qu'un tel couple s'est un jour approché de Neptune, suffisamment pour que l'objet le plus proche de la planète, qui se déplaçait autour du centre de gravité en sens inverse de sa révolution autour du Soleil, soit capturé.

**Nouveau satellites**

On en perd le compte... L'UAI (Union Astronomique Internationnale) a nommé définitvement 4 satellites de Neptune :

S/2002 N 1 (Neptune IX) Halimede
S/2002 N 2 (NeptuneXI) Sao
S/2002 N 3 (Neptune XII) Laomedeia
S/2002 N 4 (Neptune XIII) Neso

---=OO=---




# 134340 Pluton

Cette dénomination est celle d'un astéroïde…

## Carte d'identité de Pluton

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| diamètre | 2.300 km | | demi grand-axe | $5.914\ 10^6$ km |
| | 0,18 Terre | | | 39 UA |
| diamètre angulaire max | < 1" | | excentricité | 0,25 |
| aplatissement | 0 | | inclinaison de l'orbite | 17° 12' |
| période de rotation | 6 j 9 h 17 mn | | année sidérale | 248 ans 244 j |
| inclinaison axe de rotation | 98° 18' | | vitesse orbitale | 4,7 km/s |
| masse | $1,29\ 10^{22}$ kg | | révolution synodique | 366,74 j |
| | 0,002 Terre | | jour solaire moyen | semblable à Uranus |
| masse volumique | $2,07$ g/cm$^3$ | | sens | - |
| | 0,37 Terre | | pression au sol | 0 ? |
| pesanteur | 0,4 m/s/s | | température min | -236° |
| | 0,04 Terre | | température max | -236° |
| vitesse de libération | 1,1 km/s | | albédo | 0,5 |
| nombre de satellites | 4 | | composition atmos. | |

Pluton a été découverte en 1930, par Clyde Tombaugh.

Après le magnifique succès de la Mécanique Céleste, couronné par la découverte de Neptune, il était assez logique de continuer la recherche de nouvelles planètes, encore plus éloignées. La même méthode, par l'analyse fine du mouvement de Neptune, a été essayée, mais les résultats n'ont pas été suffisants pour mettre en évidence une nouvelle planète. C'est donc par hasard, bien qu'à la suite d'une patiente recherche systématique, que le nouvel objet a été aperçu.

Depuis la 26$^e$ assemblée générale de l'Union Astronomique Internationale d'août 2006, Pluton est désignée comme *planète naine*, et numérotée 134.340. On la désigne donc maintenant sous le terme "134.340 Pluton", comme 1 Céres.

A ce sujet, André Brahic nous fait remarquer que Jules César disait "*il vaut mieux être le premier dans son village, que le second à Rome*". Ainsi, Pluton a été promue au rang de Premier Objet de la Ceinture de Kuiper, alors qu'elle n'était avant que la neuvième planète…

Le système solaire comprenait : des *planètes*, des *astéroïdes* et des *comètes*. L'observation de Chiron en particulier, qui était un astéroïde, a montré qu'il pouvait développer une queue cométaire faible. La frontière entre les deux types d'objets venait de tomber. Maintenant, notre système contient donc : des *planètes*, des *planètes naines* et des *petits corps*.

**Orbite**

Pluton est plus lointaine que toutes les planètes principales, et elle est particulière à plus d'un titre ; son orbite est très elliptique, ce qui l'amène à vagabonder de 7 milliards de km à l'aphélie, à 4,5 milliards de km au périhélie. D'ailleurs, quand elle est au plus près du Soleil, elle en est plus proche que Neptune ; c'était le cas récemment depuis 1979, mais elle a recoupé l'orbite de Neptune en 1999, redevenant vraiment la *planète* la plus lointaine.

L'orbite de Pluton est tout à fait particulière :

- son excentricité est énorme, comparée à celle des autres planètes : les excentricités sont toutes comprises entre celles de Vénus (0,01) et celle de Mars (0,09), sauf pour Mercure (0,21) et Pluton (0,25). Pluton est donc bien la championne toutes catégories de ce côté-là.
- sa période de révolution autour du Soleil vaut 248 ans 157 j = 248,4301 j ; celle de Neptune vaut 164 ans 288 j = 164,79 j. Calculons le

rapport de la période de Pluton à celle de Neptune :

248,4301 / 164,79 = 1,507

ce rapport vaut 3/2. Il ne peut pas être fortuit. Il résulte d'une perturbation de Pluton par Neptune, et d'un effet de résonnance.

- son inclinaison sur le plan de l'écliptique est de 17° 12'.Les inclinaisons des autres planètes vont de 0° 46' pour Uranus, à 7° pour Mercure. Là encore, Pluton bat tous les records avec une inclinaison 2,5 fois plus forte que la plus forte des autres !

Pour terminer, constatons que Pluton a son axe de rotation incliné de 122° sur l'orbite et, comme Uranus, elle roule sur son orbite.

Tout ceci fait beaucoup de particularités accumulées pour une seule planète ! Tous ces faits la mettent vraiment à part des autres planètes, et donnent à penser que Pluton ne s'est pas formée exactement de la même manière que les autres planètes. Mais l'histoire en reste là pour l'instant.

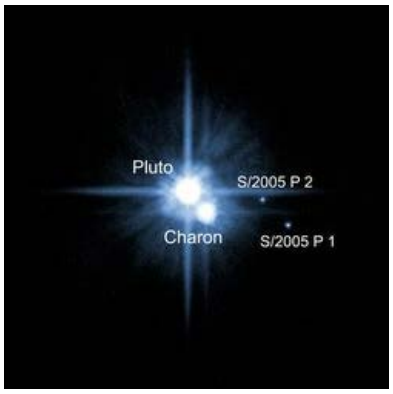
Si on considère les orbites de Neptune et Pluton en projection sur un plan (celui de l'écliptique), on a l'impression qu'elles se recoupent. Cette impression est très trompeuse. L'inclinaison très forte de l'orbite de Pluton fait que, lorsqu'elle se trouve proche de son périhélie (entre les deux points de croisement), elle est en fait très loin du plan de l'écliptique. La distance minimum entre les deux orbites est de plusieurs Unités Astronomiques. A son périhélie, Pluton est à 8 UA du plan de l'écliptique, et s'en éloigne encore plus, jusqu'à 13 UA, à son aphélie.

Losque Pluton est au voisinage de son aphélie, elle est doublée par Neptune, dont la vitesse est supérieure. Mais Pluton se trouve alors vers 49 UA du Soleil, et 13 UA au-dessus de l'écliptique. La distance entre Neptune et Pluton est donc très grande, et il n'y a aucune interaction gravitationelle significative.

**Satellites**

En 1978 on a trouvé un satellite à Pluton ; nommé Charon, son diamètre de 1.200 km vaut la moitié de celui de Pluton. C'est le plus gros satellite de tout le système solaire, en proportion à sa planète (encore une particularité…). La découverte d'un satellite est très importante, car l'application des lois de la mécanique céleste à son mouvement permet de déterminer précisément la masse de la planète, ce qui fut fait pour Pluton.

Mais le 31 octobre 2005, des images données par le télescope spatial ont montré la présence de deux nouveaux objets proches de Pluton. Il s'agit de deux satellites jusqu'alors inconnus. Provisoirement nommés S/2005 P1 et S/2005 P2, ils orbitent autour de Pluton à une distance de 2 à 3 fois supérieure à celle de Charon.

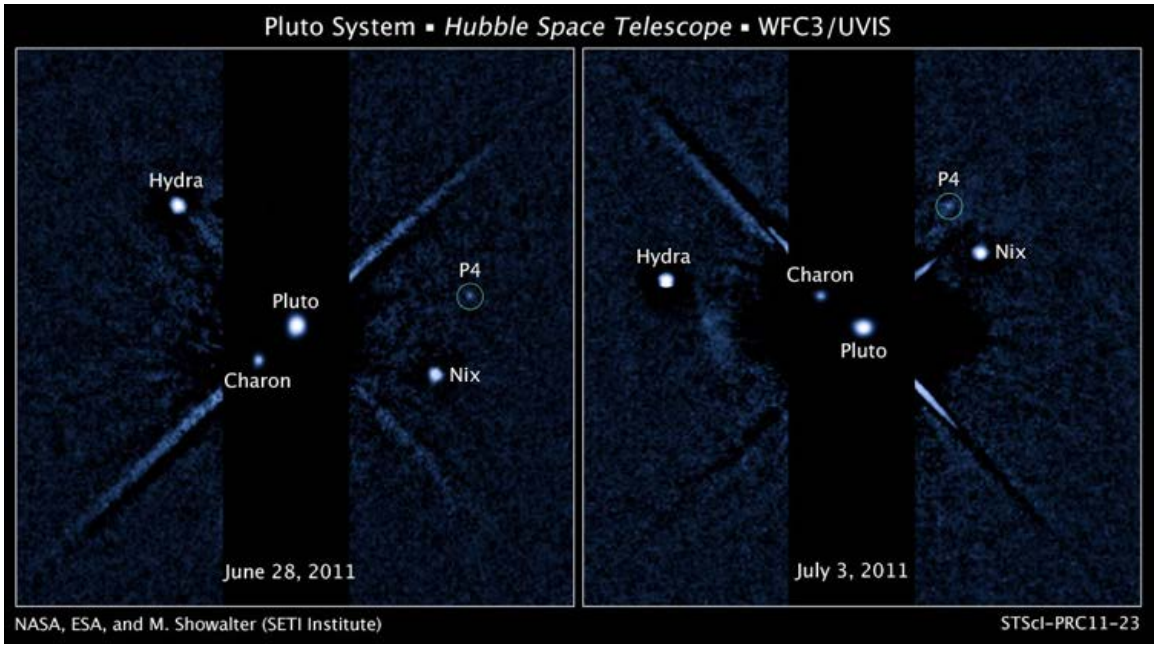



Ces deux objets sont 5.000 fois moins lumineux que Pluton…
Ils ont été nommés Nix et Hydra.

Cette photo montre les deux satellites, alors qu'ils n'avaient pas encore reçu leurs dénominations définitives. S/2005 P1 est Hydra, et S/2005 P2 est Nix.

NASA, ESA, H. Weaver (JHU/APL), A. Stern (SwRI), and the HST Pluto Companion Search Team

En 2011, un quatirème satellite de Pluton a été découvert par le télescope spatial :

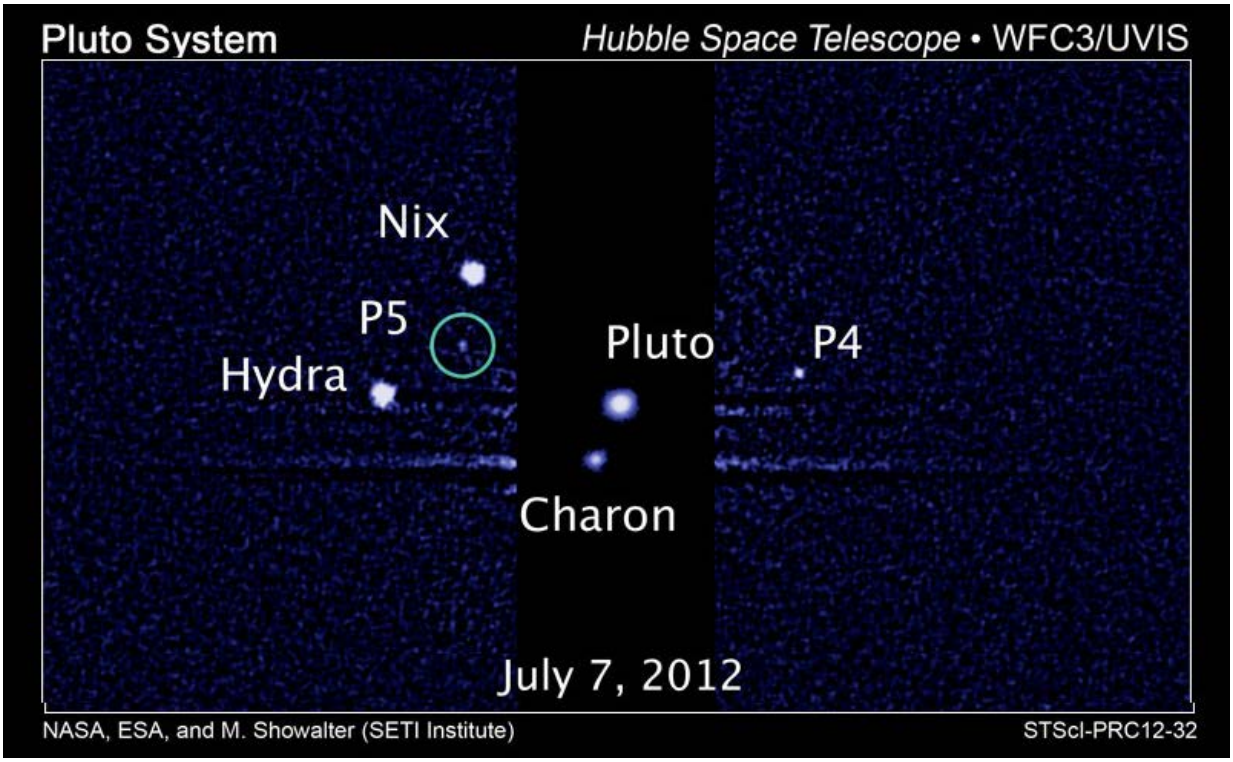



Cette photo est composite, car le nouveau satellite est beaucoup moins brillant que Pluton. Sur une photo exposée pour montrer Pluton, il serait

invisible, et sur une photo exposée pour lui, Pluton serait complètement surexposé. C'est pourquoi on distingue une bande sombre verticale, qui correspond à la photo peu exposée de Pluton et Charon. Le reste de l'image est pris avec un temps de pose bien plus long, qui permet d'atteindre le nouveau satellite. Les lignes brillantes en croix sont des artefacts, dus au télescope. Les taches bleues éparpillées sont du bruit, produites par des électrons aléatoires dans le matériau de la caméra elle-même, à cause de très long temps de pose.

Le nouveau satellite est petit, son diamètre étant estimé entre 13 et 34 kilomètres. Il est de plus bien sombre, ce qui lui donne un éclat très faible. Et l'ensemble est à quelques 5 milliards de kilomètres de nous. Le voisinage de Pluton se montre finalement plus encombré que ce que l'on croyait. Dans l'hypothèse où nous aurions maintenant fait le tour de la question, ce serait un objet de plus à observer grâce à la sonde New Horizons, qui doit passer à proximité en 2015. Mais il ne faudrait pas que de nombreux corps plus petits, non détectables aujourd'hui, se trouvent encore à proximité de Pluton, car la sonde risquerait de ne pas y résister…

Et justement, en juillet 2012, un cinquième satellite, encore plus petit et moins brillant, a encore été observé :




Les nouveaux satellites n'ont encore que leur dénomination provisoire

**Le globe**

Le peu qu'on sache de Pluton est qu'elle est de petite taille, plus petite que Mercure (elle n'en fait pas la moitié), avec un diamètre de 2.300 km. Du fait de sa taille et de son éloignement, elle est très faible et il faut untélescope de plus de 20 cm pour espérer la percevoir. Encore faut-il savoir exactement où elle se trouve, sinon il est impossible de la distinguer des étoiles. Et son déplacement sur le ciel est si lent, qu'il ne peut la mettre en évidence qu'au bout d'un temps très long.

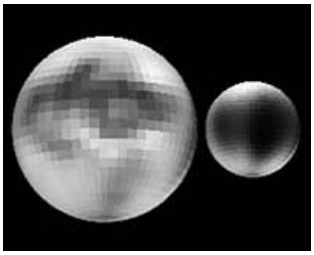
Sa température moyenne est de -236 .

L'échec de la méthode des perturbations pour trouver la planète montre que sa masse est faible, mais ne permet justement pas de la déterminer précisément.

L'observation de l'orbite de Charon a permis de déterminer la masse de Pluton : elle atteint à peine le $500^{e}$ de la masse de la Terre. C'est presque 30 fois moins massif que Mercure, la moins massive des autres planètes ; de plus en plus étrange.

Connaissant sa masse et son diamètre, on a pu en déduire sa masse volumique, qui est de 2,07 $g/cm^3$. Cette faible valeur incite à penser que Pluton est recouverte d'une épaisse couche de glace de méthane (ce qui est confirmé par spectroscopie), et la rapprocherait plus des comètes que des planètes. Si on compare aux autres planètes, elle est très au-dessous de la masse volumique des planètes telluriques (moyenne 5,2), et au-dessus de celle des trois premières géantes. Seule Uranus présente une masse volumique légèrement plus élevée : 2,2 $g/cm^3$. Mais les quatre planètes géantes sont essentiellement gazeuses, alors que Pluton ne retient qu'une vague trace d'atmosphère. Dans le cas des planètes géantes, la masse volumique représente une moyenne entre le noyau dense, et l'atmosphère très légère, alors que pour Pluton il s'agit de la masse volumique du corps solide uniquement. Ce qui ne peut s'expliquer que par des matériaux solides beaucoup plus légers que ceux qui constituent les autres planètes.

On sait que la surface de Pluton n'est pas uniforme, parl'observation de la courbe de lumière dans le visible. Le télescope spatial a même donné des images de cette surface, avec une définition très mauvaise due à la distance :



Pluton et Charon photo Marc W. Buie/Lowell Observatory

Sur ces photos, les faces visibles sont celles qui se font face dans l'espace. On distingue bien les irrégularités de surface, qui se traduisent par des variations de brillance.

Une étude française de mai 2000 a montré des variations de température superficielle. L'intrument ISOPHOT du satellite ISO (European Space Agency) a permi de déterminer pour la première fois la courbe de lumière du couple Pluton-Charon dans l'infra-rouge. Cette courbe montre des variations semblables à celle du visible, mais en opposition de phase : les parties brillantes de Pluton sont les plus froides !

La brillance maximum se trouve à la longitude 220°, et le minimum infrarouge est à 240° ; la brillance minimum est à 100°, et le maximum IR est à 80°. Cette opposition s'explique parfaitement : les couleurs sombres absorbent davantage la chaleur. Le sol plus chaud émet davantage d'infra-rouge. La différence de température atteint 25° entre ces deux points.

L'opposition n'est toutefois pas parfaite : on note un décalage entre le maximum d'une courbe et le minimum de l'autre. Ce décalage est dû à l'inertie thermique du sol de Pluton. Sa valeur nous donne donc un renseignement sur la texture du sol : la région la plus sombre de celui-ci devrait être poreuse.

**L'atmosphère**

Pluton possède une très légère atmosphère, dont la pression est le 1/100.000$^{e}$ de celle de la Terre. De plus, l'orbite étant très excentrique, la température varie du périhélie à l'aphélie, suffisament pour qu'une partie de l'atmosphère se gèle au sol lorsque la planète est la plus éloignée du Soleil (ce phénomène se produit également avec les saisons de Mars).

Aucune sonde n'est encore allé voir Pluton et Charon de près, et les images télescopiques prises du sol ne permettent même pas de distinguer le satellite. Le télescope spatial, hors de l'atmosphère terrestre, a donné des images sur lesquelles il est impossible de discerner des détails, et il faudra sans doute attendre la première mission vers Pluton pour apprendre quelque chose sur cet astre lointain. Cette mission, nommée *Pluto-Kuiper Express*, devait partir au tout début du siècle, mais les crédits sont en baisse…. Elle a été remplacée par la mission *New Horizons*, qui a quitté la Terre en 2006, et arrivera en vue de Pluton en 2015. Elle pratiquera un simple survol, et continuera sa route vers d'autres objets de la Ceinture de Kuiper.

**Jour solaire**

L'inclinaison de l'axe de rotation de Pluton sur son orbite produit un phénomène semblable à celui qui se produit sur Uranus.

Mais il y a encore plus ! Le plus gros satellite de Pluton est seulement deux fois plus petit ; à une distance de moins de 20.000 km, il apparaît sous un angle de 1° 44', plus de trois fois plus gros que la Lune pour nous. Et qui plus est, il est toujours au même endroit dans le ciel ! Comme la lune tourne toujours la même face vers la Terre, Charon tourne toujours le même cratère vers Pluton, mais ce dernier en fait tout autant : ils tournent l'un autour de l'autre, comme si un cable les reliait. Ceci est l'aboutissement du travail des marées, qui a bloqué la rotation de Pluton tout autant que celle de Charon. Pour la Terre, le mécanisme n'a pas encore abouti, car en comparaison la Lune est beaucoup plus petite. Mais là-bas, les deux objets étant du même ordre de taille, ont subi tous deux ce phénomène. En conséquence, Pluton et Charon tournent tous deux sur leur axe en 6 j et 9 h, mais ils tournent également l'un autour de l'autre dans ce même temps. Pluton est toujours au même endroit dans le ciel de Charon, et Charon est toujours au même endroit dans le ciel de Pluton.

**La suite**

Découverte d'Uranus, puis découverte de Neptune, puis de Pluton. Le système solaire est passé de 6 à 7, puis 8, 9 planètes… Pourquoi pas 10 ?

Bien sûr, après la découverte de Pluton on s'est mis rechercher la planète X (X comme inconnue ou chiffre romain 10 ?). Mais on ne l'a pas trouvée ! N'existe-t-elle donc pas ?

Non ! Si !!

Elle n'existe sans doute pas au sens où on l'entendrait : une belle planète comme Vénus ou Saturne. Mais il existe de nombreux objets beaucoup plus petits, qui tournent autour du Soleil.

---

## *La ceinture de Kuiper*

Carte d'identité

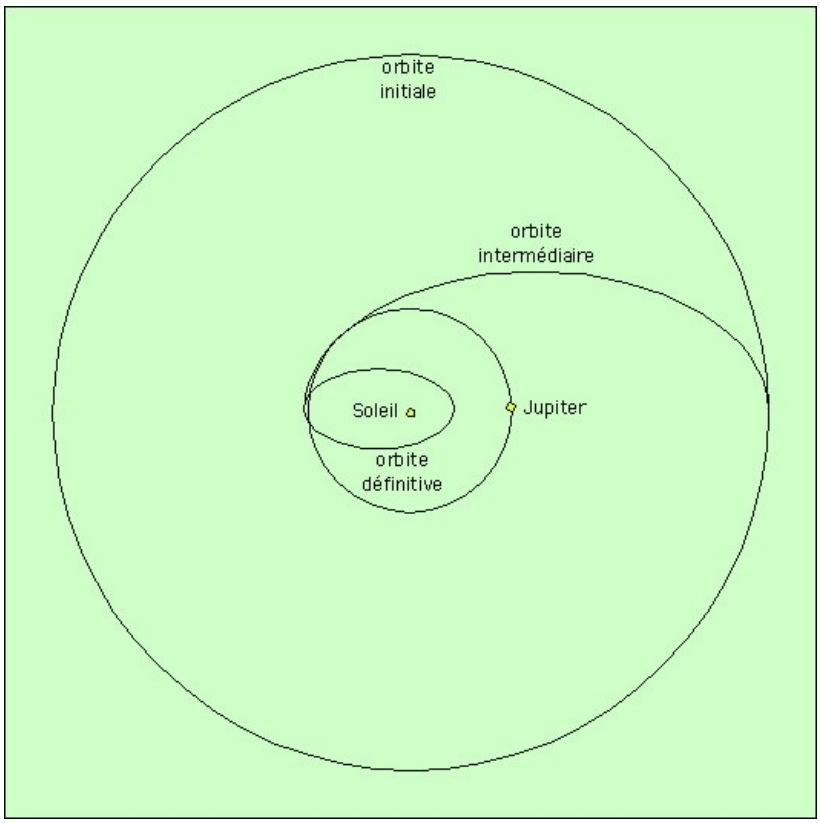
| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| bord interne | 30 UA | | premier objet découvert | 1992 QB1 |
| | 4,5 $10^{9}$ km | | nombre estimé d'objets de plus de 100 km de diamètre | 35.000 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| bord externe | 50 UA | nombre d'objets connus en 2004 | 800 |
| | 7,5 $10^9$ km | inclinaison des orbites | < 30° |
| masse totale estimée | ≈ $1^{23}$ kg | types | plutinos (résonnance 2:3) |
| | ≈ 1/50 Terre | | résonnants (autre résonnance) |
| masse volumique | ≈ 2 g/$cm^3$ | | classiques |
| | ≈ 1/3 Terre | | épars (e très élevé) |

La Ceinture de Kuiper est un anneau de petits corps qui se trouvent au voisinage de Pluton et un peu au-delà ; on en a découvert à peu près 800 jusqu'à 2004. Pluton est lui-même un élément de la ceinture de Kuiper. Ceci explique les différences essentielles qui existent entre sa composition et son orbite, et celles des planètes géantes ses voisines.

Il s'agit d'une idée de l'astronome Gerard Kuiper, qui lui est venue par l'observation des comètes périodiques. Au lieu de prévoir la marche future de ces objets, il a calculé leurs orbites passées. Ce faisant, il a montré que ces comètes étaient passées il y a plus ou moins longtemps à proximité d'une planète géante, la plupart du temps Jupiter, qui les avait perturbées. Il est alors possible de remonter à l'orbite avant perturbation et d'en calculer les paramètres. Les orbites initiales ainsi trouvées sont des ellipses fortement excentriques, dont l'aphélie se situe toujours dans une zone au-delà de l'orbite de Neptune. L'idée de base avait déjà été proposée par l'irlandais Kenneth E. Edgeworth en 1943 et 1949.

Une analyse plus fine montre que des perturbations, toujours dues aux planètes géantes, et plus anciennes encore, ont pu transformer des orbites relativements circulaires dont les rayons correspondent aux distances aphéliques en de telles orbites elliptiques.




Des objets circulant sur des orbites circulaires (ou presque) à ces grandes distances du Soleil ont pu être perturbées par les planètes géantes, et expédiées sur des orbites à forte excentricité qui coupent l'orbite de Jupiter. Un second coup de pouce de cette planète amène alors l'objet sur une orbite semblable à celles des comètes périodiques habituelles.

Cette constatation a amené G. Kuiper à supposer l'existence d'un réservoir d'objets qui tournent autour du Soleil sur des orbites pratiquement circulaires, au-delà de Neptune. Au hasard des perturbations, leurs orbites se transforment et elles viennent former de nouvelles comètes périodiques, de courte période (< 200 ans). Les orbites de ces objets ne sont pas très éloignées de l'écliptique, et constituent un système assez plat. On l'a nommé *ceinture de Kuiper*.

D'hypothétique, elle est devenue bien réelle par la découverte récente de plusieurs centaines de petits corps qui circulent effectivement sur de telles orbites. La première découverte date de 1992 (David Jewitt et Jane Luu).

Il fallait s'y attendre, la réalité est moins simple que les idées de base. On a vite vu que les objets de la ceinture de Kuiper ne circulent pas tous sur des orbites semblables.

**Les objets de Kuiper**

On les désigne par le sigle KBO, Kuiper Belt Objets.

On suppose l'existence de 7.000 objets dans la ceinture de Kuiper, de diamètre supérieur à 100 km. Leur localisation devrait être comprise entre

30 et 50 UA. Ils sont regoupés dans une bande proche de l'écliptique.

Parmi eux, on compte Quaoar, Varuna (dont le diamètre atteint la moitié de celui de Pluton), Chaos (encore assez gros), et Sedna (presque aussi gros que Pluton).

Connaissant les orbites réelles (et non plus calculées) de ces objets, on a vu que l'orbite de Pluton leur ressemblait : son excentricité est très forte pour une planète, ainsi que son inclinaison sur l'écliptique. Le couple Pluton-Charon semblait bien être en fait le plus gros objet (connu) de la ceinture de Kuiper. Dans ce cas, ce n'est donc pas vraiment une planète, et le système solaire n'en compte donc que 8. Ou alors tous ces objets sont des planètes, et on en perd le compte…

Quaoar a été découvert en juin 2002 à l'aide du télescope de 1,20 m du Mont Palomar. Son diamètre vaut approximativement 1.300 km, plus de la moitié de celui de Pluton. Il a été mesuré par le télescope spatial, car il est au-dessus de son pouvoir séparateur : 0,04" d'arc. Il orbite à une distance de 43,4 UA ou 6,5 milliards de km du Soleil, l'excentricité de son orbite est de 0,04, et son inclinaison de seulement 8° sur l'écliptique (seulement, pas comparaison à Pluton). Son année vaut 285 ans.

Une analyse spectrale faite à l'aide du télescope Keck a montré qu'il y avait de la glace d'eau sur Quaoar. Quaoar est le nom d'une divinité créatrice amérindienne, du peuple Tongva qui habitait l'actuelle région de Los Angeles.

Les KBO connus s'étendent sur 12 milliards de km au-delà de l'orbite de Neptune.

Varuna et AW197 mesurent chacun 900 km (diamètre estimé d'après les mesures de lumière, aucun télescope actuel ne pouvant les résoudre). Varuna orbite à 43 UA du Soleil.

2001 KX76 est un corps glacé perdu à 39 UA du Soleil. Ce n'est absolument pas un astéroïde, et pourtant sa taille doit être autour de 1.200 km au moins.

2004 DW

- son diamètre est estimé entre 840 et 1.800 km ;
- son orbite est elliptique, avec un périhélie à 4,355 milliards de km du Soleil et un aphélie à 7,580 millards de km ;
- l'année de cet objet doit être autour de 252 ans.

2002 AW197 est aussi gros que Varuna.

**Statistiques**

On connait maintenant un millier d'objets dans la ceinture de Kuiper, la plupart atteignant à peine 100 km de diamètre. La masse totale des KBO pourrait être 100 fois supérieure à celle des astéroïdes. Rien n'interdirait de trouver dans la ceinture de Kuiper un petit nombre d'objets plus gros que Pluton.

Les objets de la ceinture de Kuiper sont supposés constitués de roches et de :

- glace d'eau
- glace de méthane
- alcool gelé
- glace carbonique ($CO_2$)
- glace de CO
- etc.

Pour déterminer le diamètre, on peut utiliser le rayonnement infrarouge. Un objet blanc renvoie beaucoup de lumière visible, et peu d'infrarouge parce qu'il est froid. Par contre, un objet noir renvoie peu de visible et beaucoup plus d'IR parce qu'il a absorbé beaucoup plus d'énergie et s'est donc chauffé davantage. L'écart entre l'énergie rayonnée dans le visible et l'IR permet donc de calculer si l'objet est blanc ou noir, et d'en déterminer le diamètre.

**Les objets de Kuiper de 1.000 km**

| nom | mag abs | albedo | Diamètre km | Type d'orbite |
|---|---|---|---|---|
| Pluton | -1 | 0,6 | 2320 | plutino |
| Charon | 1 | 0,4 | 1270 | plutino |
| 2004 DW | 2,2 | 0,04/0,12 | ~1500 | plutino |
| Quaoar | 2,6 | 0,12 | 1200+/-200 | classique |
| Ixion | 3,2 | 0,09 | 1065+/-165 | plutino |
| 2002 AW197 | 3,2 | 0,1 | 890+/-120 | épars |
| Varuna | 3.7 | 0,07+/-0,02 | 900+/-140 | classique |

**Mesure du diamètre**

La détemination du diamètre d'un objet de Kuiper est difficile, car les moyens actuels ne nous permettent pas de les résoudre. Seule donc la luminosité nous donne un renseignement. Bien évidemment, la distance au Soleil joue un rôle important dans la brillance apparente. Il est donc nécessaire de connaître précisément l'orbite de l'objet à mesurer, afin d'avoir sa distance au Soleil précise. Mesurant sa magnitude apparente, et

corrigeant par la distance, on obtient la magnitude absolue de l'objet. Elle ne dépend plus de la distance, mais elle dépend de l'albedo et de la surface de l'objet (la surface étant proportionelle au carré du rayon).

Si on connaissait l'albedo, on obtiendrait alors la surface, donc le diamètre de l'objet. Le problème est que l'albedo est une caractéristique physique à laquelle nous n'avons pas accès aujourd'hui.

La méthode utilisée consiste à mesurer la magnitude dans deux domaines : visible et infra-rouge. Si un objet est brillant dans le visible, il renvoie presque toute la lumière reçue du Soleil, et celle-ci ne le chauffe pas. Il est donc froid, et sombre en infra-rouge. Réciproquement, un objet qui renvoie peu de lumière dans le visible l'absorbe et se réchauffe, par suite il brille dans l'infrarouge. La différence de brillance dans le visible et l'infra-rouge permet donc d'estimer l'albedo. On peut dire autrement que l'énergie reçue doit être évacuée ; l'albédo modifie simplement la proportion de visible de d'infrarouge réémis.

Une autre difficulté se présente : la très basse température de ces objets leur donne (loi du corps noir) un rayonnement maximum à grande longueur d'onde, vers 60 à 70 µm. Mais l'atmosphère terrestre est opaque dans ce domaine. Alors, il a fallu se rabattre sur une longueur d'onde plus courte, et les mesures ont été faites à 10 et 20 µm. Il faudra attendre des mesures spatiales pour avoir une plus grande précision en utilisant le bon domaine.

Cette méthode étant difficile à appliquer, peu d'objets ont été mesurés précisément. La précision est de l'ordre de 20 % dans les bons cas. Varuna a été mesuré en 2001, son diamètre est de l'ordre de 1.000 km. Quaoar a un albedo de 0,12 alors que Charon atteint 0,4. Il y a donc de grands écarts entre les albedos des différents objets, et donc une estimation pure et simple ne donne qu'une indication sur le diamètre : 2004 DW est un objet de Kuiper dont on n'a pas mesuré l'abedo. S'il est semblable à celui de Quaoar (0,12), son diamètre atteint 1.500 km, alors que s'il est de 0,4 comme celui de Charon, le diamètre tombe à 750 km.

Pour l'instant, il faut donc garder en mémoire que les diamètres indiqués sont des estimations, la plupart du temps entachées d'une erreur importante. Dans un avenir proche, il sera possible de faire certaines études physiques sur les objets de Kuiper dépassant les 1.000 km de diamètre.

---

**Sedna : 2003 VB12**

Découvert en 2003 (par C. Trujillo, M. Brown, D. Rabinowitz), c'est le plus gros connu des objets de Kuiper. Il pourrait dépasser les 2.000 km de diamètre, ce qui le ferait presque aussi gros que Pluton (2.300 km). Sedna pourrait donc retenir une faible atmosphère, comme Pluton. D'autre part, lors de la découverte, il était plus loin du Soleil que tous les autres découverts avant lui.

Sedna possède une autre particularité : son orbite excentrique l'amène très loin du Soleil, et le place entre la ceinture de Kuiper et le nuage de Oort.

| | |
|---|---|
| demi grand axe | 547 UA |
| excentricité | 0,861 |
| périhélie | 76 UA |
| aphélie | 1.018 UA |
| année | 10.500 ans |
| inclinaison | 11,9° |

Au périhélie, cet objet se trouve donc presque deux fois plus loin que Pluton, et à l'aphélie 25 fois plus loin !

On est cependant encore très loin du nuage de Oort, qui s'étend jusqu'à 1/2 AL (on est à 0,015 AL). Sedna est donc un objet intermédiaire, qui irait du bord externe de la ceinture de Kuiper (périhélie) au bord interne du nuage de Oort (à l'aphélie).

La température de surface ne doit pas dépasser les -140 .

Dans la mythologie Inuit, Sedna est la déesse de la glace, vivant dans l'océan Arctique.

Le KBO 2000 OO67 est sur une orbite très elliptique, atteignant 1.000 UA à l'aphélie.

---

## *Familles de KBO*

**Les Plutinos**

La connaissance d'un nombre conséquent de ces objets permet de faire certaines remarques d'ordre statistique. La plus impressionante aujourd'hui est sans doute la présence de nombreux objets dans la résonnace 3:2 par rapport à Neptune, tout comme Pluton (2 ans d'un plutino = 3 ans de Neptune). Pluton étant le plus ancien connu, et pour l'instant le plus gros de ces objets, on a donné le nom de *plutinos* à ces corps. Ce nom se rattache donc à la similitude des orbites, et non à une composition similaire.

| Objet | a | e | i | q | Q |
|---|---|---|---|---|---|

| | UA | | deg. | UA | UA |
|---|---|---|---|---|---|
| Pluton | 39,61 | 0,25 | 17,17 | 29,58 | 49,30 |
| Orcus | 39,19 | 0,226 | 20,6 | 30,41 | 48,05 |
| 1996 TP66 | 39,71 | 0,34 | 5,7 | 26,38 | 53,05 |
| 1993 SZ4 | 39,82 | 0,26 | 4,7 | 29,57 | 50,07 |
| 1996 RR20 | 40,05 | 0,19 | 5,3 | 32,55 | 47,55 |
| 1993 SB | 39,55 | 0,32 | 1,9 | 26,91 | 52,18 |
| 1993 SC | 39,88 | 0,19 | 5,2 | 32,24 | 47,52 |
| 1993 RO | 39,61 | 0,20 | 3,7 | 31,48 | 47,73 |
| 1993 RP | 39,33 | 0,11 | 2,8 | 35,00 | 43,66 |
| 1994 JR1 | 39,43 | 0,12 | 3,8 | 34,76 | 44,11 |
| 1994 TB | 39,84 | 0,32 | 12,1 | 27,05 | 52,63 |
| 1995 HM5 | 39,37 | 0,25 | 4,8 | 29,48 | 49,26 |
| 1997 QJ4 | 39,65 | 0,22 | 16,5 | 30,83 | 48,47 |
| 1995 KK1 | 39,48 | 0,19 | 9,3 | 38,67 | 46,98 |
| 1995 QZ9 | 39,77 | 0,15 | 19,5 | 33,70 | 45,85 |
| 1995 YY3 | 39,39 | 0,22 | 0,4 | 30,70 | 48,08 |
| 1996 TQ66 | 39,65 | 0,13 | 14,6 | 34,59 | 44,71 |

a : demi grand axe ; e : excentricité ; i : inclinaison
q : distance périhélique ; Q : distance aphélique

La résonnance protège les plutinos des perturbations de Neptune. En effet, ayant un demi-grand axe voisin de celui de Neptune, ces objets pourraient normalement s'en approcher suffisamment pour être éjectés de leur orbite (éventuellement être capturés ou tomber sur Neptune). Mais au moment où un tel objet croise l'orbite de Neptune, cette dernière est toujours loin ! C'est en particulier le cas de Pluton : lors du passage au périhélie, Neptune était de l'autre côté du Soleil. On a montré déjà que c'est aussi le cas des objets 1993 SB, 1994 TB, 1995 QY9, ce qui les rapproche encore de Pluton !

On estime que le quart des objets de la ceinture de Kuiper sont des plutinos. Ceux de plus de 100 km devraient donc être au nombre de 1.400. Toutefois, il existe un biais observationnel, car par définition les plutinos sont les KBO les plus proches, donc les plus faciles à détecter.

Quelques autres objets doivent être dans des résonnances différentes avec Neptune : par exemple la résonnance 4:3 pour 1995 DA2.

L'inclinaison des orbites semble être inférieure à 20° (le maximum serait donc atteint par Pluton). La présence des résonnances, les inclinaisons, sont compatibles avec la théorie de la migration des planètes lors de la formation du système solaire. Cette théorie, imaginée pour expliquer les systèmes exoplanétaires découverts depuis 1995, se trouverait alors renforcée.

---

**Les objets de Kuiper classiques**

La plupart des KBO ne sont pas des plutinos ; on les appelle les KBO classiques. Leur périhélie est nettement plus loin que l'orbite de Neptune. Leurs excentricités sont faibles, comme on pourrait l'attendre pour des corps formés dans un disque d'accrétion calme. Le prototype des KBO classiques est 1992 QB1. Leur demi grand-axe est compris entre 42 et 48 UA. Leur éloignement les préserve des perturbations de Neptune, et donc leur durée de vie est supérieure à l'âge du système solaire. Il n'y en a pas au-delà de 50 UA.

Par contre, leurs inclinaisons sont souvent fortes, et atteignent 30° (les dépassent pour 1996 RQ20 et 1997 RX9). Ces inclinaisons ne sont pas expliquées par la théorie de base de formation du système solaire, et il faut invoquer un autre mécanisme (perturbations par un planétésimal massif - il aurait aussi perturbé les plutinos ; ou bien perturbations par une étoile proche - les passages sont actuellement rares, mais le Soleil a pu se former dans un amas).

---

**Les objets de Kuiper épars**

Ce sont des objets de Kuiper ayant leur périhélie autour de 35 UA, et des orbites très excentriques, et inclinées sur l'écliptique. Leur désignation anglaise est *Scattered Kuiper Belt Objects* (*SKBO*).

Leur modèle est 1996 TL66 :

| **1996 TL66** | |
|---|---|
| **excentricité** | 0.59 |

| | |
|---|---|
| **demi grand-axe** | 85 UA |
| **inclinaison** | 24° |
| **magnitude** | 21 |
| **albedo** | 0,04 |
| **diamètre** | 500 km |

On note aussi 1999 CV118, 1999 CY118 et 1999 CF119.

2003 EL61,

**136199 Eris (2003 UB313)**, découvert le 1 octobre 2003, par M. E. Brown, C. A. Trujillo, D. Rabinowitz.

Demi grand-axe = 67,709 UA, e = 0,4416, inclinaison 44°, période 557 ans. Les mesures photométriques donnent un diamètre compris entre 4.400 et 9.900 km. En supposant qu'il renvoie la totalité de la lumière reçue, son diamètre serait encore supérieur à celui de Pluton. C'est donc un objet nettement plus gros. On l'évalue à 2.600 km contre 2.250 pour Pluton. Une évaluation plus récente à l'aide du télescope bolométrique MAMBO, donne un diamètre de l'ordre de 3.000 km. Une estimation due au télescope spatial ramène cette valeur à 2.400 km.

Le spectre de cet objet est dominé par les raies du méthane, caractéristique partagée avec Pluton.

Eris possède un satellite, nommé Dysnomia.

Eris est la déesse de la discorde dans la mythologie grecque. Dysnomia est sa fille, c'est l'un des fléaux qui se sont jetés sur la Terre lorsque Pandore a ouvert sa boîte…

**La course**

Les objets épars seront difficiles à suivre au cours de leur évolution orbitale, étant donné qu'ils sont découverts près de leur périhélie (éclat maximum), et ensuite leur éclat diminue. Les aphélies étant très éloignés, les objets ne seront pas visibles avec les moyens actuels. Il est bien évident que les orbites ne seront pas assez bien connues pour retrouver facilement un tel objet à la position prédite à son retour au périhélie : une erreur très faible sur l'arc observé actuellement peut donner une erreur très importante après un tel parcours.

La question est de savoir si les télescopes gagneront en puissance assez vite pour ne pas perdre ces objets. Il est vrai que ceci ne se produira pas avant quelques centaines d'années… Les astronomes du futur auront sans doute la joie de découvrir de "nouveaux" objets !

Mais un regard rétrospectif vers les progrès instrumentaux du XX$^{e}$ siècle nous donne le vertige : les miroirs ont grossi de 1,5 m à 10 m, les temps de pose sont passé de la dizaine d"heure à quelques minutes (CCD), et surtout la magnitude limite de 15 à 30. Il est possible que les progrès soient assez rapides pour suivre les principaux KBO jusqu'à leur aphélie.

**Nombre d'objets**

Il est impossible de déterminer combien d'objets se trouvent dans ces régions de l'espace. Mais ceux que nous connaissons ont été trouvés à l'aide de recherches automatiques (télescope automatique, couplé à un ordinateur qui analyse les images obtenues afin de déterminer les objets en mouvement). Le nombre d'objets trouvés dans la surface explorée permet d'extrapoler à tout le ciel. On en déduit un nombre probable d'objets visibles aujourd'hui. Mais ces objets passent presque tout leur temps très loin du Soleil ; ils sont beaucoup plus lents à l'aphélie. Donc, il doit exister une forte proportion d'objets qui sont actuellement trop loins pour être détectés (on calcule cette proportion). On en déduit le nombre total d'objets SKBO existant.

Les découvreurs de 1996 TL66 ont ainsi estimé qu'il devait exister quelques 10.000 objets de Kuiper épars de taille semblable. Il doit y avoir aussi de nombreux objets plus petits. L'ensemble pourrait avoir une masse totale de l'ordre de celle de la Terre.

**Age des objets**

Les objets de Kuiper, si loin du Soleil, sont probablement des objets très primitifs, qui sont restés inchangés depuis la formation du système solaire. Sauf si…

On a envisagé qu'ils aient pu subir des collisions entre eux, des gros se fragmentant, et les débris étant les objets observés aujourd'hui. Il n'est guère possible de vérifier une telle hypothèse actuellement. S'il y a eu fragmentation, il y avait dans les premiers temps du système solaire des objets plus gros. Ces derniers ont alors subi un réchauffement (énergie de contraction, énergie des collisions, radioactivité) et se sont transformés par différenciation ou modification chimique. Ils ne seraient pas tout aussi primordiaux que ce que l'on pensait. Il faudra des études précises de composition chimique, donc des moyens d'observations beaucoup plus puissants, pour départager ces théories.

**Origine**

Lors de la formation du système solaire, des objets en grand nombre ont dû se former dans ces zones éloignées. Leurs orbites devaient être à peu près quelconques. Ensuite, rapidement, les perturbations de Neptune ont agit, et modifié les orbites. Il est probable que les objets dont les périodes de révolutions étaient proches des 3/2 de celle de Neptune ont été forcées à cette valeur précise, donnant les plutinos.

Par contre, les objets moins réguliers, qui passaient près de Neptune, ont été fortement perturbés, et envoyés sur des orbites très différentes ; certains ont percuté la planète, d'autres ont été éjectés du système solaire. Ce tri par les perturbations devrait s'étaler sur une très courte période, de l'ordre de quelques millions d'années. Parmi les objets qui ont gagné de l'énergie, et dont l'aphélie s'est éloigné du Soleil, ceux qui sont

restés raisonnablement proches (moins de 100 UA) n'ont plus subi de perturbations (à l'aphélie, celles de Neptune sont négligeables, et celles des étoiles proches et de la Galaxie aussi), et ceux qui s'en sont très éloignés ont constitué le nuage de Oort. Des simulations numériques montrent ce phénomène.

Les objets épars de Kuiper, au périhélie, s'approchent de Neptune. Mais leurs orbites étant très excentriques, leur vitesse est alors grande, donc ils restent peu de temps dans cette zone dangereuse. Si Neptune se trouve là par hasard au moment du passage périhélique, la perturbation sera importante, et l'objet peut être précipité dans le système solaire interne. C'est probablement l'origine des comètes à courte période qui viennent nous rendre visite de temps en temps. En effet, s'approchant du Soleil, leurs glaces superficielles vont se sublimer, et former les deux queues caractéristiques des comètes.

**Evolution des idées**

Lors de sa découverte en 1930, Pluton a été la neuvième planète du système solaire. Ceci est resté vrai jusqu'à une période récente. Mais depuis 1992, la théorique ceinture de Kuiper devient un objet réel. Et ses propriétés sont les mêmes (pour une partie de la ceinture au moins) que celles de Pluton…

Beaucoup d'objets de la ceinture de Kuiper sont, comme Pluton, en résonance 2:3 avec Neptune. Tous ces corps ont donc une origine commune, une même constitution, et une même histoire. Il est normal de les réunir. Pluton étant le premier découvert, son nom désigne l'ensemble : les objets de la ceinture de Kuiper en résonnance 3:2 avec Neptune sont par définition les plutinos.

---

Les petites planètes qui ont un nom définitif (septembre 2008) sont : Cérès, Pluton, Haumea, Eris et Makemake. Seule Cérès se trouve dans la ceinture principale, les autres sont dans la ceinture de Kuiper.

---=OO=---




**Ce chapitre est en cours de rédaction**

**Nuage de Oort**

Le nuage de Oort est une sphère (et non un anneau) formée de comètes (gelées, donc inactives et invisibles), qui entoure le système solaire à grande distance. Il contiendrait de 1.000 à 2.000 milliards de comètes situées de 0,25 à 0,5 années-lumière (1.500 à 3.500 UA). Il s'étendrait même jusqu'à 1 AL, c'est-à-dire à la limite gravitationnelle du système solaire : un peu plus loin, la comète serait attirée plus fortement par une autre étoile.

Le nuage de Oort est donc constitué de petits objets (quelques kilomètres à quelques dizaines de kilomètres), placés à une distance de nous beaucoup plus grande que la plus lointaine planète. Tant que ses constituants restent dans ces zones lointaines, où le froid est très grand (quelques degrés absolus, de l'ordre de -250° C), ils ne manifestent aucune activité. Leur albedo étant par ailleurs très faible (ils réfléchissent très peu de la faible lumière qu'ils reçoivent du Soleil), ils sont totalement inobservables. Pour longtemps encore, notre nuage de Oort sera innaccessible aux instruments. Mais paradoxalement, il se pourrait que nous observions le nuage de Oort d'autres étoiles ! Le nuage qu'on observe autour de β Pictoris pourrait être de cette nature, constitué de comètes. On observe en effet dans le spectre de cette étoile de fortes raies d'absorption de la vapeur d'eau, qu'on interprête comme l'évaporation des comètes détruites par l'étoile.

A ces distances, les comètes sont très sensibles aux moindres perturbations (proximité d'un nuage de gaz et poussières, ou d'une étoile), qui peuvent les expédier hors de notre système, ou au contraire les faire tomber vers le Soleil. Dans ce cas, elles nous apparaissent comme de nouvelles comètes. Leurs orbites sont très excentriques, avec l'aphélie dans le nuage de Oort, et le périhélie plus ou moins proche du Soleil. La comète passe le plus clair de son temps à très grande distance du Soleil, où elle est congelée. Elle ne reste proche du Soleil que pendant quelques semaines à quelques mois. Bien qu'elle fonde rapidement près du Soleil, comme elle y reste peu de temps, elle a une durée de vie assez longue. Une comète perd au maximum quelques dizaines de tonnes d'eau par seconde.

En 1950 Jan Oort a montré que :

- aucune comète observée ne montre une orbite parabolique, qui trahirait une origine externe à notre système ;
- les comètes à longue période ont une forte tendance à regrouper leur aphélie vers 50.000 UA ;
- elles proviennent de toutes les directions de l'espace.

**Nombre d'objets et masse**

Le nombre d'objets constituant le nuage de Oort, non observé, est totalement inconnu. Il est toutefois possible d'en donner une estimation, basée sur la fréquence des apparitions de nouvelles comètes. Pour justifier cette fréquence, il faut une certaine quantité d'objets soumis aux perturbations.

Cette technique donne un nombre d'objets très important, se chiffrant en milliards.

La masse totale de ces objets reste cependant très faible, car ils sont tous de très petite taille. On l'estime à quelques dizaines de masses terrestres.

Objets du nuage de Oort

Sedna (2003 VB12) découvert en 2003 par Mike Brown, Chad Trujillo, David Rabinowitz

1.250 km < diamètre < 1.800 km (déduit de mesures photométriques)
périhélie : 76 ± 7 UA

aphélie : ~ 850 UA

**Stabilité**

Les objets constituant le nuage de Oort sont lointains, certains sont à la limite d'influence du Soleil. Ils lui sont faiblement liés, et donc une faible perturbation peut les précipiter sur une orbite différente, que celle-ci les amène vers le Soleil (nouvelle comète) ou les expédie au contraire dans le milieu interstellaire.

Les perturbations peuvent provenir des étoiles proches, dont les mouvements produisent des perturbations variables. La force gravitationnelle solaire subie par un objet assez lointain du nuage de Oort est peu différente de celle provenant des autres étoiles proches : les masses de ces

objets sont du même ordre de grandeur, et les distances sont dans un rapport faible, du simple au quadruple pour donner une idée. Dans ces conditions, la force perturbatrice est de l'ordre du $10^e$ de la force principale, et ses effets sont très importants. Ces perturbations sont probablement responsables de l'apparition des nouvelles comètes en période calme (comme actuellement).

Mais si on observe l'environnement solaire un peu plus lointain, on y trouve des nuages d'hydrogène très massifs. Le complexe d'Orion est très important, et de nombreux nuages semblables se trouvent dans les bras spiraux de la Galaxie. Le mouvement du Soleil et de son cortège de planètes et d'objets mineurs l'amène à traverser un bras spiral avec une pseudo-période de l'ordre de quelques centaines de millions d'années. Dans ces périodes, ils passe à proximité de grands nuages dont les perturbations doivent être beaucoup plus importantes.

Il est possible que le nombre de comètes nouvelles soit alors très important. Un grand nombre d'objets du nuage de Oort doivent être projetés vers notre étoile, et venir s'y brûler. Un nombre plus grand encore peut-être doivent être expédiée loin du Soleil, et définitivement perdues.

La stabilité du nuage de Oort dans ces conditions doit être assez relative. Toutefois, étant donné l'extrême éloignement des corps perturbateurs, leur vitesse est très faible, et la diminution du nombre d'objets est tout aussi lente. L'évaporation du nuage de Oort devrait s'étaler sur des milliards d'années.

*A contrario*, le Soleil peut-il gagner de nouvelles comètes ? Il est probable que les autres étoiles doivent posséder elles aussi des nuages de Oort, dont la stabilité ne doit pas être plus grande. Et des comètes perdues par ces étoiles peuvent parfois venir se prendre dans les filets gravitationnels du Soleil…

**Pluies de comètes**

Les étoiles de la Galaxie suivant chacune sa route, des rencontres se produisent parfois. Les distances à ces moments-là sont très faibles en comparaison des distances moyennes, mais restent encore grandes devant les distances des planètes au Soleil. On pense actuellement qu'une étoile passe à $10^4$ UA (= 0,15 AL) tous les 10 millions d'années, et à $10^3$ UA (= 0,015 AL) tous les 100 millions d'années. Ces rencontres produisent une multiplication du nombre de comètes nouvelles par 10 à 100, et par 100 à 1.000 respectivement. Actuellement, le taux de nouvelles comètes semble être au plus bas.

Les pluies de comètes pourraient être produites par :

- Les perturbations par des étoiles passant près du système solaire ;
- Les nuages moléculaires rencontrées au hasard et que le système solaire traverse.

On connait une étoile, Gliese 710, qui est actuellement de magnitude visuelle 9, et qui se rapproche de nous à grande vitesse. Elle est à 63 AL de la Terre (magnitude absolue 7,57), mais dans un million d'années, elle passera à moins d'une année-lumière. Un calcul simple montre que sa magnitude sera de -0,04, ce sera l'une des plus brillantes du ciel : la troisième après Sirius (hémisphère nord, mv = -1,6) et Canopus (hémisphère sud, mv = -0,9).

Elle sera donc dans le Nuage de Oort. Les perturbations gravitationnelles qu'elles produira alors seront très intenses, puisqu'elle sera plus de 4 fois plus proche que l'étoile la plus proche aujourd'hui. Certaines comètes seront expulsées du système solaire, tandis que d'autres seront précipitées en direction du Soleil.

Une belle pluie de comète sera visible ! on pourrait en avoir plusieurs dans le ciel en même temps, et ce seront des comètes toutes fraîches, dont la surface n'a jamais été exposée au Soleil. Elles n'ont pas encore maigri par l'abrasion du Soleil, et seront au mieux de leur forme. Le spectacle sera certainement magnifique. En espérant pour les spectateurs que tous ces petits objets se tiennent tout de même à une distance respectable de la Terre…

---=OO=---

# Les comètes




Les comètes sont des phénomènes inquiétants pour l'humanité, par leur aspect inhabituel, et par leur arrivée inopinée. Elles troublent la belle ordonnance des astres. De ce fait, elles ont toujours été assimilées à de mauvais présages, et il est bien évident que lorsqu'on a cette idée en tête, on trouve toujours une catastrophe à leur associer… Elles ont donc suscité l'angoisse, de manière irraisonnée d'abord, puis d'une façon plus réfléchie même au début du XX$^{e}$ siècle, où l'on a cru qu'elles risquaient d'empoisonner la Terre ! On trouve de nombreuses représentations des comètes, associées à l'idée d'une dague, d'une épée faite pour tuer. Ambroise Paré en a fait une description terrible ! On les a volontiers associées à la mort d'un souverain. Il faut dire aussi qu'on voyait autrefois plus de comètes que maintenant, non pas qu'il y en avait plus, mais simplement parce que le ciel n'avait pas encore été souillé par des lumières, des poussières, fumées et autres déchets produits par notre brillante civilisation… Sans compter le projet très sérieux (qui en est resté là, pour le moment) de placer en orbite autour de la Terre des millions de petites aiguilles d'aluminium, destinées à renvoyer la lumière solaire vers la Terre, pour assurer l'éclairage nocturne ! Qu'on réalise un tel projet, et on ne verra même plus la Lune…

**Aspect des comètes**

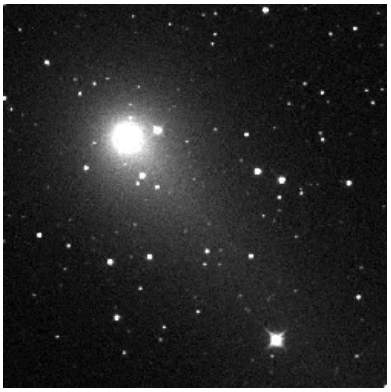
Lorsqu'on les découvre, les comètes présentent l'aspect d'une faible nébulosité qui se déplace de jour en jour dans le ciel. A mesure que le temps passe, elle devient plus brillante, s'allonge, et développe un jet qu'on nomme *queue*. L'observation attentive de cette queue montre de fines stries, qui lui donnent un aspect de chevelure. C'est l'origine du nom des comètes, qui provient du latin *coma* = chevelure. Certaines comètes ont développé des queues immenses, qui traversaient tout le ciel.

La partie la plus brillante de la comète s'appelle la *tête*, ou *coma*. Elle a l'aspect d'une boule cotoneuse. C'est une sphère de gaz, vapeur d'eau, poussières, qui se sont détachées de la comète par sublimation. Elle cache le *noyau*, qui est la comète véritable.

Dans son déplacement, la comète se rapproche du Soleil, passe derrière ou devant lui, puis s'en éloigne en diminuant d'éclat. Petit à petit, sa queue diminue, jusqu'à ce qu'elle devienne invisible. Assez souvent, une comète ne peut pas être observée d'un même point de la Terre, à la fois avant et après son passage à proximité du Soleil. Aussi, les observateurs ont rarement pris conscience de ce transit. La comète semble donc apparaître, puis disparaître mystérieusement, sans respecter de loi évidente comme les astres qui peuplent le ciel.

Dans ces conditions, les comètes ne semblent pas être des astres, et leur nature a posé un vrai problème. D'autre part, les considérations philosophiques en vogue depuis l'Antiquité interdisaient de croire que les comètes étaient des astres. Pythagore, en 530 avant J.C., supposait la Terre sphérique, entourée de 10 sphères en cristal concentriques, portant les astres. En tournant, ces sphères produisent des notes de musique selon leur taille et leur vitesse ; l'ensemble de ces notes donne un accord parfait. C'est l'origine de la *musique des sphères*.

Tout ce qui était en-dessous de la Lune était imparfait, changeant, et destructible ; au-dessus de la Lune, était le monde parfait des astres.



Comète Linear, photo J.F. Colliac

Les Chinois avaient déterminé il y a 2.600 ans que la queue des comètes est toujours opposée au Soleil. Ils savaient aussi qu'elles brillent parce qu'elles réfléchissent la lumière du Soleil.

Les premiers hommes qui se soient intéressés aux comètes sur le plan scientifique se sont tout d'abord demandé à quelle distance elles se trouvaient. Incapables qu'ils étaient de la mesurer, toutes les hypothèses étaient envisageables, en particulier celle de phénomène atmosphérique. Il était facile de vérifier que les comètes sont loin de la Terre : si elles étaient proches, dans l'atmosphère, deux observateurs un peu éloignés la verraient dans des régions différentes du ciel. Par exemple, si elles étaient à 50 km d'altitude, deux personnes séparées de 1 km les verraient sous un angle de plus d'un degré (plus de deux fois la pleine lune). C'est Tycho-Brahé qui a eu cette idée, et l'a appliquée à la grande comète de 1577 entre ses observations faites à Uranienborg, et celles d'un des ses amis installé à Prague.

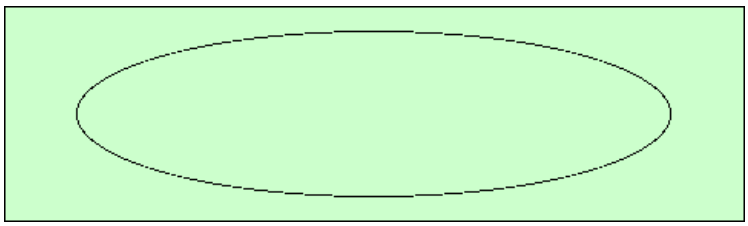
Cette interprétation atmosphérique ayant été rejetée, il restait à préciser l'orbite des comètes.

Tycho-Brahé encore, avec la précision de ses mesures sur la même comète, a remarqué qu'elle circulait sur une orbite qui ne pouvait être un cercle parcouru d'un mouvement uniforme, ce qui égratignait le dogme (c'était avant que Kepler énonce ses lois). Mais de plus, elle parcourait le ciel en traversant les orbites de certaines planètes, qui ne pouvaient donc pas être collées à une sphère de cristal… Et c'en était fini de la musique des sphères, puisqu'il n'y avait plus de sphères ! Les idées étaient donc dans l'air pour la venue de Kepler.

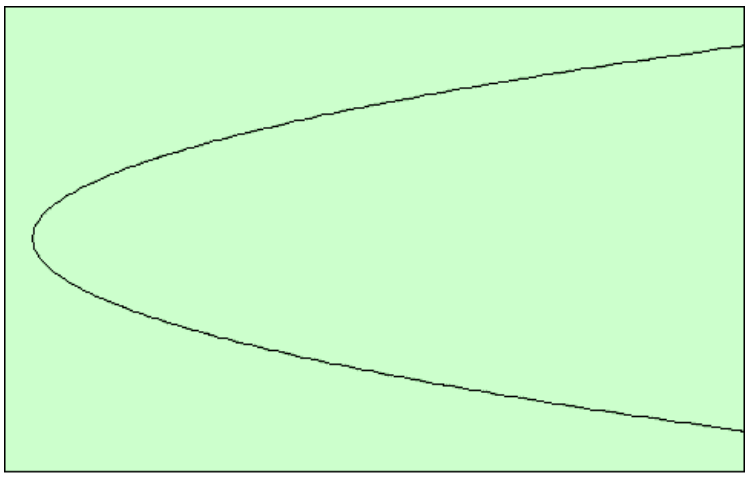
Une fois que les comètes ont été comprises comme objets célestes, que leurs orbites très allongées ont été connues avec une certaine précision, et que Kepler ait publié ses lois, l'interrogation suivante s'est portée sur la forme de l'orbite : ellipse, parabole ou hyperbole ? Ces trois courbes sont des coniques, et sont proches mathématiquement l'une de l'autre, mais leurs propriétés sont cependant très différentes ; l'ellipse est une courbe fermée, ayant le soleil en l'un des foyers, et l'objet qui y circule appartient donc au système solaire de manière durable. Par contre, la parabole et l'hyperbole sont des courbes ouvertes ; elles possèdent deux branches qui vont à l'infini, et donc un objet qui circule sur une telle courbe, après avoir contourné le Soleil à grande vitesse, va s'en éloigner indéfiniment en réduisant peu à peu sa vitesse. Sur une orbite parabolique, la vitesse tend vers 0 à l'infini, alors que sur une hyperbole elle reste non nulle.

Les objets qui circulent sur des orbites paraboliques ou hyperboliques n'appartienent pas au système solaire et n'y sont qu'en visite. L'excentricité d'une ellipse est strictement inférieure à 1, celle d'une parabole égale à 1, celle d'une hyperbole strictement supérieure à 1.

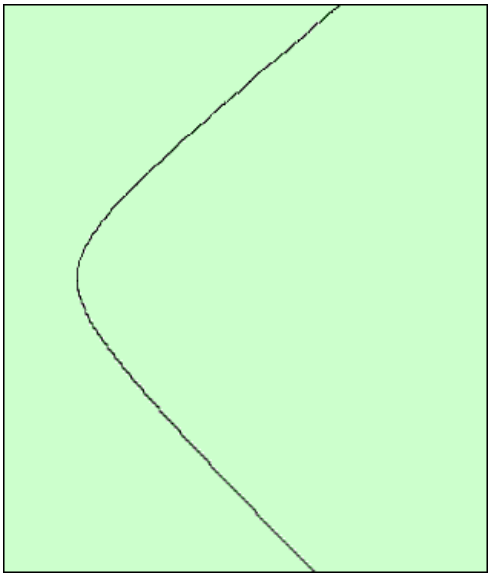
Lorsque Edmund Halley a fait des calculs précis sur une certaine comète, et calculé où elle devait se trouver quelques années avant, il s'est aperçu qu'il s'agissait de la même comète observée 76 ans plus tôt. Il a démontré ainsi que certaines comètes étaient périodiques, et donc appartenaient au système solaire. Leurs orbites sont des ellipses. Pour cette raison, on a donné son nom à cette comète si célèbre.



ellipse e < 1



parabole e = 1



hyperbole e > 1

Remarquez que près du périhélie les trois courbes sont très semblables. Si on ne connait que cette partie de l'orbite, il est difficile de savoir à laquelle on a affaire.

Certaines comètes ont donc des orbites elliptiques, et appartiennent au système solaire. En est-il de même de toutes ?

La réponse n'est pas immédiate. On distingue plusieurs types de comètes, en fonction de leur excentricité.

**Comètes à courte période**

Les comètes à courte période sont celles dont l'orbite (elliptique) est parcourue en moins de 200 ans. Elles tournent presque toutes dans le sens direct, et leur inclinaison est très faible.

La plus courte période est celle de la comète d'Encke, qui vaut 3,3 ans. Leur périhélie est proche de l'orbite de la Terre, et l'aphélie se situe en général dans la zone de Jupiter. Ceci sera à considérer lorsqu'on cherchera à comprendre la formation et l'origine des comètes.

**Comètes à longue période**

Les comètes à longue période ont forcément des orbites très allongées, puisqu'on les voit dans le système solaire interne, ce qui signifie que leur périhélie est proche du Soleil. Leur période étant longue, le demi-grand axe de l'orbite est grand, donc l'aphélie est lointain. Il s'ensuit que leur excentricité est proche de 1.

Mais comme nous l'avons dit plus haut, il est très difficile de distinguer entre ellipse, parabole et hyperbole au seul voisinage du périhélie. Aussi, certaines comètes semblent présenter des orbites paraboliques, et même hyperboliques. Mais les excentricités mesurées n'excèdent jamais 1,006 et sont donc dans une zone d'incertitude. Si on pouvait observer ces objets à grande distance du Soleil, on leur trouverait sans doute une orbite elliptique ($e < 1$). D'ailleurs, si elles venaient vraiment de l'extérieur du système solaire, leurs excentricités seraient quelconques, donc souvent très supérieures à 1, ce qu'on n'observe pas. Ceci montre que les comètes sont des objets du système solaire, même si certaines sont très lointaines.

Toutefois, il est possible que quelques unes soient vraiment sur des orbites hyperboliques, après que l'orbite elliptique normale ait été perturbée par les planètes géantes Jupiter et/ou Saturne. Anciens objets du système solaire, elle le quitteraient alors.

Contrairement aux comètes à courte période, les inclinaisons des comètes à longue période présentent des inclinaisons quelconques par rapport au plan de l'écliptique.

Jan Oort a étudié en 1950 les orbites des comètes connues, et a montré que les comètes à longue période avaient leurs aphélies à des distances de l'ordre de 20.000 à 100.000 UA du Soleil.

Nous allons voir plus loin que les comètes perdent de la matière (qui forme la chevelure et la queue) lorsqu'elles passent près du Soleil. Comme ce sont de petits objets, à chaque passage elles maigrissent. Elles ne peuvent pas exister très longtemps lorsqu'elles s'approchent de notre étoile. En tout cas, les comètes qui venaient près du Soleil peu de temps après sa formation ont été détruites depuis fort longtemps. Il est donc évident que de nouvelles comètes viennent en permanence remplacer les anciennes.

Jan Oort a conclu qu'il existait, entre 20.000 et 100.000 UA du Soleil, un ensemble de comètes qui tournent sur des orbites grossièrement circulaires. Une année-lumière correspond à 60.000 UA à peu près, et les étoiles les plus proches sont à un peu plus de 4 AL, donc à 250.000 UA. Ceci signifie donc que certaines comètes se promènent à une distance du Soleil de l'ordre de la distance entre les étoiles. Aussi sont-elles sensibles aux perturbations gravitationnelles des étoiles proches. Un calcul simple montrerait que la vitesse orbitale, à cette distance, est de quelques mètres par seconde seulement. Par contre, la vitesse des étoiles proches par rapport au Soleil est de l'ordre de 20 km/s. Les perturbations induites par les étoiles proches sur ces comètes sont donc conséquentes.

On peut envisager que l'une de ces étoiles perturbe occasionellement des comètes, les expédiant brutalement soit hors du système solaire, soit vers le Soleil. Mais il semble plus raisonnable de penser que l'ensemble des étoiles proches perturbe en permanence toutes ces comètes, modifiant lentement les orbites. Lorsqu'une comète se trouve un peu ralentie, son périhélie se rapproche du Soleil. Son orbite est alors une ellipse d'excentricité très voisine de 1, avec l'aphélie vers 50.000 UA et le périhélie à quelques UA seulement.

Les inclinaisons de leurs orbites étant quelconques, ce réservoir de comètes doit avoir une symétrie sphérique. On le nomme maintenant *nuage de Oort*.

## *Nature des comètes*

Pour simplifier, on dit que les comètes sont des *boules de neige sale*. Cette image est due à Fred Whipple en 1950 ; elle est assez proche de la réalité, car la glace d'eau est l'un des composants principaux des comètes, et cette glace est salie par des composés très sombres, qui en diminuent considérablement l'albédo. Ces poussières sombres permettent à la comète d'absorber efficacement les rayons du Soleil, aussi leur activité peut commencer alors qu'elles sont encore loin du Soleil, et se poursuivre longtemps après leur passage au périhélie. La comète Hale-Bopp a ainsi commencé son activité bien avant l'orbite de Jupiter, et on a pu la suivre encore à plus d'un milliard de km.

Les comètes passent le plus clair de leur temps très loin du Soleil, dans des régions où le froid spatial les congèle. Puis en s'approchant, elles se réchauffent progressivement. Elles n'ont bien sûr pas d'atmosphère retenue par la gravité, celle-ci est bien trop faible. La sonde Rosetta qui doit se poser sur une comète, est munie de crampons pour éviter d'être éjectée ! La pression à leur surface étant nulle, l'eau ne peut y exister à l'état liquide ; la glace chauffée par le Soleil se sublime, passant directement à l'état de vapeur. Elle libère ainsi les gaz qu'elle contenait, et les poussières qui y étaient piégées. Cette matière éjectée subit alors la pression du vent solaire, qui va la pousser dans une direction opposée au soleil. C'est ainsi que se forment la chevelure et la queue. En fait, il faut parler **des** queues, car on en distingue de deux sortes : la queue de gaz et la queue de poussières.

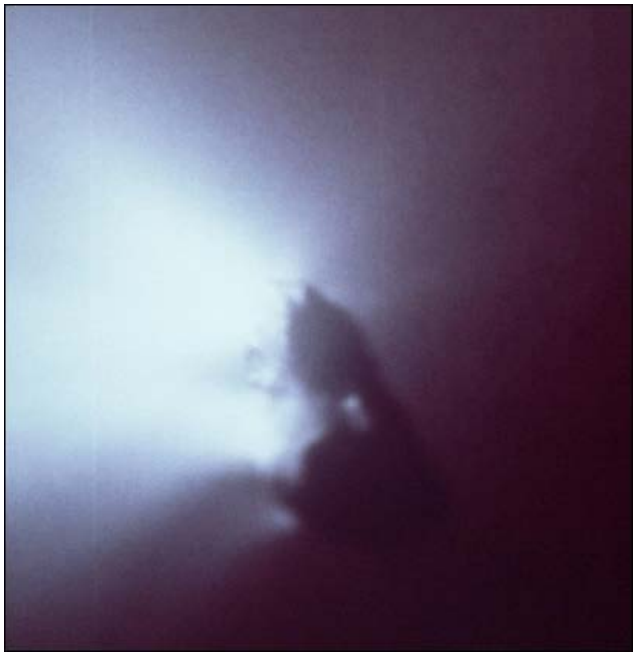
La vapeur d'eau et les gaz, légers, subissent de plein fouet le vent solaire, et prennent une direction presque opposée au soleil. Par contre, les poussières plus lourdes seront moins influencées, et garderont une direction plus proche de celle de l'orbite de la comète. Ainsi, les deux queues se distinguent nettement sur les photos. On remarque de plus qu'elles ne sont pas de la même couleur : la queue de gaz est nettement plus bleue, alors que la queue de poussières est blanc-jaunâtre (car elle réfléchit la lumière du Soleil).

Puisque les comètes perdent du gaz et des poussières en s'approchant du Soleil, leur taille diminue au cours du temps. Les comètes périodiques, qui reviennent se chauffer au Soleil de temps en temps, vont maigrir rapidement. Un jour viendra donc où il n'en restera plus… Cette évolution est assez rapide : pour la comète de Halley, qui revient tous les 76 ans à peu près, la durée de vie ne peut excéder quelques millénaires. Puisque les comètes se sont formées en même temps que le reste du système solaire, il y a presque 5 milliards d'années, il y a bien longtemps qu'elles auraient du disparaître. D'où viennent donc celles que nous pouvons contempler de nos jours ?

**Sublimation**

La sublimation de la glace d'eau se produit, dans le vide, à -73 . Cette température est atteinte dans le système solaire à une distance de 3 UA à peu près. C'est donc à partir de cette distance que la glace d'eau des comètes commence à se sublimer. Par contre, la glace carbonique se sublime à une température beaucoup plus basse, atteinte dès 10 UA du soleil. C'est donc le plus souvent entre Mars et Jupiter qu'une comète commence à manifester son activité.

La comète de Halley a été visitée le 14/3/86 par la sonde européenne Giotto ; une sonde américaine, une sonde japonaise et deux sondes russes ont également abordé la comète, mais en passant nettement plus loin. Giotto a transmis de magnifiques photos du noyau de la comète, qui montrent sa forme irrégulière, son activité du côté chauffé par le Soleil (ce qu'on prévoyait, mais qui n'avait jamais été observé auparavant). On y voit aussi des cratères, comme sur tout autre objet céleste.



Noyau de la comète de Halley, photographié par la sonde européenne Giotto (caméra multicouleurs) Crédits ESA

Sur cette photo, on voit distinctement deux zones d'activité intense.

**Erosion**

Considérons la comète de Halley, que la sonde Européenne Giotto a survolée, et qui est donc bien connue. Elle perd à chaque passage près du Soleil, de 1 à 3 mètres d'épaisseur à sa surface. Le diamètre de son noyau est de l'ordre de 10 km. Nous pouvons en déduire la perte relative à chaque passage près du Soleil :

Soit r son diamètre, e l'épaisseur enlevée lors d'un passage, $V_r$ le volume avant érosion, $V_{r-e}$ le volume après érosion.

$V_r = 4\pi\ r^3 / 3$

$V_{r-e} = 4\pi\ (r - e)^3 / 3 = 4\pi\ (r^3 - 3\ r^2\ e + 3\ r\ e^2 - e^{\ 3}) / 3$

Le terme dans la parenthèse se simplifie en $(r^3 - 3\ r^2\ e)$. En effet, e étant petit, $e^2$ et $e^3$ sont négligeables devant $r^3$. D'où :

$V_{r-e} = 4\pi\ (r^3 - 3\ r^2\ e) / 3 = 4\pi\ r^3 / 3 - 4\pi\ r^2\ e = V_r - 4\pi\ r^2\ e$

Le volume arraché à chaque passage est le volume avant ablation - le volume après ablation :

$V_e = V_r - V_{r-e} = V_r - (\ V_r - 4\pi\ r^2\ e) = 4\pi\ r^2\ e$

Par rapport au volume total de la comète :

$k = V_e / V_r = 4\pi r^2 e / (4\pi r^3 / 3) = 3 e / r$

Si e = 1 m, et r = 5.000 m : k = 3 / 5000 = 0,0006

$V_e = 0{,}0006\ V_r$

La comète perd donc quelques dix-millièmes de son volume (donc de sa masse) à chaque passage près du Soleil.

Elle aura complètement disparu après 10.000 passages. Halley ayant une orbite de 76 ans, ceci se produira dans 10.000 × 76 = 760.000 ans. On retiendra qu'en un temps de l'ordre du million d'années, une comète standard disparaît. Ce temps dépend bien sûr de la masse initiale, qui est parfois nettement plus faible.

Les comètes que nous voyons maintenant sont donc forcément nouvelles, sinon elles auraient déjà disparu.

**Provenance des comètes**

Les comètes à courte période (moins de 200 ans) et dont l'orbite est voisine du plan de l'écliptique (comme les orbites des planètes), et les comètes à longue période qui présentent une inclinaison quelconque de leur orbite pourraient avoir une origine différente.

En étudiant les orbites d'un grand nombre de comètes, on s'est aperçu que les aphélies des comètes périodiques se trouvaient groupés à une distance du Soleil un peu au-delà de l'orbite de Pluton, et que les orbites étaient toutes dans le plan de l'écliptique (à peu près) et parcourues dans le sens direct.

Par contre, les autres comètes proviennent de régions bien plus lointaines, et leur inclinaison sur l'écliptique est quelconque : certaines tournent dans le sens rétrograde. On a donc compris qu'il y avait deux réservoirs distincts de comètes : la *ceinture de Kuiper* et le *nuage de Oort*.

**Constitution des comètes**

schéma

**Queue de gaz**

La queue de gaz est composée essentiellement des éléments H, O, C et N (Hydrogène, Oxygène, Carbone et Azote), d'eau $H_2O$, de composés des éléments précédents : acide cyanhydrique, monoxyde de carbone, cyanogène, radical OH… Récemment, on a découvert de très nombreuses autres molécules organiques dans les queues de comètes.

**Queue de poussières**

Les radiations solaires opérent un tri parmi les poussières : les plus lourdes restent sur une orbite proche de celle de la comète qui les a émises ; les plus fines sont poussées par les rayons solaires, donc leur trajectoire s'infléchit à l'opposé du Soleil. Si la comète ne se déplaçait pas sur son orbite, la queue serait exactement à l'opposé du Soleil. Mais sa direction résulte de la composition de deux mouvements : le déplacement de la comète sur son orbite, et la poussée des radiations et du vent solaire.

Le vent solaire a été découvert en 1952 par Biermann, en étudiant la structure de la queue de plasma opposée au Soleil.

Halley perd quelques mètres d'épaisseur à chaque passage au périhélie (en moyenne, car il y a des zones très actives, qui perdent beaucoup plus, d'autres ne perdent rien).

La comète C/Howard-Kooman-Michels (1971 S1) photographiée par un coronographe militaire américain en orbite, s'est précipitée dans le Soleil le 30/8/79. C'était sans doute un fragment d'une comète plus grosse qui se serait brisée par les effets de marée près du Soleil. En effet, elle appartenait au groupe de Kreutz qui comprend des comètes à périhélie très proche du Soleil. La comète 3D/Biela a explosé au milieu du XX$^e$ siècle. Il n'en est resté qu'un essaim météoritique, donnant lieu chaque année à la pluie d'étoiles filantes nommée Andromédides.

Période due à la traversée du plan de la galaxie de 31,5 MA. Dernière traversée il y a à peu près 3 MA.

---=OO=---




Avant d'étudier les réactions nucléaires, il est bon de savoir ce que sont les atomes (spécialement les noyaux atomiques), et d'avoir quelques notions sur les particules élémentaires. Pour cela, la lecture du chapitre qui leur est consacré peut être utile.

**Réactions chimiques**

La notion de réaction est bien mieux connue dans le domaine de la chimie que dans le domaine nucléaire. Aussi ferons-nous d'abord une claire différence entre les deux.

Une réaction chimique consiste à prendre deux molécules (associations d'atomes), à en extraire les constituants, et à les recoller différement. Par exemple, NaOH (une molécule de *soude caustique*, constituée d'un atome de sodium Na, un atome d'oxygène O, et un atome d'hydrogène H) et HCl (une molécule d'*acide chlorhydrique*, constituée d'un atome d'hydrogène H et d'un atome de chlore Cl) vont donner NaCl (une molécule de sel de cuisine, ou *chlorure de sodium*, constituée d'un atome de sodium Na et d'un atome de chlore Cl) et $H_2O$ (une molécule d'eau, constituée d'un atome d'oxygène O et de deux atomes d'hydrogène H). On écrit plus simplement :

$$NaOH + HCl \rightarrow NaCl + H_2O$$

On remarque que le nombre d'atomes de chaque espèce est le même avant et après la réaction (à gauche et à droite de la flèche). Ils sont conservés. On dit que *la réaction est équilibrée*.

Puisque ce sont les électrons qui collent les atomes dans une molécule, le nombre d'électrons de chaque atome détermine sa capacité plus ou moins grande à participer à ces réactions, c'est-à-dire ses propriétés chimiques. Il assure aussi la neutralité électrique de l'atome, donc il est identique au nombre de protons du noyau. En fin de compte, c'est donc le nombre de protons d'un noyau qui détermine, indirectement, ses propriétés chimiques.

Pour définir un noyau, on donne le nombre de protons qu'il contient, on le note Z, et on le nomme *numéro atomique*. Deux éléments chimiques différents ont des numéros atomiques différents ; deux isotopes d'un même élément possèdent le même numéro atomique. Pour préciser l'isotope considéré, il faut donner le nombre de neutrons. Mais l'habitude est autre, on donne la *masse atomique*, c'est à dire le nombre de nucléons (protons + neutrons), A. Par exemple, pour le carbonne 14, on a Z = 6, A = 14. Le nombre de neutrons est N - Z = 8.

Le carbone 14 est le plus célèbre des isotopes du carbone, et sert à dater les résidus organiques anciens. En fait, un morceau de carbone est constitué d'un mélange d'atomes, dont la plupart possèdent 6 protons et 6 neutrons, mais quelques uns ont 7 ou 8 neutrons. On les nomme carbone 12, $^{12}C$, carbone 13, $^{13}C$, et carbone 14 $^{14}C$.

Un autre exemple célèbre est l'eau lourde, dont les molécules sont constituées avec des atomes d'hydrogène lourd ou *deutérium* : un proton et un neutron. La masse d'un tel atome est à peu près double de celle de l'hydrogène normal. Il existe aussi un hydrogène super lourd, avec deux neutrons, nommé *tritium*.

Avez-vous déjà bu de l'eau lourde ? Sans aucun doute ! En effet, l'eau des océans en contient un faible pourcentage. Il y en a donc un peu dans nos bouteilles d'eau minérale.

**L'alchimie**

Retenez bien que les réactions chimiques portent sur les nuages électroniques, sans jamais toucher aux noyaux. La chimie est produite par l'interaction électromagnétique. C'est pour cette raison qu'un atome de plomb restera toujours, quelque réaction chimique que vous puissiez lui faire subir, un vulgaire atome de plomb… Le rêve de l'alchimiste ne risquait pas se réaliser de cette façon !

Mais la physique nucléaire donne la solution, et nous allons voir qu'on est capable de transformer un noyau de plomb en noyau d'or, à condition de payer le prix en énergie, ce qui ruinera (c'est le cas de le dire) tout espoir dans ce domaine. On sait le faire, mais ça coûte cher ! C'est peut-être bien mieux ainsi… La *Pierre Philosophale* est un accélérateur de particules !

**Réactions nucléaires**

Les réactions que nous allons étudier maintenant portent sur les noyaux (latin *nucleus*), c'est pourquoi on les nomme *réactions nucléaires*. C'est l'interaction forte qui en est responsable.

De la même manière qu'une réaction chimique, une réaction nucléaire consiste à prendre certains composants, et à les remplacer par d'autres. Elle s'écrit donc de manière semblable, avec un groupe d'éléments à gauche, une flèche au centre, et un autre groupe à droite.

Les constituants sont des noyaux atomiques (constitués de protons et neutrons), et la réaction les réarrange en deux nouveaux noyaux, en conservant le nombre de nucléons. Par exemple, un atome de $^{13}C$ (carbone 13, 6 protons et 7 neutrons) et un atome d'hydrogène (1 proton) vont donner un atome de $^{14}N$ (azote 14, 7 protons et 7 neutrons). Ce qui s'écrit :

$$^{13}C + {}^{1}H \rightarrow {}^{14}N + \gamma$$

Dans cette réaction, le $\gamma$ (gamma) représente un photon qui est émis, et qui emporte de l'énergie. Nous verrons un peu plus loin pourquoi.

> L'énergie qui gouverne une réaction nucléaire est des centaines de millions de fois plus élevée que celle qui gère les réactions chimiques. Aussi, dans les conditions qui permettent les réactions nucléaires, les électrons des atomes ont été arrachés depuis longtemps, ce qui justifie qu'on les ignore. La chimie et les réactions nucléaires se produisent dans des domaines d'énergie très différents !

Remarquez que dans la réaction nucléaire, l'équilibre chimique est rompu : il y a un atome de carbone à gauche, et il n'y en a pas à droite. Par contre, le bilan de neutrons et protons est respecté : (6p + 7n) + 1p = 7p + 7n. Il s'agit d'une réaction nucléaire à proprement parler.

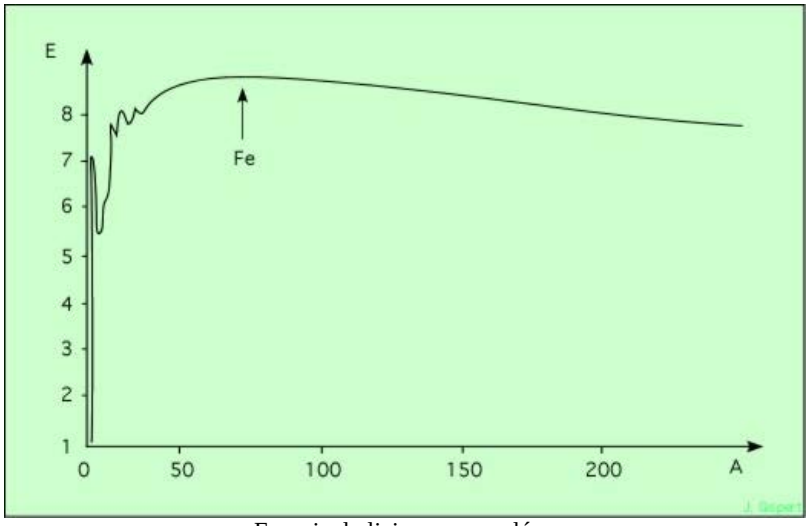
Il existe d'autres réactions, dans lesquelles le nombre de nucléons est conservé, mais pas leur genre. Un proton peut se changer en neutron, et réciproquement. La responsable de ces changements est l'interaction faible, et des électrons sont concernés par ces transformations. Une réaction béta change un proton en neutron, ou l'inverse, ce qui fait que le noyau qui la subit n'est plus de la même espèce chimique. C'est ce qui permet certaines transmutations.

**Fusion et fission**

Les réactions nucléaires sont de plusieurs types, selon les transformations produites. On distingue tout d'abord les réactions de *fusion*, et les réactions de *fission*. Dans les premières, on ajoute des composants pour former des noyaux plus lourds, dans les secondes au contraire, on casse un gros noyau pour en produire de plus petits. Voici deux exemples de telles réactions :

| | |
|---|---|
| **fusion** | $^{2}H + {}^{1}H \rightarrow {}^{3}He + \gamma$ |
| **fission** | $^{226}Ra \rightarrow {}^{222}Rn + {}^{4}He$ |

L'hydrogène fusionne pour donner de l'hélium (4 noyaux d'hydrogène donnent un noyau d'hélium), mais l'hélium lui-même peut fusionner pour donner des éléments plus lourds encore, carbone (3 noyaux d'hélium donnent un noyau de carbone), oxygène, azote. Dans ce genre de réactions, il faut comme précédemment faire le bilan énergétique. Toutes les réactions de fusion produisent de l'énergie. Mais on s'aperçoit que l'énergie qu'elles **dégagent** est de plus en plus faible à mesure qu'on considère la fusion d'éléments plus lourds (en partant du plus léger, l'hydrogène). Lorsqu'on arrive à synthétiser du fer, la différence s'annule. Le bilan énergétique devient défavorable, à partir du fer, la réaction **consomme** de l'énergie au lieu d'en produire. On peut dire cela autrement : pour A < 56, la réaction est *exothermique*, au-dessus, elle devient *endothermique*.



Energie de liaison par nucléon

Ce schéma montre l'énergie de liaison **par nucléon**, entre les nucléons qui constituent un noyau atomique. Pour que ceci ait un sens, on a divisé l'énergie totale de liaison à l'intérieur de l'atome par le nombre de nucléons. On montre ainsi une énergie **moyenne** par nucléon.

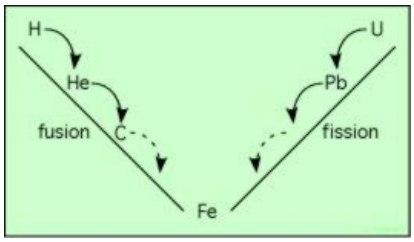
> La compréhension de cette énergie est facile, grâce à une analogie. Vous achetez un sac de deux kilos de pommes de terre au supermarché du coin, vous le payez 2,30 euros. Le dimanche, au cours d'une excursion, vous achetez un sac de 50 kg de pommes de terre directement à la ferme, vous le payez 20 euros. Qu'est ce qui est le plus avantageux ? Impossible de comparer directement les deux prix, puisqu'ils ne portent pas sur la même quantité. Pour répondre, vous diviserez les deux prix par la quantité correspondante pour obtenir le **prix au kilo**. L'énergie par nucléon est obtenue exactement de la même manière. Les pommes de terre étant toutes différentes, on utilise le kilo. Mais les nucléons ont tous la même masse, ce qui permet d'utiliser leur nombre.

Pour le fer 56, par exemple, c'est la différence entre la masse des nucléons qui le composent et la masse du noyau $^{56}Fe$, divisé par le nombre de nucléons (ici 56) :

$$(26\ m_p + 30\ m_n - m_{Fe}) / 56$$

où $m_p$ = masse du proton, $m_n$ = masse du neutron, $m_{Fe}$ = masse du noyau de fer 56. Il faut exprimer les masses en $eV/c^2$, équivalence justifiée par l'équation d'Einstein $E = m\ c^2$.

Ce qui est remarquable, c'est que la courbe montre un maximum au niveau du fer. Ceci signifie que les nucléons dans un noyau de fer sont plus fortement liés à leurs voisins que dans tout autre noyau ! Les noyaux de fer sont donc les plus stables : pour les casser, il faut plus d'énergie que pour tout autre.




Ce schéma représente une sorte d'entonnoir, ayant le fer au centre. Ce dernier est le point de stabilité maximum. La fusion des divers éléments, depuis l'hydrogène jusqu'au fer, suit la pente descendante de gauche. De même, la fission de l'uranium suit l'autre pente. Ceci symbolise le caractère exothermique de ces réactions. Par contre, si on voulait fusionner des éléments plus lourds que le fer, il faudrait remonter la pente (du côté droit), donc fournir de l'énergie. Il faudrait fournir de l'énergie aussi de l'autre côté pour briser des atomes plus légers que le fer. Dans une étoile, il ne serait pas possible de fournir de l'énergie pour fusionner au-delà du fer, car ceci diminuerait l'énergie disponible, donc la pression, et romprait l'équilibre de l'étoile.

Ceci ouvre une voie de recherche : quelle est la **stabilité** de chaque noyau ? Lorsqu'on teste une nouvelle colle, on se demande si elle va tenir… Cette question se pose pour des éléments chimiques différents, mais aussi pour les isotopes d'un même élément, puisque ce sont des noyaux ayant un nombre différent de neutrons. Certains noyaux ne risquent-ils pas de se casser ?

Une réaction nucléaire doit se faire (dans le sens de la flèche qui la représente) du moins stable vers le plus stable, comme un pendule évolue vers sa position d'équilibre. Des noyaux légers auront donc tendance à s'assembler (par réaction de **fusion**), alors que des noyaux lourds auront tendance à se briser (par réaction de **fission**). Dans les deux cas, ils se rapprochent du fer.

Bien que les réactions de fusion et de fission soient de nature très différente, elles procèdent des mêmes principes fondamentaux de la physique.

### Radioactivité

La radioactivité a été découverte par Becquerel en 1896 sur des sels d'uranium, puis confirmée peu après par Marie Curie sur le thorium. Les *radionuclides* (éléments radioactifs) les plus répandus sont l'uranium 238, le thorium 232 et le potassium 40. Un champ magnétique partage les rayonnements produits par des sels uraniques en trois faisceaux différents, nommés historiquement *alpha*, *béta* et *gamma*. Ce sont les trois formes de radioactivité. Les trois consistent en l'émission d'une particule, avec les changements associés.

### Radioactivité alpha

La radioactivité *alpha* est l'émission d'une **particule alpha** (noyau d'hélium) par un noyau atomique. On dit que le noyau est excité (son énergie est trop grande) ; il se désexcite par cette émission. C'est une réaction nucléaire spontanée. La réaction donnée en exemple de fission plus haut est une *radioactivité alpha*.

La particule alpha doit avoir une grande stabilité pour se comporter dans cette réaction comme un tout. Ceci s'explique en particulier parce qu'elle est composée de 2 protons et 2 neutrons. Les deux protons se mettent en position de spin antiparallèle, les deux neutrons aussi. Ainsi, le principe d'exclusion de Pauli est respecté. Si on ajoute une cinquième particule, proton ou neutron, son niveau d'énergie devra être plus grand pour respecter le principe d'exclusion. La particule alpha est donc, de ce point de vue, la plus grosse possible au niveau d'énergie minimum, ce qui explique au moins en partie sa stabilité.

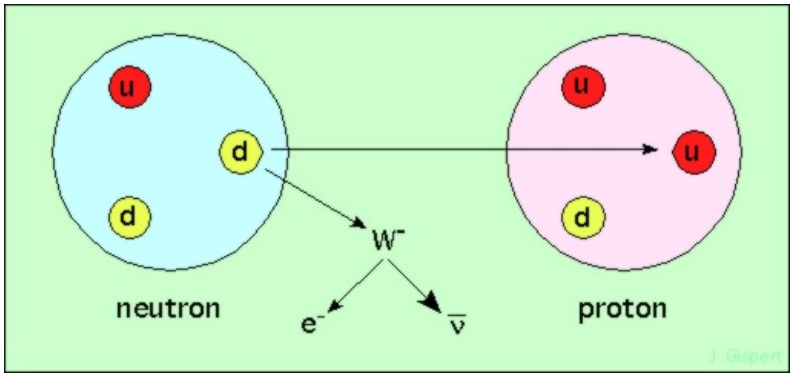
### Radioactivité béta

Dans la *radioactivité béta*, un électron est éjecté à la place d'une particule alpha. La réaction s'écrit :

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

où p représente un proton (qu'on aurait pu noter aussi $^1H$), n un neutron, et $e^-$ un électron négatif (un véritable électron, celui portant une charge positive étant nommé positron), $\bar{\nu}_e$ est un antineutrino électronique. Elle ne porte pas sur un noyau, mais sur un nucléon, qui peut faire partie d'un noyau. Si c'est le cas, le noyau est modifié (il aura un proton de plus, et un neutron de moins).

Cette réaction est nommée *désintégration* $\beta^-$. Plus profondément, un quark d du neutron est changé en un quark u. Le neutron (udd) est donc devenu proton (uud). Le changement de saveur du quark s'accompagne de l'émission d'un boson $W^-$, qui se désintègre immédiatement en un électron et un antineutrino, complétant la réaction.




La réaction notée plus haut est en fait un résumé, qui en regroupe deux.

Il existe une radioactivité béta complémentaire, qui met en jeu le positron, antiparticule de l'électron :

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$$

Elle est nommée *désintégration* $\beta^+$. On voit que le proton à gauche porte une charge positive, qui est emportée à droite par le positron. La réaction est donc électriquement équilibrée.

Enfin, on note des réactions symétriques des éjections : ce sont des absorptions. Elles sont possibles toujours par l'interaction faible, et justifiées par les mêmes principes :

- un proton absorbe un électron et se transforme en neutron, en perdant sa charge électrique positive :

$$p + e^- \rightarrow n + \nu_e$$

- un neutron absorbe un positron et se transforme en proton, en perdant sa charge électrique négative :

$$n + e^+ \rightarrow p + \bar{\nu}_e$$

où $\bar{\nu}_e$ représente un antineutrino électronique.

Ces réactions sont très simples à écrire : il suffit d'équilibrer les éléments à gauche et à droite. Ici, la charge doit être conservée, et vous pouvez vérifier, dans la dernière réaction par exemple, que l'on a à gauche neutre (le neutron), et + (le positron), donc une charge positive ; à droite + (le proton) et neutre (le neutrino). Donc un bilan d'une charge positive de chaque côté, la réaction est bien équilibrée.

De plus, l'énergie doit aussi se conserver, ce qui justifie la présence du *neutrino* (électriquement inutile). C'est d'ailleurs par ces réactions que le neutrino a été imaginé par Enrico Fermi pour équilibrer l'énergie de la réaction, puis observé expérimentalement plus tard.

#### Radioactivité gamma

La *radioactivité gamma*, enfin, est simplement une perte d'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique. La particule éjectée est le photon associé à l'onde. C'est par elle qu'un noyau se désexcite. Le niveau d'énergie d'un photon gamma est bien supérieur aux niveaux de fluorescence, qui concernent les électrons périphériques d'un atome.

| type | particule éjectée | interaction responsable |
|---|---|---|
| alpha | particule alpha (noyau $^4$He) | forte |
| béta | électron ou positron | faible |
| gamma | photon | électromagnétique |

## *Réactions de fusion*

#### Fusion de l'hydrogène (H ; 1 proton)

Les réactions de fusion sont celles qui combinent deux noyaux, pour donner un noyau plus lourd.

Nous avons vu plus haut que le noyau d'hélium était plus léger que les 4 noyaux d'hydrogène qui l'ont produit. L'énergie par nucléon a augmenté, au détriment de la masse. La masse par nucléon a diminué.

Nous allons considérer la fusion de l'hydrogène, telle qu'elle se produit dans les étoiles. Ce n'est pas une réaction simple, mais un enchaînement de plusieurs réactions successives. Plusieurs enchaînements différents peuvent se produire.

Deux noyaux d'hydrogène (protons) portant chacun une charge électrique positive, se repoussent très fortement (répulsion coulombienne). Cette répulsion est si forte, à courte distance, que le noyau s'entoure d'une barrière, dite *barrière coulombienne*. Pour qu'un proton arrive au contact

d'un noyau, il doit franchir la parrière coulombienne.

Mais les noyaux possèdent aussi une autre force, qui agit de très près comme une colle. Si on rapproche deux protons assez près l'un de l'autre, malgré la répulsion électrique, on arrive à les coller, et ils le resteront (s'il n'y avait pas d'autre problème, comme nous le verrons plus loin). Mais il faut pour cela qu'ils soient vraiment très, très proches… C'est l'interaction forte qui les attache. Cette force est beaucoup plus intense que la répulsion électromagnétique, mais elle ne s'exerce pratiquement qu'au contact.

**Expérience**

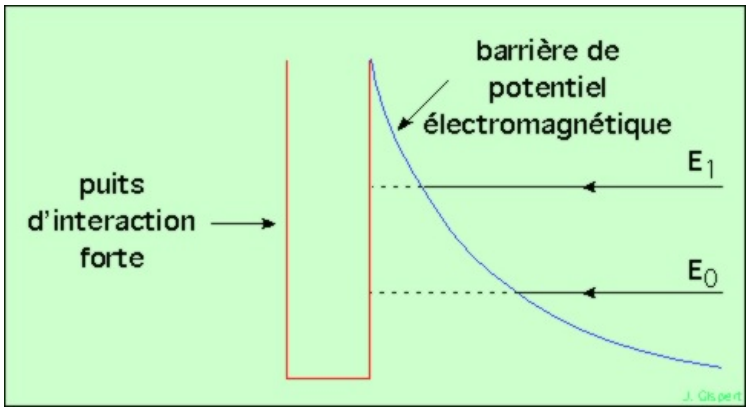
Mettez de la colle néoprène sur deux aimants de même polarité qui se repoussent ; rapprochez-les l'un de l'autre en forçant ; si vous arrivez à les faire toucher, la colle va les retenir l'un contre l'autre. La répulsion magnétique des aimants joue ici comme la répulsion électromagnétique des protons ; la colle agit comme l'interaction forte qui colle les protons dans le noyau d'un atome. La colle n'agit pas à distance !

Si vous agitez le groupe ainsi constitué, vous arriverez facilement à séparer les deux aimants, leur groupe explosant littéralement sous la répulsion électromagnétique. Le noyau simulé est instable, et se désintègre à la moindre excitation.

**Effet tunnel**

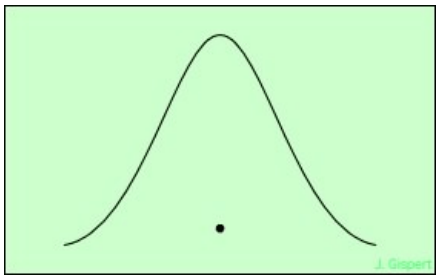
La répulsion électromagnétique des protons agit comme une barrière qui les empêcherait de se rapprocher. On la nomme *barrière de potentiel*. Considérons un proton au repos, et un autre qui s'en approche. Pour qu'il franchisse la barrière de potentiel dressée autour du premier, il faut qu'il ait une grande vitesse, et donc qu'il soit à très haute température. Ceci n'est pas réalisé dans les conditions qui règnent sur Terre, c'est pourquoi il est si difficile de construire un réacteur de fusion comme ITER.

Et malgré les 15 millions de degrés qui règnent au centre du Soleil, la vitesse des protons est encore trop faible pour les rapprocher suffisamment. Si la mécanique classique s'appliquait, la fusion de l'hydrogène n'y serait pas possible. Mais un phénomène de mécanique quantique, qui ne se produit pas dans le monde à notre échelle (macroscopique), permet à un proton de franchir la barrière parfois, sans disposer de la vitesse qui serait nécessaire (en mécanique classique). Tout se passe comme s'il avait traversé la barrière. Pour cette raison, ce phénomène est nommé *effet tunnel*.




Ce schéma montre, en rouge, le puits de potentiel attractif de l'interaction forte. Pour que les deux protons soient collés, il faut que le second tombe dans le puits de potentiel du premier. Si le second arrive de la droite, avec l'énergie $E_0$ (correspondant à sa vitesse, donc à sa température), il ne pourra pas franchir la barrière électromagnétique, qui est trop haute. A l'énergie $E_1$, c'est encore impossible. Cependant, il arrive qu'un proton puisse passer, même si son énergie est trop faible. Il traverse alors la barrière de potentiel.

Ceci demande une petite explication. Nous avons dit que toute particule possédait une onde associée. Cette onde indique l'endroit de l'espace où se trouve la particule.

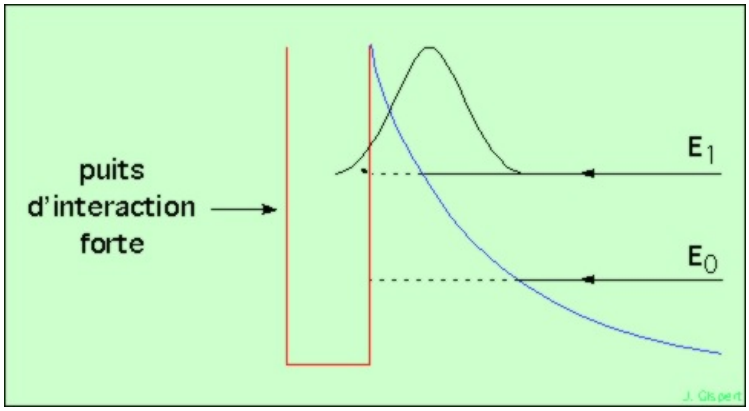


La particule est figurée par un petit cercle, et son onde associée au-dessus. On remarque que la particule se trouve au centre de l'onde.

En fait, cette situation est **la plus probable**. Mais la particule peut se trouver n'importe où au-dessous de l'onde. La probabilité qu'elle se trouve en un point donné est proportionnelle à la hauteur (l'amplitude) de l'onde en cet endroit.

La particule a donc peu de chances de se trouver sur une aile de l'onde,mais c'est possible.

En reprenant le schéma de l'effet tunnel, on comprend que, lorsque le centre de l'onde heurte la barrière de potentiel, le proton se trouve en général bloqué. Mais parfois, s'il se trouve sur l'aile avant de l'onde, il se trouve de l'autre côté de la barrière, qui est par conséquent franchie :




**Hélium 2 ?**

Lorsque deux protons réussissent à se coller, ils forment un noyau ayant deux charges positives. Il n'aura donc pas les mêmes propriétés chimiques que l'hydrogène. Il s'agit d'un élément nouveau : c'est un noyau d'hélium. Comme il n'est constitué que de ces seuls protons, on dit qu'il s'agit d'hélium 2, et on le note $^{2}$He. Le 2 en haut à gauche indique le nombre total de particules qui constituent le noyau, et celui placé en bas (s'il est présent, mais le symbole chimique le rend superflu : He = Hélium 2 protons) représente le nombre de protons. Cet hélium est donc constitué de deux nucléons, dont deux protons.

La répulsion électromagnétique, bien que moins intense que l'interaction forte, agit suffisament sur les deux protons pour faire éclater le noyau au bout d'un temps très bref (quelques milliardièmes de seconde…). Aussi le noyau d'hélium 2 tout juste formé se brise, et on retrouve les deux protons de départ (deux noyaux d'hydrogène). Comme si rien ne s'était passé !

Remarquez que les deux protons, étant deux fermions identiques, doivent obéir au principe d'exclusion. Ils doivent donc se placer des des états de spin différents (+1/2 pour le premier, -1/2 pour le second). L'ennui est que cet état antiparallèle possède une énergie négative, et les protons ne sont plus liés !

La fusion de deux noyaux d'hydrogène (protons) ci-dessus se note :

$$^{1}\mathrm{H} + {}^{1}\mathrm{H} \leftrightarrow {}^{2}\mathrm{He}$$

La double flèche indique que la réaction est réversible. Les deux protons sont notés $^{1}$H (puisque ce sont des atomes d'hydrogène 1), et le noyau produit est un $^{2}$He (hélium, constitué de deux protons).

La désintégration qui se produit très rapidement redonne les deux protons :

$$^{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{1}\mathrm{H} + {}^{1}\mathrm{H}$$

Ces deux réactions se produisent en permanence dans le Soleil, et le très faible intervalle de temps, non nul, entre les deux permet d'entretenir en permanence une très faible proportion d'hélium 2.

**Deutérium**

Mais un autre phénomène se produit parfois : l'un des deux protons se débarrasse de sa charge électrique, en émettant un électron positif (positron) **avant** que le noyau n'éclate ; il devient alors un neutron par radioactivité béta. Un positron est exactement semblable à un électron, mais porte une charge positive et non négative. C'est l'antiparticule de l'électron, ou anti-électron.

La réaction qui se produit dans le noyau d'hélium 2 s'écrit :

$$^{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{2}\mathrm{H} + e^{+} + \nu$$

où ν est un neutrino électronique.

Ainsi, l'assemblage $^{2}$H obtenu comporte maintenant un proton et un neutron. Entre eux, pas de répulsion électromagnétique, et donc l'assemblage est stable. Ce noyau va pouvoir vivre longtemps. On reconnait un noyau de deutérium, ou hydrogène lourd. L'ensemble dégage 1,44 MeV d'énergie, emportée par le positron et le neutrino.

**Hélium 3**

Les réactions ne s'arrêtent pas là. Le noyau de deutérium obtenu va capturer un nouveau proton, qui restera chargé (qui restera proton). Le nouvel assemblage comporte donc deux protons et un neutron ; c'est donc un noyau d'hélium, mais qui comporte un neutron de plus que celui qu'on a vu plus haut. De même qu'il existe plusieurs isotopes d'hydrogène, il existe plusieurs isotopes d'hélium : celui-ci est l'hélium 3 (car il comporte 3 nucléons), noté $^{3}$He.

La réaction s'écrit :

$$^{2}\mathrm{H} + {}^{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{3}\mathrm{He} + \gamma$$

La réaction produit, en plus du noyau d'hélium 3, un photon gamma de haute énergie. Elle dégage 5,49 MeV, emportés par le photon. Ce photon

constituera une partie de l'énergie produite dans le Soleil. Le noyau obtenu est stable, grâce au neutron qui colle les deux protons par interaction forte, sans les repousser par interaction électromagnétique. Il joue le rôle de liant.

**Expérience (suite)**

Si vous collez un morceau de métal (non magnétique) sur les deux aimants, avec la même colle, vous renforcez la liaison. Vous obtenez alors un noyau stable ayant le même nombre d'aimants (de protons). Le morceau de métal joue le rôle d'un neutron, qui est sensible à l'interaction forte, mais n'exerce pas de répulsion électrique. L'assemblage est un isotope, ayant le même nombre de protons (aimants) et un nombre différent de neutrons (bout de métal).

**Hélium 4 enfin**

Et les réactions continuent, mais de façon un peu différente. Deux noyaux d'hélium 3 nouvellement formés se rencontrent, et fusionnent en se débarrassant de deux protons :

$$^3He + ^3He \rightarrow ^4He + ^1H + ^1H + \gamma$$

Cette réaction produit 12,86 MeV. Le résultat est un noyau comportant maintenant deux protons et deux neutrons ; c'est de l'hélium 4 (car il comporte 4 nucléons) $^4He$. On l'appelle aussi *particule alpha* (pour des raisons historiques, liées à la radioactivité). Ce noyau est très stable, et ne subira plus d'autre réactions, sauf si la température s'élève très fortement (100 millions de degrés). La raison qui empêche une nouvelle fusion est simple : le noyau possède maintenant deux charges électriques, qui vont repousser vivement tout autre noyau candidat à la fusion. Mais si la barrière de potentiel était franchie, la fusion n'aurait pas lieu pour autant. Nous avons vu (radioactivité) que dans la particule alpha, les deux protons ont leur spin antiparallèle, les deux neutrons aussi. Protons et neutrons étant des particules différentes (fermions différents), les quatre peuvent se trouver au minimum d'énergie. Si on veut ajouter un cinquième nucléon, il devra se trouver obligatoirement sur un niveau d'énergie plus élevé, niveau qui est incompatible avec la stabilité du noyau !

On peut résumer tout ceci dans une animation, qui montre comment l'hydrogène fusionne en hélium. Les protons sont représentés par de petites boules rouges, les neutrons par de petites boules bleues. Le positron est représenté en rouge également, puisqu'il porte la même charge électrique que le proton, mais en plus petit car c'est un lepton (léger). Enfin, le neutrino est représenté en jaune.

cliquez sur "forcer" pour provoquer une réaction béta,
qui transformera un proton en neutron.

En bas à gauche apparaît la dernière réaction produite. A droite, deux indications différentes sont données. Pour la première réaction, il s'agit de la durée de vie du noyau formé : l'hélium 2 ne subsiste que $10^{-20}$ seconde. Pour que le noyau ne se brise pas, il faut qu'une réaction béta transforme l'un des deux protons en neutron, pendant ce si bref intervalle de temps. Aussi, pour un proton donné, la transformation ne se fera en moyenne qu'au bout de 14 milliards d'années, plus que la durée de vie du Soleil. C'est le nombre extraordinaire de protons qui composent le cœur du Soleil qui permet de réaliser suffisamment de réactions pour assurer l'énergie de notre étoile.

Au total, 4 atomes d'hydrogène ont fusionné pour former un atome d'hélium 4. L'ensemble de ces réactions se résume à l'écriture simplifiée suivante :

$$4\ ^1H \rightarrow ^4He + 2\ e^+ + 2\ \gamma + 2\ \nu_e$$

On nomme cet ensemble de réactions *chaîne proton-proton*, d'après la première des réactions qui combine deux protons. En voici le résumé :

$$^1H + ^1H \rightarrow ^2He$$

$$^2He \rightarrow ^2H + e^+ + \nu_e$$

$$^2H + ^1H \rightarrow ^3He + \gamma$$

$$^3He + ^3He \rightarrow ^4He + ^1H + ^1H$$

Ce n'est pas la seule possibilité pour former un atome d'hélium à partir de l'hydrogène, nous le verrons plus loin.

**Bilan de masse**

On peut maintenant s'amuser à peser les atomes : on va avoir une bonne surprise ! L'atome d'hélium pèse MOINS que les 4 protons qui l'ont constitué. Comment se fait-il qu'un mur de briques soit plus léger que le tas de briques dont il est issu ?

La réponse est donnée par Einstein, et sa célèbre équation $E = mc^2$ de la Relativité. La différence de masse entre les 4 protons et le noyau d'hélium a été transformée en énergie. La valeur de c étant très élevée (300.000.000 m/s), $c^2$ est un coefficient multiplicateur prodigieux : même si m est petite, l'énergie sera très grande. C'est la source de l'énorme énergie dispensée par le Soleil, est c'est parce qu'elle est très importante pour une faible perte de masse que le Soleil peut briller si longtemps…

Nous verrons plus loin d'autres réactions du même genre, qui se produisent dans le cœur des étoiles ou dans d'autres milieux encore plus

extraordinaires.

Nous allons considérer la fusion de l'hydrogène que nous venons d'écrire (en ignorant les particules secondaires) :

$$4\ {}^{1}H \rightarrow {}^{4}He$$

Soit $m_p$ la masse d'un proton, et $m_h$ celle du noyau d'hélium. Appliquons l'équation d'Einstein $E = m\ c^2$ :

| aux 4 protons | au noyau d'hélium |
|---|---|
| $E_{4H} = 4\ m_p\ c^2 = 4 \times (938{,}27\ MeV / c^2) \times c^2$ $= 3.753{,}08\ MeV$ | $E_{He} = m_{He}\ c^2 = (3{,}72738\ Gev / c^2) \times c^2$ $= 3{,}72738\ Gev = 3.727{,}38\ Mev$ |

**La réaction a diminué l'énergie totale du système** ($E_{He}$ est inférieure à $E_{4H}$).

On retrouve un grand principe de la physique : **les systèmes évoluent toujours vers un état de moindre énergie**.

**Exemple** : si vous vous tombez une boule de pétanque sur le pied, ça vous fera d'autant plus mal qu'elle tombe de plus haut. Donc, plus elle est haute, plus elle possède d'énergie (c'est de l'énergie gravitationnelle). En tombant, elle trouve un état d'énergie moindre.

Attachez la boule à une ficelle. Faites balancer la boule, comme un pendule. Elle va osciller pendant un moment, puis se stabiliser dans la position la plus basse. Vous comprenez que le système a évolué vers son état d'énergie minimale. La boule ne peut pas descendre plus bas à cause de la ficelle.

Revenons maintenant à notre système à 4 nucléons. Nous avons deux états, l'un lié (He), l'autre libre (4 H). Le plus stable de ces deux états doit être celui de moindre énergie. C'est l'hélium, comme nous venons de le calculer. Et puisque l'énergie est équivalente à la masse, c'est aussi l'état de moindre masse. On comprend maintenant pourquoi le noyau d'hélium est plus léger que ses constituants séparés.

S'il était plus lourd que la somme de ses constituants, il évoluerait spontanément vers l'état libre, qui serait de moindre énergie.

Maintenant, un autre grand principe physique est la **conservation de l'énergie**. Elle ne doit ni augmenter, ni diminuer, dans un système isolé. Si les 4 atomes d'hydrogène antérieurs à la réaction présentent une énergie de masse supérieure à celle du noyau d'hélium produit, la différence d'énergie doit se retrouver ailleurs. Donc, le bilan doit être équilibré à gauche et à droite de l'équation. Il faut donc rajouter de l'énergie à droite, juste ce qui est nécessaire pour l'équilibre. Cette énergie est emportée par les positrons, neutrinos (sous forme d'énergie cinétique) et rayons gamma (énergie électromagnétique) émis.

La différence de masse correspond à l'énergie libérée :

$$E_{libérée} = E_H - E_{He} = 3.753{,}08\ MeV - 3.727{,}38\ Mev = 25{,}7\ MeV$$

Par rapport à la masse des 4 protons, cela représente : $25{,}7 / 3.753{,}08 = 0{,}00684$ ou 0,7 %

Par conséquent, la fusion d'un gramme d'hydrogène produira l'équivalent de 0,007 g sous forme d'énergie. Nous allons faire le calcul dans le Système International. Il faut pour cela écrire la masse en kilogrammes.

$0{,}007\ g = 0{,}007\ 10^{-3}\ kg = 7\ 10^{-6}\ kg$ ;

c = 300.000 km/s, donc c = 300.000.000 m/s = $3\ 10^8$ m/s.

Donc :

$$E = \Delta m\ c^2 = 7\ 10^{-6} \times (3 \times 10^8)^2 = 7 \times 10^{-6} \times 9 \times 10^{16} = 63\ 10^{11} = 63\ 10^{10}\ J/s$$

Ceci est équivalent à 25,7 MeV, qui sont dégagés pour chaque noyau d'hélium produit.

**La chaîne proton-proton en détails**

Les 4 réactions qui composent cette chaîne n'ont pas toutes la même probabilité de se produire :

| réaction | type | attente | température |
|---|---|---|---|
| ${}^{1}H + {}^{1}H \rightarrow {}^{2}He + \gamma$ | nucléaire | 14 milliards d'années ! | 15 millions de degrés |
| ${}^{2}He \rightarrow {}^{2}H + e^{+} + \nu$ | béta | moins de $10^{-8}$ s | |
| ${}^{2}H + {}^{1}H \rightarrow {}^{3}He + \gamma$ | nucléaire | 6 secondes | |
| ${}^{3}He + {}^{3}He \rightarrow {}^{4}He + 2\ {}^{1}H + \gamma$ | nucléaire | 1 million d'années | |

Ces réactions se produisent à partir de 4 millions de degrés, mais le taux de réaction dépend de la température : plus c'est chaud, plus c'est efficace. Dans le cœur du soleil, la température est de 15 millions de degrés, et les réactions de cette chaîne sont très efficaces.

Toutes ces réactions ne se produisent pas à la même vitesse ; remarquons tout d'abord que la première n'est possible que par effet tunnel, dans une aile de l'onde associée au proton. La probabilité pour que le proton se trouve dans cette aile est très faible, et par suite la réaction ne se produit presque jamais. Pour un proton donné, dans le centre du Soleil (15 millions de degrés), l'attente est de 14 milliards d'années, en moyenne, avant que la réaction ne se produise. C'est dire que très peu d'hélium 2 est produit à chaque instant.

L'hélium 2 produit ($^{2}He$) se désintègre en moins de $10^{-8}$ seconde en deux noyaux d'hydrogène (les deux protons de départ). C'est tout juste si le noyau d'hélium 2 a existé. Cette réaction, très rare, permet cependant d'avoir à chaque instant un petit nombre de noyaux $^{2}He$ présents dans le Soleil.

Dans les $10^{-8}$ secondes de vie de ce noyau, il est possible qu'une réaction béta désintègre l'un des protons en un neutron, pour donner le noyau de Deutérium qui permettra la réaction suivante ($^{2}H$ est noté D). Là encore, la probabilité est très faible (caractéristique des désintégrations béta), et presque tous les noyaux d'hélium 2 se brisent en noyaux d'hydrogène. C'est cette désintégration béta, par sa rareté, qui va ralentir énormément le processus de transformation de l'hydrogène en hélium. Heureusement, car sans cela, il y a longtemps que le Soleil aurait fini de briller !

Les deux réactions qui suivent, et achèvent la chaîne, sont rapides (un petit million d'années...), et ne posent pas de problème.

Pour être complet, il faut mentionner deux variantes du cycle proton-proton. Celle donnée ci-dessus se nomme alors PPI, et les deux autres PPII et PPIII. Elles font intervenir le lithium et le bérylium, qui sont des noyaux très fragiles, qui en fait se brisent en général avant de pouvoir intervenir dans une autre réaction. Pour cette raison, l'efficacité de ces variantes est beaucoup plus faible que celle du cycle principal. Elles nécessitent la présence de noyaux d'hélium dans le plasma. Elles passent par des noyaux plus lourds, Bérylium 7 et même Bore 8.

**Variante PPII**

Dans la variante PPII, le Bérylium se désintègre en Lithium :

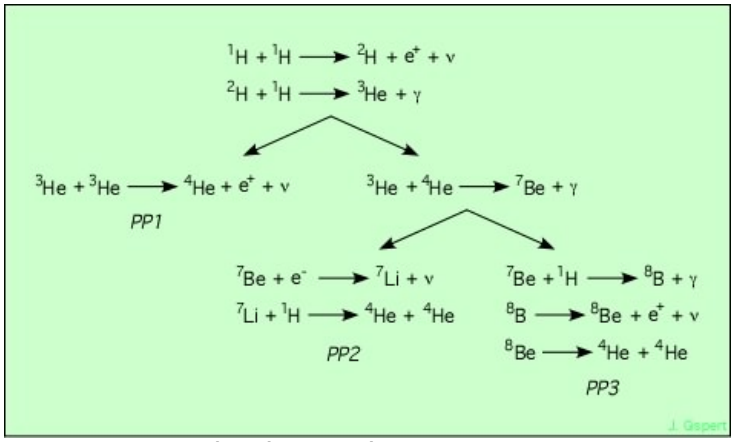
| réaction | type |
|---|---|
| $^{3}He + {}^{4}He \rightarrow {}^{7}Be + \gamma$ | nucléaire |
| $^{7}Be + e^{-} \rightarrow {}^{7}Li + \nu_e$ | béta |
| $^{7}Li + {}^{1}H \rightarrow {}^{4}He + {}^{4}He$ | nucléaire |

Le $^{4}He$ qui intervient dans la première réaction se retrouve à la fin dans la dernière. On dit qu'il a servi de catalyseur pour la réaction, par analogie avec les catalyseurs chimiques.

**Variante PPIII**

Ici, le Bérylium croît encore en Bore, puis ce dernier en Bérylium 8, dont le noyau est équivalent à deux particules alpha :

| réaction | type |
|---|---|
| $^{3}He + {}^{4}He \rightarrow {}^{7}Be + \gamma$ | nucléaire |
| $^{7}Be + {}^{1}H \rightarrow {}^{8}B + \gamma$ | béta |
| $^{8}B \rightarrow {}^{8}Be + e^{+} + \nu_e$ | nucléaire |
| $^{8}Be \rightarrow {}^{4}He + {}^{4}He$ | nucléaire |



Résumé de la chaîne proton-proton

On visualise bien les différences entre les trois branches :

- entre PP1 et (PP2, PP3), on trouve la fusion avec un hélium 3 pour le premier, un hélium 4 pour les deux autres (il doit donc déjà exister, cette réaction sera donc de plus en plus probable quand la concentration en hélium 4 augmentera).
- entre PP2 et PP3, on ajoute au bérylium 7
  - soit un électron qui va annuler la charge d'un proton et donc produire un noyau de lithium (le précédent dans la table de Mendéléev) ;
  - soit un proton de charge positive, qui va produire un noyau de bore 8 (le suivant dans la table de Mendéléev).

**Une remarque** à propos des deux variantes : au début de la fusion, le taux de $^4$He est très faible dans le cœur de l'étoile. Aussi, les réactions PP1 et PP2 ne se produisent-elles qu'exceptionnellement. Mais à mesure que la première chaîne concentre l'hélium, la probabilité des variantes augmente. La chaîne PP1 nécessite que deux réactions H + H se réalisent, afin de disposer de deux noyaux $^3$He. Mais les variantes n'ont besoin que d'un seul noyau $^3$He pour produire un noyau d'hélium 4. Donc, lorsque ces variantes deviennent productives, un noyau $^4$He est obtenu pour chaque fusion H + H.

On exprime le taux de production de la chaîne PP complète en fonction de la température. La formule de base est le taux de la première branche. Elle est valable à faible température, disons jusqu'à 8 millions de degrés. Pour obtenir une formule générale, on multiplie la formule de base par un terme qui représente l'apport des variantes lorsqu'elles sont actives. Ce facteur vaut 1 (il ne change pas la valeur) jusqu'à une température de l'ordre de 8 millions de degrés. Au-dessus, il augmente, pour atteindre pratiquement 2 vers 20 millions de degrés. Cette augmentation représente la contribution de la branche PP2, et s'explique par la remarque ci-dessus (un noyau $^4$He par fusion H + H). Mais à plus haute température encore, la branche PP3 est favorisée par rapport à PP2. Mais elle produit moins d'énergie, et le taux est alors un peu décroissant.

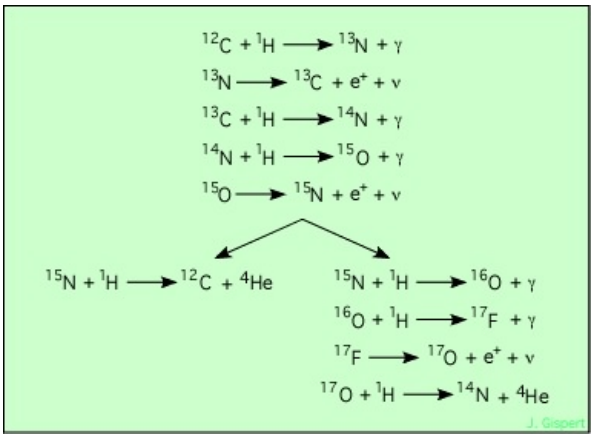
**Cycle du carbone, ou cycle CNO, ou cycle de Bethe**

Le *cycle du carbone* utilise des atomes présents dans le milieu pour permettre certaines réactions. Ces atomes servent de catalyseurs comme l'hélium dans le cycle PP. Il ne peut donc se produire que si la métallicité de l'étoile est non nulle (si elle contient des éléments plus lourds que l'hélium). Les atomes utilisés sont reproduits à la fin du cycle, ce qui justifie la dénomination de catalyseurs.

Il y a deux variantes de ce cycle. Toutes deux consistent en une succession d'absorptions de protons par un noyau de carbone (au départ). Ce noyau se transforme successivement :

- par réaction nucléaire pure, en un élément au-dessus du tableau de Mendéléev ;
- par réaction béta, un proton se désintégrant en neutron.

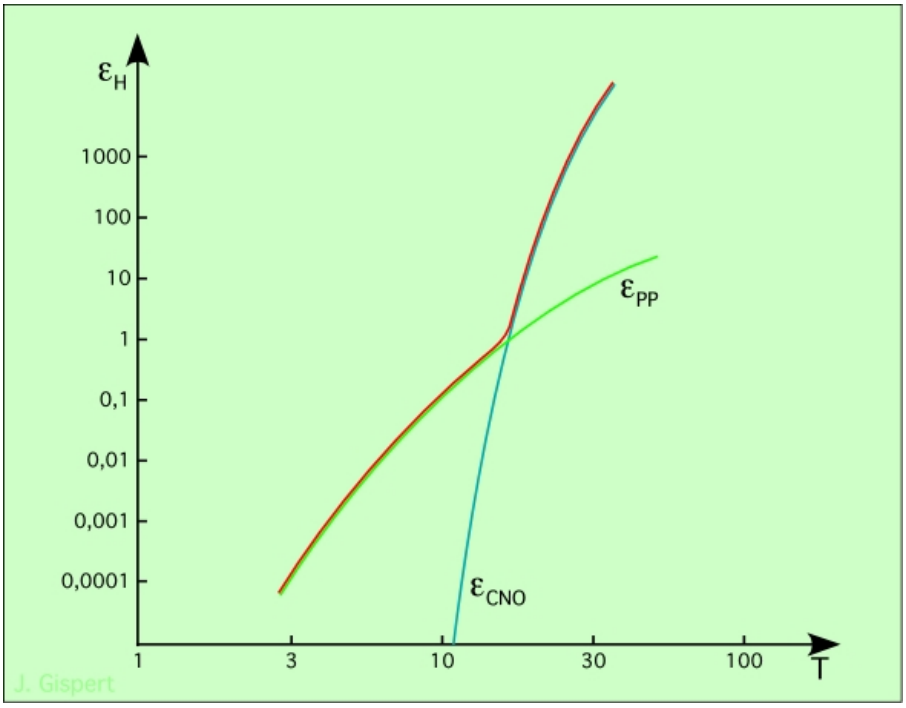
Le cycle passe successivement par l'azote (7 protons), puis par l'oxygène (8 protons). La masse du noyau croissant ainsi, il devient instable, et se désintègre par radioactivité alpha, en émettant un noyau d'hélium.




La première variante restitue le carbone utilisé dans la première réaction, alors que la seconde, passant par le fluor (9 protons) produit de l'azote dans la dernière réaction. En fait, l'azote produit peut intervenir dans la quatrième réaction du cycle, et donc redonner du carbone par la première variante au bout du compte.

Le cycle du carbone est efficace à plus haute température que la chaîne proton-proton, puisqu'il met en jeu des atomes plus lourds. A une température de l'ordre de 18 millions de degrés, les deux mécanismes produisent la même quantité d'énergie, chacun contribuant donc pour la moitié de la production totale. C'est pourquoi le moteur du Soleil, de température inférieure, est alimenté essentiellement par le cycle proton-proton, qui produit 77 % de son énergie totale. Par contre, dans des étoiles plus massives, la température centrale est plus élevée, et le cycle de carbone devient prédominant. La masse pour laquelle ceci se produit est de l'ordre de 1,5 masses solaires.

Le schéma ci-dessous montre l'efficacité des deux cycles, et la courbe résultant de leur combinaison :




$\varepsilon_{PP}$ est le taux de réactions de la chaîne PP, $\varepsilon_{CNO}$ celui du cycle CNO. On voit que jusqu'à 18 millions de degrés, la courbe verte (chaîne PP) est au-dessus de la courbe bleu (CNO), et que donc la chaîne PP est plus efficace. La courbe rouge représente le taux de production d'énergie d'une étoile, qui suit le chemin le plus favorable.

Le Soleil se situe juste en-dessous du coude, et le cycle PP y est prépondérant.

Le bilan global de toutes ces réactions peut s'écrire : $4\ {}^{1}H \rightarrow {}^{4}He$ ; en effet, tout le reste est restitué à la fin de la réaction. Seul l'hydrogène a été transformé. C'est pour cette raison qu'on dit que les étoiles transforment l'hydrogène en hélium.

La fusion de l'hydrogène est le moteur de la phase la plus longue de la vie d'une étoile, la *Séquence Principale*. Lorsque tout l'hydrogène du cœur a été consommé, l'étoile est en panne ; mais elle peut le plus souvent utiliser un carburant de secours, tout simplement l'hélium qu'elle vient de produire. Cet élément-là est aussi capable de fusionner, mais à une température beaucoup plus élevée, qui n'était pas atteinte auparavant.

**Fusion de l'hélium (He - 2 protons)**

Les réactions de fusion les plus énergétiques sont produites par les noyaux les plus légers, donc hydrogène et ses isotopes. Plus on monte dans les masses atomiques, moins la réaction produit d'énergie. Donc les réactions après l'hydrogène, au cours de la vie de l'étoile, donneront de moins en moins d'énergie, et nécessiteront une température de plus en plus élevée.

Il n'est pas possible d'ajouter un proton (noyau d'hydrogène) à une particule alpha (noyau d'hélium), car ceci produit un noyau de masse atomique 5. Or aucun n'est stable : ${}^{5}Li$ et ${}^{5}He$ (proton désintégré en neutron) ont une durée de vie de $10^{-21}$ s… C'est bien trop peu pour qu'ils capturent un autre proton et passent à Z = 6 (voir plus haut).

> La particule alpha comporte deux neutrons et deux protons, de spins antiparallèles. Ils remplissent à eux 4 le premier niveau d'énergie. Si on ajoute un nucléon, il devra se trouver sur le niveau d'énergie au-dessus. C'est ce qui produit l'instabilité de ces noyaux.

Pour fusionner l'hélium, il reste alors la fusion de deux particules alpha, qui donnent un noyau de masse atomique 8 (les noyaux plus légers étant tous hautement instables) :

$$^{4}He + {}^{4}He \rightarrow {}^{8}Be$$

Mais le Berylium 8 n'est pas non plus stable. Il se désintègre en $10^{-16}$ s. C'est très rapide, mais tout de même 100.000 fois moins que pour le lithium 5 ou l'hélium 5. En fait, dans les conditions qui règnent au centre des étoiles assez massives, les chocs entre atomes sont assez fréquents, pour que quelques atomes de ${}^{8}Be$ fusionnent, avant de se désintégrer, avec des particules alpha. Cette nouvelle réaction s'écrit donc :

8 4 12

$$^{8}Be + {}^{4}He \rightarrow {}^{12}C + \gamma$$

Ces deux réactions doivent se faire dans un temps très bref, sous peine de ne pas se réaliser du tout. Ce qui fait que c'est (presque) une réaction à trois particules alpha qui se produit. Pour cette raison, on appelle cet ensemble de deux réactions quasi-simultanées : *réaction triple alpha*.

Le résultat est un atome ayant le nombre de protons et de neutrons d'un atome de carbone, produit dans un état excité, et qui doit donc se désexciter. Il dispose pour cela de deux moyens :

- la réaction inverse, qui redonne le $^{8}Be$ (qui se désintègre à son tour… on retrouve les trois particules alpha) ;
- la désexcitation par émission d'un photon gamma. Ce photon gamma emporte l'énergie qui sert à l'équilibre de l'étoile. Le noyau de carbone désexcité est stable.

C'est le premier mentionné des deux mécanismes qui est le plus probable. Mais les quelques désexcitations réalisées par des rayons gamma sont suffisantes pour qu'au fil du temps le carbone s'ammoncelle dans l'étoile.

La réaction de fusion de $^{8}Be$ est donc peu probable en général, et ne justifierait pas l'abondance du carbone observée dans l'univers. Ceci a été longtemps un problème insurmontable. Il a été résolu par Edwin Salpeter dans les années 50.

La deuxième réaction, produisant l'atome de carbone, est une réaction **résonnante**. Ceci signifie que sa *section efficace* (fixant le taux de réaction, comme la surface d'une cible fixe le nombre de fléchettes qui l'atteignent) dépend fortement de la température : lorsque celle-ci augmente, la section efficace croît très vite, passe par un maximum, puis décroît. Au maximum, le taux de réactions est très élevé, et l'hélium fusionne très vite en carbone. Dans certains cas, cette réaction est même explosive : c'est le flash de l'hélium, qui se produit lorsque la température, augmentant, atteint la température de résonnance.

Les nucléons, dans le noyau, sont organisés en couches d'énergie successives, comme les électrons dans l'atome (voir la description du modèle en couches). Chaque couche est à un niveau d'énergie. Lorsque deux noyaux fusionnent, chacun a ses nucléons organisés selon ses propres couches. Fusionnant, ils conservent la structure précédente (deux systèmes de couches). Ils produisent donc un noyau composé, dans lequel les couches ne correspondent pas au nombre total de nucléons. C'est l'origine de l'excitation.

Deux voies s'offrent pour désexciter le noyau intermédiaire : soit il éclate, et redonne les constituants de départ (c'est donc comme si rien ne s'était passé), soit le réarrangement des nucléons se produit, et un photon emporte l'énergie d'excitation. Mais la première alternative est de loin la plus probable.

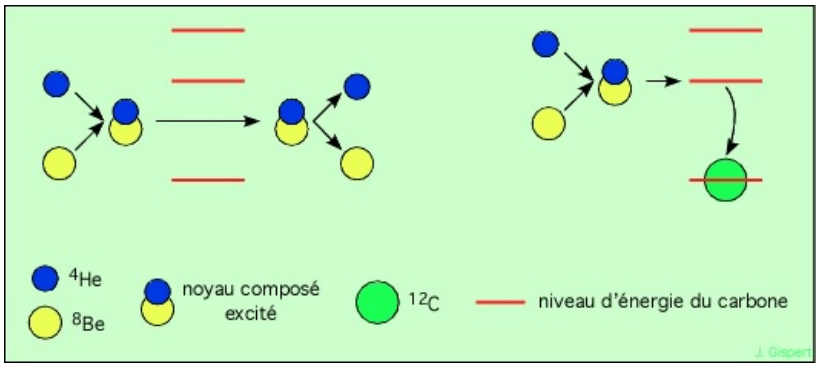
Il arrive cependant, pour certaines réactions, que l'énergie d'excitation du noyau composé corresponde (presque exactement) à un niveau d'excitation du noyau ayant même nombre de protons et neutrons (mais organisés en couches). Alors, la probabilité de désexcitation par ce mécanisme est considérablement augmentée. L'énergie du noyau composé dépend évidemment de l'énergie cinétique des deux noyaux qui réagissent ; donc, elle dépend de la température du milieu. C'est ce qui explique l'existence d'une température de résonnance.

Prenons l'exemple du carbone, dans la réaction $^{8}Be + {}^{4}He \rightarrow {}^{12}C$. La réaction peut se décomposer en :

$$^{8}Be + {}^{4}He \rightarrow \text{Noyau Composé} \rightarrow {}^{12}C + \gamma$$

Le noyau de carbone final possède des niveaux d'énergie quantifiés. Le noyau composé, intermédiaire, contient bien 6 protons et 6 neutrons, mais ils ne sont pas arrangés pour former un noyau de carbone : il est dans un niveau d'énergie excité.

Or le noyau intermédiaire possède justement une énergie égale à celle d'un niveau excité du carbone. On dit que la réaction est résonnante pour cela. Ainsi, il est tout à fait possible que le noyau intermédiaire se désexcite en passant dans l'état fondamental du carbone.




A gauche, le noyau composé possède une énergie qui ne correspond pas à un niveau de l'atome de carbone. Il se brise et redonne les deux composants séparés. A droite au contraire, son énergie est égale à celle d'un niveau excité du carbone. Alors, le noyau composé peut facilement se désexciter en émettant cette énergie (photon gamma), et se trouver donc au niveau fondamental du carbone, stable. Les nucléons, en perdant cette énergie, se réarrangent selon les couches du carbone.

Ces réactions ne sont possibles que lorsque la barrière électrostatique des protons est vaincue. Puisqu'elles mettent en jeu trois noyaux d'hélium, soit 6 protons, l'énergie cinétique des noyaux doit être très grande, et donc aussi leur température. **100 millions de degrés** au moins sont nécessaire, et la densité doit être d'au moins **100 kg/cm$^{3}$** pour assurer un taux de réaction suffisant. C'est pourquoi la fusion de l'hélium est impossible pendant celle de l'hydrogène (Séquence Principale).

De nombreuses autres réactions résonnantes participent à l'explication du fonctionnement des étoiles, dans toutes leurs phases d'évolution. Ceci est possible parce que la température du coeur de l'étoile augmente plus ou moins rapidement, et finit ainsi par atteindre la température de résonnance pour certaines réactions.

Ces deux réactions produisent 7,275 MeV par noyau de carbone produit. C'est 10 fois moins que ce que donne la fusion de l'hydrogène, par unité de masse.

**Autres réactions**

Dans les mêmes conditions de température et de pression, d'autres réactions sont possibles. En réagissant avec une particule alpha, le carbone donne de l'oxygène 16 ; l'azote 14 produit de l'oxygène 18 :

- $^{12}C + {}^{4}He \rightarrow {}^{16}O + \gamma$
- $^{14}N + {}^{4}He \rightarrow {}^{18}F + \gamma$
- $^{18}F \rightarrow {}^{18}O + e^{-} + \nu$
- $^{16}O + {}^{4}He \rightarrow {}^{20}Ne + \gamma$ (plus rarement)

Ce sont aussi des réactions résonnantes. En fonction du taux de réalisation de chacune de ces réactions à la température considérée, on arrive à un état d'équilibre, et un mélange bien déterminé des différentes espèces produites. L'ensemble conduit à un cœur constitué de 49 % de $^{12}C$, 49 % de $^{16}O$ et 2 % de $^{18}O$, à la fin de la fusion de l'hélium.

La fusion de l'hélium assure l'équilibre de l'étoile dans sa phase de *géante rouge*. Mais l'hélium étant plus lourd que l'hydrogène, l'énergie produite à chaque réaction est inférieure à celle produite par la fusion de 4 hydrogènes. Donc, pour produire une même quantité d'énergie, il faut un taux de réactions bien plus élevé. De plus, l'étoile est plus contractée, donc la gravité plus forte. Pour l'équilibrer, il faut bien plus d'énergie. Ces deux phénomènes, agissant dans le même sens, donnent une durée de vie considérablement plus courte dans la phase géante rouge, que dans la Séquence Principale.

L'oxygène 18 peut aussi fusionner avec une particule alpha, et donner du néon, qui fusionne à son tour en magnésium. Ces réactions seront importantes par leur émission de nombreux neutrons, qui ont parfois un grand rôle à jouer.

$$^{18}O + {}^{4}He \rightarrow {}^{21}Ne + n \quad {}^{22}Ne + {}^{4}He \rightarrow {}^{25}Mg + n \quad {}^{25}Mg + {}^{4}He \rightarrow {}^{28}Si + n$$

$$^{18}O + {}^{4}He \rightarrow {}^{22}Ne + \gamma \quad {}^{22}Ne + {}^{4}He \rightarrow {}^{26}Mg + \gamma \quad {}^{26}Mg + {}^{4}He \rightarrow {}^{29}Si + n$$

Ces réactions produisent beaucoup de neutrons, comme on peut le voir. Ces neutrons à leur tour permettront de nouvelles synthèses, par addition de neutrons.

Si on s'intéresse à des noyaux plus lourds encore, on comprend bien que la température doit être de plus en plus élevée. Pour atteindre les températures requises, il fut que l'étoile ait une masse suffisante. Pour le Soleil, l'histoire s'arrêtera après la fusion de l'hélium.

Les fusions ne pourront pas se produire dans la même zone et au même moment. Ceci aura de grandes conséquences sur la constitution interne des étoiles de grande masse.

**Fusion du carbone (C - 6 protons)**

Lorsque la température atteint les 500 millions de degrés (avec efficacité maximum à 800), le carbone à son tour fusionne. Mais les réactions sont plus variées que pour la fusion de l'hydrogène. Deux atomes de carbone se combinent, pour donner du magnésium, du sodium ou du néon. Des réactions typiques sont :

$$^{12}C + {}^{12}C \rightarrow {}^{24}Mg + \gamma$$

$$^{12}C + {}^{12}C \rightarrow {}^{23}Mg + n + \nu$$

$$^{12}C + {}^{12}C \rightarrow {}^{23}Na + {}^{1}H + \nu$$

$$^{12}C + {}^{12}C \rightarrow {}^{20}Ne + {}^{4}He$$

La réaction qui produit le magnésium 23 est endothermique, c'est-à-dire qu'elle consomme de l'énergie au lieu d'en produire. Ces réactions produisent normalement de l'énergie, qui combat l'effondrement gravitationnel de l'étoile. Si de nombreuses réactions comme celle-ci se produisent, au lieu de le combattre, elles accéléreront l'effondrement. En plus, les neutrinos produits traversent la matière de l'étoile sans interaction, donc sans y déposer leur énergie. Ils emportent ainsi presque 30 % de l'énergie produite par l'étoile dans cette phase.

**Fusion de l'oxygène (O - 8 protons)**

La fusion de l'oxygène devient possible à des températures encore plus élevées, de l'ordre du milliard de degrés. Ce qui nécessite une étoile de masse importante pour atteindre une telle température.

$$^{16}O + {}^{16}O \rightarrow {}^{32}S + \gamma$$

$$^{16}O + {}^{16}O \rightarrow {}^{31}P + p$$

$$^{16}O + {}^{16}O \rightarrow {}^{28}Si + {}^{4}He$$

$$^{16}O + {}^{16}O \rightarrow {}^{24}Mg + 2\,{}^{4}He$$

$$^{16}O + {}^{16}O \rightarrow {}^{31}S + n$$

Parmi les produits de ces réactions, le silicium est le plus stable. C'est donc lui qui est le plus abondant à la fin des réactions.

**Fusion du silicium (Si - 14 protons)**

La fusion du silicium requiers une température de 4,5 milliards de dégrés pour se produire, en franchissant la barrière coulombienne de répulsion électrique. Ceci pose un gros problème : **avant** d'atteindre de telles températures, le rayonnement de corps noir devient tel que des photons gamma sont émis en abondance (ils emportent une partie de l'énergie). Ces photons sont assez énergétiques pour briser de nombreux atomes, qui produisent des réactions de désintégration. En effet, leur énergie est du même ordre de grandeur que les niveaux excités des atomes. Plutôt que de se construire, les noyaux vont donc se briser. Ce phénomène empêche la fusion des éléments à partir du silicium (la fusion est la réaction d'un élément sur lui-même).

Les noyaux les plus fragiles sont brisés les premiers : ce sont ceux dont la masse atomique est impaire. Le fer et le silicium, de masse atomique paire, sont pour l'instant préservés. Ceci explique en partie le pic du fer.

> Le pic du fer est une abondance plus forte du fer que des éléments de masses voisines. Ceci ne peut s'expliquer que par une stabilité particulière du fer, plus importante que celle des noyaux proches.

Le pic du fer s'explique par des réactions d'équilibre. Certaines réactions produisent un noyau instable, qui se désintègre très rapidement. Mais si de nombreuses réactions de ce type se produisent à chaque seconde, elles peuvent maintenir un faible taux du noyau instable avant qu'il ne se désintègre.

## *La suite est en cours de rédaction…*

**Synthèse du soufre**

Ce sont des réactions produites par des particules alpha :

$^{28}Si + \gamma \rightarrow {}^{24}Mg + {}^{4}He$

$^{28}Si + {}^{4}He \rightarrow {}^{32}S + \gamma$

$^{32}S + {}^{4}He \rightarrow {}^{36}Ar + \gamma$ etc.

**Stabilité des noyaux**

Dans la nature, on ne connait pas d'élément plus lourd que l'uranium, qui possède 92 protons. Chacun sait que certains des isotopes de l'uranium sont radioactifs, ce sont ceux qui permettent de retirer de l'énergie des centrales nucléaires actuelles.

**Réactions d'addition de neutrons**

Les réactions d'addition de neutrons ne jouent pas de rôle important dans la Séquence Principale, mais deviennent essentielles dans quelques cas où les neutrons sont émis en grandes quantités. Elles expliquent la formation des éléments à partir d'une masse atomique de 65 (que le fonctionnement des étoiles n'explique pas, tout au moins dans les proportions observées).

- Les neutrons étant neutres (comme leur nom l'indique…), ne subissent pas de répulsion électromagnétique de la part des noyaux atomiques. Lorsqu'un neutron est projeté contre un noyau atomique, il peut s'en approcher très près sans être rejeté. Et lorsqu'il est à une distance très faible, l'interaction forte va agir, et retenir définitivement le neutron dans le noyau.
- D'autre part, les noyaux absorbent d'autant plus facilement les neutrons, qu'ils sont plus lourds.
- Il reste à savoir si des neutrons sont disponibles pour de telles réactions.

Dans les phases normale de vie d'une étoile, la production de neutrons est faible, ne permettant ces processus qu'à un taux dérisoire. Mais pendant certaines phases transitoires, le taux de production des neutrons peut être conséquent.

Un atome qui a ainsi absorbé un neutron conserve le même nombre de protons, donc il s'agit toujours du même élément chimique. Mais on est en présence d'un isotope plus lourd. Est-il stable ?

**Processus r et s**

Les processus r et s sont des processus d'addition de neutrons. Lorsqu'on ajoute un neutron à un noyau, on peut obtenir un nouveau noyau stable ou instable. Et s'il est instable, il se désintègre plus ou moins vite.

- S'il y a peu de neutrons, un noyau instable aura tout le temps de se désintégrer avant de recevoir un nouveau neutron. Pour se désintégrer, il utilise la désintégration béta, dans laquelle un neutron devient proton. Il y a peu de neutrons parce que leur flux est faible, et le processus est lent. C'est pourquoi il est dit *s* pour *slow*.

- S'il y a beaucoup de neutrons (flux important, processus rapide), on parle de *processus r*, r pour *rapid*. Entre deux captures de neutrons, un noyau n'a pas le temps de se désintégrer (neutron vers proton), et les neutrons s'accumulent dans le noyau. Ce processus donne donc des noyaux riches en neutrons.

**Utilité astrophysique de ces réactions**

Quelles sont les avancées faites en astronomie par la connaissance des réactions nucléaires ?

Elles sont de plusieurs ordres, selon le point de vue :

- si on considère l'énergie émise par les réactions nucléaires, on explique l'équilibre des étoiles, pendant toutes leurs phases actives ;
- si on observe les produits des réactions, on comprend la composition actuelle de la matière dans l'Univers.

Lors de la séquence principale, l'énergie est produite par la fusion de l'hydrogène ; pendant la phase géante rouge, c'est la fusion de l'hélium, produit pendant la séquence principale, qui prend le relais ; ensuite, la fusion du carbone, de l'oxygène, du silicium, achèvent de contenir la gravité. Ce qui se passe ensuite dépend de la masse de l'étoile considérée, mais plus aucun équilibre ne peut venir d'une production d'énergie. La pression quantique de Fermi assure un équilibre définitif dans les naines blanches (par les électrons), et dans les étoiles à neutrons (par les neutrons), mais elle ne nécessite aucune énergie.

Les éléments constitutifs de la matière interstellaire et des nuages de gaz sont produits par :

- les réactions de fusion, depuis l'hydrogène jusqu'au silicium, produisent les éléments de l'hélium au fer, à l'exception du lithium, du bérylium et du bore ;
- les réactions d'addition de neutrons par le processus s'expliquent…
- les réactions d'addition de neutrons par le processus s'expliquent…
- les réactions de spallation expliquent les trois éléments légers lithium, bérylium et bore.

## *Fission nucléaire en astronomie*

Désintégration radioactive de certains éléments, dans les planètes, dans les supernovæ…

La désintégration radioactive demande la présence d'atomes lourds, susceptibles de se briser. Il faut donc qu'ils aient été créés par un mécanisme précédent (essentiellement réactions explosives). Les principaux radioéléments sont l'Uranium, le potassium 40, le thorium, et l'aluminium. Ils jouent des rôles différents, en fonction de leur mécanisme de formation et de leurs périodes.

Ces différents mécanismes sont étudiés dans les chapitres correspondant aux domaines où ils interviennent.

**Planètes**

Les éléments à longue période ont un rôle majeur dans l'entretien de la chaleur d'une planète. Normalement, celles-ci sont chauffées par accrétion et contraction gravitationnelle dans leur phase de formation, mécanismes qui cessent rapidement. Ensuite, elles ne peuvent plus que se refroidir progressivement dans l'espace. Mais la présence d'éléments radioactifs en leur sein, par l'énergie dégagée lors de la fission, entretient un flux de chaleur qui compense partiellement le refroidissement.

Cette production d'énergie a sa source dans la masse de la planète, donc dans son volume. Elle est par conséquent proportionnelle au cube du rayon. De l'autre côté, le refroidissement se fait par la surface, donc proportionnellement au carré du rayon. Le bilan énergétique (gain / perte) est donc proportionnel au rapport $R^3 / R^2 = R$. Une planète conserve donc sa chaleur d'autant plus facilement qu'elle est plus grosse (rayon plus grand). C'est ce qui explique que Mercure et Mars soient refroidies, alors que la Terre est encore active (volcanisme).

**Supernovæ**

L'explosion d'une supernova est un phénomène bref. La luminosité devrait donc monter très rapidement (ce qu'elle fait), puis baisser presque aussi vite. Or ce n'est pas le cas. On explique ce retard par la désintégration d'un isotope de l'aluminium, $^{26}Al$, dont la période est brève, et qui est synthétisé lors de l'explosion. L'explosion passée, l'aluminium 26 commence à se désintégrer, produisant une énergie qui va entretenir assez longtemps l'éclat de la supernova. Vous trouverez des explications détaillées dans le chapitre correspondant.

**Nombres magiques**

Les noyaux ayant certains nombres particuliers de protons ou de neutrons présentent une stabilité particulièrement élevée. Ceci est expliqué par le modèle en couches du noyau atomique. Les abondances observées des éléments chimiques s'expliquent en partie par ce modèle de noyau.

**Durée de vie des particules**

Certaines particules sont stables, d'autres se désintègrent spontanément. On a tenté de mesurer la durée de vie du proton, sans succès. Il semble vraiment très stable, au point que sa durée de vie est supérieure à $10^{31}$ ans. L'âge actuel de l'Univers est de l'ordre de 10 milliards d'années, *i.e.* $10^{10}$ ans. Le proton doit donc vivre au moins $10^{21}$ fois l'âge de l'Univers…

Par contre, le neutron est instable, mais seulement dans son état libre. Sa durée de vie est de 10,6 minutes. Dans l'état lié, il est stable, fort heureusement, sinon les atomes n'existeraient pas !

## *Fission*

La fission n'intervient pas dans les étoiles, qui tirent leur énergie de la fusion des éléments jusqu'au fer. Mais elle se produit dans certaines circonstances très particulières, comme par exemple le maintien de l'éclat d'une supernova, après l'explosion. Pendant la phase explosive elle-même, la température et la densité sont assez élevées pour synthétiser des éléments plus lourds que le fer, parce qu'il y a énormément d'énergie disponible, produite en un temps très bref. Cette énergie ne demande qu'à être utilisée, alors que dans les étoiles, elle doit servir à maintenir l'équilibre… Parmi les éléments produits dans l'explosion, certains sont radioactifs, avec des périodes diverses. La courbe de lumière montre bien la décroissance radioactive des éléments à courte période concernés.

La *fission* est la rupture spontanée d'un noyau lourd, trop massif pour être stable, en noyaux plus légers. C'est ce qui se produit s'il possède trop de nucléons, car l'interaction forte s'affaiblit très vite avec la distance (elle a une portée très faible). Lorsque le noyau contient un grand nombre de nucléons, la distance entre deux nucléons augmente, et donc l'interaction forte diminue rapidement. Mais la répulsion électrostatique entre les protons diminue bien moins vite, et finit par devenir prépondérante. Alors, le noyau perd sa cohésion, et va à la rupture.

Prenons l'exemple de l'uranium 235 (98 protons + 137 neutrons). Ce noyau est instable, car la liaison entre ses nucléons est faible, et la répulsion coulombienne presque aussi intense que l'attraction. Il présente une fission spontanée : chaque atome d'uranium 235 a une probabilité de se désintégrer très faible. On caractérise cette désintégration en indiquant le temps au bout duquel il ne reste plus que la moitié d'une masse initiale. Pour l'uranium 235, elle est de 700 millions d'années. Il s'use même si on ne s'en sert pas, mais pas vite

La fission de l'uranium produit une particule alpha (noyau d'hélium) et de l'énergie. Ceci parce que la particule alpha (deux protons et deux neutrons) ne présente qu'une faible répulsion électrostatique, produite par l'intéraction entre ses deux protons, et une attraction importante due à l'interaction forte entre ses 4 nucléons. La structure très symétrique de l'assemblage augmente encore sa cohésion. Pour l'atome d'uranium instable, il est donc plus facile de se défaire d'une particule alpha qu'un d'un simple proton par exemple.

La fission de l'uranium est utilisée dans les centrales nucléaires. Ceci n'intéresse pas directement l'astronomie, bien que  La désintégration des noyaux d'uranium à l'intérieur de la Terre (et des autres planètes) produit de la chaleur, sans laquelle notre planète serait sans doute froide aujourd'hui, et ne présenterait plus aucune activité volcanique ou tectonique. La Lune, Mercure et Mars, beaucoup plus petites, n'ont plus cette source pour les maintenir.

Lorsqu'un noyau d'uranium reçoit un neutron (qui peut s'approcher sans subir de répulsion coulombienne), il se transforme en un autre isotope, l'uranium 236 (98 protons + 138 neutrons). Cet isotope est extrêmement instable, et se désintègre en deux atomes de masse moyenne, et quelques neutrons. Le nombre de neutrons dépend des deux atomes produits, car plusieurs réactions différentes sont possibles. La plus importante est :

$$^{235}_{92}\mathrm{U} + \mathrm{n} \rightarrow {}^{96}_{36}\mathrm{Kr} + {}^{140}_{56}\mathrm{Ba} + 3\,\mathrm{n}$$

Imaginez qu'on possède une masse d'un kilo d'uranium 235. Dans cette masse, un atome se désintègre spontanément, en émettant deux neutrons. Ces neutrons vont heurter deux autres atomes de l'uranium, qui vont se briser par la réaction ci-dessus, en émettant 3 nouveaux neutrons, qui vont à leur tour… Ce phénomène prend le nom de *réaction en chaîne*. En un temps extrêmement bref, tous les noyaux d'uranium vont éclater, et chacun libère son énergie. La quantité d'énergie libérée est vraiment énorme, et puisque c'est en un temps très bref, c'est une explosion : c'est le principe de la bombe A.

Bien d'autres atomes se désintègrent ainsi, et leurs propriétés sont extrêmement utiles. C'est pourquoi il faut les étudier.

Des désintégrations se produisent dans les planétoïdes lorsqu'ils viennent juste de se former, et participent activement à leur chauffage, qui va permettre la différenciation. Il s'agit là d'atomes qui se désintègrent rapidement, on dira qu'ils sont à *courte période*.

Mais les désintégrations ont aussi un usage très important en astronomie, car ce sont elles qui permettent de donner des dates ! On utilise pour cela une propriété fondamentale : le taux de désintégration est constant, et ne dépend pas des conditions physiques dans lesquelles se trouvent les atomes. On peut mesurer ces taux en laboratoire, et ensuite, la proportion d'atomes radioactifs que l'on trouve dans un échantillon permet de déduire son âge.

La désintégration radioactive obéit à un double principe :

- le nombre de désintégrations dans le temps dt est proportionnel au nombre total N d'atomes disponibles ;
- il est aussi proportionnel à dt.

Ceci implique que le nombre N d'atomes restant à l'instant t après la formation des atomes est :

$$N = N_0\, e^{-\log 2\, t\, /\, T}$$

Au bout du temps T, il reste la moitié des atomes initiaux. Au bout de 2 périodes (2 T), il en reste le quart. Au bout de 3 périodes, il n'en reste plus que le huitième…

Désintégration d'un échantillon radioactif

L'animation ci-dessus simule la désintégration d'un élément dont la période est de 1.000 unités de temps. Le temps est mentionné en haut à gauche. A droite, est indiqué le nombre d'atomes restant. Pour mieux apréhender l'évolution, chaque désintégration s'accompagne d'un son. Montez donc le son de votre machine pour l'entendre.

Au départ, il y a 1.024 atomes (ce nombre est une puissance de 2, on peut le diviser exactement par 2 10 fois). Les atomes instables sont représentés en rouge. Lorsqu'ils se désintègrent, ils deviennent blancs.

Au bout d'une période (1.000 unités de temps) vous pourrez constater qu'il reste la moitié, soit 512 atomes. 1.000 unités de temps plus tard, il reste la moitié de la moitié, soit 256 atomes. Au bout de trois périodes, il ne restera plus que 128

atomes, et ainsi de suite.

Supposons qu'on ait un échantillon contenant N atomes, dont p sont radioactifs, et les N - p autres proviennent de la désintégration. Au moment de la formation de l'échantillon, tous les atomes étaient radioactifs, il y en avait donc N. Puisqu'il y en a p de radioactif, on peut écrire :

$$p = N\, e^{-(\log 2)\, t / T}$$

La période T est connue, donc on peut calculer t :

$p / N = e^{-(\log 2)\, t / T}$

$\log(p / N) = -(\log 2)\, t / T$

$t = -\log(p / N) / (T \log 2)$

Le calcul de t donne l'âge de l'échantillon. Ceci est le principe de la datation bien connue au carbonne 14 (qui se désintègre en azote 14). Celle-ci s'adapte aux périodes peu anciennes qui concernent l'archéologie, car la période du carbone 14 n'est que de 5.734 ans. Au bout de 7 périodes, il ne reste que $1 / 2^7 = 1 / 128^e$ de la quantité initiale. La méthode permet donc de dater jusqu'à 40.000 ans à peu près.

Avec des éléments de période plus longue, on peut dater des échantillons bien plus anciens. La méthode Potassium-Argon (le Potassium 40 se désintègre en Argon 40) est adaptée à des durée beaucoup plus longues, sa période étant de 1,25 milliards d'années.

En astronomie, on utilise d'autres atomes instables pour dater par exemple les météorites.

## *ITER*

ITER est un réacteur expérimental de fusion de l'hydrogène, destiné à valider les choix effectués. Il s'agit d'un *Tokamak*, c'est-à-dire une chambre à vide, dans laquelle sont injectés des atomes ionisés (donc portant une charge positive). Un très fort champ magnétique empêche les atomes de s'échapper de l'enceinte.

Pour fusionner l'hydrogène, nous avons vu que la première réaction du cycle proton-proton est de très loin la plus difficile à réaliser, à cause de la barrière de potentiel. Le principe d'ITER consiste à éviter cette réaction, en injectant des atomes de deutérium (1 proton et 1 neutron), et de tritium (1 proton et 2 neutrons). La réaction est la suivante :

$$^2H + {}^3H \rightarrow {}^5He$$

L'atome produit est de l'hélium (2 protons, 3 neutrons). Mais il est très instable. Il se désintègre très vite en hélium 4, en éjectant un neutron :

$$^5He \rightarrow {}^4He + n$$

Le neutron est éjecté violemment, et possède beaucoup d'énergie cinétique. Il vient frapper la paroi, qui absorbe son énergie en se chauffant. Un système de refroidissement transporte cette chaleur vers une chaudière produisant de la vapeur. C'est cette vapeur qui va produire l'électricité en entraînant une turbine tout à fait classique.

ITER ne produira jamais d'électricité à des fins industrielles, ce n'est pas son but. Il sera suivi, s'il donne de bons résultats, par des modèles d'application. L'intérêt de ce principe tient dans les caractéristiques suivantes :

- le combustible ne présente aucun danger, c'est l'un des constituants de l'eau ;
- il est présent en faibles quantités dans l'eau de mer, mais le volume des océans nous en assure assez pour des milliards d'années ;
- la réaction est difficile à enclencher, et en cas de panne du réacteur, elle s'arrête spontanément ; Aucun risque d'explosion ;
- le produit de la réaction est de l'hélium, pas plus dangereux que le combustible ;

Le seul problème vient des neutrons produits. Ce sont eux qui transmettent l'énergie qu'on cherche à produire, mais pour cela ils viennent heuter très violemment les parois de la chambre de réaction. Ils produisent alors des réactions d'addition de neutrons, qui transforment les atomes de la paroi en d'autres éléments, dont certains sont radioactifs. Mais ces éléments sont à courte période, et disparaissent vite après l'arrêt du réacteur.

Ce principe de production de l'énergie n'est certainement pas parfait, mais il a l'avantage d'en produire énormément, à partir de combustible disponible partout, sans produire de déchets trop encombrants.

**Tableau de Mendéléev des éléments naturels, réduit au symbole chimique et au nombre de protons Z**

Vous pouvez trouver un tableau contenant les noms des éléments, ainsi que leur masse atomique, dans la fiche appropriée.

Passez simplement la souris sur une case pour visualiser le nom de l'élément.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| H 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | He 2 |
| Li 3 | Be 4 | | | | | | | | | | | B 5 | C 6 | N 7 | O 8 | F 9 | Ne 10 |
| Na 11 | Mg 12 | | | | | | | | | | | Al 13 | Si 14 | P 15 | S 16 | Cl 17 | Ar 18 |
| K 19 | Ca 20 | Sc 21 | Ti 22 | V 23 | Cr 24 | Mn 25 | Fe 26 | Co 27 | Ni 28 | Cu 29 | Zn 30 | Ga 31 | Ge 32 | As 33 | Se 34 | Br 35 | Kr 36 |
| Rb 37 | Sr 38 | Y 39 | Zr 40 | Nb 41 | Mo 42 | Tc 43 | Ru 44 | Rh 45 | Pd 46 | Ag 47 | Cd 48 | In 49 | Sn 50 | Sb 51 | Te 52 | I 53 | Xe 54 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Cs 55 | Ba 56 | La 57 | Hf 72 | Ta 73 | W 74 | Re 75 | Os 76 | Ir 77 | Pt 78 | Au 79 | Hg 80 | Tl 81 | Pb 82 | Bi 83 | Po 84 | At 85 | Rn 86 |
| Fr 87 | Ra 88 | Ac 89 | Rf 104 | Db 105 | Sg 106 | Bh 107 | Hs 108 | Mt 109 | Ds 110 | Rg 111 | Cn 112 | Uut 113 | Fl 114 | Uup 115 | Lv 116 | Uus 117 | Uuo 118 |

Entre La et Hf se placent les *lantanides* :

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ce 58 | Pr 59 | Nd 60 | Pm 61 | Sm 62 | Eu 63 | Gd 64 | Tb 65 | Dy 66 | Ho 67 | Er 68 | Tm 69 | Yb 70 | Lu 71 |

et après Ac, les *actinides* :

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Th 90 | Pa 91 | U 92 | Np 93 | Pu 94 | Am 95 | Cm 96 | Bk 97 | Cf 98 | Es 99 | Fm 100 | Md 101 | No 102 | Lr 103 |

Les éléments radioactifs (dont l'un au moins des isotopes est radioactif) sont placés sur fond violet.

Quelques éléments portent des noms curieux, qui méritent une petite explication. Sur Terre, on n'a jamais observé que les 94 premiers éléments, jusqu'au plutonium. Certains ne sont qu'à l'état de traces. Dans l'espace, on a observé également le californium (98). Les autres éléments connus ont seulement été synthétisés en laboratoire, par fusion à partir d'élément plus légers. Ces opérations étant très difficiles à réaliser, certains des noyaux correspondants n'ont été observés qu'une seule fois. De plus, ils sont tous instables et se désintègrent très vite.

Pour nommer un nouvel élément, l'organisme responsable attend d'avoir des indications sérieuses sur sa réalité. Aussi a-t-il décidé de donner à certains des noms provisoires, en attendant des preuves, ou même une première détection. On peut en effet établir théoriquement jusqu'où le tableau de Mendéléev pourrait aller, avec des noyaux à vie brève mais non nulle. Et ce sont ces cases-là qu'on désigne par un nom provisoire.

Ces noms ont été définis à partir de l'élément 111, et leur construction suit une règle simple : elle est latine, et indique simplement la suite des trois chiffres qui composent le numéro, avec le suffixe *ium*, pour donner une allure connue ! Ainsi, l'élément 111 a été nommé Un-Un-Un, c'est-à-dire *ununium*. Le numéro 112 suivant est *ununbium*. Puis viennent *ununtrium*, *ununquatrium*, *ununpentium*, *ununhexium*, *ununseptium*, *ununoctium*, *ununennium*. Pour passer à la dizaine suivante, on change le second un en bi : *unbinillium*, *unbiunium*, etc.

Vous remarquerez que dans le tableau, certains de ces noms fabriqués ont déjà disparu, les élément correspondant étant maintenant acceptés, et ayant reçu un nom définitif.

Même acceptés, ces éléments sont très mal connus, et leurs propriétés chimiques sont indéterminées. On pourrait se baser sur la périodicité du tableau de Mendéléev, mais ceci ne donnerait pas de bons résultats. Le nombre d'électrons est si grand, que des calculs quantiques (évidemment approchés), montrent qu'il doit y avoir des phénomènes d'interaction qui perturbent beaucoup leur ordonance, et devraient donner à ces éléments des propriétés chimiques bien différentes de ce qu'on connait. Dommage qu'ils soient si instables…

**Fusion controlée**

La recherche de la fusion controllée vise à produire énormément d'énergie dans un volume très petit, pour remplacer les énormes machines utilisées à l'heure actuelle (barrages, centrales thermiques…). L'etude des réactions de fusion dans les étoiles a montré la difficulté de réalisation de cette idée. En fait, on ne cherche même pas à reproduire ce qu'il se passe dans le Soleil. On peut dire, pour faire simple, qu'on cherche plutôt à imiter une naine brune. En effet, plutôt que de partir d'atomes d'hydrogène, dont la répulsion électrostatique est trop importante pour être envisageable, on essaye de fusionner des isotopes de l'hydrogène : deutérium et tritium.

Les réactions possibles sont :

| | |
|---|---|
| $^2H + ^2H \rightarrow ^3He + n$ | fusion de deux noyaux de deutérium |
| $^2H + ^2H \rightarrow ^3H + p$ | idem |
| $^2H + ^3H \rightarrow ^4He + n$ | fusion d'un noyau de deutérium et d'un noyau de tritium |
| $^2H + ^3He \rightarrow ^4He + p$ | fusion d'un noyau de deutérium et d'un noyau d'hélium 3 |

Ces différentes réactions se produisent à température plus basse et à densité plus faible que celles de l'hydrogène, ce qui facilite bien les choses. Mais cependant, elles restent très difficiles à réaliser, car la pression nécessaire pour qu'elles se produisent est gignatesque par rapport à la pression ambiante. Il est donc très difficile de maintenir les noyaux dans un très faible volume, et à très haute température, pour que les collisions soient assez nombreuses pour produire de l'énergie.

Diverses solutions sont envisagées, pour assurer le confinement des particules (forte densité et forte température), le temps de la réaction. Il y a essentiellement deux approches :

- le confinement magnétique, avec les Tokamaks en particulier (ITER est de ce type) ;
- le confinement inertiel, avec bombardement d'une petite cible par des faisceaux laser.

Aucune de ces possibilités n'est encore aboutie pour produire plus d'énergie que ce qu'elle en consomme… Pour parler un lmangage maintenant habituel, on pourrait dire que les réacteurs de fusion actuels sont endothermiques…

---=OO=---




## *Plan*


Les constellations
Le Zodiaque
Noms des étoiles
Magnitudes
Mouvements propres
Projection du mouvement sur la sphère céleste
Masse d'une étoile
Luminosité
Rayon
Relation masse-rayon
Relation masse-luminosité
Classes spectrales
Classes de luminosité
Naines et géantes
Durée de vie sur la Séquence Principale
Température superficielle
Animation
Vitesse de rotation
Problème de la rotation
Masse volumique
Diagramme HR
Les populations stellaires
Chaîne proton-proton
Cycle CNO
Dépendance à la température
Rendement comparé
Séquence Principale
Naines brunes
Equilibre hydrostatique
Pression
Energie gravitationnelle
Nature des étoiles
Intervalles de définition des étoiles
Fin de la Séquence Principale
Amas d'étoiles
Vent stellaire
Taux de perte de masse
Vitesse terminale
Formation des raies spectrales dans le vent stellaire


**Qu'est-ce qu'une étoile ?**

Un petit point lumineux qui brille dans le ciel la nuit !

Si on cherche à aller au-delà des apparences, de nombreux problèmes se posent. D'abord, on peut utiliser un instrument d'optique puissant pour tenter de mieux les voir. Espoir vite déçu : dans un instrument plus puissant, les points lumineux des étoiles apparaissent plus brillants, mais plus petits ! Ceci pour deux causes différentes :

- les étoiles sont si loin qu'on ne peut rien voir de leur surface même avec les meilleurs télescopes (ceci est heureusement en train de changer…) ;
- les propriétés de la lumière expliquent la plus petite taille d'un point lumineux dans un grand instrument.

L'aspect ponctuel des étoiles dans les plus grands instruments a longtemps limité leur étude à des dénombrements et des statistiques. Nous verrons plus loin que ces méthodes ont permis de concevoir la forme de notre galaxie.

Pour étudier les étoiles, il faut donc utiliser d'autres techniques, plus évoluées que le simple regard. Il faut des instruments de mesure.

Dans ce chapitre, nous allons voir ce que sont les étoiles, comment elles fonctionnent, comment elles se forment et évoluent, de leur naissance à leur mort. A côté des calmes étoiles normales, nous verrons quelques monstres, par leur taille, par leur masse, ou par leur densité. Nous verrons aussi que certaines montrent des variations d'éclat, et nous aborderons les relations qu'elles entretiennent entre elles.

## *Les apparences*

### Les constellations

Lorsqu'on regarde le ciel étoilé, certains dessins nous sautent aux yeux ; on appelle ces figures formées par les étoiles des *astérismes* (du latin *aster*). Les astérismes les plus remarquables sont nommés *constellations*.

Le ciel est comme un paysage : pour pouvoir en parler, il faut avoir des repères. Les constellations jouent ce rôle, depuis la nuit des temps. Un bon observateur se doit de bien connaître le ciel.

La plus belle de toutes les constellations est sans doute Orion, qui orne les nuits d'hiver. Elle est remarquable car elle est constituée d'étoiles qui sont toutes brillantes, alors que la plupart des autres constellations possèdent une ou deux étoiles brillantes, et d'autres plus discrètes.

Des constellations ont été définies par tous les peuples. Les associations les plus évidentes se retrouvent partout, parfois avec des noms différents : *la Grande Ourse* se nomme *le Chameau* chez les Touaregs. Chez les Arabes, elle évoque un *corbillard*.

Les constellations sont des figures formées par la perspective. Orion, par exemple, associe des étoiles très proches de la Terre, et peu brillantes, à des étoiles beaucoup plus lointaines et très lumineuses. Ces figures n'ont donc aucun intérêt astronomique, hormis celui de constituer des repères simples dans le ciel, car elles n'ont pas d'existence physique.

Les noms des constellations sont d'inspiration différente dans les deux hémisphères, pour des raisons historiques. Dans l'hémisphère nord, on trouve :

- des noms de personnages mythologiques : Persée, Céphée, Andromède…
- des noms d'animaux ayant eu un rôle dans la mythologie : la Baleine, la Grande et la Petite Ourse, Pégase…
- les noms des constellations zodiacales, qui ont une origine différente : la Vierge, le Verseau, le Capricorne la Balance…

Les Arabes ont conservé les résultats de l'astronomie grecque, et ont fini par adopter les constellations définies par les grecs, en abandonnant les leurs. De ce fait, les noms des constellations sont, pour l'hémisphère nord, d'origine grecque, alors que les noms des étoiles sont pour la plupart d'origine arabe.

De nombreux personnages mythologiques ont été envoyés dans le ciel par les dieux pour les récompenser d'actes héroïques, ou bien les mettre à l'abri… Cette opération s'appelle la *catastérisation* ! Ce qui signifie "transformation en astérisme".

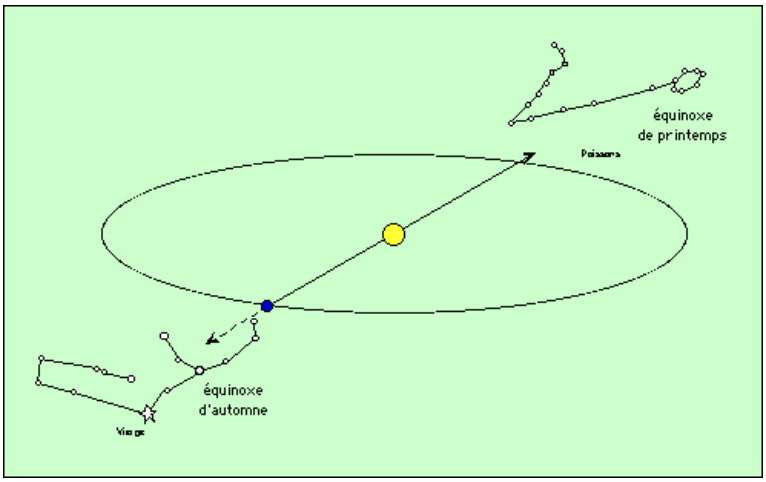
> Il est intéressant de découvrir la mythologie en rapport avec les constellations, car on peut y lire des histoires. Par exemple, on trouve dans le ciel *Céphée*, roi d'Ethiopie, et *Cassiopée* la reine. Cassiopée s'est prétendue plus belle que les Néréides, filles de Poséidon. Furieux, Poséidon envoie un monstre marin, *la Baleine*, ravager les côtes du royaume. Seul moyen de calmer Poséidon, Céphée doit sacrifier sa fille *Andromède* à la Baleine. Il l'attache donc à un rocher de la côte. Mais *Persée*, chevauchant *Pégase* (né du sang de Méduse), arrive en même temps que la Baleine, et lorsque celle-ci se précipite pour dévorer Andromède, il lui présente la tête de Méduse qu'il venait de tuer. A la vue de celle-ci, la Baleine est pétrifiée et Andromède sauvée. 6 constellations sont évoquées dans ce passage.

**Le Zodiaque**

Les constellations zodiacales ont été définies par les Babyloniens. Peuple pastoral, ils ont associé les figures dans le ciel à des périodes de l'année en relation avec l'agriculture. Le ciel leur servait ainsi de calendrier. Une petite explication est nécessaire pour comprendre le sens des signes du zodiaque. Les constellations zodiacales entourent notre système solaire par un grand cercle sur la sphère céleste. *Les Poissons* et *la Vierge*, par exemple, sont à l'opposé l'une de l'autre.

Au cours de l'année, la Terre tourne autour du Soleil, et pour nous, le Soleil se profile devant chaque constellation à son tour. La constellation en question est donc masquée par la lumière du Soleil, et demeure invisible pendant quelques temps. Jusqu'à ce que, la Terre s'étant déplacée, le Soleil ne soit plus devant la constellation.

Au moment de l'équinoxe de printemps, la Terre se trouve dans la position indiquée sur la figure ci-dessous : le Soleil se profile devant les Poissons. Lorsqu'il est midi, c'est donc cette constellation qui culmine dans le ciel (bien qu'on ne puisse la voir). Si vous regardez le ciel à minuit, vous découvrirez donc au méridien la constellation exactement opposée. Si vous connaissez l'ordre de succession des constellations, il est donc facile de savoir dans laquelle se trouve le Soleil : vous regardez quelle constellation culmine à minuiténbsp;; le Soleil est dans celle qui lui est opposée !




Deux constellations sont opposées si l'une se couche lorsque l'autre se lève… L'ordre est le suivant :

| *Méridien à midi* |
|---|

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 21 mar<br>20 avr | 20 avr<br>21 mai | 21 mai<br>22 juin | 22 juin<br>23 juil | 23 juil<br>23 aou | 23 aou<br>23 sep | 23 sep<br>24 oct | 24 oct<br>22 nov | 22 nov<br>22 déc | 22 déc<br>21 jan | 21 jan<br>19 fév | 19 fév<br>21 mar |
| Poissons | Bélier | Taureau | Gémeaux | Cancer | Lion | Vierge | Balance | Scorpion<br>Ophiucus | Sagittaire | Capricorne | Verseau |
| 23 sep<br>24 oct | 24 oct<br>22 nov | 22 nov<br>22 déc | 22 déc<br>21 jan | 21 jan<br>19 fév | 19 fév<br>21 mar | 21 mar<br>20 avr | 20 avr<br>21 mai | 21 mai<br>22 juin | 22 juin<br>23 juil | 23 juil<br>23 aou | 23aou<br>23 sep |
| *Méridien à minuit* | | | | | | | | | | | |

Les dates supérieures correspondent au passage du Soleil au méridien à midi. Donc lorsque la constellation est invisible. Les dates de la ligne inférieure sont décalées de six mois, et indiquent le passage de la constellation au méridien à minuit, donc lorsqu'elle est le plus facilement observable. Vous voyez par exemple que le Sagittaire est au méridien aux alentours de minuit en juin-juillet.

Les Babyloniens ont nommé les constellations zodiacales en fonction de leurs activités de bergers et de paysans. Ainsi, au début du printemps, lorsque naissaient les agneaux, ils ont nommé *Bélier* la constellation dans laquelle se trouvait le Soleil. Au moment des labours, pour lesquels ils utilisaient des bœufs tirant la charrue, la constellation contenant le Soleil a pris le nom de *Taureau*. Le *Cancer* est plus difficile à définir. Si on regarde le soleil couchant tous les soirs au cours d'une année, on le voit se déplacer de soir en soir, du sud vers le nord pendant l'hiver et le printemps, puis du nord vers le sud en été et automne. Lorsque le Soleil change sa marche, autrement dit marche a reculons, il fait penser à une écrevisse. D'où le nom de la constellation associé, Ecrevisse ou Cancer (crabe).

Je crois entendre votre objection : la constellation qui contient le Soleil sur la figure est celle des Poissons, et non le Bélier comme il est dit dans le texte ! Ce n'est pas une erreur, mais la conséquence d'un phénomène astronomique important, nommé *précession des équinoxes*. Au moment où les Babyloniens ont nommé les constellations, le Soleil se trouvait effectivement dans le Bélier au début du printemps. Mais le plan de l'équateur terrestre tourne lentement, et l'équinoxe de printemps est maintenant dans les Poissons. Il n'y restera d'ailleurs plus très longtemps, car il va passer dans le Verseau (le sens de la précession des équinoxes est de droite à gauche dans le tableau ci-dessus).

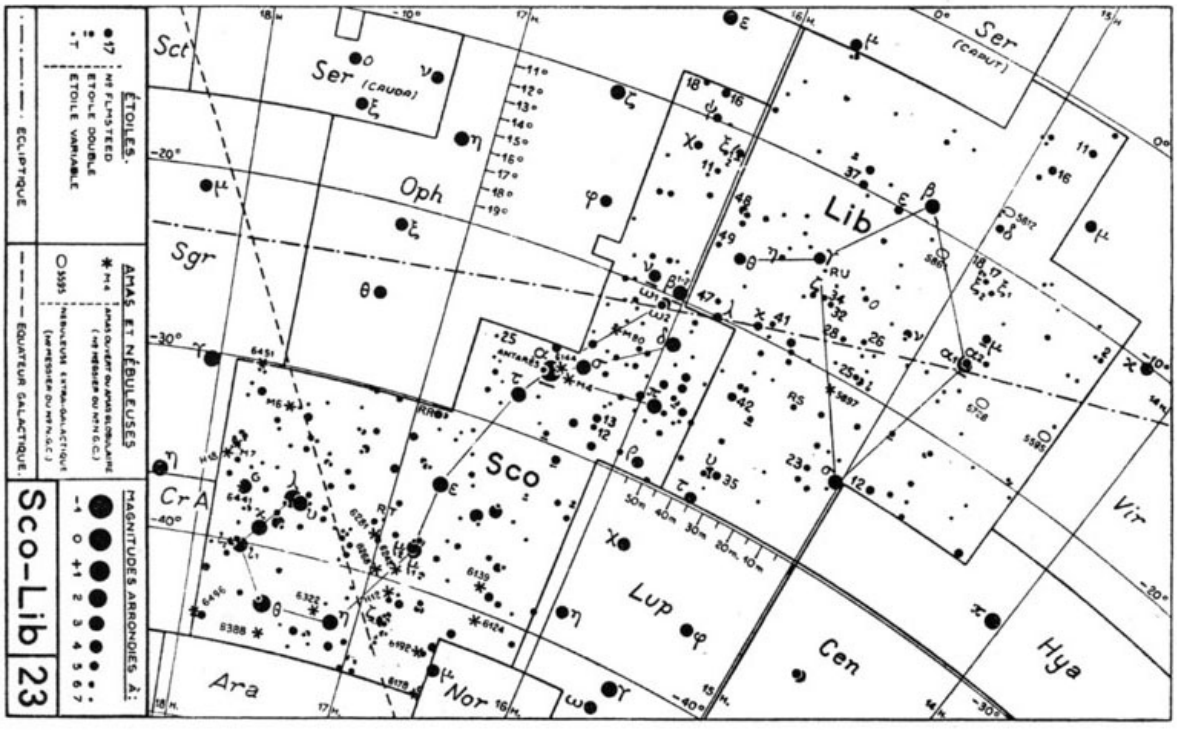
D'une façon analogue, les 12 constellations antiques du zodiaque ont été définies.

Si vous trouvez, dans une documentation, les coordonnées d'un astre, mais pas l'indication de la constellation dans laquelle il se trouve, la petite Applet ci-dessous vous aidera (elle n'utilise pas les limites exactes, très complexes, des constellations, et donne donc plusieurs constallations candidates) :

applet permettant de déterminer la constellation correspondant à des coordonnées équatoriales données.
Vous trouvez les constellations *susceptibles* d'abriter l'objet. Recherchez-le ensuite sur une carte.

Dans l'hémisphère sud, il y a beaucoup plus d'océans que de terres émergées. Et les peuples habitant ces régions ne nous ont pas donné de noms pour les constellations (on n'a peut-être pas trop cherché d'ailleurs). Toujours est-il que ce sont les marins du nord qui, en découvrant ces régions, ont défini et nommé les constellations. On y trouve des choses curieuses : *le Microscope*, *la Machine Pneumatique*, *le Sextant*, *la Boussole*, *la Mouche*, *l'Oiseau de Paradis*, *le Toucan*… Une grande constellation a été définie, qui a pris le nom de *Navire* (Argos). Bien trop grande, cette constellation a été divisée, et chaque morceau a pris le nom d'une partie du navire. C'est ainsi qu'on trouve *les Voiles* et *la Carène*.

La définition usuelle des constellations, dont les frontières étaient floues, était insuffisante pour les besoins des astronomes. Ils ont voulu conserver leurs noms, mais en fixer les limites. C'est ce qu'a fait l'Union Astronomique Internationale (UAI). La carte ci-dessous montre bien la complexité des limites d'une constellation. Ces limites sont parallèles aux axes de coordonnées, et s'adaptent le mieux possible aux contours anciens, arrondis et mal définis.




carte du Scorpion et de la Balance, Société Astronomique de France

L'écliptique est la ligne en double pointillés. Le zodiaque s'étend de 5° de part et d'autre. On remarque sur cette carte que le Scorpion est tout juste dans le zodiaque : la tête seulement en fait partie. Et une autre constellation, *Ophiucus*, *le Serpentaire* en français, se trouve entre le Sagittaire et le Scorpion. De ce fait, le zodiaque comprend maintenant treize constellations et non douze ! (mais ceci a-t-il une importance ?)

**Noms des étoiles**

Les étoiles les plus brillantes et les plus remarquables ont été nommées par les bergers de Mésopotamie. Ensuite, les Grecs, les Egyptiens, les Arabes ont contribué à cette première reconnaissance du ciel.

Voici quelques noms avec une explication :

| nom | explication | origine |
|---|---|---|
| Arcturus | *Arctos oura* : à la queue de l'ourse | grec |
| Antarès | *anti Arès*. Arès est le nom latin de Mars ; Antarès est rouge comme la planète, et supposée rivaliser avec elle | grec |
| Aldébaran | *Al-dabaran* : celle qui est derrière (car elle suit les Pléiades) | arabe |
| Sirius | la brûlante | arabe |
| Spica | *l'Epi* de la Vierge | latin |
| Procyon | *Pro kounos* : avant le chien (elle se lève avant la constellation du Grand Chien) | grec ancien |
| Denebola | *Al danahb al asad* : la queue du lion | arabe |
| Deneb Kaitos | la queue de la baleine | arabe |

Lorsque certaines personnes ont tenté de faire œuvre scientifique en étudiant le ciel, il leur est vite apparu la nécessité de nommer un plus grand nombre d'étoiles. Bayer, en 1603 dans l'*Uranometria*, a choisi de nommer les étoiles avec des lettres grecques, et le nom de la constellation. La plus brillante est appellée α, la seconde plus brillante est β, etc. Les étoiles qui possédaient des noms, les plus brillantes, ont hérité en plus de cette dénomination. Par exemple, α du Lion (*Régulus*) ou bien β du Cygne (*Albireo*). De même, les astronomes ont traduit les noms des constellations en latin, langue morte et donc universelle. Le latin présente des déclinaisons. De ce fait, il faut utiliser le génétif pour nommer les étoiles : on dira α Andromedæ et non pas α Andromede. Pour connaitre tous les noms des constellations et leurs génétifs, vous pourrez consulter le tableau en annexe. Ce tableau présente en plus les abbréviations en trois lettres des noms des constellations, qui ont été également standardisées par l'UAI. L'étoile ci-dessus est alors notée α And, et ceci se lit α Andromedæ.

Ceci permet de nommer un plus grand nombre d'étoiles, mais l'alphabet grec est limité.

Aux alentours de 1700, John Flamsteed a dessiné d'excellentes cartes du ciel, et a classé les étoiles d'ouest en est dans chaque constellation. Joseph Lalande les a ensuite numérotées dans cet ordre. Bien sûr, cette classification s'adresse seulement aux étoiles visibles à l'œil nu. On utilise le numéro de Flamsteed pour les étoiles qui n'ont pas de lettre grecque.

D'autre part, il est très difficile de repérer une petite étoile faible parmi toutes les autres… Seule son *adresse* dans le ciel permet de la retrouver ! L'adresse d'une étoile, ce sont ses coordonnées, mesurées précisément. Alors, les astronomes ont constitué des catalogues contenant des centaines de milliers d'étoiles, avec leurs positions et leurs caractéristiques. Mais il y a dans notre voisinnage, notre Galaxie, 200 milliards d'étoiles ! Aucun catalogue ne peut les contenir toutes… Il faut donc se limiter, et ceci se fait de deux façons différentes :

- en ignorant les étoiles faibles, et cataloguant toutes les étoiles du ciel plus brillante que cette limiteénbsp;;
- en ne considérant que les étoiles ayant des propriétés physiques particulières bien définies, et ignorant toutes les autres, même brillantes.

C'est pour cette raison qu'il existe de nombreux catalogues, chacun ayant été construit dans un but un peu particulier.

Avant de parler des catalogues modernes, il faut dire que les Babyloniens, déjà, avaient constitué des listes rudimentaires d'étoiles. C'était il y a 6.000 ans à peu près. Ensuite, on a connaissance d'un catalogue établi par Hipparque en 127 avant JC, mais il a été détruit. Le premier catalogue ancien dont on dispose est celui de Claude Ptolémée, publié dans l'Almageste en 137 après JC. Il contient 1.028 étoiles. Plus tard, les Arabes au Moyen-Age et Tycho Brahé en 1594 ont constitué des catalogues de même importance. Pour trouver mieux, il faut attendre l'invention de la lunette, et son usage par Galilée.

Les catalogues publiés au XVII$^{e}$ siècle (Lacaille, Bradley, Lalande) contenaient de 10.000 à 47.000 étoiles. Le catalogue d'Argelander publié en 1862 à Bonn, qui a pris le nom de *Bonner Durchmusterung* (Catalogue de Bonn), contenait 324.000 étoiles, et il a été complété en 1886 par 134.000 étoiles de l'hémisphère sud. Les étoiles de ce catalogue sont désignées par les initiales du catalogue BD, suivies de leur numéro. En 1914 a été terminé un autre supplément du BD, nommé *Cordoba Durchmusterung* (Catalogue de Cordoue, initiales CD), et qui contient 570.000 étoiles. Ce travail gigantesque a été fait visuellement… mais avec des télescopes bien sûr, puisque la plupart des étoiles référencées sont invisibles à l'œil nu.

L'apparition de la photographie, permettant d'enregistrer des étoiles plus faibles que celles visibles dans le même instrument, a multiplié encore le volume des catalogues. Il devenait impossible de créer un catalogue de toutes les étoiles, et Kapteyn a proposé de choisir quelques zones d'un degré de côté, et de les cataloguer en détail. Ce sont les *Selected Areas*. Elles sont réparties uniformément sur la sphère céleste. Enfin, signalons *l'Atlas photographique du Palomar*, réalisé à l'aide du grand Schmidt de l'observatoire. Il couvre tout le ciel visible de ce site jusqu'à la 21$^{e}$ magnitude.

L'ensemble de tous les catalogues édités regroupe une quinzaine de millions d'étoiles, ce qui est énorme si on regarde le travail nécessaire, et dérisoire en comparaison du nombre d'étoiles de la Galaxie : 15 millions / 200 milliards, c'est-à-dire 0,0075 % du total…

Un autre catalogue célèbre, qui contient des objets autres que les étoiles, a été réalisé par le français Charles Messier. Ce brave homme était un chercheur de comètes méticuleux (activité importante à son époque). Il observait donc le ciel régulièrement, connaissait par cœur toutes les étoiles visibles avec son instrument, et cherchait tout nouveau point brillant. Les comètes se présentent comme de petites taches floues dans l'oculaire. Or dans le ciel, il y a de telles taches, qui ne sont pas des comètes. Alors, Charles Messier a noté précisément les positions de ces objets, génants pour sa recherche, dans un catalogue qui a pris son nom.

Il se trouve que tous les objets de *Messier* (ceux de son catalogue) se sont avérés être des nébuleuses de gaz (où naissent des étoiles), ou bien des nébuleuses planétaires (reste d'explosions d'étoiles) ou bien encore des galaxies. Son catalogue a été enrichi, et il est toujours en usage. Les objets sont désignés par la lettre M suivi du numéro. Par exemple, la nébuleuse d'Orion est désignée par M 42.

Sans chercher à être exhaustif, il faut encore signaler le catalogue *NGC*, ou *New General Catalog*, établi à la fin du XIX$^{e}$ siècle par Dreyer. Il désigne en particulier les mêmes objets que le catalogue de Messier, mais il est beaucoup plus riche (et plus récent). Les objets de Messier ont donc tous une désignation dans le NGC, mais on les note souvent par leur nom de Messier. Par exemple, la nébuleuse d'Orion est M 42 ou bien NGC 1976. Le catalogue NGC a été étendu par la suite sous le nom de *Index Catalog*, dans lequel les objets sont indiqués pas les deux lettres IC (suivies d'un numéro).

Signalons enfin qu'il existe maintenant des catalogues d'objets très faibles ou même invisibles, mais très brillants dans d'autres longueurs d'onde (radio, ultraviolet, infrarouge, gamma, X). Le catalogue *3C* (3$^{e}$ catalogue des radiosources de Cambridge) est un très important catalogue de radiosources. En 1962, il a été étendu : *3CR*, 3$^{e}$ catalogue de Cambridge révisé.

**Magnitude visuelle**

Les étoiles ont été classées par éclat décroissant par Claude Ptolémée. Il a appellé grandeur l'impression de brillance d'une étoile : les plus brillantes à l'œil nu sont de la première grandeur, les plus faibles de la sixième. Cette définition élémentaire correspond à la capacité de discrimination de l'œil, elle donne une indication grossière insuffisante pour un usage scientifique. En particulier, toutes les étoiles brillantes sont qualifiées de première grandeur, même si leurs éclats sont très différents. On remarque que le nombre qui exprime la grandeur est d'autant plus élevé que l'étoile est moins brillante.

Plus tard, on a remplacé le mot grandeur, imprécis, par celui de magnitude. Les magnitudes déterminées comme précédemment sont appellées *magnitudes visuelles*.

Après l'invention de la lunette, on a prolongé les magnitudes vers le haut (vers les étoiles moins brillantes, invisibles à l'œil nu). Plus performants sont les instruments d'observation, plus faibles sont les étoiles visibles. Et leur nombre augmente très vite avec la magnitude limite accessible :

| magnitude limite | nombre d'étoiles | magnitude limite | nombre d'étoiles |
|---|---|---|---|
| 6 | 3.000 | 14 | 6.500.000 |
| 8 | 23.000 | 16 | 20.900.000 |
| 10 | 165.000 | 18 | 142.000.000 |
| 12 | 1.100.000 | 20 | 506.000.000 |

Une analyse photométrique a montré qu'en passant d'une magnitude à la suivante, l'éclat de l'étoile diminue d'un facteur 2,5. Elle est 2,5 fois moins lumineuse. Donc, si on ajoute 1 à la magnitude, on multiplie la luminosité par 2,5 : ceci prouve que l'échelle des magnitudes est logarithmique, et explique la formule ci-dessous.

Actuellement, on est capable de photographier des étoiles de magnitude supérieure à 30, qui sont 1.000 milliards de fois moins brillantes que les étoiles de première magnitude…

L'éclat apparent d'une étoile dépend de deux choses :

- **sa luminosité, qui caractérise le flot de lumière qu'elle émet**. Une ampoule de 100 W émet plus de lumière qu'une ampoule de 60 W ;
- **sa distance à la Terre**. Une ampoule de 100 W, vue à 100 mètres, semble moins brillante qu'à 10 mètres.

**Magnitude absolue**

On définit maintenant la *magnitude absolue*, comme étant la magnitude qu'aurait l'étoile si elle était à la distance standard de 10 parsecs (32,6 A.L.). Si la magnitude **absolue** d'une étoile est plus petite que celle d'une autre, elle est réellement plus brillante, elle émet davantage de lumière (si vous mettez des ampoules de 60 W et 100 W à 100 mètres de vous, les plus fortes paraîtront plus brillantes).

Si d est la distance de l'étoile en parsecs, M sa magnitude absolue et m sa magnitude visuelle, alors :

$$m - M = 5 \log d - 5$$

La calculette ci-dessous vous permet de calculer l'une des trois variables en fonction des deux autres. Elle vous donne l'expression de chaque variable permettant son calcul, tirée de la définition ci-dessus.

Ici devrait se trouver une applet

Si on connait m (la magnitude visuelle mesurée) et d (sa distance mesurée par une méthode trigonométrique), alors on peut calculer sa magnitude absolue. Par ce moyen, on peut déterminer la magnitude absolue des astres proches (suffisamment pour que la parallaxe puisse être

déterminée). Fort heureusement, cette distance est assez grande pour qu'elle englobe tous types d'astres (hormis les quasars).

**Parallaxe spectroscopique, module de distance**

Réciproquement, si on connait la magnitude absolue d'une étoile, et sa magnitude visuelle, on peut en déduire sa distance. Or certaines étoiles sont si particulières, qu'elles ont toutes la même magnitude absolue (RR Lyræ par exemple). Si on est capable de les reconnaître (par leur spectre…), on connait donc cette dernière. La mesure de leur magnitude apparente permet alors facilement d'évaluer leur distance, grâce à la relation m - M = 5 log d - 5. Cette méthode est nommée *parallaxe spectroscopique*.

On appelle *module de distance* la quantité :

$$m - M$$

**Exemple** : l'amas M3 contient des variables RR Lyræ dont la magnitude absolue est M = 0,6. On les observe à la magnitude apparente m = 15,8. Utilisez la calculette ci-dessus pour calculer la distance de l'amas.

Réponse : 11 kilo parsecs (11.000 pcs).

De la magnitude absolue, on peut déduire la luminosité L par :

$$M = - 2{,}5 \log L + \text{cste} \qquad \text{loi de Pogson}$$

Certaines étoiles, qui étaient classées dans la première magnitude par les Anciens, sont en fait plus brillantes si on effectue une mesure de magnitude à l'aide d'une cellule photoélectrique. On a donc défini aussi des magnitudes négatives. Sirius, par exemple, est de magnitude -1,45.

Pour bien comprendre ce que sont les magnitudes visuelle et absolue, indiquons enfin que le Soleil présente une magnitude visuelle de - 26,72. Elle correspond à une magnitude absolue de +4,8. A 10 parsecs, il serait à peine visible à l'œil nu.

Contrairement à la magnitude visuelle, qui dépend de la distance, la magnitude absolue est une propriété intrinsèque des étoiles ; elle ne dépend que leurs propriétés physiques.

Il faut, pour fixer les choses, donner une valeur à la constante. On la choisit telle que les magnitudes absolues du Soleil soient : $M_B = 5{,}48$ dans la bande spectrale autour de 0,436 µm (*bande B*), et $M_V = 4{,}83$ dans la bande autour de 0,545 µm (*bande V*).

**Magnitude absolue bolométrique**

Cette dernière remarque montre que l'on peut définir la magnitude absolue dans un domaine restreint de longueurs d'onde. Ceci permet de comparer les couleurs des étoiles. Mais *a contrario*, on peut considérer la magnitude absolue correspondant à tout le domaine spectral. On parle alors de *magnitude absolue bolométrique*. Elle considère l'ensemble de la lumière émise, y compris dans l'infrarouge et l'ultraviolet. Certaines étoiles brillent plus dans l'un de ces domaines que dans le visible.

## *Les positions*

**Distance des étoiles**

Pour les Anciens, les étoiles étaient toutes à la même distance de nous, collées sur la sphère céleste. Mais n'oublions pas que la Terre était au centre de cette sphère, il ne pouvait donc pas y avoir de mouvements des étoiles. Lorsque Copernic a introduit son système héliocentrique, il est devenu évident que la Terre devait se déplacer au cours de l'année autour du Soleil, et que les étoiles devaient présenter un mouvement apparent pour nous. Exactement de la même manière que les arbres du paysage semblent défiler devant nous quand nous déplaçons en train. Or ce mouvement apparent des étoiles n'était pas détectable. Les détracteurs du système héliocentrique en ont fait un argument contre cette idée, alors que ses partisans en ont conclu que les étoiles devaient être très loin ! En effet, les objets lointains ne changent guère de position apparente si on se déplace peu. De notre train, la montagne au loin semble immobile.

On sait bien maintenant que Copernic avait raison, et que les étoiles sont très loin. La mesure de leurs distances est un problème très difficile, qui a été résolu il y a peu de temps. Les étoiles nous apparaissent comme des points sur la voûte céleste. De notre point d'observation (la Terre) nous n'avons pas la profondeur. Donc pas les moyens de mesurer des distances sans mettre en œuvre des méthodes spéciales.

La diversité de ces méthodes se justifie par leur domaine d'application : la plus précise se limite au voisinage très proche du Soleil. Plus loin, il faut utiliser une méthode moins directe, moins précise. Et plus on s'éloigne, plus la précision des critères se dégrade. Cependant, il existe plusieurs méthodes pour estimer la distance d'une étoile donnée : en les comparant, on arrive à une valeur assez précise.

Toutefois, toutes les méthodes sont basées sur les propriétés physiques des étoiles, et leur précision dépend de la stabilité de ces propriétés. Il convient donc d'étudier en priorité la structure et l'évolution des étoiles. L'étude des distances fait l'objet d'un chapitre à part.

Pour la mesure des distances stellaires, l'unité que nous avons définie pour les planètes ne convient pas. On a défini deux nouvelles unités, *l'année-lumière* et le *parsec*.

L'*année-lumière* est la distance parcourue par la lumière en une année. Comme la lumière se déplace à 300.000 km par seconde, il suffit de multiplier ce nombre par le nombre de secondes qu'il y a dans l'année. Ce nombre de secondes est : 60 × 60 × 24 × 365 = 31.536.000 secondes. L'année-lumière vaut donc enkilomètres :

31.536.000 × 300.000 = 9.460.800.000.000 km, soit approximativement (on n'en est pas à quelques milliards de kilomètres près)

10.000.000.000.000 km.

On peut lire : 10.000 milliards de km. On retiendra :

$$1 \text{ AL} = 10^{13} \text{ km.}$$

L'étoile la plus proche est située à 4,2 années-lumière. Notre galaxie mesure 100.000 années-lumière, et les plus lointaines galaxies connues sont à une dizaine de milliards d'années-lumière…

L'année-lumière pose un problème qui est important en physique : elle définit une nouvelle unité qui n'a aucun rapport avec les précédentes. Puisqu'une année-lumière vaut 9.460.800.000.000 km, et l'unité astronomique 149.597.870,66 km, on en déduit facilement que 1 AL = 63.242 UA. On dit que ces deux unités sont rattachées l'une à l'autre, mais elles sont de nature différente.

**Mouvements propres**

Les mouvements que nous avons évoqués à propos de la mesure des distances étaient des mouvements apparents, produits par la rotation de la Terre autour du Soleil. Ceux que nous allons voir maintenant sont des déplacements des étoiles elles-mêmes, les unes par rapport aux autres. Pour différencier ces deux types de mouvements, il y a un critère simple : les mouvements apparents dus à la rotation de la Terre autour du Soleil sont périodiques, de périodes 1 an. Les mouvements propres des étoiles sont non périodiques, ils vont toujours dans le même sens (à cause du principe d'inertie).

Les étoiles se déplacent donc, mais tellement lentement en projection sur la sphère céleste qu'il faut des mesures très précises pour détecter leurs mouvements. Ou alors…

Les mouvements propres des étoiles ont été découverts par Sir Edmund Halley, celui de la comète. Il a comparé les positions de certaines étoiles brillantes mesurées en 1718, à celles faites dans l'Antiquité. Le temps séparant les deux séries de mesures est assez long pour que le déplacement soit très supérieur aux erreurs de mesure. Il a ainsi mis fin au dogme de la sphère des fixes. Il a notament déterminé les mouvements propres d'Arcturus et d'Aldébaran. Sa méthode utilisait donc des mesures de précision médiocre (de l'ordre de la minute dans l'Antiquité), mais un temps très long pour que le déplacement soit très important.

Maintenant, les moyens d'observation permettent de déterminer les mouvements propres de nombreuses étoiles, notamment grâce à la précision des données du satellite Hipparcos, de l'Agence Spatiale Européenne.

L'étoile possédant le mouvement propre le plus important est l'étoile de Barnard ; elle se déplace sur le ciel de 10,3" par an. C'est une petite étoile de magnitude 10. L'étoile de Kapteyn se déplace de 8,8" par an. On voit que ces valeurs sont très faibles, c'est pourquoi les étoiles semblent fixes en première approximation.

Ces étoiles sont toutes proches, car sinon la distance interdit de mesurer les mouvements propres dans un temps raisonnable. Pour les étoiles dont le mouvement propre et la distance sont connus, il est possible de déterminer la vitesse linéaire en projection sur la sphère céleste (en km/s).

| nom | distance AL | parallaxe | mvt propre | vitesse tangentielle km/s | vitesse radiale km/s | vitesse résultante km/s | magnitude |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| étoile de Barnard | 6,1 | 0,552" | 10,31" | 88 | -108 | 139 | 9,7 |
| étoile de Kapteyn | 12,7 | 0,256" | 8,81" | 163 | +245 | 294 | 9 |
| 9352 Lacaille | 12 | | 6,9" | | +10 | | 7,4 |
| CD -37° 15 492 | 15,5 | | 6,09" | | +24 | | 8,3 |
| 61 Cygni | 11,1 | 0,294" | 5,21" | 84 | -64 | 105 | 5,6 |
| Wolf 359 | 8,0 | 0,429" | 4,70" | 52 | +13 | 54 | 13,5 |
| ε Indien | 11,2 | 0,291" | 4,69" | 76 | -40 | 89 | 4,7 |
| O2 Eridani A | 15,9 | 0,205" | 4,08" | 94 | -43 | 104 | 4,5 |
| Proxima Centauri | 4,3< | 0,762 | 3,85" | 24 | -16 | 29< | 0,3 |
| Lalande 21185 | 7,9 | | 4,78" | | -87 | | 7,6 |
| BD +5° 1 668 | 12,4 | | 3,73" | | +22 | | 10,1 |
| 8760 Lacaille | 12,5 | | 3,46" | | +22 | | 6,6 |
| étoile de Van Maanen | 13,2 | | 2,98" | | +238 | | 12,3 |

Nous avons vu que les constellations ne sont que des apparences dues à la perspective. Puisque les mouvements propres des étoiles changent leurs positions respectives au cours du temps, les constellations doivent se déformer. C'est le cas par exemple de la Grande Ourse, qui était très différente il y a 100.000 ans, et qui sera encore autre dans 100.000 ans. L'animation ci-dessous vous montre son évolution passée et future.

En pointant une étoile avec la souris, vous ferez apparaître son nom. Vous pouvez aussi arrêter et reprendre l'animation grâce au bouton "départ/arrêt".

Ici devrait se trouver une applet
Evolution de la Grande Ourse

Seules les étoiles principales de la Grande Ourse sont figurées. Mais celles des constellations alentour se déplacent aussi. L'animation est centrée sur Mégrez, qui y est donc apparemment fixe.

Glissez la souris sur une étoile pour afficher son nom.

Il est facile de voir que Benetnash, il y a 100.000 ans, nous aurait paru appartenir à un autre astérisme car elle était éloignée des autres étoiles qui constituent la Grande Ourse actuelle. De même, dans le futur, Benetnash, Mizar, Alioth, Mégrez et Phegda formeront un astérisme bien évident. Dubhé et Mérak, trop éloignées, pourraient appartenir à une autre constellation, avec d'autres étoiles dont elle se seront rapprochées…

Les constellations ne sont vraiment que des illusions d'optiques dues aux positions de la Terre et des étoiles constituantes. Elles sont aussi irréelles que le dessin fait à un instant donné par les voitures rouges circulant dans une ville.

Qu'en pensent les astrologues ?

**Projection du mouvement sur la sphère céleste**

Les mouvements propres des étoiles se font dans n'importe quelle direction, sans rapport avec la direction d'observation depuis la Terre. Les mouvements dont nous venons de parler sont la projection du mouvement réel sur la sphère céleste, on les appelle *mouvements tangentiels* (parce que c'est la projection du mouvement sur la tangente à la sphère céleste). La projection perpendiculaire se fait selon l'axe de visée ; on l'appelle *mouvement propre radial* (suivant le rayon de la sphère céleste). Le mouvement propre radial n'entraîne aucun déplacement par rapport aux autres étoiles (une voiture qui vient droit vers vous ne semble pas se déplacer par rapport aux arbres du paysage). Le seul moyen de détecter ce déplacement est la spectroscopie.

Les vitesses mesurées sont comprises entre 20 et 60 km/s pour la grande majorité, mais les plus rapides atteignent jusqu'à 600 km/s.

Nous allons passer maintenant aux propriétés physiques des étoiles.

## *Propriétés physiques*

**Masse d'une étoile**

Comme pour la distance, la masse d'une étoile est très difficile à mesurer, sauf cas particulier. Son observation ne nous apprend rien à ce sujet. Mais certaines étoiles sont doubles, et tournent l'une autour de l'autre. Dans un tel cas, l'application des lois de la gravitation, ou plus simplement d'une version améliorée des lois de Kepler, nous permet de calculer les masses des composantes.

On considère une étoile double, dont les composantes ont les masses inconnues $M_1$ et $M_2$. On mesure le demi-grand axe a de leur orbite (celle de A autour de B supposée fixe), et leur période orbitale T. On en déduit la somme s de leurs masses par application de la troisième loi de Kepler :

$$a^3 / T^2 = M_1 + M_2 = s$$

Par observation prolongée des deux étoiles, on peut tracer leur trajectoire sur le ciel. Leur centre de gravité commun suit une droite, et les étoiles oscillent autour de cette droite. D'autant plus que l'étoile est plus légère. Donc, le rapport des écarts à cette droite donne le rapport des demi grands axes $a_1 / a_2$ qui est égal à l'inverse du rapport des masses :

$$M_1 / M_2 = a_2 / a_1 = k$$

Maintenant, on connait donc la somme et le rapport des masses, on peut déterminer chacune :

$$M_1 = k\, M_2 \; ; \; s = k\, M_2 + M_2 = (k + 1)\, M_2 \qquad M_2 = s / (k + 1)\text{anbsp;;}$$

$M_1$ se déduit facilement par $M_1 = k\, M_2$.

Toutes les étoiles ne sont pas doubles, et donc beaucoup échappent à cette méthode. Nous n'avons aucun moyen direct de mesurer la masse des étoiles simples. Mais la théorie des étoiles nous apprend que d'après leurs propriétés physiques, on peut les classer en divers types. Et que des étoiles de même type ont la même masse.

Alors, si on trouve quelques étoiles de chaque type faisant partie d'un couple, on pourra en déduire leur masse, et par suite celle des étoiles simples de même type.

Dans le cas particulier du Soleil, la mesure de la masse est très simple, car on dispose de tout son cortège planétaire pour appliquer les lois de Kepler. On trouve 2.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000 kg.

Avez-vous réussi à lire ce nombre ? Vous pouvez l'exprimer en tonnes, ça supprimera toujours 3 zéros…

On peut le réécrire sous la forme $2\ 10^{30}$ kg, qui est plus lisible, mais guère plus évocatrice…

Devant la difficulté à manier des nombres pareils, qui n'ont guère de signification pour nous, les astronomes ont mis en usage une unité plus pratique : tout simplement la masse du Soleil ! La masse d'une étoile sera donc donnée en masses solaires, ce qui est noté $M_\odot$. Une étoile de 2 $M_\odot$ est donc deux fois plus massive que notre Soleil. Ainsi, les masses sont directement comparables.

On a observé des étoiles de masses très diverses, comprises entre 0,08 $M_\odot$ et 120 $M_\odot$.

Nous verrons que **la masse est le paramètre le plus important d'une étoile** ; c'est lui qui détermine en particulier sa durée de vie et son évolution.

On retiendra :

$$\mathbf{1\ M_\odot = 2\ 10^{30}\ kg}$$

La masse d'une étoile n'est pas quelconque. On peut considérer qu'elle est comprise entre les valeurs suivantes :

$$\mathbf{0{,}08\ M_\odot < M_* < 120\ M_\odot}$$

- la limite inférieure correspond à une température centrale (7 millions de degrés) juste suffisante pour permettre la fusion de l'hydrogène. Elle est définie par les propriétés physiques de l'hydrogène, et par la gravitation. Au-dessous de cette limite, la fusion du deutérium (hydrogène lourd) est possible. Mais cet isotope est rare, et la production d'énergie restera très faible. Les dont la masse est comprise entre 0,01 et 0,08 $M_\odot$ sont des *naines brunes* : on qualifie ainsi des étoiles qui possèdent une source d'énergie propre par le deutérium, mais qui sont incapables de fusionner l'hydrogène. Au dessous de 0,01 $M_\odot$, ce sont des planètes (aucune production d'énergie nucléaire).
- la limite supérieure est beaucoup moins bien définie, car elle dépend de nombreux paramètres. En fait, rien n'interdit la formation d'étoiles plus massives que 120 $M_\odot$, mais le débordement d'énergie nécessaire pour éviter leur écrasement gravitationnel est tel, qu'elles sont instables : les couches extérieures sont violemment expulsées. Un bel exemple nous est donné par η Carinæ, qui atteint 150 $M_\odot$.

| Masse | Type |
|---|---|
| $M^* < 0{,}01\ M_\odot$ | planète |
| $0{,}01\ M_\odot < M^* < 0{,}08\ M_\odot$ | naine brune |
| $0{,}08\ M_\odot < M^*$ | étoile |

Un moyen pratique de se rappeler l'intervalle de masse des naines brunes : en anglais, elles sont comprises entre *seventeen* (17) et *seventy* (70) masses joviennes.

**Luminosité**

La *luminosité* d'une étoile représente la quantité d'énergie qu'elle émet dans l'espace à chaque seconde. Elle concerne toutes les longueurs d'onde, de l'infrarouge jusqu'à l'ultraviolet. Or seul le visible est… visible ! Donc, la luminosité mesurée simplement d'après les observations télescopiques ne concerne que ce domaine. Si on mesure réellement toutes les longueurs d'onde, on utilise la magnitude absolue bolométrique, et on l'utilise pour déterminer la luminosité exacte de l'étoile.

La luminosité varie dans de très grandes proportions. Pour s'en rendre compte, il faut mesurer la brillance apparente des étoiles, et mesurer leur distance. On en déduit la quantité de lumière qu'elles émettent, donc leur luminosité. La mesure de la distance est difficile, et même à l'heure actuelle elle n'est très précise que pour les étoiles assez proches. Malgré tout, le satellite européen Hipparcos a fait faire à la mesure des distances un bond d'un facteur 10. Et parmi toutes les étoiles dont on connait bien la distance, on rencontre tous les types spectraux. On peut en déduire des lois :

$$\mathbf{0{,}005\ L_\odot < L_* < 900.000\ L_\odot}$$

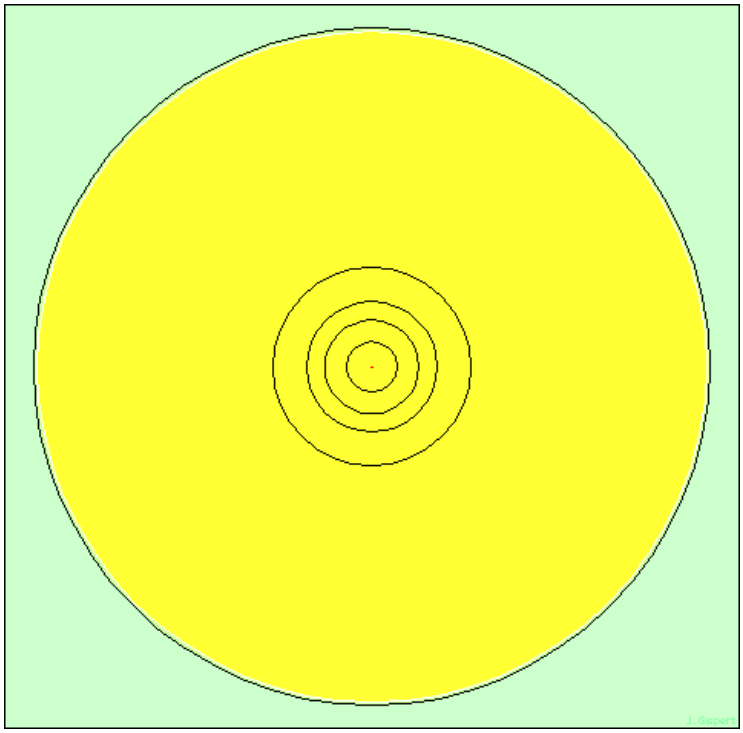
Les étoiles les moins lumineuses sont 200 fois moins brillantes que notre Soleil, et à l'opposé les plus brillantes rayonnent 900.000 fois plus que lui !

**Rayon**

Les tailles des étoiles sont aussi fort diverses :

$$\mathbf{0{,}02\ R_\odot < R_* < 1.100\ R_\odot}$$

Le rayon du Soleil est de 700.000 km. La plus petite étoile a donc un rayon de 0,02 × 700.000 = 14.000 km (c'est seulement le double du rayon de la Terre). Par contre, la plus grosse a un rayon de 770 millions de kilomètres. C'est la distance de Jupiter au Soleil, ce qui signifie que si cette étoile était à la place de notre Soleil, Mercure, Vénus, la Terre, Mars et Jupiter seraient à l'intérieur…



Le système solaire avec une étoile géante

Ce schéma montre une étoile de taille maximum (en jaune), le Soleil (le petit point rouge au centre, très grossi…), avec les orbites des planètes Mercure, Vénus, la Terre, Mars et Jupiter.

Les premières estimations de la taille des étoiles ont été faites d'après des mesures de luminosité, et de température superficielle. A température égale, les plus lumineuses sont les plus grosses. De cette constatation sont venues les appellations d'étoiles géantes, et de naines. Il n'y a rien d'étonant, en voyant ce schéma, de penser que le Soleil est une naine…

## *Relations importantes*

On a trouvé empiriquement des relations entre la masse d'une étoile (de la Séquence Principale) et son rayon ou bien sa luminosité. Attention, ces relations n'indiquent pas comment se comporte une étoile particulière, mais comment varient les propriétés des étoiles lorsqu'on considère des masses croissantes.

Ces relations ont été retrouvées par la théorie, et donnent une idée des propriétés d'une étoile particulière. Il est évident que si l'on veut une plus grande précision, on doit effectuer un calcul direct. Or les équations qui représentent la structure stellaire sont des équations aux dérivées partielles couplées, qui n'admettent pas de solution analytique générale. Pour un cas particulier donné, il faut faire une intégration numérique adaptée.

### Relation masse-rayon

Les lois de puissance sont des formes particulières simples qui permettent d'estimer l'évolution d'une grandeur en fonction d'une autre. Une loi de puissance est de la forme générale

$$y = x^k$$

Cette loi donne la valeur de y en fonction de celle de x. Si $k > 1$, y croît plus vite que x. Si $0 < k < 1$ y croît moins vite que x. Si $k = 0$, y est constante, et vaut toujours 1. Enfin, si $k < 0$, y décroît lorsque x croît; $x^k = 1 / x^{-k}$ (si k est négatif, -k est positif). Bien sûr, plus k est grand, plus la variation de y sera rapide.

L'intérêt de ces lois de puissance est la possibilité d'effectuer les calculs analytiques jusqu'au bout. On s'en sert souvant dans la théorie des étoiles. Un cas particulier très important est les *modèles polytropiques* : on nomme ainsi les modèles dans lesquels la pression interne est une loi de puissance de la masse volumique. Ce cas particulier est totalement intégrable, et donne une solution analytique de la structure stellaire. Malheureusement, les étoiles réelles ne sont pas polytropiques… sauf quelques cas particuliers ! Les naines blanches en font partie, et on connait donc leur structure.

Pour les naines, il existe deux relations masse-rayon, selon la masse de l'objet, différant de la valeur de l'exposant :

| | |
|---|---|
| $M \leq 1{,}1\ M$ | $R = M^{0{,}57}$ |
| $M > 1{,}1\ M$ | $R = M^{0{,}80}$ |

La masse étant donnée en masses solaires, le rayon est obtenu en rayons solaires. Si donc $M = 1$, on obtient $R = 1$.

La limite entre les deux relations possède un sens physique : les étoiles de masse inférieure à 1,1 masses solaires ont un intérieur radiatif et une enveloppe convectives, c'est le contraire pour les autres. Cette limite sépare la Séquence Principale en *Séquence Principale inférieure*, et *Séquence Principale supérieure*.

**Relation masse-luminosité**

On observe, et on justifie théoriquement, une relation de même type entre la masse et la luminosité d'une étoile de la Séquence Principale.

| | |
|---|---|
| $M \leq 1\ M$ | $L = M^{3,2}$ |
| $M > 1\ M$ | $L = M^{3,88}$ |

**Classes spectrales**

Quand on regarde attentivement le ciel, on arrive à distinguer quelques étoiles colorées. C'est le cas par exemple, en hiver, des deux magnifiques étoiles d'Orion : Bételgeuse et Rigel. On voit bien que Bételgeuse est rouge, et Rigel bleue. Cette différence d'apparence traduit une différence de propriétés physiques.

Si vous placez un morceau de fer dans une forge, il va commencer à briller lorsque sa température atteint les 800°. Il est alors rouge sombre. Si on continue le chauffage, il va passer au rouge vif, puis au blanc si on insiste. D'où l'expression *chauffé à blanc*. Par analogie, on en déduit que la couleur d'une étoile va nous renseigner sur sa température.

Mais la couleur est difficile à apprécier, et ce ne sera pas un bon critère direct de classement. En fonction de la température, les divers éléments chimiques émettent de la lumière, tout comme le morceau de fer. Mais la lumière émise par un gaz est particulière, constituée de quelques couleurs précises uniquement. Tout ceci est expliqué dans un chapitre sur les propriétés de la lumière.

On analyse donc la lumière de l'étoile à travers un prisme (ou à travers un réseau plus souvent). Selon les raies d'absorption observées, on sépare les étoiles en un certain nombre de classes définies ci-dessous :

| classe | caractéristiques spectrales | couleur | indice de couleur | température effective | exemple |
|---|---|---|---|---|---|
| O | He II, He I | bleue | -0,3 | 28.000 - 50.000 | κ Per, ε Ori |
| B | C | bleu-blanc | -0,2 | 9.900 - 28.000 | Rigel, Spica |
| A | H | blanche | 0,0 | 7.400 - 9.900 | Véga, Sirius |
| F | métaux, H | jaune - blanc | 0,3 | 6.000 - 7.400 | Procyon |
| G | Ca II, métaux | jaune | 0,7 | 4.900 - 6.000 | Soleil, α Cen A |
| K | Ca II, Ca I, autres molécules | orange | 1,2 | 3.500 - 4.900 | Arcturus |
| M | TiO, autres molécules, Ca I | rouge | 1,4 | 2.000 - 3.500 | Bételgeuse |
| R | Cn, C2 | rouge-orangé | 1,7 | 3.500 - 5.400 | … |
| N | C2 | rouge | > 2 | 1.900 - 3.500 | R Lep |
| S | ZrO, autres molécules | rouge-orangé | 1,7 | 2.000 - 3.500 | R Cyg |

**Tableau des classes spectrales**

Les étoiles O par exemple montrent dans leur spectre des raies d'absorption de l'hélium ionisé (He II) et de l'hélium neutre (He I). Les étoiles B présentent des raies du carbone, mais plus de l'hélium. C'est dû au fait que l'hélium s'ionise à une très haute température, atteinte dans les étoiles O, mais pas dans les B. On remarquera qu'à partir de la classe K apparaissent des raies de molécules. Or les molécules sont fragiles, facilement détruites par la chaleur. Leur présence montre que ces étoiles sont beaucoup moins chaudes.

Les étoiles R et N sont les étoiles carbonées. Ce sont toutes des géantes. Les S sont à faible teneur en carbone.

Remarquez que la température n'est pas un critère de distinction entre les classes spectrales : les étoiles de classes M, S et N ont les mêmes intervalles de températures, mais des compositions différentes.

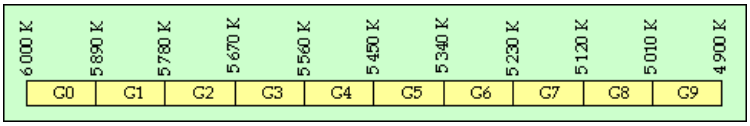
A l'intérieur de chaque classe, les étoiles sont numérotées de 0 à 9. La valeur 0 correspond aux étoiles les plus chaudes, et 9 aux moins chaudes. Ainsi, la classe G par exemple est divisée en G0, G1, … G9, les étoiles G0 ayant une température d'à peu près 6.000 K alors que les G9 n'ont que 4.900 K.

**Exemple** : La température du Soleil étant d'à peu près 5.700 K, et ses principales raies spectrales étant celles du Calcium ionisé et des métaux, quelle est sa classe ?

Tout d'abord, le tableau ci-dessus montre que les étoiles ayant ces raies principalement sont de classe G. Il reste à déterminer la sous-classe.

La classe G va de 4.900 à 6.000 K. Elle s'étend donc sur un intervalle de 6.000 - 4.900 = 1.100 K.

Réparti sur dix sous-classes, cela donne 110 K par classe ; les sous-classes se répartissent donc ainsi :




Il suffit de lire ce tableau pour voir que le Soleil est de classe G2.

Pour être complet sur ce sujet, il faut considérer un ensemble de lettres qui viennent parfois modifier le type spectral, pour rendre compte de certaines particularités. On distingue des préfixes et des suffixes :

| **Prefixes** | | |
|---|---|---|
| D | **D**egenerate | |
| d | **d**warf | Ancienne notation, on dit maintenant classe V (voir plus bas) |
| sd | **s**ub**d**warf | remplacé par classe VI |
| **Suffixes** | | |
| e | raies d'**é**mission | produites par un nuage chaud entourant l'étoile, ou par sa couronne |
| m | raies **m**étalliques intenses | |
| n | raies d'absorption **n**ébulaires | dues en général à une rotation rapide |
| neb | spectre **néb**ulaire mélangé à celui de l'étoile | |
| p | **p**eculiar | un élément chimique présente des raies anormalement abondantes |
| var | **var**iable | |
| wl | **w**eak **l**ines | raies faibles, caractérisant de vieilles étoiles pauvres en métaux |

**Exemple** : Proxima Centauri est de type dM5e

**Classes de luminosité**

La seconde propriété physique importante pour caractériser une étoile est basée sur la quantité de lumière qu'elle émet. A l'œil nu, on voit des étoiles d'éclat variable, mais cette apparence fait intervenir la distance. La magnitude absolue caractérise l'éclat des étoiles, elle est donc une mesure de la quantité de lumière émise.

Cette quantité dépend de deux paramètres :

- la quantité de lumière émise par unité de surface ;
- la surface émettrice.

Prenons deux morceaux de fer, l'un ayant une surface double de l'autre. A la même température, le premier émet deux fois plus de lumière.

Les étoiles se comportent de la même façon. A une même température, celle qui émet deux fois plus de lumière a une surface double. Cette remarque a permis de définir les classes de luminosité :

| classe | type d'étoile | exemple |
|---|---|---|
| O | supergéantes extrêmement lumineuses, hypergéantes | ρ Cas, S Dor |
| Ia | supergéantes lumineuses | Bételgeuse, Deneb |
| Ib | supergéantes moins lumineuses | Antarès, Canopus |
| II | géantes brillantes | Polaris, H Lyrae |
| III | géantes | Aldébaran, Arcturus, Capella |
| IV | sous-géantes | sous-géantes |
| V | Séquence Principale (naines) | Soleil, α Cen, Sirius, Véga, 61 Cyg |
| Sd | sous-naines | … |
| D | naines blanches | Sirius B, Procyon B, 40 Eri B |

Les noms des classes appellent une explication. Lorsqu'on a compris qu'une grande luminosité correspond à une grande surface, donc un grand diamètre, on a réalisé qu'il existait des étoiles beaucoup plus grosses que notre Soleil, et on les a baptisées Géantes. On en a trouvé de plus grosses encore, dites supergéantes. On a alors réalisé que notre Soleil était finalement une toute petite étoile, donc une naine…

Et au bout du compte, il n'y a pas d'étoiles normales ! ! (tout au moins pour la taille).

La classe V, celle des naines, est qualifiée aussi de *Séquence Principale*. Ce terme vient du diagramme de Hertzprung-Russel, que nous étudierons plus loin.

Le Soleil étant une naine de la Séquence Principale, est de classe V. Sa dénomination complète est donc G2 V.

**Naines et géantes**

Comment a-t-on découvert l'existence d'étoiles naines et géantes, *i.e.* comment a-t-on pu avoir une idée de leur diamètre, alors que celui-ci était (est encore dans la plupart des cas) totalement inobservable directement ?

Très simplement parce qu'on a observé des étoiles de même température superficielle qui ont des éclats très différents. Une même température de surface implique une même quantité de lumière émise, pour chaque $m^2$. Alors, celle qui brille le plus a davantage de $m^2$ !

Explicitons :

- la température de surface est connue par l'analyse de la lumière : on détermine dans le spectre la longueur d'onde où se trouve l'intensité lumineuse maximum, et par la loi de Stéfan-Boltzman, on en déduit la température (c'est ainsi qu'on a mesuré la température de surface du Soleil). On en déduit la quantité de lumière émise par $m^2$.
- on peut mesurer la magnitude visuelle de l'étoile, qui indique son éclat apparent, fonction de sa distance. Pour savoir quelle est la brillance réelle de l'étoile, il faut faire abstraction de sa distance, qui affaiblit son éclat.
- si l'étoile est assez proche, on peut mesurer sa parallaxe, qui nous donnera sa distance.
- la magnitude visuelle et la distance nous donnent la magnitude absolue, qui mesure l'éclat intrinsèque de l'étoile.Nous connaissons maintenant la quantité de lumière émise par $m^2$ (point 1) et la quantité totale de lumière émise (point 3) ; il suffit de faire une division pour obtenir la surface de l'étoile.

On a ainsi montré que certaines étoiles, de haute température superficielle, émettaient peu de lumière ; donc leur surface était faible : ce sont les **naines blanches**. On a montré par ailleurs que d'autres étaient assez froides (2.000° de température superficielle) et pourtant étaient très lumineuses : ce sont les **géantes rouges**.

Plus tard, on a obtenu pour quelques étoiles des mesures plus directes de leur diamètre, qui ont confirmé cette explication.

**Durée de vie sur la Séquence Principale**

Eddington a montré que, pour maintenir son équilibre, une étoile doit rayonner une quantité d'énergie proportionnelle à $M^{3,5}$.

Nous allons en déduire l'ordre de grandeur de la durée de vie de l'étoile :

La durée de vie de l'étoile est :

- d'autant plus grande que sa réserve d'énergie est plus grande,
- et d'autant plus petite que la production d'énergie est plus rapide.

On en déduit qu'elle est proportionnelle à la réserve d'énergie, et inversement proportionnelle au taux de production d'énergie :

durée de vie = réserve d'énergie / taux de production

La réserve d'énergie est proportionnelle à la masse M de l'étoile (plus il y a d'hydrogène, plus elle peut en brûler ; elle brûlera seulement ce qui se trouve dans le cœur, mais c'est une proportion constante) ; on peut donc remplacer ce terme par M. Quand au taux de production de l'énergie, nous avons vu qu'il est proportionel à $M^{3,5}$. Notons V la durée de vie. Elle est donc proportionnelle à :

$$\text{durée de vie} = V \quad M / M^{3,5} = 1 / M^{2,5}$$

$$V \propto \frac{1}{M^{2,5}}$$

Le symbole mathématique $\propto$ signifie : *proportionnel à*. Il indique que V est égal à $1 / M^{2,5}$ multiplié par une constante : $V = k / M^{2,5}$. Si on veut préciser, il reste à déterminer cette constante.

On exprimera la masse en *masses solaires* M . La formule doit donner, en particulier, la bonne durée de vie pour le Soleil. Donc si M = 1 M , V = 10, en milliards d'années. Donc $10 = k / 1^{2,5} = k$. On substitue cette valeur k = 10 dans la formule, et on obtient :

**$V = 10 / M^{2,5}$ milliards d'années**

Calculons la durée de vie de quelques étoiles :

| **masse, en M** | **durée de vie** | | |
|---|---|---|---|
| | **× vie solaire** | **en milliards d'années** | **en millions d'années** |
| 0,08 | 552 fois | 5.500 | |
| 0,5 | 5,6 fois | 56 | |
| 1 | 1 fois | 10 | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 2 | 0,15 fois | 1,8 | |
| 5 | 0,08 fois | | 200 |
| 10 | 0,003 fois | | 30 |
| 20 | 0,0005 fois | | 6 |
| 40 | 0,00009 fois | | 1 |
| 60 | 0,00004 fois | | 0,4 |
| 100 | 0,00001 fois | | 0,1 |
| 150 | 0,000003 fois | | 0,04 |

On peut maintenant faire un calcul inverse : fixons une durée de vie, et calculons la masse de l'étoile :

$V = 10 / M^{2,5}$ $V \times M^{2,5} = 10$ $M^{2,5} = 10 / V$ $M = (10 / V)^{1 / 2,5} = (10 / V)^{0,4}$

$$M = (10 / V)^{0,4}$$

Prenant V = 13,7 milliards d'années, on trouve M = 0,88 M .

13,7 milliards d'années représente l'âge de l'Univers. Toutes les étoiles de masse inférieure à 0,88 M , qui se sont formées juste après le Big Bang, ont une durée de vie supérieure à l'âge de l'Univers, et n'ont donc pas fini leur vie (sur la Séquence Principale). Seule la théorie peut donc nous renseigner sur leur avenir.

Enfin, voici une animation qui vous permettra de voir la forme de la courbe. Les valeurs de la masse ont été limitées à l'intervalle de 0,2 à 5 masses solaires, car vous constaterez que la courbe tombe très très vite, lorsque la masse augmente un peu : elle est très creuse. Avec un intervalle plus grand, le creux serait encore plus marqué, et la courbe illisible.

animation
Courbe masse/durée de vie

Déplacez le curseur pour considérer des étoiles de diverses masses. Dans la partie haute, vous verrez les valeurs de la masse et de la durée de vie correspondante. Observez les variations très rapides pour les petites masses.

**Température superficielle**

On la note en général $T_{eff}$ (pour température effective).

$$\mathbf{2.000\ K < T_{eff} < 150.000\ K}$$

La température effective du Soleil est de 5.770 K. On voit donc qu'il est parmi les étoiles les plus froides. Heureusement pour nous !

Les étoiles dont la surface est la plus chaude sont des étoiles massives, dont les réactions nucléaires sont très rapides et violentes pour maintenir l'équilibre.

La température superficielle d'une étoile naine s'exprime par :

$T_{eff} = (L / 4 \pi \sigma R^2)^{1/4}$

σ est la constante de Stefan-Boltzmann.

Certaines étoiles particulières ont aussi une surface très chaude, mais pour une raison un peu différente. Ce sont les étoiles dites de **Wolf-Rayet**, qui ont perdu leur enveloppe. Ce que nous voyons est donc leur cœur mis à nu, et par conséquent très chaud à cause des réactions nucléaires qui s'y produisent. Par opposition à ces étoiles de Wolf-Rayet, on peut dire que les étoiles normales sont constituées d'un cœur protégé par une couverture.

**Animation**

On peut réunir l'ensemble de ces valeurs dans une animation, qui permet de calculer les paramètres d'une étoile naine en fonction de sa masse :

Animation donnant les paramètres d'une naine
Relations entre la masse d'une part, le rayon et la luminosité d'autre part

L'axe horizontal (abscisses) représente la masse M de l'étoile, en masses solaires. Les deux courbes montrent l'évolution du rayon R (en jaune) et de la luminosité L (en vert). En haut, le bandeau résume les paramètres de l'étoile : masse, rayon, luminosité, température, durée de vie sur la Séquence Principale (SP), et type spectral. Les trois premiers sont en unités solaires (masses solaires, rayons solaires, luminosités solaires) ; la température est en Kelvins ; la durée de vie en millions d'années.

Vous remarquerez que la courbe "rayon" présente un point anguleux au niveau de 1,1 masses solaires. Cette particularité vient du changement

d'exposant dans la formule : $R = M^{0,57}$ avant 1,1 mases solaires, et $R = M^{0,80}$ après.

En déplaçant le curseur rouge, on fait varier la masse de l'étoile, et tous ses paramètres. On peut ainsi afficher les caractéristiques de l'étoile choisie. Il est remarquable de constater que les types spectraux ne sont pas équivalents dans ce graphique : le type B s'étend depuis M = 2,55 M jusqu'à 15,9 alors que le type K ne couvre que l'intervalle de masses de 0,4 à 0,72. Leur importance sur le graphique est très différente, et les types représentant les faibles masses sont mal représentés.

Le bouton "zoom" en bas permet de remédier à ce défaut, en retraçant le graphique pour les étoiles en-dessous de 2 masses solaires. Vous y retrouverez la petite discontinuité due au changement de fonction sur la courbe des rayons. Cette limite défini la Séquence Principale inférieure (en dessous de 1,1 masses solaires), et supérieure.

**Vitesse de rotation**

Toutes les étoiles tournent sur elles-même, mais il faut une analyse assez fine pour le mettre en évidence. L'observation directe le montre pour le Soleil, grâce à sa grande proximité. Mais on ne peut résoudre la surface d'aucune autre étoile pour y voir des taches animées d'un mouvement de rotation. La mesure d'une vitesse de rotation ne peut donc se faire que par une méthode indirecte.

Prenons le cas d'une étoile dont l'axe de rotation soit perpendiculaire à la ligne de visée (la Terre se trouve dans son plan équatorial). Elle nous présente un disque dont la partie droite (par exemple) se rapproche de nous par la rotation, alors que la partie gauche s'éloigne. La lumière émise par la matière qui se trouve à droite et qui s'approche de nous, est donc décalée vers le bleu par effet Doppler. Par contre, la matière du côté gauche s'éloigne, et la lumière qu'elle émet est décalée vers le rouge.

L'animation ci-dessous le montre :

votre navigateur est incapable de vous montrer l'applet…
Influence de la vitesse de rotation sur la largeur des raies spectrales

On voit une étoile présentant quelques taches, qui visualisent la rotation. Le spectre de cette étoile apparaît, et montre quatre raies de l'hydrogène. La vitesse de rotation est initialement très faible, et les raies sont fines. Si on fait varier la vitesse de rotation de l'étoile, on voit les raies s'élargir accélération) ou se rétrécir (ralentissement).

Supposons l'étoile fixe par rapport à la Terre (si ce n'est pas le cas, l'ensemble du spectre sera décalé d'une même valeur).

Considérons la lumière émise par le centre de l'étoile. Elle nous parvient sans décalage (on la suppose fixe par rapport à la Terre). Les raies d'absorption produites par la chromosphère seront donc à leur position normale dans le spectre.

La lumière qui nous parvient du bord droit, qui se rapproche, est décalée vers le bleu. Par conséquent, nous recevrons moins de lumière dans ce domaine du spectre, qui paraîtra assombrie. Il en est de même à l'autre bord de l'étoile, qui s'éloigne, et produit une raie décalée vers le rouge. Au total, la raie est très sombre au centre, et s'étale sur les ailes en diminuant d'intensité.

Ce mécanisme produit un profil particulier de la raie, dont l'analyse permet de mettre en évidence une rotation, et de la mesurer.

Nous ne sommes cependant pas au bout de nos peines. Si nous inclinons l'axe de rotation, la largeur de la raie diminue ! L'explication est très simple : la vitesse de rotation apparente, par rapport à nous, est plus faible que si l'axe était bien perpendiculaire à la ligne de visée. A la limite, si l'axe pointe exactement vers nous, la rotation apparente est nulle, est les raies ne seront pas élargies. La forme de la raie n'est pas affectée, et rien ne nous permet de mesurer l'angle d'inclinaison.

Dans ces conditions, on peut penser qu'il est vain de tenter cette mesure, puisque nous ne saurons pas si nous mesurons la vitesse réelle (inclinaison nulle) ou seulement sa projection sur la ligne de visée, la vitesse exacte nous restant inaccessible.

C'est compter sans les statistiques ! On peut supposer que les étoiles ayant des propriétés physiques semblables partageront aussi une vitesse de rotation du même ordre. Les astronomes ont donc fait cette mesure pour un grand nombre d'étoiles de même type spectral. Et ils ont montré effectivement que les vitesses observées se confinent dans une certaines fourchette de valeurs. En supposant (ce qui est parfaitement raisonnable) que les orientations des axes de rotation sont distribuées au hasard, ils ont obtenu une vitesse représentative de chaque type spectral.

Pour les étoiles du bas de la Séquence Principale, entre les types M et G, la vitesse de rotation à l'équateur varie de 1 km/s à 5 km/s. Mais on observe une discontinuité, nommée *discontinuité rotationnelle*, vers le type spectral F. Les vitesses sautent brutalement à 100 km/s ! Elles continuent d'augmenter, et atteignent 200 km/s pour le type spectral B.

Il y a une explication physique, au moins dans les grandes lignes, à cette discontinuité : elle se produit lorsque l'enveloppe convective disparaît. Celle-ci devient de plus en plus fine lorsqu'on monte dans les types spectraux, et devient inexistante pour le type F. Le transport d'énergie est à partir de là totalement radiatif.

Or la couche convective joue un grand rôle dans l'entretien du champ magnétique de l'étoile. Lorsqu'elle disparaît, une modification de ce champ entraîne une variation de la vitesse de rotation.

**Problème de la rotation**

Les étoiles se formant par effondrement d'un nuage d'hydrogène en rotation initiale, on peut calculer à quelle vitesse elle *devraient* tourner. L'image classique d'une patineuse qui tourne sur elle-même, bras écartés, puis ramène les bras le long du corps est très explicite : sa vitesse de rotation augmente beaucoup ! Les physiciens ont formalisé ce phénomène grâce à la notion de *moment angulaire* (moment n'a ici rien à voir avec le temps).

Considérons une sphère **homogène** (la masse est régulièrement répartie à l'intérieur). Pour la faire tourner, il faut lui fournir de l'énergie. On

mesure la résistance à cet entraînement par le moment angulaire, qui vaut pour une sphère homogène :

$$I = 2/5\ M\ R^2$$

Si ω est la vitesse angulaire de rotation, le moment angulaire, qui mesure en quelque sorte la quantité de rotation, s'exprime par :

$$L = I\ \omega = 2/5\ M\ R^2\ \omega$$

Or, dans une transformation sans échange d'énergie avec l'extérieur, le moment angulaire se conserve. Lorsque notre nuage d'hydrogène se contracte pour former une étoile, son moment angulaire aura donc la même valeur avant et après la contraction.

Prenons par exemple, un nuage comptant $10^{10}$ atomes d'hydrogène par $cm^3$, et ayant une masse solaire. Supposons qu'il tourne en 1.000 ans sur lui-même. Il se contracte pour donner une étoile de la taille du Soleil, soit $7\ 10^8$ m. Quelle sera sa vitesse de rotation après contraction ?

On utilise la conservation du moment angulaire :

$$L = I_1\ \omega_1 = I_2\ \omega_2$$

où $I_1$ et $\omega_1$ représentent le moment angulaire et la vitesse angulaire avant contraction, et $I_2$ et $\omega_2$ les mêmes quantités après contraction. La vitesse angulaire est :

$$\omega = 2\ \pi\ /\ P$$

où P est la période. Donc

$$\omega_1 = 2\ \pi\ /\ P_1 \text{ et } \omega_2 = 2\ \pi\ /\ P_2.$$

$$\text{et } L = I_1\ \omega_1 = I_1\ 2\ \pi\ /\ P_1 = I_2\ \omega_2 = I_2\ 2\ \pi\ /\ P_2$$

Par suite, en supposant que l'étoile est une sphère homogène :

$$I_1\ /\ P_1 = I_2\ /\ P_2$$

$$I_1 = 2/5\ M\ R_1^2 \text{ et } I_2 = 2/5\ M\ R_2^2$$

d'où :

$$I_1\ /\ P_1 = 2/5\ M\ R_1^2\ /\ P_1 = I_2\ /\ P_2 = 2/5\ M\ R_2^2\ /\ P_2$$

$$\text{il vient : } P_2 = P_1\ (R_2\ /\ R_1)^2$$

Il nous reste à calculer le rayon avant contraction, et nous en déduirons la période recherchée.

Dans chaque $cm^3$, il y a $10^{10}$ atomes d'hydrogène, de masse $1{,}6734\ 10^{-24}$ g chacun. Ce qui fait une masse volumique de :

$$\rho = 10^{10}\ 1{,}6734\ 10^{-24}\ g\ cm^{-3} = 1{,}6734\ 10^{-14}\ g\ cm^{-3}$$

Le nuage est une sphère de rayon R, qui a donc un volume $V = 4/3\ \pi\ R^3$, et une masse de $M = \rho\ V = \rho\ 4/3\ \pi\ R^3$.

On a supposé que sa masse était une masse solaire, donc $2\ 10^{33}$ g. On peut donc écrire :

$$2\ 10^{33} = M = \rho\ 4/3\ \pi\ R^3 = 1{,}6734\ 10^{-14}\ 4/3\ \pi\ R^3 = 7{,}009\ 10^{-14}\ R^3$$

d'où :

$$R^3 = 2\ 10^{33}\ /\ 7{,}009\ 10^{-14} = 0{,}29\ 10^{47}\ cm^3$$

Il suffit d'extraire la racine cubique :

$$R = (0{,}28\ 10^{47})^{-3}\ cm = (28\ 10^{45})^{-3}\ cm = 3\ 10^{15}\ cm = 3\ 10^{13}\ m = 30 \text{ milliards de km.}$$

Six fois la distance de Pluton au Soleil.

Nous avons maintenant : $P_1$ = 1.000 ans, $R_1 = 3\ 10^{13}$ m, et le rayon actuel du Soleil est $R_2 = 7\ 10^8$ m. Donc :

$$P_2 = P_1\ (R_2\ /\ R_1)^2 = 1.000 \text{ ans } (\ 7\ 10^8\ /\ 3\ 10^{13})^2 = 1.000 \times 5{,}44\ 10^{-10} \text{ années} = 5{,}44\ 10^{-7} \text{ années}$$

Multiplions cette valeur par 365, puis par 24, puis par 60 et encore par 60, pour l'écrire en secondes : $P_2$ = 17 secondes !

| Le Soleil devrait tourner sur lui-même en 17 secondes ! |
|---|

Même si les données choisies pour le calcul ne sont pas parfaitement exactes, elles ne peuvent justifier un écart entre 17 secondes et un mois

(rapport de 150.000), comme on l'observe. Remarquons de plus que nous avons omis le disque de matière qui reste autour de l'étoile naissante en supposant que la totalité du disque s'effondrait.

Il est évident qu'un mécanisme a dû freiner la rotation du Soleil, et la théorie de sa formation devra en tenir compte. Les vitesses de rotation des autres étoiles sont du même ordre de grandeur, à un facteur 100 près, et doivent justifier elles aussi de ce mécanisme. On sait que le moment cinétique de rotation du Soleil a été transféré aux planètes, qui en possèdent aujourd'hui 98 %.

On explique ce phénomène par l'existence d'un champ magnétique, dont les lignes partent du Soleil, et vont vers l'extérieur. Les planètes sont prises dans ce champ, et interagissent avec lui. Le champ leur communique de l'énergie, qu'il emprunte au Soleil. C'est ainsi que le Soleil ralentit et les planètes s'éloignent un peu.

**Masse volumique**

On ne peut pas parler simplement de la masse volumique d'une étoile. L'étoile n'a pas de limite précise, et se dilue progressivement dans l'espace à partir de ce qu'il est convenu d'appeler sa surface (la photosphère). Et en pénétrant dans son intérieur, on observerait une masse volumique régulièrement croissante vers le centre.

On peut donc parler de plusieurs masses volumiques différentes :

- la masse volumique centrale, la plus forte, celle qui autorise les réactions thermonucléaires ;
- la masse volumique moyenne, obtenue en divisant la masse totale de l'étoile par son volume total ;
- la masse volumique en un point quelconque, à la distance r du centre.

La dernière n'est utilisée que pour construire des modèles d'étoiles. Dans ce cas, il faut définir précisément la variation de la masse volumique en fonction de la distance au centre, pour savoir où exactement se produisent les réactions.

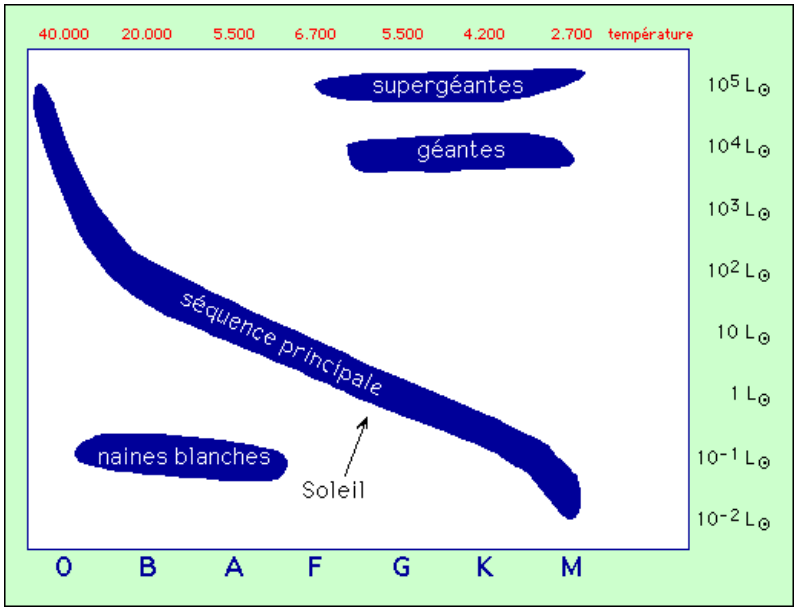
Pour se faire une idée globale d'une étoile, la masse volumique moyenne semble la plus représentative, alors que pour déterminer sa production d'énergie, c'est la masse volumique centrale qui est décisive. Pour les étoiles de faible masse, les deux sont proches : la gravité étant très faible, la matière se réparti relativement uniformément dans le globe de l'étoile. Mais pour les étoiles très massives, la très forte gravité produit au contraire une grande concentration de matière au centre, avec une masse volumique très élevée, alors que les couches externes de l'étoile sont soumises à une température si forte qu'elles se dilatent démesurément. La masse volumique centrale est extrêmement élevée, et la masse volumique moyenne très basse à cause du rayon immense du globe.

Masse volumique **moyenne** de trois types d'étoiles :

- Soleil : 1 g / $cm^3$
- naine blanche : $10^9$ g / $cm^3$
- étoile à neutrons : $10^{14}$ g/$cm^3$
- géante rouge : de l'ordre de $10^{-6}$ g/$cm^3$

**Diagramme HR**

Nommé d'après les deux astronomes qui l'ont proposé, indépendamment l'un de l'autre : Ejnar Hertzsprung et Henry Norris Russel. Le diagramme HR montre la relation existant entre la température superficielle d'une étoile et sa luminosité totale. Ce diagramme, qui peut paraître semblable à beaucoup d'autres, est en fait l'outil fondamental de l'astrophysique.




Le diagramme HR est à deux dimensions, avec en abscisse (axe horizontal) une indication de la température de l'étoile. Trois valeurs équivalentes sont possibles :

- le type spectral ;

- la température effective ;
- l'indice de couleur.

Un examen rapide du tableau des types spectraux vous convaincra que ces trois éléments sont équivalents, le tableau permettant de passer simplement de l'un à l'autre.

L'axe des ordonnées (vertical) est gradué selon la luminosité de l'étoile, mais on peut aussi y mettre la magnitude absolue, ce qui est équivalent. Vous trouverez dans la littérature des diagrammes HR construits avec diverses combinaisons de ces quantités.

**Les populations stellaires**

Le diagramme HR permet de classer les étoiles (de notre Galaxie) en deux types de populations :

- population I, comprenant des étoiles jeunes, dont la métallicité est forte (jusqu'à 2 %, valeur qui représente la métallicité du Soleil). Elles se trouvent essentiellement dans les bras spiraux de la Galaxie, noyées dans la maitère insterstellaire.
- population II, constituée d'étoiles vieilles à métallicité beaucoup plus faible. Elles ne se trouvent pas dans les bras spiraux. Les géantes rouges et les naines blanches font partie de la population II. Les amas globulaires sont de population II exclusivement, ainsi que les galaxies elliptiques.

Pour un âge global donné, une population stellaire apparaît d'autant plus bleue que sa métallicité est plus élevée.

La métallicité dans les atmosphères stellaires entraîne un effet de serre ! Celui-ci est d'autant plus important que l'étoile est plus froide. Il joue donc un rôle dans les étoiles de faible masse.

On parle quelquefois de population III, pour classer des étoiles de métallicité quasiment nulle. De telles étoiles seraient vraiment très vieilles, formées juste après le Big Bang.

La composition globale des étoiles est de 90 % d'hydrogène (en nombre d'atomes), et 10 % d'hélium (tout le reste ne représente que 0,1 % des atomes présents dans les étoiles). Attention, on donne souvent la répartition sous la forme 74 % H pour 24 % He (2 % métaux). Lorsqu'on donne sous cette foerme, il s'agit du pourcentage en masse. L'atome d'hélium étant 4 fois plus lourd que celui d'hydrogène, ces deux formulations sont équivalentes.

## *Equilibre*

Explications synthétiques sur la vie des étoiles

L'équilibre d'une étoile se réalise entre deux forces antagonistes :

- la gravité qui la comprime ;
- une pression interne qui la dilate.

On nomme cet équilibre *équilibre hydrostatique*.

> "Une étoile est toujours soumise à sa propre gravité et tend à devenir aussi petite que possible. Pour des raisons diverses, cette tendance est contrariée pendant de longues périodes. Toutes les étapes de cette évolution peuvent être vues comme des pauses dans la contraction ou comme des manifestations de celle-ci."
>
> James Kaler
> Les étoiles
> Belin 1997

La gravité est due à la présence de la matière, donc elle est permanente.

> La pression est due :
>
> - soit à une **énergie** (transitoire) ;
> - soit à un **phénomène quantique** (permanente).

La pression due à l'énergie n'est que transitoire ; lorsque la source d'énergie est épuisée, elle cesse. Par contre, la pression d'origine quantique est permanente, comme la gravité. Donc, tout équilibre induit par l'énergie est provisoire (pouvant atteindre des centaines de milliards d'années…), alors que l'équilibre quantique sera, s'il est atteint, définitif (en l'absence d'intervention extérieure).

C'est **l'énergie** qui produit la pression dans toutes les étoiles que nous observons ; C'est son effet que nous allons considérer maintenant.

L'énergie s'échappe de l'étoile, puisque nous en recevons. Les pertes se font par deux mécanismes :

- le rayonnement ;
- les pertes neutriniques.

Les pertes neutriniques sont négligeables, sauf dans certaines phases particulières où elles deviennent prépondérantes pendant un temps très bref.

On considère maintenant que la perte est due au rayonnement.

L'étoile perdant de l'énergie, elle doit en produire en permanence pour maintenir l'équilibre. Ceci ne peut donc durer qu'un temps fini.

Cette énergie a deux origines possibles :

- gravitationnelle ;
- nucléaire.

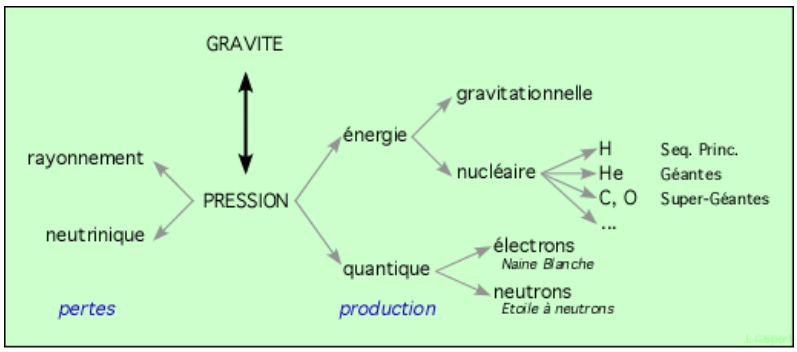
L'énergie gravitationnelle est produite par la contraction de l'étoile. Or le diamètre ne peut diminuer indéfiniment, au moins à une vitesse significative. Donc la production d'énergie gravitationnelle est limitée dans le temps.

L'énergie nucléaire provient de la transformation d'un élément chimique en un autre (hydrogène en hélium, ou bien hélium en carbone, ou bien …). Lorsque le premier est épuisé, la production d'énergie cesse.

Les deux mécanismes de production d'énergie à la disposition d'une étoile (gravitationnelle et nucléaire) ayant une durée limitée, les étoiles évoluent nécessairement.

Les réactions nucléaires requièrent des conditions de température et de pression élevées. Ce sont des réactions de fusion (fusion de deux atomes pour en produire un nouveau). Chaque élément chimique fusionne dans des conditions de température et de pression différentes, croissantes avec la masse de l'atome. L'hydrogène fusionne à la température la plus basse (seulement une dizaine de millions de degrés) ; à température et pression plus élevées fusionne l'hélium ; puis le carbone…

Le schéma ci-dessous représente l'équilibre dans les étoiles, entre gravité et pression. La pression est due à une production d'énergie ou à un mécanisme quantique (flèches côté droit). L'énergie est d'origine gravitationnelle ou nucléaire, et dans ce dernier cas due à la fusion des divers éléments. Sur le côté gauche, sont indiquées les pertes d'énergie, par rayonnement ou par émission de neutrinos.




Suivez le chemin : rayonnement, pression, énergie, gravitationnelle ; vous venez de définir une étoile naissante, qui n'est pas encore en équilibre (l'énergie gravitationnelle est produite par la contraction de l'étoile, dont le diamètre diminue au cours du temps). C'est une étoile de type *T Tauri*.

Suivez maintenant le chemin : rayonnement, pression, énergie, nucléaire, H ; vous venez de définir une étoile typique comme le Soleil (de la Séquence Principale).

La production d'énergie peut être en même temps d'origine nucléaire et gravitationnelle, mais l'étoile alors n'est pas en équilibre. Ceci se produit pendant un temps bref, entre deux phases stables. Par exemple dans l'ascension vers la branche des géantes.

Les pertes neutriniques sont peu importantes dans la vie normale d'une étoile, et ne se montrent efficaces que pendant de brefs instants particuliers. Les pertes peuvent se faire à la fois par rayonnement et par neutrinos. Là encore, l'étoile n'est pas stable, car la perte neutrinique se fait sans contre-partie, les neutrinos emportant leur énergie pratiquement sans interraction avec la matière de l'étoile… sauf dans le cas où la densité est extrêmement élevée, c'est-à-dire dans le cœur d'une supernova en cours d'effondrement.

L'énergie gravitationnelle n'intervient dans la vie de l'étoile que lorsque l'énergie d'origine nucléaire fait défaut :

- lors de la formation de l'étoile, encore trop froide pour les réactions de fusion. La contraction gravitationnelle chauffe le gaz progressivement. Une partie de l'énergie produite est rayonnée, l'autre maintient un pseudo-équilibre (pseudo puisque l'étoile se contracte) ;
- lorsque le combustible nucléaire est épuisé, induisant une baisse des réactions et donc de l'énergie. L'équilibre n'est plus assuré, et la gravitation l'emporte à nouveau. L'étoile se contracte, donc se chauffe, et de nouvelles réactions peuvent éventuellement se produire.

| équilibre | phase | réactions | T centrale | T surface | diamètre | densité centrale | longévité |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| hydrostatique | Séquence Principale | $4\ ^1H \rightarrow\ _4He$ | $10^6$ K | 6.000 K | 1,5 $10^6$ km | 100 g / $cm^3$ | >$10^{10}$ ans pour 1 Mo |
| | géante rouge | $4\ ^4He \rightarrow\ ^{12}C$<br>$^4He + ^{12}C \rightarrow\ ^{16}O$<br>Si → Fe | $10^8$ K | 2.000 K | 1,5 $10^8$ km | | |
| quantique | naine blanche | / | | | *10.000 km* | $10^9$ g / $cm^3$ | refroidissement perpétuel |
| | étoile à neutrons | / | | | *10 km* | $10^{14}$ g / $cm^3$ | refroidissement perpétuel |
| | | | | | | | |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| aucun | trou noir | / | | | *3 km* | | |

Les diamètres mis en italique sont indicatifs, et correspondent à des objets d'une masse solaire à peu près.

Une étoile de la Séquence Principale brûle son hydrogène jusqu'à $1/5^{me}$ de la quantité initiale.

La densité **moyenne** des étoiles est extrêmement variable de l'une à l'autre : celle des naines blanches vaut 50.000 fois la densité de l'eau, le Soleil 1,4 g/ $cm^3$, Antarès a une densité moyenne plusieurs millions de fois plus faible que celle de l'eau.

90 % des étoiles sont sur la Séquence Principale ; c'est parce que cette période de leur vie est la plus longue.

**Chaîne proton-proton :**

$$H + H \rightarrow {}^2H + \nu + \gamma$$

$${}^2H + H \rightarrow {}^3He + \gamma$$

$${}^3He + {}^3He \rightarrow {}^4He + 2H + \gamma$$

La première réaction est très très lente ($10^{10}$ ans ! ) ; c'est pourquoi la durée de vie du Soleil est si grande (détails des réactions nucléaires).

Lithium, Bérylium et Bore, fragiles, se désintègrent au fur et à mesure de leur production.

**Cycle CNO**

Le cycle du carbone, ou cycle CNO (Carbone, Oxygène) ou cycle de Bethe, est décrit en détails dans la page consacrée à la physique nucléaire. C'est un autre ensemble de réactions nucléaires qui fusionne l'hydrogène en hélium, mais qui se distingue des chaînes PP par certains aspects.

**Dépendance à la température**

La chaîne PP1 présente son maximum d'efficacité à la température la plus basse possible pour la fusion de l'hydrogène. La variante PP2 est plus efficace à une température légèrement plus élevée, et la variante PP3 encore un peu plus. Le cycle CNO trouve son efficacité maximale à une température nettement plus élevée.

La température optimale n'est pas le seul élément à considérer. La dépendance du taux de réactions par rapport à la tempéraure est au moins aussi importante. Les réactions de la chaîne PP dépendent de la température. Si celle-ci augmente un peu, la production d'énergie augmente un peu également. Il s'ensuit une augmentation de pression, qui dilate légèrement l'étoile. La dilatation entraîne une baisse de la température, et par suite le taux de réactions diminue, et la température avec. Toute augmentation de température est donc annulée par un mécanisme antagoniste, et cette dépendance produit la grande stabilité des étoiles sur la Séquence Principale.

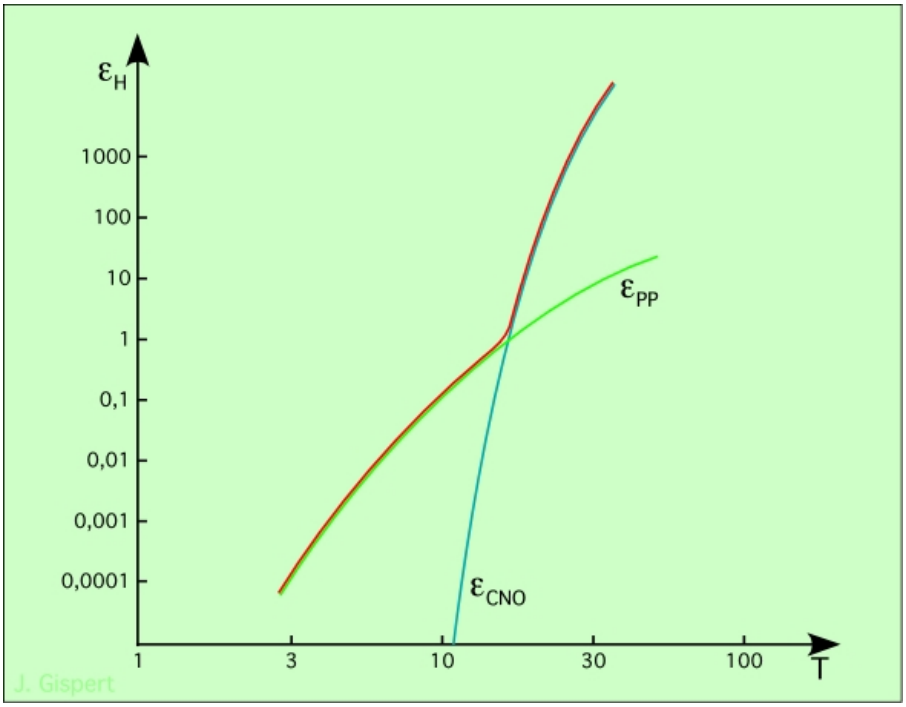
Le cycle CNO dépend beaucoup plus fortement de la température. Or celle-ci diminue lorsqu'on s'éloigne du centre. Donc, le taux de réactions produites par le cycle CNO diminue beaucoup plus vite avec l'éloignement du centre, que celui de la chaîne PP. Ceci a deux conséquences :

- les étoiles PP ont un cœur beaucoup plus gros, et la température y diminue lentement avec la distance au centre ;
- dans les étoiles CNO, la température diminue très vite avec l'éloignement du centre, et le transport radiatif ne suffit plus : le cœur est convectif.

Les étoiles PP sont les moins massives (température centrale plus basse), qui occupent le bas de la Séquence Principale. Donc, dans le bas de la Séquence Principale, les étoiles ont un cœur radiatif, et une enveloppe convective ; c'est l'inverse dans la Séquence Principale supérieure.

**Rendement comparé**

A basse température, au-dessous de 10 millions de degrés, le cycle proton-proton présente un bon rendement, et le cycle CNO n'a pas la température suffisante pour produire beaucoup d'énergie. Lorsque la température augmente, les rendements s'inversent, et le cyclo CNO devient prépondérant. Le schéma ci-dessous montre l'efficacité des deux cycles, et la courbe résultant de leur combinaison :




Par conséquent, puisque la température centrale dépend de la pression, qui dépend de la masse, les étoiles les moins massives fusionnent essentiellement par le cycle PP (courbe verte), les plus massives par le cycle CNO (courbe bleue). Pour le Soleil, la masse est juste en-dessous du coude, et le cycle PP est prépondérant. La courbe rouge est la résultante des deux, qui s'apllique dans une étoile réelle où les deux cycles coexistent.

Remarquez sur les courbes la sensibilité des deux mécanismes à la température : la courbe $\varepsilon_{PP}$ est moins pentue que la courbe $\varepsilon_{CNO}$. Ceci montre que pour une petite élévation de température, le taux de réactions CNO augmente beaucoup plus que le taux PP. Par conséquent, le surcroit d'énergie produite par un petite élévation de température est plus grand dans le cycle CNO, et la pression augmente plus vite. Cette augmentation entraîne immédiatement une augmentation du volume (dans un gaz parfait, cas général), et donc une baisse de température. C'est ce mécanisme qui régule le fonctionnement des étoiles, mais lorsque la sensibilité à la température est trop grande, il peut aussi produire des instabilités.

**Séquence Principale**

Gravité relativement faible  production d'énergie faible  grande longévité.

Revenons au Soleil. Grâce à des mesures de l'assombrissement au bord, on sait que la température dans la photosphère diminue lorsque l'altitude croît, de 5.700 K à 1.200 K seulement. Mais au-dessus, elle remonte, et la chromosphère est presque toute à 7.000 K (la chromosphère a une épaisseur de 6.000 km à peu près).

A la limite entre la chromosphère et la couronne, sa température croît brutalement jusqu'à un million de degrés. La température moyenne de la couronne est de 2 millions de K ; Elle est très irrégulière, et monte jusqu'à 5 millions de K.

La chromosphère et la couronne sont trop peu denses pour absorber le rayonnement. C'est pourquoi leur température peut être très élevée (elles ne se comportent absolument pas comme des corps noirs). Au lieu de présenter des raies d'absorption, elles donnent des raies d'émission ; en particulier pour la chromosphère, la raie Hα largement dominante lui donne sa couleur rouge caractéristique.

Outre les raies de l'hydrogène et de l'hélium, on observe celles des métaux fortement ionisés (Fe XIV).

La couronne étant très chaude, émet dans les très courtes longueurs d'onde. Elle est particulièrement visible en rayons X (bien sûr au-delà de l'atmosphère qui les absorbe). C'est ainsi que les satellites observant dans cette gamme ont montré une couronne agitée, et très inégale. Des boucles de matière et des trous, qui n'apparaissent pas dans le domaine visible, montrent que les champs magnétiques sont très intenses. Ce sont eux qui sont responsables du chauffage de la couronne à si haute température.

Mira : découverte en 1596 géante rouge variable de type spectral M, période de 330 jours ; sa taille varie de 50% et sa luminosité de 7 magnitudes, soit 600 fois.

**Naines brunes**

Lorsqu'un nuage protostellaire en contraction est de masse insuffisante, inférieure à 0,08 M , la gravitation restera trop faible pour élever la température centrale jusqu'aux 10 millions de degrés fatidiques (approximativement), permettant l'allumage des réactions nucléaires. Toutefois, si on observe attentivement la série de réactions nucléaires qui mènent à la synthèse de l'hélium, on distinguera la première, qui à partir de deux noyaux d'hydrogène donne un noyau de deutérium (fusion de deux protons, et désintégration béta de l'un d'eux en neutron). C'est elle qui réclame la température la plus élevée. Les réactions suivantes, qui utilisent l'hélium comme combustible, se produisent à plus basse température. Or il existe dans l'Univers une petite proportion de deutérium, qui a été produite dans ses premiers instants. Cette petite quantité de deutérium va pouvoir fusionner dans une étoile de très faible masse, et produire un peu d'énergie.

Ainsi, les objets stellaires les plus petits auront une faible source d'énergie nucléaire. Elles pourront briller faiblement, et ce sont des étoiles… Mais rien à voir avec les vraies étoiles de la Séquence Principale. Leur surface restera relativement froide, donc très peu lumineuse. Comme d'autre part elles ont un très faible diamètre, elles rayonnent très peu. Ce sont des astres très difficiles à détecter.

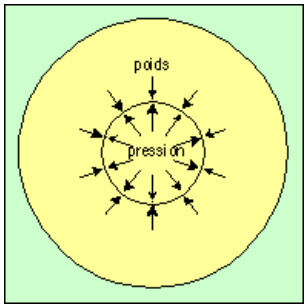
Une première naine brune a été observée il y a quelques années, il s'agit de Gliese 229 B (Gliese 229 s'est avérée être une étoile double). Sa luminosité vaut à peu près 0,000006 fois la luminosité du Soleil. De plus, son spectre présente des raies moléculaires, en particulier du méthane. La molécule de méthane ne peut exister dans une atmosphère stellaire normale, à cause de la trop forte température. C'est une indication indirecte de la basse température de la naine brune.

On a accordé récemment un grand intérêt aux naines brunes parce que, en grand nombre, elles pourraient représenter une partie de la masse manquante dans les galaxies. Aussi des programmes de recherches systématiques ont été mis sur pied. Si une naine brune sombre et proche passe devant une étoile, par effet de micro-lentille gravitationnelle, elle devrait amplifier la lumière de l'étoile pendant un bref moment. Et effectivement, on a observé une dizaine d'événements qui pourraient s'expliquer de cette manière, mais leur nombre est beaucoup plus faible que ce qu'on espérait en regard du problème posé. Apparament, les naines brunes n'expliquent pas la masse manquante de notre Galaxie.

Si on considère des naines brunes de masse de plus en plus faible, on trouvera une limite en dessous de laquelle même la combustion du deutérium n'est plus possible. Il ne s'agit donc plus d'une étoile, mais d'une planète. On peut donc envisager l'existence de planètes formées à la manière d'une étoile, à partir de la contraction d'un nuage d'hydrogène et non d'un disque d'accrétion entourant une jeune étoile. Un objet candidat de ce type a été découvert dans le Taureau, mais il pourrait s'agir d'une planète formée normalement et éjectée de son étoile par les perturbations dues aux autres planètes.

Finalement, on peut voir une continuité des masses entre les plus petites planètes, et les plus grosses étoiles. Mais il existe bien une limite de nature, puisque les premières n'ont pas d'énergie nucléaire, au contraire des secondes.

**Equilibre hydrostatique**




Le problème qui se pose maintenant est de savoir pourquoi il ne change pas d'aspect : il pourrait se contracter, ou se dilater, rayonner plus ou moins selon les époques. En fait, il est dans un équilibre remarquable, ce dont les modèles doivent tenir compte. Cet équilibre entre le poids d'une couche supérieure et la pression que lui oppose celle sur laquelle elle repose se nomme équilibre hydrostatique.
Si l'équilibre existe, le poids est exactement compensé par la pression. C'est parce que le Soleil est en équilibre hydrostatique qu'il ne grossit pas, et ne maigrit pas. D'où vient la pression qui équilibre le poids ? dans le cas de la Terre, il s'agit tout simplement de la rigidité des roches, qui sont des solides. Mais pour le Soleil, constitué de gaz, il n'y a pas de rigidité, il faut donc un autre mécanisme.

Considérons le Soleil comme une succession de couches que l'on rencontrerait en s'enfonçant à l'intérieur. Pour comprendre l'équilibre, faisons une expérience : plaçons une main à plat sur une table. En détendant les muscles, la main reposera sur la table, sur laquelle elle s'appuiera. Son poids la fera descendre vers le bas, mais la présence de la table l'en empêchera. Le poids de la main écrase la table, qui réagit en exerçant une pression sur la main. Un équilibre s'établit, et la main ne bouge plus.

Si maintenant on pose un livre sur la main, son poids se fera sentir. La main s'écrasera un peu, et ainsi elle opposera une pression au poids du livre ; un nouvel équilibre s'établit. Posons un second livre, la pression augmente, la main se tasse encore un peu, et l'équilibre se produit. Nous nous arrêterons là !

**Pression**

Représentons-nous un gaz comme un ensemble d'atomes qui s'agitent en tous sens. S'ils s'agitent, c'est qu'ils possèdent de l'énergie ; il s'agit de l'énergie thermique (dues à la chaleur). Un atome qui tombe vers le centre du Soleil va très vite heurter un autre atome qui s'en échappe rapidement à cause de cette énergie. Sous le choc, sa chute s'arrête.

Nous venons d'expliquer pourquoi les atomes ne tombent pas vers le centre du Soleil, mais en tenant compte de l'énergie qu'ils possèdent. Or le Soleil rayonne, ce qui est pour lui une perte d'énergie. Il faut donc une production d'énergie pour entretenir l'équilibre.

Cette énergie est la lumière et la chaleur que le Soleil rayonne. Mais d'où provient-elle ?

Maintenant, nous pouvons donner une définition d'une étoile :

**c'est une sphère de gaz :**

- **auto gravitante,**
- **en équilibre hydrostatique**

L'équilibre est entretenu par un gradient de pression, lui-même entretenu par un gradient de température, produit par la chaleur engendrée par les réactions nucléaires centrales.

Gradient signifie variation. Le gradient de pression est une baisse progressive de la pression lorsqu'on s'éloigne du centre.

**Energie gravitationnelle**

Si vous laissez tomber un objet pesant sur un parquet, il y laissera une marque ; ceci prouve qu'il possédait de l'énergie. Il l'a acquise dans sa chute, puisqu'il n'en avait pas lorsque vous le teniez dans la main. (attention, il ne possédait pas d'énergie cinétique, celle due au mouvement ; mais il possédait de l'énergie potentielle, qui en se transformant lui donne l'énergie cinétique) C'est donc la gravité de la Terre qui, en l'attirant à elle, lui a communiqué cette énergie. Tout atome d'hydrogène, en tombant vers le centre du Soleil, dégagera donc aussi de l'énergie ; on la nomme énergie gravitationnelle. Elle peut expliquer la brillance du Soleil au rythme que l'on observe, mais au prix d'une lente contraction du Soleil sur lui-même. Son diamètre devrait diminuer. Ce n'est pas le cas, et donc cette source ne convient pas pour expliquer son fonctionnement.

Une étoile est une boule de gaz (hydrogène et hélium), qui tient rassemblée par sa propre gravité. La densité décroît du centre vers la périphérie, jusqu'à devenir nulle très loin (dans le milieu interstellaire). Une étoile n'a pas de surface solide comme une planète, elle n'a même pas de surface du tout ! il existe une étoile que l'on peut voir de près, le Soleil. Or l'expérience quotidienne nous montre que le Soleil est bien rond. Comment expliquer cette apparence bien nette, avec la dilution progressive, continue, du gaz que nous avons envisagée ? Nous verrons la réponse un peu plus loin, en étudiant sa structure.

**Nature des étoiles**

Les étoiles sont de grandes masses de gaz. Les atomes qui se trouvent à la surface d'une étoile sont très fortement attirés vers le centre par la forte gravité de l'astre. Ils ont donc tendance à tomber. Si tous les atomes suivaient ce penchant, l'étoile se contracterait progressivement (en fait, très rapidement), jusqu'à une taille minuscule.

Puisque ce n'est pas le cas, une force doit agir, qui a tendance à dilater l'étoile. Et sa stabilité provient d'un subtil équilibre entre ces deux forces. Les origines de cette force sont différentes selon l'âge de l'étoile.

Les gaz qui les composent sont essentiellement l'hydrogène et l'hélium, les autres éléments n'étant présents qu'en très faibles proportions (c'est la spectroscopie qui nous l'indique).

Il existe des étoiles de brillance, de couleur, de dimensions très différentes. Leurs distances à la Terre sont très diverses, bien que toutes celles qu'on distingue à l'œil nu soient en fait très proches de nous (astronomiquement parlant).

**Intervalles de définition des étoiles**

| | |
|---|---|
| **Masse** | **0,08 M < $M_*$ < 100 M** |
| **Durée de vie** | **40.000 ans < $V_*$ < 5.500 milliards d'années** |
| **Luminosité** | **0,005 L < $L_*$ < 900.000 L** |
| **Rayon** | **0,02 R < $R_*$ < 1.100 R** |
| **Température superficielle** | **2.000 K < $T_{eff}$ < 150.000 K** |
| **Température centrale** | |
| **Masse volumique moyenne** | |
| **Masse volumique centrale** | |

- la limite inférieure de la masse correspond à une température centrale juste suffisante pour permettre la fusion de l'hydrogène. Elle est définie par les propriétés physiques de l'hydrogène, et par la gravitation. Au-dessous de cette limite, la fusion du deutérium (hydrogène lourd) est possible. Mais cet isotope est rare, et la production d'énergie restera très faible. Les objets dont la masse est comprise entre 0,01 et 0,08 M sont des naines brunes : on qualifie ainsi des étoiles qui possèdent une source d'énergie propre par le deutérium, mais qui sont incapables de fusionner l'hydrogène. Au dessous de 0,01 M , ce sont des planètes (aucune production d'énergie nucléaire).
- la limite supérieure est beaucoup moins bien définie, car elle dépend de nombreux paramètres. En fait, rien n'interdit la formation d'étoiles beaucoup plus massives que 60 M , mais le débordement d'énergie nécessaire pour éviter leur écrasement gravitationnele est tel, qu'elles sont instables : les couches extérieures sont violemment expulsées. Un bel exemple nous est donné par η Carinæ, qui atteint 150 M .

**Fin de la Séquence Principale**

Comme son nom l'indique, la Séquence Principale est la phase de plus grande stabilité d'une étoile. C'est la fusion de l'hydrogène seule qui peut lui procurer cette stabilité, aussi la Séquence Principale est-elle la phase pendant laquelle l'étoile fusionne l'hydrogène en son cœur.

Elle finit lorsque les réactions de fusion s'arrêtent au centre, qui se contracte, mais les réactions se propagent vers l'extérieur, et continuent dans une couche autour du centre. Cette couche va peu à peu s'éloigner du centre, à mesure que l'hydrogène est transformé en hélium.

La fin de la Séquence Principale est le début de l'ascension vers la branche des géantes. A mesure que les réactions s'éloignent du centre, le cœur se comprime, sa température augmente donc, il chauffe davantage les couches qui le surmontent. Celle-ci se dilatent donc, et l'enveloppe de l'étoile grossit. Sa surface augmente, et il s'ensuit une baisse de la température superficielle, qui se traduit par un rougissement.

De plus, les atomes qui se trouvent à la périphérie de l'enveloppe se trouvent de plus en plus loin du centre.

Pendant l'ascension vers la branche des géantes, l'étoile n'est pas vraiment en équilibre. Elle se déplace rapidement sur le diagramme HR vers le haut et la droite. La fin de cette ascension dépend de la masse de l'étoile.

**Amas d'étoiles**

On peut voir dans le ciel des regroupements serrés d'étoiles. Les Pléiades en sont un bel exemple, visible dans le ciel du soir au début de l'hiver. Elles ressemblent à une constellation en miniature. Non loin des Pléiades se trouvent les Hyades dans le Taureau. Ces deux groupements sont appellés *amas*.

On peut voir des amas d'aspect différent : c'est le cas de M13 dans Hercule. Il se présente sous une forme sphérique, avec un centre très brillant qui forme une tache lumineuse. A la périphérie, on distingue des étoiles, qui se raréfient en s'éloignant du centre. Ces amas d'aspect différent ont pris le nom d'amas globulaires, en rapport avec leur aspect.

Ces deux types d'amas trahissent des natures profondément différentes, que nous verrons en détail dans un chapitre particulier.

**Vent stellaire**

Le Soleil perd en permanence des atomes, qu'il éjecte à grande vitesse dans l'espace. Ce sont essentiellement des noyaux d'hydrogène, avec un peu d'hélium. Pourtant, il est dans sa phase tranquille de la Séquence Principale. Au stade T Tauri, l'étoile produit énormément d'énergie gravitationnelle, elle est très brillante et émet un fort vent stellaire. Celui-ci est mesuré par effet Doppler, la vitesse d'éjection élargissant les raies d'absorption.

Dans la phase qui suit la Séquence Principale, qui voit l'ascension vers la branche des géantes, l'enveloppe grossit considérablement, et les atomes qui se trouvent à sa périphérie sont de moins en moins liés par la gravitation, qui diminue avec la distance. De ce fait, ils s'échappent beaucoup plus facilement, ce qui produit un renforcement considérable de vent stellaire. Dans les étoiles de grande masse, il atteint les $10^{-4}$ M par an, contre $10^{-13}$ M actuellement pour le Soleil.

Dans le cas des étoiles de grande masse, le vent stellaire enlève plus de la moitié de la masse originale de l'étoile, avant qu'elle n'explose en supernova.

Le vent stellaire est une perte de masse continue. C'est une émission de particules.

L'intensité du vent stellaire dépend de la métallicicté

L'évolution des étoiles dépend fortement de la perte de masse dans plusieurs phase de leur vie. L'évolution des étoiles massives dans une galaxie de faible métallicité (vieille) peut être radicalement différente de l'évolution des étoiles dans notre Galaxie.

**Taux de perte de masse**

$\dot{M} = \frac{dM}{dt}$

$\dot{M}$ (masse perdue par unité de temps).

$\dot{M} \geq 0$ est exprimée en masses solaires par an.

Une étoile pour laquelle $\dot{M} = 10^{-6}$ M /an perd une masse égale à celle de la Terre en 3 ans.

**Vitesse terminale**

C'est la vitesse du vent stellaire à grande distance de l'étoile (où la gravité est faible).

$V_t$ = 10 km $s^{-1}$ pour les supergéantes froides, 3.000 km $s^{-1}$ pour les étoiles chaudes lumineuses.

C'est une vitesse d'ensemble ; ce n'est pas la vitesse d'agitation thermique des atomes dans le vent.

- une étoile de $\dot{M}$ élevée n'évoluera pas comme une étoile de $\dot{M}$ faible ;
- des théories différentes donnent des valeurs différentes pour $\dot{M}$ et $V_t$. Ces valeurs permettent donc de départager les théories.

Le taux de perte de masse est la masse qui traverse une sphère de rayon r centrée sur l'étoile, pendant une unité de temps. La densité à la distance r est ρ(r), la vitesse V®.

$\dot{M} = 4 \pi r^2 \rho(r) V(r)$

C'est la même quantité $\dot{M}$ qui traverse toute sphère de rayon r centrée sur l'étoile.

## *Formation des raies spectrales dans le vent stellaire*

## *Processus Line-scattering*

Un photon est absorbé, puis réémis en un temps très bref. Il est de même couleur, au décalage Doppler dû à l'agitation thermique près. Si le niveau concerné est proche du fondamental, le temps de désexcitation est très souvent $10^{-10}$ à $10^{-9}$ s.

Si le niveau de base est le fondamental, on dit qu'il s'agit d'une raie de résonnance. C'est l'origine de la plupart des profils P Cygni.

**Recombinaison**

Un ion rencontre un électron, qui s'attache à lui. Souvent au niveau fondamental, parfois dans un niveau excité. Il s'ensuit une cascade vers le niveau fondamental, avec émission de photons.

Ce mécanisme est responsable des raies d'émission Hα et des raies d'émission IR dans les vents stellaires des étoiles chaudes.

**Excitation par chocs**

Un choc peut fournir à un atome l'énergie d'excitation. Ensuite, il se désexcitera en émettant des raies.

**Absorption pure**

Photo excitation d'un atome déjà excité. La transition résultant de la première excitation est perdue. Très peu important dans les vents stellaires, car les atomes sont presque tous au niveau fondamental.

**Maser**

MASER est un acronyme pour "Microwave Amplification of Stimulated Emission of Radiation". C'est un mécansime assez semblable à l'effet LASER ("Light Amplification of Stimulated Emission of Radiation"), mais dans un domaine de longueurs d'ondes différent (micro ondes).

Un atome excité à un niveau peut produire un photon ν, s'il reçoit un photon de même fréquence ν. Il se désexcite en émettant un photon ν dans la même direction ! On a alors deux photons identiques qui se déplacent dans la même direction. Chacun de ces photons peut à sont tour provoquer l'émission d'un autre, d'où l'effet d'amplification.

Si la proportion d'atomes excités est grande, ce phénomène est important. Il ne doit pas y avoir de gradient de vitesse, car l'effet Doppler inhibe ce mécanisme.

Le mécanisme Maser produit des raies fortes et étroites (pas de décalage Doppler) dans les vents des étoiles froides.

---

## *Maquette d'étoiles*

Envisageons de dessiner à la même échelle sur une feuille de papier une étoile à neutrons, une naine blanche, le Soleil (Séquence Principale) et une géante rouge. Combien de feuilles A4 nous faut-il ?

Le rayon typique d'une étoile à neutrons est de 10 kilomètres. Celui d'une naine blanche est du même ordre que celui de la Terre, c'est-à-dire de 10.000 km ; le rayon du Soleil est de 740.000 km, et enfin celui d'une géante rouge atteint 200 millions de km.

Si nous représentons l'étoile à neutrons par un cercle de 1 mm de diamètre (tête d'épingle en verre), les diamètres des autres types seront (1 mm correspondant à 10 km) :

| type | diamètre réel | diamètre maquette |
|---|---|---|
| Etoile à neutrons | 10 km | 1 mm |
| Naine blanche | 10.000 km | 1 mètre |
| Soleil | 1,5 millions de km | 150 m |
| Géante rouge | 200 millions de km | 20 km |

Et pourtant, elles ont toutes presque la même masse…

La surface du cercle qui représente la géante rouge est de $\pi\ r^2 = \pi\ 10^2\ km^2 = 314\ km^2$.

Transformons cette valeur en mètres carrés : 1 km = 1.000 m  $1\ km^2 = 10^6\ m^2$. La surface de la géante rouge est donc $314 \times 10^6\ m^2$

Une feuille A4 mesure 21 × 29,7 cm, sa surface est $0{,}21 \times 0{,}297 = 0{,}062\ m^2$ ; le nombre de feuilles à juxtaposer pour pouvoir dessiner la géante rouge est de $314\ 10^6 / 0{,}062 = 5.064\ 10^6$. C'est à dire 5 milliards de feuilles !!

Combustion du carbone au-dessus de 2,25 Mo.

## *Etoiles doubles et étoiles variables*

Les étoiles doubles sont des étoiles qui nous semblent très proches l'une de l'autre, ou qui le sont réellement. On les étudiera par ailleurs.

Certaines étoiles présentent des variations d'intensité lumineuse. On les nomme étoiles variables. De très nombreux mécanismes sont responsables de ces variations, et un chapitre entier leur est consacré. La compréhension des étoiles variables est fondamentale pour l'astrophysique.

---=OO=---




## *Les étoiles*

Une étoile est une masse de gaz stable. Deux forces agissent sur elle :

- **sa propre gravité, qui tend à l'écraser**.
  Comme la Terre retient son atmosphère, les étoiles retiennent leur gaz. Mais ce gaz est compressible, alors que la Terre ne l'est pas, et l'étoile devrait se contracter.
- **une pression en son cœur, qui tend à la faire éclater**.
  Cette force est en général due à la production d'énergie par des réactions nucléaires.

Caractéristique essentielle : l'équilibre.

Le plus souvent, ces deux forces antagonistes s'équilibrent, les étoiles sont stables. C'est pourquoi elles brillent si longtemps.

**La gravité :**

- **plus il y a de matière, plus elle est forte** ;
  Une étoile de même taille que le Soleil, mais de masse double, a une gravité à la surface double.
- **plus la matière est concentrée, plus elle est forte** (plus près, plus fort !).
  Une étoile de même masse que le Soleil, mais deux fois plus petite, a une gravité quadruple.

La gravité est indépendante du temps.

Elle est **toujours** à l'œuvre, et tend à écraser l'étoile.

Pour éviter cet écrasement, l'étoile doit **toujours** lui opposer une force.

**Forces d'équilibre :**

- **la première est la chaleur**. Elle agite les particules, et produit une pression qui freine ou bloque la contraction.
  Cette chaleur peut avoir deux sources :
  - **l'énergie gravitationnelle**. En tombant, le gaz d'une étoile dégage de l'énergie, qui la chauffe.
    **Elle dure pendant la chute**
    Vous la ressentez lorsqu'un objet vous tombe sur le pied !
  - **la fusion thermonucléaire** qui chauffe le cœur de l'étoile (comme dans une bombe H).
    **Elle dure tant qu'il y a du carburant**

- **la seconde est la pression de Fermi.**
  Elle est produite par les électrons ou les neutrons que contient l'étoile (aussi nombreux que les noyaux d'hydrogène).
  Ne nécessitant aucun carburant, **cette pression dure indéfiniment.**

**Pression de Fermi**

**Les électrons n'aiment pas la promiscuité**. Plus on les force à se rapprocher (contraction de l'étoile), plus vite ils se fuient. Et plus violemment ils cognent les autres particules, créant une pression de plus en plus forte nommée pression de Fermi.

Le comportement bizarre des électrons provient de l'onde qui leur est associée.
Il en est une conséquence nécessaire, et non un ingrédient ajouté artificiellement.

**Les électrons ne pouvent dépasser la vitesse de la lumière**. Lorsque la contraction les force à s'approcher de cette vitesse, ils ne peuvent plus accélérer pour compenser. La pression de Fermi a donc une limite, qui dépend de la gravité, donc de la masse.

La masse limite est la **masse de Chandraskhar** pour les électrons,

et la **masse d'Oppenheimer-Volkov** pour les neutrons.

La pression de Fermi ne dépend pas du temps, puisqu'elle découle de la gravité.

Une fois établie, elle est toujours à l'œuvre.

Nécessitant une très forte densité, elle ne concerne que la fin de vie des étoiles.

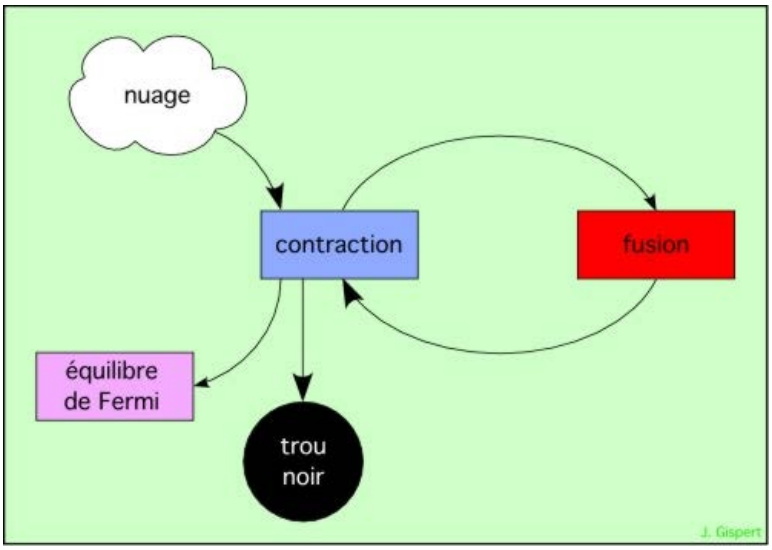
On conçoit donc qu'une étoile puisse être en équilibre :

- **temporairement si la pression est produite par la chaleur ;**
- **définitivement si c'est la pression de Fermi.**

**Principe de l'évolution des étoiles**

- Toute la vie d'une étoile s'explique par l'équilibre entre la gravité et une force antagoniste.
- Lorsqu'un équilibre est rompu, l'étoile en cherche rapidement un autre.

Elle passe ainsi par des phases longues d'équilibre,
séparées par des périodes rapides de transition.




**Etapes de la vie d'une étoile**

- **Formation de l'étoile (transition)**
  Effondrement d'un nuage de gaz et de poussières, 10 à 100 millions de fois plus vaste que la future étoile.
  La chute du gaz vers le centre chauffe l'étoile en formation (énergie gravitationnelle).
  La pression produite par la chaleur ralentit la contraction.
  L'étoile se met à briller comme une braise.
  **Durée : quelques milliers d'années**.

- **Séquence Principale (phase stable)**
  Lorsque le cœur atteint 10 millions de degrés, l'hydrogène commence à fusionner en hélium : l'étoile naît.
  La pression produite s'oppose à la contraction, l'étoile se met en équilibre.
  L'énergie est rayonnée : c'est celle que nous recevons du Soleil et des étoiles.
  **Durée : de quelques centaines de millions à quelques centaines de milliards d'années, selon la masse**.

- **Après l'hydrogène (transition)**
  Lorsque l'hydrogène s'épuise, la pression diminue, la gravité l'emporte, le cœur reprend sa contraction.
  Sa température centrale s'élève à nouveau. L'enveloppe grossit et rougit.
  **Durée : quelques millions d'années**.

- **géante rouge (phase stable)**
  Si le cœur atteint 100 millions de degrés, l'hélium fusionne pour donner du carbone, en produisant de l'énergie.
  L'étoile retrouve un équilibre.
  Le cœur chauffe et dilate l'enveloppe, qui enfle considérablement (100 fois le diamètre du Soleil).
  Et puisque la surface (photosphère) de cette étoile est immense, elle se refroidit, et donc rougit.
  **Durée : quelques centaines de millions d'années.**.

- **Epuisement de l'hélium (transition)**
  Lorsque l'hélium s'épuise, une nouvelle phase de contraction provoque une nouvelle élévation de température…

Chaque étape de fusion produit un élément plus lourd.
Cet élément est susceptible de fusionner à son tour à température plus élevée.

L'étoile passe, par une transition, d'une étape de fusion à la suivante en contractant son cœur, ce qui produit l'élévation de température nécessaire.

Cette contraction du cœur ne peut se produire que si la masse est suffisamment élevée.

Cette série d'étapes est limitée.

Chaque élément produit donne moins d'énergie que le précédent (l'hélium moins que l'hydrogène, le carbone moins que l'hélium…).

La fusion du fer ne produit plus d'énergie, mais en consomme : lorsque l'étoile en arrive là, **son équilibre énergétique est définitivement rompu**.

La masse de l'étoile détermine sa gravité, et donc l'écrasement qu'elle peut produire, et la température maximum. Par suite, la possibilité de fusionner les divers éléments.

La série se termine de deux façons différentes :

- **étoiles de masse raisonnable :** la masse détermine jusqu'à quel élément la fusion peut aller. Ensuite, la série de fusions s'arrête, et l'étoile cherche un autre type d'équilibre.
  La pression de Fermi joue ce rôle, par :
  - les électrons dans les naines blanches,
  - les neutrons dans les étoiles à neutrons.

- **les étoiles de grande masse** vont jusqu'au terme de la série.
  Là encore, l'étoile doit trouver un autre équilibre si c'est possible… Sinon, elle finira en trou noir !

Remarque : Pour le Soleil, l'équilibre de la Séquence Principale durera 10 milliards d'années. Il en est actuellement à la moitié. Son cœur est à 15 millions de degrés, et sa surface à 6.000 degrés seulement ! La couleur des étoiles varie selon leur masse : rouge pour les petites, bleue pour les grosses.

**Les différents restes d'étoiles**

Les étoiles ci-dessous sont stables définitivement.

- Naine brune
  Si la masse de l'étoile est inférieure à 8 % de la masse du Soleil, l'hydrogène ne peut pas fusionner. Cependant, le deutérium (hydrogène lourd), produit un peu d'hélium. Le deutérium existe en petite quantité dans l'Univers, et permet à cette étoile de briller faiblement. Sa température de surface est basse, elle est donc rougeâtre. Sa masse lui confère une petite taille, et justifie donc le nom.
- Naine blanche à cœur d'hélium
  Pour les masses un peu supérieures, la fusion de l'hydrogène a lieu, mais la gravité ne produit pas une température suffisante pour fusionner l'hélium. Dans la contraction en fin de fusion, les électrons se rapprochent, et développent une pression de Fermi. Celle-ci bloque définitivement la contraction. L'étoile a perdu son enveloppe de gaz, son cœur chaud d'hélium reste nu.
- Naine blanche à cœur de carbone
  Si la masse est juste suffisante pour la fusion de l'hélium, le cœur de l'étoile se transforme en carbone et oxygène. Lorsque cette fusion s'arrête, l'étoile se contracte, développe une pression de Fermi des électrons, et se stabilise comme la précédante. C'est une naine blanche à cœur de carbone.
- Etoile à neutrons
  Si la masse est suffisante pour passer à la fusion du carbone, l'étoile fusionne tous les éléments jusqu'au fer. Après toutes ces étapes, l'écrasement gravitationnel brise tous les atomes formés, et presse les électrons et protons, qui se transforment ainsi en neutrons. Alors, comme les électrons dans les naines blanches, les neutrons développent une pression de Fermi bien plus forte (ils sont plus lourds), qui bloque la contraction.
- Trou noir Si la masse initiale de l'étoile dépasse 8 fois la masse du Soleil, même les neutrons ne pourront pas maintenir l'écrasement gravitationnel. Aucun mécanisme connu ne peut éviter l'effondrement complet en trou noir. Un trou noir est un objet tellement dense, que la lumière ne peut plus le quitter. Elle y reste piégée. Par conséquent, aucun rayonnement n'en émanant, il apparaît totalement noir.

Tous ces objets ont atteint leur dernier stade d'évolution, et se refroidissent lentement.
Il leur faudra des milliards d'années pour atteindre la température du milieu interstellaire.

Les deux types de naines blanches sont ainsi nommées parce que :

- elles sont très petites, à peine plus grosses que la Terre ;
- le cœur qui subsiste est très chaud : 100.000 degrés, ce qui lui donne une couleur blanche. Leur densité est énorme : 1 tonne / $cm^3$. La masse limite est la masse de Chandraskhar : 1,4 $M_\odot$ .

**Evolution des étoiles de faible masse**

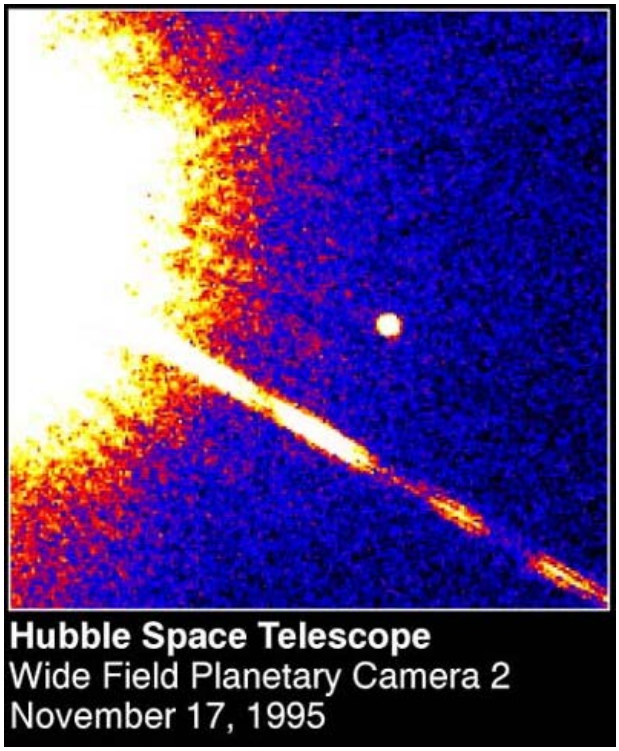
Les étoiles ont des destinées bien diverses Pour que les différentes fusions se produisent, il faut que la température centrale de l'étoile soit suffisante. Et cette température est d'autant plus élevée que l'étoile est plus contractée. Or c'est la masse qui produit l'écrasement de l'étoile. Donc, son évolution est essentiellement liée à sa masse.

Pour mesurer la masse M d'une étoile, on se réfère à celle du Soleil, prise pour unité et notée $M_\odot$. Une étoile de 2 $M_\odot$ a ainsi 2 fois la masse du Soleil. La masse indiquée est la masse au moment de la formation de l'étoile.

| température et masse minimales pour la fusion | | |
|---|---|---|
| hydrogène (en hélium) | 10 millions de degrés | 0,08 M |
| hélium (en carbone, oxygène) | 100 millions de degrés | 0,8 M |
| carbone (en magnésium, oxygène) | 800 millions de degrés | 3 M |
| oxygène (en soufre, silicium) | 1 milliard de degrés | 5 M |
| silicium (en nickel, fer) | 2 milliards de degrés | 15 M |

M < 0,008 M ; aucune réaction nucléaire n'est possible. L'objet est de type planétaire.

M < 0,08 M ; (soit 64 fois la masse de Jupiter = 64 $M_J$), masse trop petite pour que la température centrale atteigne les 10 millions de degrés. Ce ne sera pas une véritable étoile, mais elle pourra tout de même fusionner le deutérium (hydrogène lourd), présent en très petites quantités. Cet objet produira très peu d'énergie. Ce sont les naines brunes.




Naine brune Gliese 229 B (HST)
T. Nakajima & S. Kulkarni (CalTech), S. Durrance & D. Golimowski (JHU) NASA

0,08M < M < 0,8 M ; véritables étoiles, elles sont assez massives pour fusionner l'hydrogène en hélium. Lorsqu'il n'y a plus d'hydrogène, elles se contractent insuffisamment pour fusionner l'hélium, et éjectent leur enveloppe. Il ne reste que le cœur, dont les électrons produisent une pression de Fermi qui le stabilise. Ce reste est une naine blanche d'hélium.

Naine blanche : Sirius B

0,8 M < M < 3 M ; la masse est suffisante pour que l'hélium produit fusionne à son tour en carbone, mais insuffisante pour aller plus loin. Comme pour les étoiles précédentes, les électrons bloqueront la contraction, et l'enveloppe sera éjectée. Le cœur devient une naine blanche de carbone.

3 M < M < 8 M ; la masse est suffisante pour que le carbone fusionne après l'hélium. Le déclenchement de cette fusion se fait dans un cœur dégénéré (l'augmentation de température ne produit par de dilatation, donc pas de refroidissement) ; il est donc explosif et entraîne la dispersion complète de l'étoile. C'est une supernova.

8 M < M < 40 M ; lors de l'allumage du carbone, la température centrale est plus élevée et la densité plus faible. La matière n'est pas dégénére, et la production d'énergie entraîne une dilatation, qui refroidit le cœur et calme la réaction. Il n'y a pas d'explosion, et le carbone fusionne paisiblement. Lorsque la dernière réaction de fusion possible se termine, le cœur se contracte encore. Les électrons ne peuvent pas supporter la trop forte gravité. La contraction se poursuit jusqu'à ce que tous les atomes se brisent, et redonnent leurs constituants, neutrons et protons. Les protons s'unissent aux électrons pour donner aussi des neutrons. L'étoile n'est plus constitués que de neutrons, qui produisent une pression de Fermi et arrêtent la contraction. Il reste une étoile à neutrons.

50 M < M ; à la fin, les neutrons eux-même ne peuvent plus supporter la gravité. L'effondrement est total et conduit à la formation d'un trou noir. Les couches externes sont expulsées, et forment une supernova. Pour les étoiles de plus de 8 masses solaires, la perte de masse au cours de l'évolution est très importante, et dépend de nombreux facteurs. Aussi, le destin de ces étoiles n'est pas défini précisément par la masse initiale.

**Structure de l'étoile**

La température centrale dépend fortement de la masse, par l'intermédiaire de la gravité qui écrase le cœur. La fusion de l'hydrogène se fait par

deux moyens : la chaîne PP et le cycle du carbonne. La chaine PP commence son activité vers 4 10  K, alors que le cycle du carbone ne démarre qu'à partir de 18 $10^6$ K. Cette dépendance beaucoup plus forte à la température entraîne une différence qualitative de comportement des étoiles. Pour les étoiles de faible masse, jusqu'à 1,5 M , la chaîne PP est le principal producteur d'hélium, le cœur de l'étoile est radiatif et l'enveloppe convective. Pour les étoiles plus massives, le cœur est au contraire convectif, et l'enveloppe radiative.

Considérons une étoile de faible masse, pour laquelle la fusion se fait par la chaîne PP. Prenons le Soleil pour exemple. Sa température centrale et de 15 $10^6$ K, bien suffisante pour la chaîne PP, mais non pour le cycle du carbone. La chaîne PP est donc active au centre. En s'éloignant du centre, la température baisse, mais il faut s'éloigner beaucoup pour descendre aux 4 $10^6$ K. Donc, une région d'extension importante permet la fusion, et la production d'énergie. Ce qui fait que tout le cœur de l'étoile produit de l'énergie, et le gradient de température est faible, trop faible pour déclencher la convection. C'est pourquoi le trnasfert d'énergie est radiatif.

Au-dessus du cœur, la température est faible, et la matière opaque. Le transfert radiatif ne peut plus être efficace. Alors c'est la convection qui prend le relais.

Considérons maintenant une étoile de grande masse. Sa température centrale atteint ou dépasse les 18 $10^6$ K, mais baisse vite en-dessous avec l'éloignemen t au centre. Aussi, la fusion est-elle concentrée dans une région beaucoup plus petite que dans les étoiles moins massives. L'énergie n'est produite qu'au centre même. Ce qui fait que le gradient de température est fort, favorable à la convection. Le c&oeur; de l'étoile est donc convectif. De plus, il est très chaud, et la base de l'enveloppe aussi. Elle est bien moins opaque que dans les petites étoiles, et permet le transfert radiatif.

Dans les toutes petites étoiles, la chaîne PP est évidemment la seule active. L'opacité est élevée, car la température est basse. L'étoile est totalement convective.

Ces différences de structure ont une incidence sur l'évolution chimique de l'étoile. La convection qui se produit dans les petites et grosses étoiles brasse la matière, et mélange l'hélium produit à l'hydrogène de tout le cœur. Par conséquent, l'hydrogène de toute la région centrale de l'étoile est transformé en hélium. Dans les étoiles intermédiaires, comme le Soleil, seul le cœur où se produisnet les réactions est concerné par la fusion.

---=OO=---




Les étoiles doubles sont des couples d'étoiles, apparents ou réels.

Selon les moyens observationnels, on distingue quelques types d'étoiles doubles :

- *doubles optiques* - dues à la perspective ;
- *doubles astrométriques* - observées par leur déplacement au cours du temps ;
- *doubles photométriques* - montrant des variations de luminosité ;
- *doubles spectroscopiques* - non observables directement, détectées par les variations du spectre ;

Ce classement n'a aucune signification physique, puisqu'il est basé uniquement sur les différentes méthodes d'observation. Mais les propriétés physiques sont corrélées avec ces méthodes. Aussi, savoir qu'une étoile appartient à telle ou telle catégorie donne une information immédiate sur les propriétés accessibles, et font la pertinence de ce classement.

**Doubles optiques, ou visuelles**

Ce sont des étoiles proches l'une de l'autre dans le ciel, par effet de perspective. Les étoiles occupent dans le ciel des positions aléatoires, car leur répartition est tout à fait quelconque. Il arrive quelquefois que deux étoiles se trouvent avoir une direction très voisine, alors que leurs distances sont assez différentes. Par effet de perspective, elles nous paraissent proches l'un de l'autre.

De tels couples n'ont aucun intérêt sur le plan scientifique. Cependant, si un véritable couple (deux étoiles à très courte distance l'une de l'autre) est proche de la Terre, il peut être vu sous un aspect exactement semblable. Pour savoir si un tel couple visuel est dû à la perspective, il faut déterminer les distances des deux composantes.

**Doubles vraies**

Les doubles vraies sont des couples d'étoiles liées par la gravité. Elles tournent autour de leur centre de gravité commun.

Contrairement à ce que l'on a cru très longtemps, les étoiles doubles ne sont pas l'exception, mais la règle. Plus précisément, plus de 50 % des étoiles appartiennent à un système multiple, double, triple ou même quintuple. Nous verrons une étoile très connue qui à ce sujet est bien particulière !

Chaque étoile décrit une ellipse képlérienne, autour du centre de gravité du couple, qui est en un des foyers. Les excentricités de ces orbites sont égales.

Soient $E_1$ et $E_2$ les étoiles. Notons $a_1$ et $m_1$ le demi grand axe et la masse de $E_1$, $a_2$ et $m_2$ ceux de $E_2$. Alors, le centre de masse est tel que :

$$m_1 a_1 = m_2 a_2$$

Plus la masse de $E_1$ est grande, plus petit sera son demi grand axe.

Par exemple, si $m_1 = 10 m_2$ :
$10 m_2 a_1 = m_2 a_2$
On peut simplifier par $m_2$ et on obtient : $a_1 = a_2 / 10$

Voici une animation montrant un couple d'étoiles de masses différentes ($m_2 = 2 m_1$, donc $a_1 = 2 a_2$), tournant autour de leur centre de gravité commun.

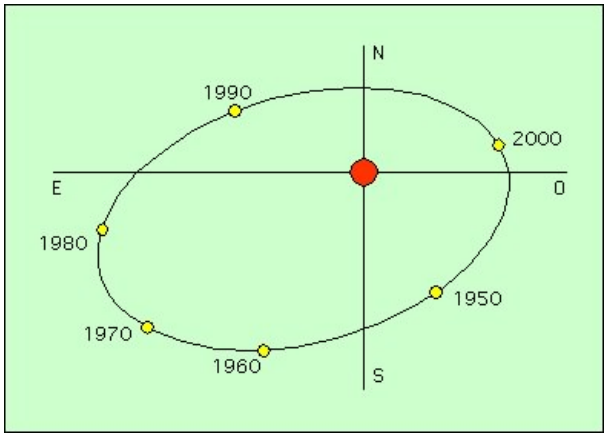
couple d'étoiles

L'animation permet de faire varier l'inclinaison des orbites, de 90° (les orbites sont vues de dessus), à 0° (elles sont vues exactement par la tranche). On peut également modifier l'excentricité des orbites. Il serait facile de démontrer qu'une ligne imaginaire joignant à tout instant les deux étoiles, devrait passer par le foyer commun (croix jaune) des orbites. L'animation permet de tracer ou non cette ligne pour le vérifier.

Si maintenant on se place dans un référentiel tel que l'une des étoiles (la plus massive par exemple) est fixe, alors l'autre décrit autour d'elle une orbite képlérienne aussi, mais son demi grand axe est la somme des deux vrais :

$$a = a_1 + a_2$$

De plus, l'orbite n'est jamais vue dans les circonstances idéales de l'animation, mais en projection quelconque sur la ligne de visée.




ξ Ursæ Majoris

ξ UMa est une étoile proche, dont les deux composantes sont visibles. Sur ce schéma, remarquez que son orbite apparente, vue depuis la Terre, est bien une ellipse, mais que l'étoile principale n'est pas au foyer de cette ellipse. Ceci est un effet de perspective, et la déformation est fonction de l'inclinaison des orbites par rapport à la Terre. Un calcul permet de reconstruire l'orbite exacte, et donc de déterminer le demi grand axe a du couple. Cet effet de projection ne se produit pas dans l'animation, parce que le grand axe des deux orbites est toujours perpendiculaire à la ligne de visée.

La valeur du demi grand axe de leur orbite, par rapport à la taille des étoiles, joue un rôle important dans les propriétés physiques. On parle de double lâche lorsque les composantes sont à des dizaines ou des centaines d'Unités Astronomiques (ce qui en fait déjà des étoiles très proches), et de couples serrés lorsque cette distance est inférieure à l'unité astronomique, tout en restant supérieure au rayon de l'étoile (sans quoi elles fusionnent).

Dans un couple très serré, il peut y avoir échange de matière entre les deux composantes, mais ceci est une autre histoire, que nous verrons en étudiant les étoiles variables.

**Doubles astrométriques**

Les doubles que nous allons étudier maintenant sont de vrais couples, mais dans lesquels une seule composante, la plus brillante, est observable. Dans le cas contraire, ce seraient des couples optiques ! Mais l'étoile la plus brillante est assez proche de la Terre pour qu'on puisse analyser son mouvement propre.

Toute étoile se déplace sur le fond du ciel, en ligne droite si on ne considère qu'un court intervalle de temps (quelques siècles...). Un couple n'échappe pas à la règle. Mais aucune des deux étoiles ne va suivre cette ligne idéale ; c'est le centre de masse qui la parcourra. Aussi, dans son mouvement elliptique autour du centre de masse, l'étoile principale va suivre une trajectoire ondulante, avec des boucles de part et d'autre de la trajectoire du centre de masse. Bien sûr, les deux boucles seront inégales, d'importance inversement proportionnelle aux masses des composantes.

L'analyse de la trajectoire de Sirius a permi, dès 1830, de montrer que cette étoile est double, bien qu'il ait été impossible de voir le compagnon. Par des mesures astrophysiques, on a pu évaluer la masse de Sirius A. Et de son chemin dans le ciel déduire la masse du compagnon, Sirius B. On a vu que cette masse était de l'ordre d'une masse solaire, mais avec une luminosité très faible, alors indétectable. Il s'agissait donc d'une étoile de masse normale, mais beaucoup moins lumineuse qu'une étoile standard (de la Séquence Principale). L'explication était que sa surface était très petite, donc aussi son rayon. Il s'agissait d'une toute petite étoile. C'est la première naine blanche détectée.

**Doubles photométriques**

La méthode d'observation est ici la mesure de la quantité de lumière reçue, à l'aide d'une cellule photoélectrique autrefois, d'une camera CCD aujourd'hui. Lorsque la luminosité varie dans le temps de manière cyclique, avec des périodes où la lumière est constante, et deux minima, on en déduit qu'il s'agit d'une binaire.

Les doubles photométriques montrent le cas où une étoile passe devant l'autre, produisant des éclipses. La luminosité étant de ce fait variable, on nomme ces étoiles variables à éclipses. Nous les étudierons donc avec les autres variables.

**Doubles spectroscopiques**

Les doubles spectroscopiques sont des étoiles apparemment simples, et ne montrant pas de variations significatives de la luminosité (il n'y a pas d'éclipses). Mais lorsqu'on prend un spectre de leur lumière, on observe parfois un dédoublement des raies spectrales. Si ce dédoublement est permanent, et périodique, on l'explique par la présence de deux étoiles, dont la vitesse par rapport à la Terre est différente, impliquant un effet Doppler lui aussi différent. C'est un couple d'étoiles vue en perspective. La vitesse des deux étoiles varie périodiquement au cours du temps, et les raies spectrales aussi. Voyez l'animation explicative de ce phénomène.

Si l'inclinaison de l'orbite par rapport à la Terre est assez faible, les étoiles s'éclipsent mutuellement, et on peut les détecter aussi comme doubles photométriques. Alors, ce sont des étoiles variables. Aussi, nous verrons l'explication des doubles spectroscopiques en étudiant les étoiles variables (l'animation indiquée ci-dessus explique également ce cas).

**Masse**

Les étoiles doubles présentent un intérêt capital en astrophysique. Comment déterminer la masse d'une étoile ? Certainement pas en observant sa lumière. En fait, il n'existe qu'une seule façon **directe** de le faire : déterminer son influence gravitationnelle sur un objet en orbite autour. C'est de cette façon qu'on a mesuré les masses des planètes, en observant le ballet de leurs satellites. La loi de la Gravitation Universelle de Newton permet de calculer la masse en fonction des paramètres de l'orbite.

Toute la physique des étoiles est basée sur la connaissance de leur masse (théorème de Vogt-Russel), et celle-ci est le paramètre le plus important, qui détermine leur évolution. Heureusement, il y a suffisamment d'étoiles doubles de tous les types spectraux proches de la Terre, qui permettent de connaître les masses des étoiles de tous types. A partir de là, l'étude des étoiles a pu se faire.

Considérons un couple orbital dont on puisse mesurer la période $T$, ainsi que les deux demi grands-axes apparents $a_1$ et $a_2$ (voir plus haut). Nous avons déjà les deux équations :

$$a = a_1 + a_2 \qquad \text{et} \qquad m_1 a_1 = m_2 a_2$$

$a_1$ et $a_2$ étant connus (mesurés sur le ciel), on calcule $a$ et le rapport $m_1 / m_2 = a_2 / a_1$ ; désignons par $r$ ce rapport $r = m_1 / m_2$, qui est donc mesuré.

Les deux objets suivent les lois de Kepler, et en particulier la troisième qui lie le demi grand-axe et la période :

$a^3 / T^2 = m_1 + m_2$

$a$ et $T$ étant connus, on en déduit la somme des masses $m_1 + m_2$ ; désignons par $s$ cette somme $s = m_1 + m_2$

On connait donc, maintenant, la somme et le rapport des masses :

$r = m_1 / m_2 \Rightarrow m_1 = r\, m_2$

Reportons cette valeur de $m_1$ dans l'expression de la somme :

$s = r\, m_2 + m_2 = m_2 (r + 1)$

d'où :

$m_2 = s / (r + 1)$

$m_2$ est maintenant connue ; on reporte sa valeur dans l'expression de la somme et on en tire $m_1$ :

$m_1 = s - m_2$

Donc, $s$ et $r$ étant mesurés :

$$m_2 = s / (r + 1)$$

$$m_1 = s - m_2$$

Ainsi, la mesure de $T$, $a_1$ et $a_2$ permet de calculer les masses des deux composantes du couple. Analysant par ailleurs leur lumière, on détermine leur type spectral. Ceci permet d'étudier le type spectral, c'est-à-dire le fonctionnement de l'étoile, en fonction de sa masse. C'est par là qu'on a pu déterminer une relation fondamentale entre la masse d'une étoile et sa luminosité, et fonder toute l'astrophysique stellaire.

**Systèmes multiples**

Quelques mots à propos des systèmes comprenant plus de deux étoiles.

On y distingue assez souvent une structure hiérarchique, en ce sens qu'un système triple est souvent composé d'un couple dont le centre de masse est lui-même en orbite avec une troisième étoile. On trouve aussi deux couples, chacun jouant le même rôle qu'une étoile simple dans une association par 4.

Un système multiple qui ne présenterait pas ce genre de particularité serait **dynamiquement instable**, et se dissocierait très rapidement après sa formation.

La nature nous offre quelques beaux exemples. Ainsi, une étoile très connue de la Grande Ourse, **Mizar**, forme une double visuelle avec **Alcor**. Alcor est connue depuis l'Antiquité, mais il est probable que sa magnitude a diminué (sa luminosité a augmenté). Le nom Alcor vient de l'arabe, et évoque la difficulté. Cette petite étoile était donc un test de bonne vue, alors qu'aujourd'hui elle est facilement visible. Il s'agit d'un couple optique, les deux étoiles n'étant pas liées gravitationnellement : Mizar est à 78 AL de nous, Alcor se situe 3 AL plus loin.

Mais une observation télescopique d'amateur montre vite que Mizar est double. C'est même la première double télescopique connue, car elle a sans doute été vue par Galilée en 1620, et elle est mentionnée par Riccioli en 1650. Mieux, c'est la première double mesurée par photographie,

par Georges Bond en 1857.

Enfin, une observation spectroscopique de chacune des deux composantes nous révèle qu'elles sont toutes deux des doubles spectroscopiques !

Autre exemple magnifique : **Albireo**, dans le Cygne (c'est l'étoile qui forme le bec du cygne). Albireo est un vrai couple orbital exceptionnel dans un petit télescope : la première composante, A, est jaune orangée, la seconde, B, est bleu-vert. Les magnitudes sont assez proches (3,1 pour A, 5,1 pour B), et le contraste de couleur fait toute la beauté de ce couple bien connu des amateurs. L'écartement des deux étoiles est de 34,3" ce qui en fait un couple facile. Sa période est supérieure à 75.000 ans, mais elle est mal déterminée. La distance de ce système est de 385 AL.

A est de type spectral K3II ; sa classe de luminosité II la place parmi les supergéantes ; son type K3 lui confère une température superficielle de 4.100 K. La magnitude et la température superficielle permettent de calculer son diamètre, qui est de l'ordre de 20 fois celui du Soleil. Mais A est de plus une binaire spectroscopique.

B, la composante bleu-vert, est de type B8V ; c'est une naine de la Séquence Principale (classe V) ; le type B8 en fait une étoile massive et chaude : 12.000 K ; son diamètre est 3 fois celui du Soleil. Cette étoile est en rotation très rapide, et la force centrifuge à l'équateur lui fait perdre de la masse. L'étoile est maintenant entourée d'un disque de matière provenant de cette perte.

---=OO=---




## *Généralités*

Les étoiles variables constituent l'un des rares domaines où l'amateur peut faire œuvre scientifique, même avec des moyens modestes. Il y a énormément d'étoiles variables, et les professionnels ne peuvent les observer pour deux raisons :

- par manque de temps : il faut une surveillance systématique ;
- par manque de matériel, leurs télescopes très coûteux ayant des tâches plus importantes à remplir.

Les étoiles variables sont celles dont la luminosité évolue au cours du temps. Au-dessus de nos têtes, il y en a de nombreuses, mais il n'est pas très facile de les observer, parce que leur éclat est souvent faible, et que leur variation est relativement lente. Pour constater la variabilité d'une étoile, il faut la comparer à quelques autres qui l'entourent, et noter précisément celles qui sont plus brillantes et celles qui le sont moins (par exemple en faisant un dessin du champ). En reprenant cette même observation la nuit suivante, ou quelques nuits plus tard, on s'apercevra peut-être qu'elle est devenue plus brillante (ou moins) que certaines de ses voisines.

- La première étoile variable découverte fut la nova observée par Tycho Brahé en 1572.
- Le 13 août 1596, Fabricius a découvert que l'étoile o (omicron) de la Baleine disparaissait, puis plus tard réapparaissait. Quelques mois plus tard, elle avait vraiment disparu. Puis elle fut redécouverte en 1603. Enfin, en 1638, Hévélius la nomma *Mira Ceti* (la Merveilleuse de la Baleine), en référence au caractère magique que lui conférait cette variabilité parmi des milliers d'étoiles connues pour invariables. Sa périodicité n'a été reconnue qu'en 1638.
- En 1669, Montanari a noté les baisses de luminosité d'Algol, β Persei. Goodrike a observé la périodicité de ses variations en 1782 ; De plus, il en a compris le mécanisme.

Lorsqu'on a observé les premières étoiles variables, on a très vite remarqué que la luminosité de certaines revenait régulièrement. Ce sont des variables périodiques. D'autres présentent des variations erratiques. Mais de manière très exceptionnelle, on peut parfois voir une étoile dont l'éclat augmente considérablement (de 10 à 12 magnitudes). La plupart du temps, ces étoiles étaient invisibles à l'œil nu avant ce changement d'éclat. On a donc l'impression de voir une étoile nouvelle, et pour cette raison on les a appelées ***Novæ*** (***nova*** au singulier). Les chinois les nommaient joliment *étoiles invitées*. Les novæ ne sont pas des variables périodiques, mais elles peuvent revenir à leur éclat d'origine après quelques mois, puis avoir un nouveau sursaut de luminosité quelques années plus tard. On les appelle alors ***novæ récurentes***.

Enfin, on a observé quelques étoiles dont l'éclat augmentait encore plus que celui des novæ ; on les a appelées ***supernovæ***. Ces termes proches sont dus à l'aspect visuel de ces astres, et cachent une nature physique parfois très différente. Nous verrons les explications plus loin.

On connaît aujourd'hui plus de 20.000 étoiles variables.

Les étoiles variables les plus faciles à observer sont Algol (β Per), γ Cassiopeia, Mira Ceti (o Ceti), R Hydræ, χ Cygni, ε Aurigæ, α Orionis, Antarès (α Scorpii), β Lyræ, R Lyræ...

**Noms des variables**

Les étoiles les plus brillantes ont reçu des noms d'usage dont l'origine remonte en général fort loin dans le temps. Mais les étoiles variables étant de découverte récente, ne possèdent pas de noms historiques. Les astronomes ont du leur trouver une désignation, mais en nommant les premières, ils n'imaginaient pas qu'il puisse y en avoir autant. Aussi, le système de désignation en usage, proposé par **Argelander**, est-il complexe, parce qu'il a subi plusieurs ajouts successifs. En voici la description :

Les quelques variables possédant un nom historique, les plus brillantes, le conservent. Par exemple Algol, Antarès et Mira Ceti.

On attribue aux autres variables une lettre à partir de R, dans l'ordre de leur découverte dans chaque constellation :

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| R | S | T | U | V | W | X | Y | Z | 9 |

ensuite en doublant la lettre, toujours à partir de R :

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RR | RS | RT | RU | RV | RW | RX | RY | RZ | 9 |
| | SS | ST | SU | SV | SW | SX | SY | SZ | 8 |
| | | TT | TU | TV | TW | TX | TY | TZ | 7 |
| | | | UU | UV | UW | UX | UY | UZ | 6 |
| | | | | VV | VW | VX | VY | VZ | 5 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| WW | WX | WY | WZ | 4 |
| | XX | XY | XZ | 3 |
| | | YY | YZ | 2 |
| | | | ZZ | 1 |
| | | | total | **54** |

Le triangle, de RR à ZZ, est la moitié d'un carré de côté 9. Il contient 9 × 10 / 2 éléments (vous pouvez vérifier ce calcul sur d'autres triangles). Donc il possède 45 éléments. Ceci va nous servir ci-dessous.

Cette série étant épuisée, on recommence à partir du début de l'alphabet, mais :

- en s'arrêtant à Q bien sûr (puisque R a déjà été utilisée) ;
- sans utiliser la lettre J (qui n'existait pas dans l'ancien alphabet).

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| AA | AB | AC | ... | AI | pas de J | AK | AL | ... | AZ | 25 |
| | BB | BC | ... | BI | | BK | BL | ... | BZ | 24 |
| | | CC | ... | CI | | CK | | ... | CZ | 23 |
| | | | ... | ... | | | | | ... | ... |
| | | | | II | | IK | | | IZ | 17 |
| | | | | | pas de ligne J | | | | | |
| | | | | | | KK | | | KZ | 16 |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | QQ | ... QZ | 10 |
| | | | | | | | | | total | **280** |

Tout ceci permet de nommer 54 + 280 = 334 étoiles variables.

On peut remarquer que l'union des deux tableaux ci-dessus constitue un triangle complet, depuis AA jusqu'à ZZ, bâtit sur un alphabet de 25 lettres (puisque le J en est exclus). Ce tableau complet contient donc 25 × 26 / 2 = 325 combinaisons différentes. On y rajoute les neufs lettres isolées du début, et on obtient donc 325 + 9 = 334 combinaisons.

Les 334 premières variables découvertes dans chaque constellation sont donc nommées selon ce procédé.

Ce n'est encore pas suffisant, les étoiles variables étant bien plus nombreuses. La méthode choisie pour la suite est la plus simple ; elle consiste à mettre la lettre V, pour variable, suivie du numéro de l'étoile. La première est donc V335, suivie de V336, V337 .... Cette suite est maintenant illimitée.

Actuellement, on a déjà dépassé :

dans le Sagittaire, V4000 ; dans Ophiucus, V2000 ; dans le Cygne, l'Aigle et Orion, V1000...

**Diversité et classement**

Nous commençons par étudier de vraies étoiles, présentant des particularités de fonctionnement, mais de nature profonde identique. Nous verrons plus tard des types beaucoup plus exotiques.

Distinguons tout d'abord les vraies variables des fausses :

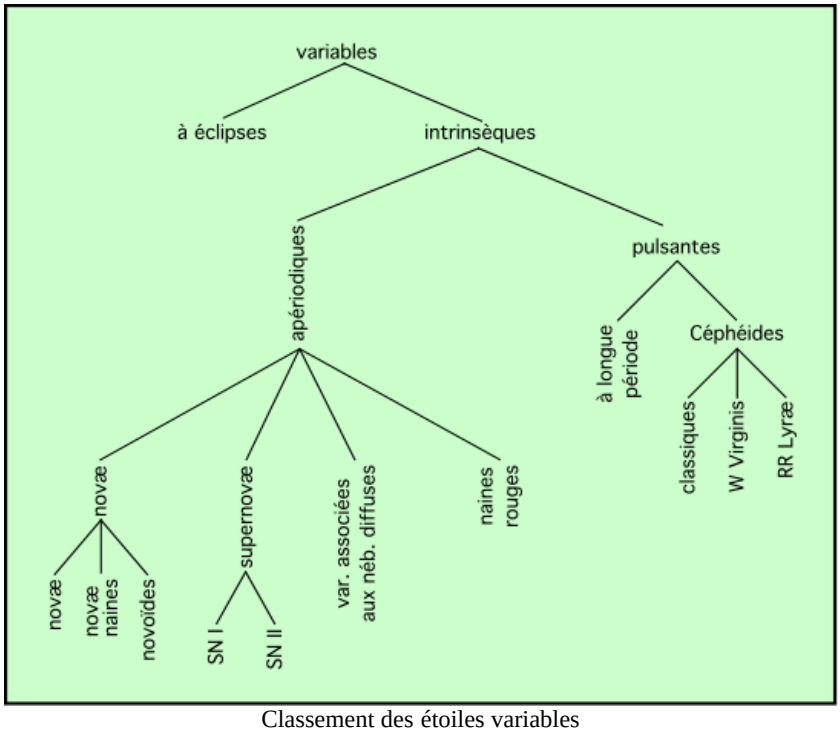
- Certaines sont des étoiles doubles, qui se cachent l'une derrière l'autre de temps en temps, et ce changement d'aspect entraîne une modification apparente d'éclat. Il n'y a pas de modification physique des étoiles, et seule la perspective explique les différences d'éclat. Ce sont les ***variables à éclipses***. Ces variables sont assez peu nombreuses, car les éclipses ne se produisent que si la Terre se trouve approximativement dans le plan de l'orbite du couple. Une proportion assez faible des couples stellaires produit donc des éclipses.

- Les autres présentent des variations de luminosité réelles, qui proviennent de changements des conditions physiques (température, pression...) à la surface ou dans les profondeurs de l'étoile. Elles sont nommées *variables intrinsèques*. Elles sont beaucoup plus nombreuses que les variables à éclipses.

Il existe des mécanismes physiques différents engendrant les variations lumineuses :

- Il y a des instabilités qui ne concernent que l'atmosphère ou les couches superficielles de l'étoile ; elles peuvent donc se reproduire avec plus ou moins de régularité ; ce sont les *variables pulsantes* ;
- D'autres proviennent de profonds changements dans la vie de l'étoile : un déséquilibre important, dû en particulier à l'évolution chimique, modifie sa structure. Il n'y a pas de répétitions régulières du phénomène, et on classe ces étoiles sous le vocable de *variables apériodiques*. C'est le cas des *novæ* et des *supernovæ*. Leurs variations de luminosité sont produites par des explosions qui vont jusqu'à détruire l'étoile. Les bouleversements qu'elle subit empêchent le phénomène de se reproduire... Les moins violentes sont capables de revenir à un état assez proche de leur état antérieur pour subir plusieurs fois le phénomène explosif ; ce sont les *novæ récurentes* .

Les plus régulières des variables pulsantes sont les ***variables périodiques***, ou *Céphéides*. Les autres, moins régulières, ont aussi une période plus longue : on les nomme ***variables à longue période***.




Classement des étoiles variables

Les Céphéides classiques sont de jeunes géantes de type spectral F à K, très lumineuses, leur période étant comprise entre 1 et 70 jours. Le prototype des variables à longue période est Mira Ceti, la période est entre 310 et 370 jours. Les RR Lyræ sont de type spectral A ou F, ce sont de vieilles étoiles qui fusionnent l'hélium, leur période est comprise entre 0,05 et 1,2 jours.

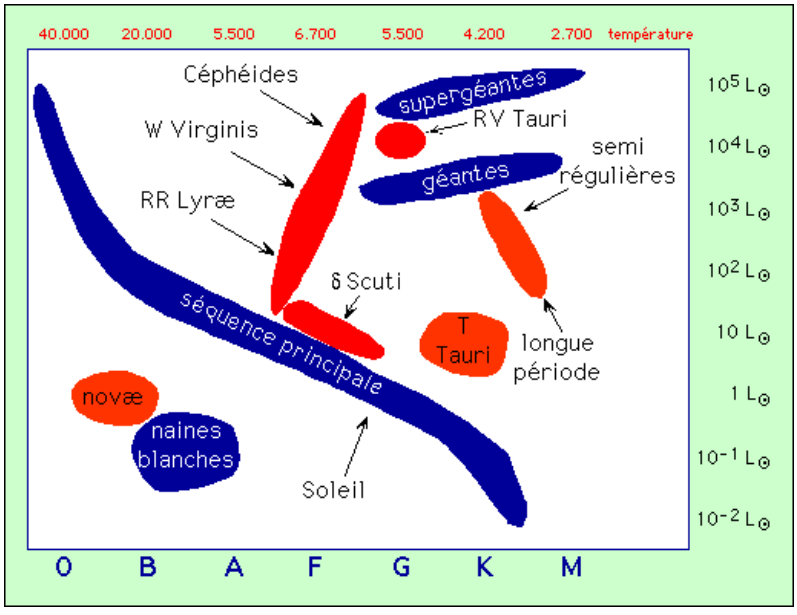
**Remarque** : ce classement élémentaire est indicatif. Il est basé essentiellement sur les propriétés physiques de quelques types d'étoiles variables, et n'est pas exhaustif.

On doit considérer ensuite les variables apériodiques, ou ***variables éruptives***.

Un grand nombre de types de variables n'entrent pas dans cette classification. La raison en est que leur comportement est vraiment atypique, avec un nombre de représentants très faible, ou bien que leur variabilité est due à plusieurs phénomènes superposés. Ces variables sont regroupées sous le vocable assez flou de ***variables nébulaires***.

Enfin, les possibilités instrumentales ayant été considérablement augmentées dans les dernières années, en particulier grâce aux satellites artificiels qui nous ont permis d'observer dans des gammes d'ondes autrement inaccessibles, des nouveaux astres nous présentent des variations d'intensité dans ces gammes d'ondes. Sans être des variables au sens traditionnel du terme, leur éclat, vu par l'intermédiaire de ces nouveaux yeux, est variable. Nous les présentons dans le chapitre consacré aux ***nouvelles variables***.

**Position dans le diagramme HR**



Ce diagramme montre uniquement les variables intrinsèques, dont la variabilité provient des conditions physiques, donc de la position sur le diagramme HR.

Les variables à éclipses peuvent se trouver n'importe où dans le diagramme, puisque leurs variations ne sont pas de nature physique.

On voit immédiatement que **les étoiles variables ne sont pas sur la Séquence Principale** ; ceci est assez normal, puisque la Séquence Principale (combustion de l'hydrogène) représente la phase de stabilité des étoiles.

**Nombre de variables connues**

La répartition des variables connues en fonction de leur type est la suivante :

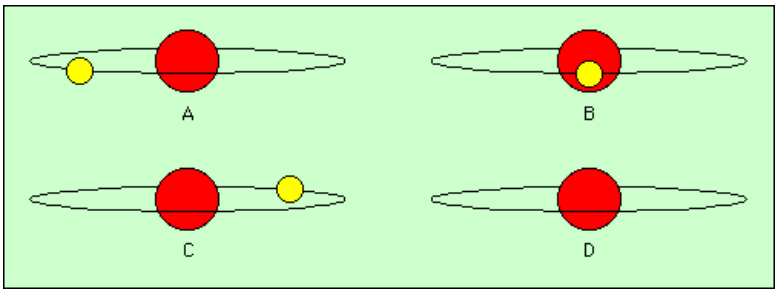
| variables à éclipses | éruptives | pulsantes | pulsars |
|---|---|---|---|
| 4.100 | 1.600 | 14.000 | 550 |

---=OO=---

# Variables à éclipses



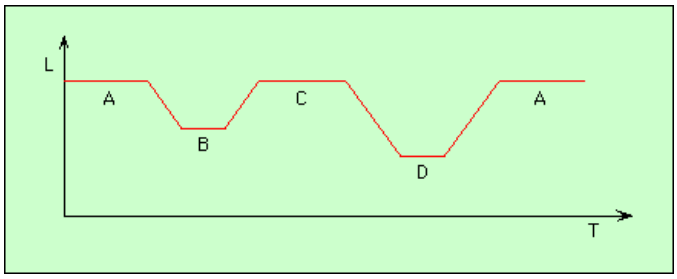
Les variables à éclipses sont des systèmes binaires dont l'orbite est vue de profil, dans lesquels chaque étoile cache périodiquement l'autre. Les deux étoiles peuvent être très différentes : une grosse froide (peu lumineuse), l'autre petite, chaude et très lumineuse. Le mouvement orbital d'une étoile autour de l'autre (plus exactement les mouvements orbitaux des deux étoiles autour du centre de gravité du système) étant très régulier, la courbe de lumière observée est d'une belle régularité. La première étoile observée et étudiée dans cette catégorie est **Algol** (β Persei ; Algol vient de l'arabe *al ghul* (l'œil du) démon) ; Aussi, on parle maintenant des étoiles *de type Algol*.




La plupart du temps, les deux étoiles sont éloignées l'une de l'autre, et on les voit toutes deux (situations A et C). L'éclat du système est donc la somme des éclats des deux étoiles.

Lorsque la plus petite passe devant la plus grosse (situation B), on note une diminution de la luminosité, puisque une partie de la plus grosse est cachée. Supposons que l'étoile rouge, plus grosse, soit aussi la moins lumineuse (c'est un cas fréquent). La diminution d'éclat sera assez faible.

Lorsque la plus petite et plus brillante passe derrière (situation D), son éclat est totalement masqué. La diminution de luminosité du couple sera forte. On peut résumer ces variations sur une courbe de lumière :




Sur cette courbe schématique, les parties A et C correspondent à l'éclat cumulé des deux étoiles. B est le minimum secondaire, lorsqu'une partie de l'étoile la moins brillante est cachée, et D est le minimum principal, correspondant à l'éclipse de la plus brillante des deux composantes.

Lorsqu'on est en présence d'une étoile variable, on peut montrer que c'est une variable à éclipses en traçant sa courbe de lumière : la forme ci-dessus est caractéristique. De plus, elle permet d'obtenir des renseignements sur chacune des composantes : les dimensions respectives des segments A, B, C et D déterminent la forme de l'orbite et les tailles respectives des deux étoiles.

Algol a une magnitude visuelle de 2,20 en-dehors des éclipses ; celle-ci descend à 3,47 au minimum principal, et à 2,26 au minimum secondaire. Le système d'Algol est trop serré pour qu'on puisse distinguer les deux composantes. Ces dernières sont 3 à 4 fois plus grosses que le Soleil, et leurs types spectraux sont B8 et G4. L'étoile de type B8 est une géante chaude, l'autre est presque de même type que le Soleil. Algol varie en 2,867 jours.

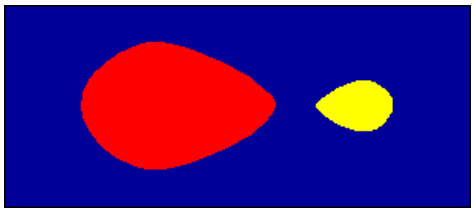
Animation montrant la courbe de lumière

**Distance des composantes**

Les couples d'étoiles présentent des écartements très divers. Certaines sont éloignées l'une de l'autre, d'autres beaucoup plus proches. Algol est un couple assez lâche, comme l'atteste sa courte période.

β Lyræ est un système extrêmement serré, dans lequel les composantes sont très déformées par leur attraction mutuelle. Elles prennent une forme elliptique, sous l'effet des marées, et se montrent tantôt sous leur petit axe, tantôt sous leur grand axe. La surface visible est donc fortement variable, ce qui modifie la brillance. La courbe de lumière est affectée par ces déformations : entre les éclipses, la surface présentée par la plus

grosse composante varie selon qu'elle se présentede face ou de profil (de face elle est ronde, de profil elle est allongée comme sur le dessin). La température superficielle est à peu près la même de tous les côtés, aussi l'éclat varie en fonction de la surface visible.



**Variables semi-attachées, attachées**

Enfin, on observe des étoiles dont les distances sont tellement faibles, qu'elles se touchent. Ceci est en général possible parce que l'une au moins des composantes est évoluée, c'est une géante rouge. Etant proche de l'autre, elle rempli son lobe de Roche. L'autre étoile aussi est déformée. La courbe de lumière est fortement affectée par ces déformations, est les divers angles sous lesquels se présente le système en rotation.

**On distingue 3 sous-groupes :**

- type Algol : période de 1 à 10 jours ; tous les types spectraux sont représentés, avec un excès de type A.
- type β Lyræ : étoiles chaudes de types spectraux O ou B ; la distance des deux étoiles est du même ordre de grandeur que leurs rayons ! Leur prériode est de quelques jours.
- type W Ursæ Majoris : période d'un jour ou moins ; type spectral de F5 à M.

Les variables de type Algol, ou *algolides*, sont les plus séparées ; les β Lyræ sont plus proches, et les W UMa encore plus.

**Spectre des variables à éclipses**

L'analyse spectroscopique du couple à différentes époques montre les variations des raies spectrales. Lorsque la composante la plus petite est totalement éclipsée, on obtient le spectre pur de l'autre composante. Dans les autres situations, on observe un spectre composite. Si le couple est suffisament lâche ou suffisament proche de nous, il est possible d'observer individuellement chaque étoile ; sinon, on doit se contenter d'un spectre mélangé.

Une autre variable à éclipses est VV Céphei. Ses éclipses sont totales, et sa courbe de lumière est plus marquée que celle d'Algol. Elle est composée d'une étoile chaude et brillante tournant en 20 ans autour d'une énorme étoile froide.

Animation montrant le spectre variable

**Epsilon Aurigæ**

Epsilon Aurigæ est un couple bien étrange ! Il s'agit d'une binaire à éclipses, mais une seule composante est visible. La période des éclipses est de 9.890 jours, soit à peu près 27 ans. La distance du couple est de l'ordre de 2.000 AL. La primaire est une grosse étoile de type spectral A8, donc très brillante, ce qui permet de la voir à cette distance sous une magnitude apparente de 3 au maximum. Son diamètre doit être d'une centaine de fois celui du Soleil.

D'après l'étude de l'orbite, le compagnon devrait avoir une masse de 8 M , et par conséquent devrait être facilement visible lui aussi. Puisque ce n'est pas le cas, on a imaginé que c'était un trou noir, et ce fut pendant quelques temps le meilleur candidat !

Mais un problème se pose pour cette interprétation : les éclipses durent deux ans !! Le diamètre d'un trou noir de 8M n'est que de 25 km, et un tel objet ne pourrait absolument pas éclipser une géante. On a donc abandonné cette idée, pour revenir à un concept plus sage : le compagnon serait une étoile normale, mais enveloppée dans un grand nuage de poussières, qui la cache à nos yeux.

La prochaine éclipse se produira à partir de 2009, et sera l'occasion de vérifier les paramètres du couple pour en préciser les caractéristiques.

**Suite**

variables périodiques

---=OO=---

# Variables pulsantes



## *Variables périodiques*

Les périodes sont comprises entre quelques heures et 100 jours. On distingue deux groupes, en fonction de la période :

**Variables à courte période**

Ces étoiles présentent toutes une courbe de lumière avec une montée de la luminosité assez rapide, et une descente nettement plus lente. La variation de luminosité est de l'ordre d'une magnitude, donc relativement faible (leur luminosité correspondante est tout de même 2,5 fois plus forte au maximum qu'au minimum).




Ce groupe à courte période comprend 3 types d'étoiles :

- Les **Céphéides**, ou Céphéides classiques (modèle δ Céphée), dont le type spectral va de F, pour les étoiles de plus courte période, à K pour les plus lentes ;
- Les **RR Lyræ**, dont la période est beaucoup plus courte, et dont le type spectral est A pour la plupart ;
- Les **W Virginis**, qui sont très semblables aux précédentes, mais de périodes plus longues.

**Les Céphéides classiques**

Les variations lumineuses s'accompagnent de variations :

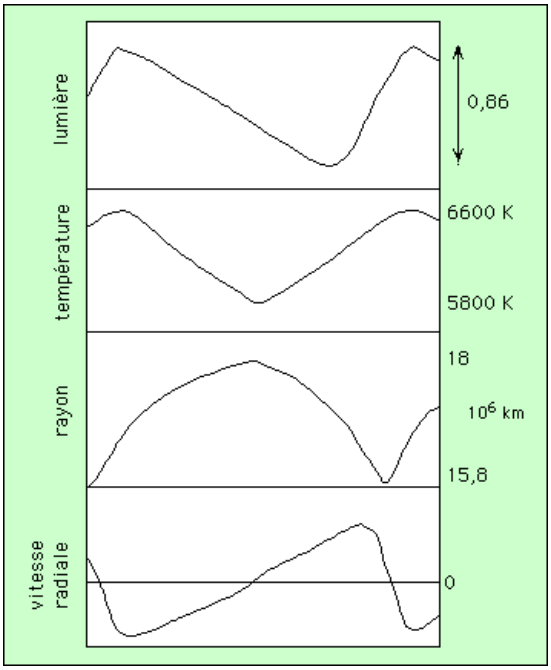
- de température (type spectral) ;
- de diamètre ;
- de vitesse des couches extérieures.

Leur luminosité est très forte, puisque leur magnitude absolue atteint M = - 6 (10.000 fois la luminosité du Soleil) .

Ce sont des étoiles jeunes (de population I). On les observe essentiellement dans le plan de la Voie Lactée.

Aucune Céphéide ne se trouve à moins de 200 AL, limite de la méthode des parallaxes, par les moyens d'observation traditionnels depuis le sol. Le satellite européen Hipparcos a permi récemment de franchir cette limite. Avec leur luminosité, elles sont visibles jusqu'à 100 millions d'années-lumière !

**Courbes de δ Cephei :**




Sa carte d'identité :

- c'est une supergéante de 36 millions de km de diamètre (25 fois plus grosse que le Soleil)
- située à 1.300 AL de la Terre
- son éclat varie de la magnitude 3,78 à la magnitude 4,63
- sa période est de 5,366 jours = 5 jours 8 h 47 mn 31 s
- sa température de surface passe de 6.600 à 5.500 K
- son type spectral est F5 Ib au maximum, et G1 Ib au minimum
- son diamètre varie de 12 % (donc de 4 millions de km… presque 3 fois le diamètre du soleil !)

**Relation Période-Luminosité**

La régularité des variations des Céphéides se traduit par une relation entre leur période et leur luminosité. Cette relation a été découverte par Miss Henrietta Leavitt en 1912. Elle indique que la luminosité absolue de ces étoiles augmente avec leur période : **les plus lentes sont les plus lumineuses**. Miss Leavitt étudiait les variables du Grand Nuage de Magellan. Cette galaxie proche, satellite de la nôtre, est de petites dimensions par rapport à sa distance. Aussi, on peut considérer que toutes ses étoiles sont à peu près à la même distance de nous : d = cste (constante). Par conséquent, 5 log d - 5 = cste ; et par suite :

$$m - M = 5 \log d - 5 = cste$$

d'où : **M = m - cste**

Par conséquent, leur magnitude apparente m, diffère de leur magnitude absolue M d'un facteur constant, le même pour toutes. Elle a pu ainsi étudier la luminosité des étoiles en fonction de leur période P, et en déduire la relation :

$$M = -3{,}10 \log P + 1{,}70 (B - V) + cste$$

Dans cette relation, le terme B - V exprime la couleur de l'étoile. B est sa magnitude apparente dans le bleu, et V sa magnitude apparente dans le visible (plus centré sur le jaune). Pour une étoile blanche, la luminosité est la même dans les deux cas, donc B - V = 0. Plus le terme B - V est important, plus l'étoile est colorée. Au lieu de ne mesurer que la magnitude globale, on utilise deux filtres, qui donnent respectivement B et V. On remarque que la différence B - V est indépendante de la distance de l'étoile.

La relation a été calibrée sur les Céphéides proches, dont on connait la distance (par la méthode géométrique des parallaxes) et par conséquent la luminosité, donc la magnitude absolue M. On en déduit la constante, et la relation devient :

$$\mathbf{M = -3{,}10 \log P + 1{,}70 (B - V) - 2{,}37}$$

Enfin, les Céphéides sont des supergéantes, très lumineuses, donc visibles de très loin : le télescope spatial a permi d'en observer une à 5 méga parsecs, *i.e.* à 15 millions d'années-lumière.

Réciproquement, si on observe P et B - V pour une céphéide quelconque, on en déduit M. En mesurant de plus m (ou plus précisément B et V), on en déduit la distance d. Cette relation est à la base de la détermination des distances dans l'Univers.

Une analogie peut expliquer cette méthode. Construisons des guirlandes de Noël clignotantes avec les caractéristiques suivantes :

- certaines comportent des ampoules de 25 W, et clignotent toutes les 25 secondes;
- d'autres comportent des ampoules de 40 W et clignotent toutes les 40 secondes ;
- les dernières sont équipées d'ampoules de 100 W et clignotent toutes les 100 secondes.

Vous admirez la ville, toute illuminée, et vous aimeriez savoir où se trouve telle guirlande. Vous observez la rapidité de son clignotement : par

exemple un éclair toutes les 100 secondes ; vous en déduisez que ses ampoules font 100 W. Et comme elles vous semblent très faibles, vous comprenez qu'elles sont très loin.

Vous voyez une autre guirlande, qui clignote en 25 secondes, et apparaît aussi brillante. Ses ampoules de 25 W étant 4 fois moins lumineuses, vous en déduisez qu'elle sont $4^{1/2} = 2$ fois plus près. Si vous pouvez déterminer la distance de la guirlande la plus faible, vous en déduirez celle de la plus lointaine.

**Mécanisme de variations**

La relation Période-Luminosité des Céphéides provient de variations de leur diamètre, donc de surface : l'étoile grossit et maigrit périodiquement. La lumière qu'on en reçoit étant proportionnelle à la surface, et celle-ci variant avec la période, il est normal que la luminosité varie avec la période (le phénomène est un peu plus complexe, car la température superficielle varie aussi). L'évolution dans le temps des courbes caractéristiques, comme celles de δ Céphée données plus haut, le montre :

animation des courbes

Les variations de luminosité des Céphéides ne proviennent pas d'explosions : il n'y a pas d'ondes de choc, mais seulement la propagation d'une onde sonore. Dans le mode fondamental, la période de l'onde est :

$$P = 0{,}05 \times R^{3/2} \times M^{-1/2}$$

Cette onde est une onde sonore. Le mode fondamental est celui de plus basse fréquence, et de plus grande amplitude. Les autres sont ses harmoniques, à l'instar de ceux qui donnent de la couleur à un instrument de musique. On comprendra donc que la fréquence de ce mode soit lié à la géométrie de l'étoile, comme la fréquence d'une corde de violon est fonction de sa longeur et de sa tension.

La masse de l'étoile est le produit de sa masse volumique moyenne ρ, par son volume :

$$M = \rho V$$

Le rayon de l'étoile étant R, le volume s'écrit :

$$V = 4/3\ \pi\ R^3$$

Donc la masse est :

$$M = \rho V = \rho\ 4/3\ \pi\ R^3$$

En reportant cette expression dans celle de la période on obtient :

$$P = 0{,}05 \times R^{3/2} \times (\rho\ 4/3\ \pi\ R^3)^{-1/2}$$

et après simplification :

$$\mathbf{P \times \rho^{1/2} = cste}$$ **relation de Ritter, ou équation de la pulsation**

Puisque la période, multipliée par $\rho^{1/2}$ (la racine carrée de ρ) donne le même résultat pour toutes les céphéides, si ρ diminue, P doit augmenter. Les supergéantes qui ont une densité faible, ont donc une période longue.

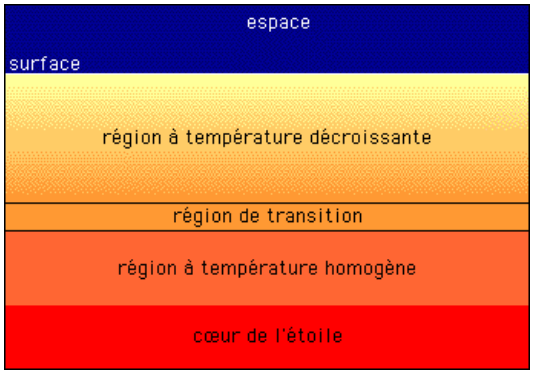
La masse (donc aussi la densité) et le rayon étant reliés à la luminosité, c'est l'explication de la relation période-luminosité.

**Origine physique des pulsations : ionisation de l'enveloppe**

L'explication des pulsations a longtemps défié les astronomes. Eddington a compris qu'il devait y avoir un mécanisme qui retient l'énergie, mais l'opinion commune était que les RR Lyræ étaient des étoiles doubles dont le compagnon, invisible, était l'élément perturbateur. Eddington a insisté, et développé une théorie montrant qu'un mécanisme bloquant l'énergie devait être à l'œuvre. L'avenir lui a donné raison, mais encore fallait-il trouver ce mécanisme.

Les pulsations résultent de la transformation d'une énergie quelconque en énergie mécanique. L'énergie nucléaire centrale ne joue aucun rôle : les conditions physiques dans le cœur de l'étoile ne varient pas, seules les couches extérieures pulsent.

Les variations de température sont produites dans l'atmosphère par une modulation de sa transparence. Il s'ensuit une variation du flot d'énergie à travers les couches.




Lorsque l'atmosphère de l'étoile se contracte, sa température devrait augmenter. Mais l'énergie gravitationnelle libérée est aussitôt utilisée pour ioniser une couche d'hélium (elle sert à ioniser les atomes, donc elle ne peut pas augmenter la température). La couche ne s'échauffe donc pas en se contractant.

L'opacité de l'atmosphère est fonction de sa densité ρ et de sa température T :

$$\kappa = \kappa_0 \, \rho^n / T^s$$ **opacité de Rosseland**

κ mesure l'opacité. L'étoile est d'autant plus opaque qu'elle est plus dense, puisqu'il y a davantage de matière susceptible d'arrêter le rayonnement ; si la température augmente, la vitesse des atomes augmente, et leurs interactions avec les photons diminuent, donc ils en arrêtent moins.

Dans une atmosphère stellaire normale, n vaut 1, et s est de l'ordre de 3,5. Lorsqu'une étoile **normale** se contracte, ρ augmente, et T aussi. Mais le cube de T croît plus vite que ρ, et l'opacité diminue, donc l'énergie supplémentaire peut s'échapper.

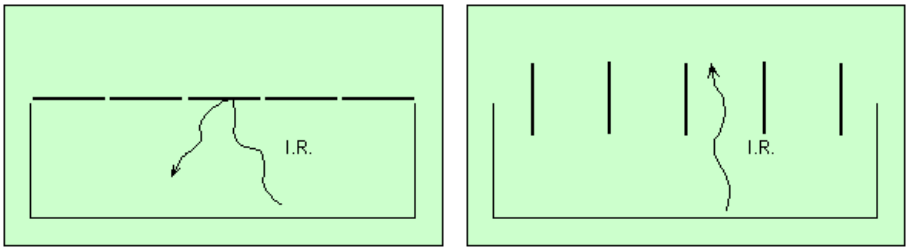
Seulement, une Céphéide n'est pas une étoile normale : dans la relation de Rosseland, la valeur de s peut devenir nulle ou même négative. L'ionisation empêche l'augmentation de température, ce qui fait que ρ l'emporte.

Ainsi, lorsque la Céphéide se contracte, sa densité augmente à température relativement constante, et donc l'opacité de l'atmosphère augmente aussi.

L'énergie produite dans le cœur se trouve alors piégée par cette couche, et bientôt provoque la dilatation !

Lorsque la dilatation commence, le phénomène inverse se produit, les noyaux atomiques se recombinent avec les électrons, l'atmosphère redevient transparente. Alors, les rayonnements peuvent s'échapper, ce qui entraîne un refroidissement… qui va produire une nouvelle contraction !

Le piégeage de l'énergie est comparable à celui qui se produit dans une serre.




Le schéma de gauche montre une serre fermée. Le sol rayonne de l'infrarouge, et se refroidit. Mais les infrarouges sont réfléchis par le verre, qui est opaque pour eux. Ils sont donc renvoyés vers le sol qu'ils réchauffent.

Si les vitres sont ouvertes, comme dans l'illustration de droite, les infrarouges peuvent s'échapper, et le sol se refroidit vraiment.

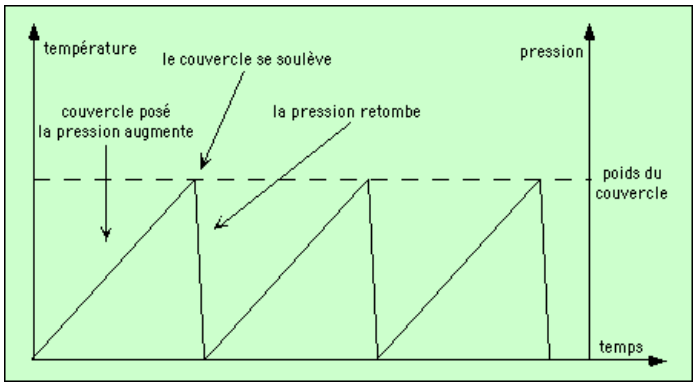
En infrarouge, la photométrie des Céphéides dépend de leur diamètre, alors que dans le visible la température effective est le paramètre principal.

**Analogie**

Pour comprendre ce mécanisme, on peut utiliser une analogie. Une cocotte en fonte pleine d'eau est mise sur le feu. On pose le couvercle. Au moment où on le dépose, la pression à l'intérieur de la casserole est égale à la pression extérieure. Le couvercle va jouer un rôle similaire à celui de l'atmosphère opaque de la Céphéide, en empêchant l'évacuation de l'énergie ; la chaleur du gaz brulé par la cuisinière sera analogue à celle produite par les réactions nucléaires du cœur de l'étoile.

Le dégagement de vapeur d'eau à l'ébullition va faire monter la pression à l'intérieur. Tant que celle-ci est inférieure au poids du couvercle, la casserole restera fermée et la vapeur ne pourra pas s'en échapper. La pression monte donc toujours. Viendra un moment où elle sera suffisante pour équilibrer le poids du couvercle ; à ce moment-là, une petite augmentation de pression va soulever le couvercle, laissant la vapeur s'échapper librement, et donc la pression retomber brutalement. Par suite, le couvercle retombe, la pression dans la casserole est à nouveau égale à la pression extérieure, mais va tout de suite commencer à augmenter, jusqu'à équilibrer le poids du couvercle…

Ceci est un exemple quotidien de *phénomène non linéaire*. Un phénomène est dit *linéaire* si à un doublement d'un paramètre correspond également le doublement d'un autre ; le déplacement d'un train est un phénomène linéaire (à vitesse constante) : en deux fois plus de temps, il va deux fois plus loin. A la fontaine, il faut deux fois plus de temps pour remplir deux seaux d'eau que pour en remplir un seul.




Dans notre casserole, le phénomène serait linéaire si le doublement de la pression à l'intérieur correspondait à un doublement de la perte de vapeur par le couvercle. Ce n'est pas le cas, la perte est quasi nulle tant que le poids du couvercle est supérieur à la pression de la vapeur qui le pousse. Lorsque la pression devient trop forte, le couvercle se soulève d'un coup ; toute la vapeur s'échappe et la pression retombe brusquement. Alors, n'étant plus soutenu, le couvercle retombe et rebouche la casserole ; la pression recommence alors à monter…

Parmi les variables pulsantes, qui présentent un mécanisme semblable, on trouve les δ Scuti qui sont de période très courte et bleues, et les β Canis Majoris qui sont plus brillantes, en rotation rapide.

Les Céphéides classiques sont des étoiles de population I (donc assez jeunes).

## *Récents développements*

**L Car**

Les résultats ci-dessus ont été obtenus avec des moyens traditionnels, des télescopes classiques. On fait maintenant des observations avec des interféromètres, en particulier avec le VLTI (instruments MIDI et VINCI). C'est ainsi qu'on a observé en 2006 la céphéide L Car, dans l'hémisphère sud.

Précisons tout d'abord que la détermination de la relation Période-Luminosité est calibrée (détermination du zéro) par la *méthode BW* (Baade-Wesselink, 1926, 1946). Elle consiste à déterminer simultanément les variations des dimensions angulaires et linéaires pour déduire la distance de l'étoile. En effet, toutes les céphéides sont lointaines, et non accessibles à une mesure parallactique. Pour déterminer les dimensions linéaires de l'étoile, on intègre les variations de vitesses radiales, ce qui donne une valeur assez fiable. Les dimensions angulaires étaient mesurées indirectement par photométrie, en supposant que l'étoile est un corps noir parfait. Mais aujourd'hui, on peut les mesurer directement par interférométrie.

La méthode BW classique fait l'hypothèse que l'étoile est nue, non entourée d'un nuage de gaz et poussières. Or cette hypothèse est fausse au moins dans le cas de L Car, la céphéide la plus brillante dans le ciel. Celle-ci est une supergéante jaune qui se trouve à 1.850 AL de la Terre, et sa masse atteint 13 M . Sa période est de 35,5 jours. On observe une raie Hα non pulsante, qui doit être émise par une enveloppe. Le taux de perte de masse, responsable de l'enveloppe, atteindrait $10^{-5}$ M / an. D'ailleurs, une émission de OI se voit à plusieurs secondes d'arc de l'étoile.

Près de son maximum (visible), L Car a une $T_{eff}$ de 5.500 K.

La comparaison de perte de masse entre différentes céphéides a donné une indication : le taux de perte de masse serait plus important pour les céphéides à longue période que pour celle à courte période.

Observées en infrarouge, les céphéides montrent souvent un excès de brillance, provenant d'une enveloppe. Un tel excès de rayonnement dans l'infrarouge (F(60 µm) / F(12 µm)) moyen est caractéristique d'une enveloppe chaude, poussiéreuse. Mais cet excès dépend de la température de l'enveloppe, et n'est pas toujours détectable.

Avant 2006, RS Pup était la seule Céphéide connue pour être associée à une enveloppe circumstellaire.

**Les RR Lyræ**

On les appelait autrefois *variables d'amas*, parce qu'elles sont abondantes dans les amas globulaires et le bulbe galactique.

RR Lyræ :

- varie entre les magnitudes 7,06 et 8,12 ;
- sa période est de 13 heures 36 minutes ;
- sa courbe de lumière est fortement asymétriqueanbsp;; montée 2 h 35, déclin 11 h ;
- l'indice de couleur B-V varie de +0,14 au maximum à +0,45 au minimum ;
- son type spectral varie de A8 à F7 ;

elle présente une notable variation de couleur.

Caractéristiques des étoiles de type RR Lyræ :

- magnitude absolue voisine de 0,6 ; (**indépendante de la période** ; elle permet la détermination de la distance des amas) ;
- origine de la variation semblable à celle des Céphéides ;
- mais avec une onde de choc, provoquant une éjection de matière ;
- type spectral autour de A (donc étoile chaude) ;
- étoiles très riches en hélium ;
- période de 5 à 32 heures ;
- diamètre = 4 à 5 fois celui du Soleil ;
- masse = 1/2 masse solaire.

Les RR Lyræ sont sur la branche horizontale, à l'intérieur de la bande d'instabilité. Provenant de la Séquence Principale, elles ont gravi la branche des Géantes Rouges, subi le flash de l'hélium, puis ont atteint la Branche Horizontale. Là, elles sont arrivées dans la zone d'instabilité où elles subissent les pulsations. Leur position dans cette bande du diagramme HR montre que leur température effective est comprise entre 6.100 K et 7.400 K. Ce sont donc des étoiles un peu plus chaudes que le Soleil.

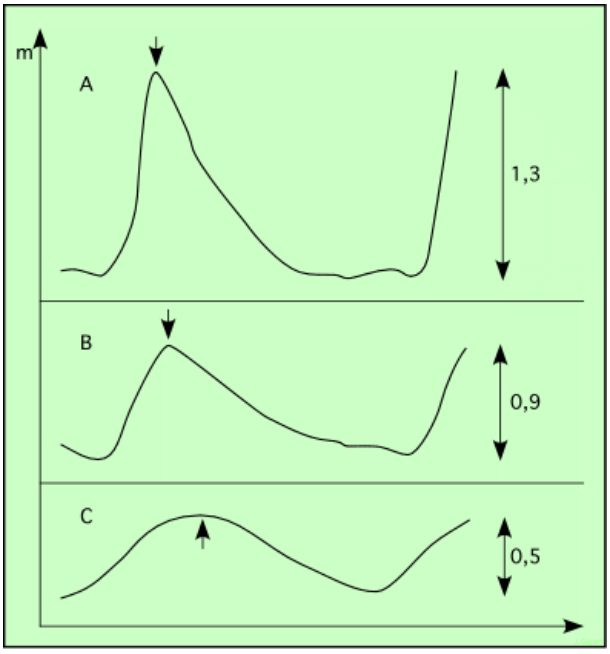
Leur métallicité est faible, comprise entre $10^{-4}$ et $10^{-2}$ (la métallicité du Soleil est de $2\ 10^{-2}$).

On subdivise les RR Lyræ en deux sous-classes :

**$RR_{ab}$** La montée de lumière est très rapide. La descente est rapide, mais moins. La luminosité est pratiquement constante pendant une demi-période au minimum (malgré de légère variations). L'amplitude de variation est entre 1,3 et 0,9 magnitudes. La période est comprise entre 12 et 15 heures.

**$RR_c$** La luminosité change tout le temps, et assez lentement. L'amplitude est de l'ordre d'une demi-magnitude. La période de 8 à 10 heures.

Le nom $RR_{ab}$ s'explique par des raisons historiques. Bailey a créé trois classes, a, b et c. Puis on a montré que les classes a et b étaient trop semblables pour les distinguer. Les courbes de lumière typiques sont :




Déterminer la masse des RR Lyræ n'est pas chose facile, car on n'en connait pas de double. Ceci est très surprenant *a priori*. Mais l'explication est assez simple. Supposons qu'un couple d'étoiles se forme, et commence son évolution. Selon leurs masses, les deux étoiles vont évoluer plus ou moins vite. Considérons d'abord le cas où le compagnon est plus massif que la future RR Lyræ. Il va évoluer plus rapidement. Or la RR Lyræ est déjà une étoile vieille ; par conséquent, le compagnon plus massif a déjà évolué vers le stade naine blanche ou même étoile à neutrons selon sa masse. Or ces deux types d'étoiles sont de très faible éclat, et difficiles à détecter. Prenons maintenant le cas où le compagnon est moins massif. Les RR Lyræ ayant une masse de l'ordre de 0,7 M , le compagnon moins massif est une naine rouge, de faible éclat encore.

Par conséquent, que le compagnon soit plus ou moins massif, son éclat est sûrement faible, ce qui explique qu'on ne connaisse pas avec certitude de RR Lyræ en couple. Pour les étoiles de masse moyenne, on considère que 50 % à peu près sont dans un système au moins binaire. Il doit en être de même pour les RR Lyræ. C'est donc un bais observationnel qui empêche d'en découvrir pour l'instant.

La masse d'une RR Lyræ est très concentrée. Le diamètre de l'étoile est compris entre 4 et 6 fois celui du Soleil. On considère que le cœur a un diamètre de l'ordre de 5 fois celui de la Terre (70.000 km). Il représente donc seulement 1 % du diamètre de l'étoile, et pourtant contient la quasi totalité de la masse : 0,5 M . L'enveloppe, qui occupe presque tout le volume de l'étoile, ne représente que 0,001 M .

La loi de Ritter est valable pour les RR Lyræ.

| | |
|---|---|
| $\mathbf{P \times \rho^{1/2} = cste}$ | relation de Ritter, ou équation de la pulsation |

Si P est donnée en jours, et ρ en densité solaire, alors la constante vaut 0,04 pour toutes les RR Lyræ de sous-type ab.

Les RR Lyræ ont été découvertes et étudiées initialement dans les amas globulaires, mais on en a découvert beaucoup dans le disque galactique. On en connait aujourd'hui 7.000 dans ce disque.

**Les W Virginis**

W Virginis a été découverte par Schönfeld en 1866. Sa courbe de lumière ne présente pas la même forme que celles des Céphéides classiques.

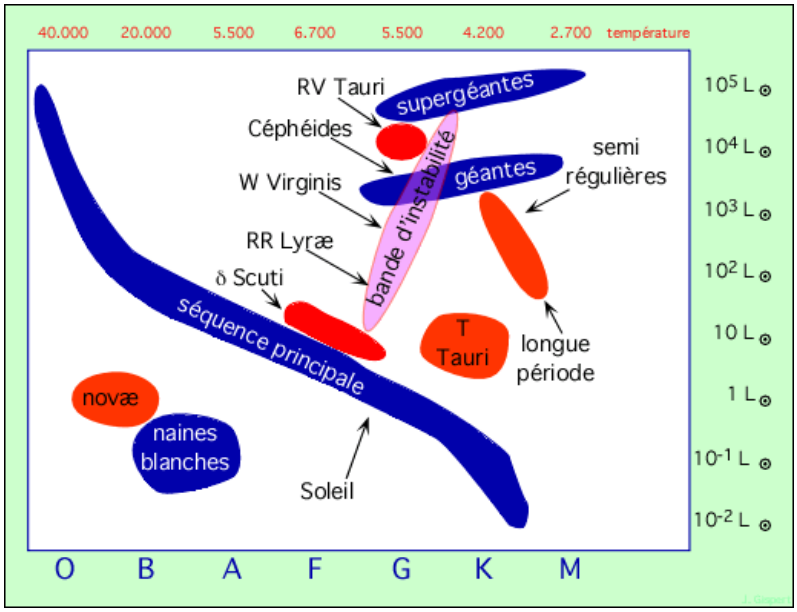
W Virginis :

- raies d'émission intenses du calcium ionisé ;
- magnitude de 8,3 à 5,5 ;
- période de 17,27 jours ;
- type spectral F0 à G0 classe de luminosité Ib

Ce sont des Céphéides de population II, vieilles. Elles sont situées dans le halo galactique, et dans les amas globulaires. Leur courbe de lumière est d'allure différente ; elles montrent d'intenses raies du calcium ionisé en émission. Leurs périodes sont soit inférieures à 2,5 jours, soit supérieures à 10 jours. Enfin, leur amplitude est souvent supérieure à 1 magnitude.

**Bande d'instabilité**

La bande d'instabilité est une bande presque verticale, dans le diagramme HR :




Elle indique la place des étoiles variables pulsantes radiales. Comment explique-t-on que, de part et d'autre, il n'y ait pas de pulsations ?

Par le fait que la bande d'instabilité correspond aux températures qui permettent l'ionisation de l'hélium, et accessoirement de l'hydrogène. Du côté rouge de la bande (étoiles de plus faible masse), la convection peut se développer et bloquer les pulsations. Du côté bleu au contraire, la zone de seconde ionisation de l'hélium est à une altitude plus élevée, où la densité est plus faible. L'augmentation d'opacité produite ne suffit pas, dans ce milieu dilué, à arrêter la lumière, et donc ne bloque pas l'énergie.

---

## *Variables à longue période*

Mira Ceti est la première découverte, par Fabricius en 1596. Sa période moyenne est de 331 jours 15 heures, avec des valeurs extrêmes observées de 310 et 370 jours. Ce n'est donc pas une variable très régulière. Au maximum, sa magnitude vaut de 2 à 5, et au minimum de 8,3 à 10,1. C'est une étoile très brillante, dont la magnitude absolue est - 2. C'est aussi une supergéante, car son diamètre dépasse 4 unités astronomiques : plus de 4 fois la distance Terre-Soleil ! Si on représente le Soleil par une tête d'épingle en verre, Mira est représentée par un ballon de 42 centimètres de diamètre…

Le cas de Mira est un peu particulier, et ses caractéristiques perturbées par le fait qu'elle est double, et peut-être triple. Mais la variation ne provient pas de la duplicité.

Le spectre du compagnon est Beq (étoile chaude à raies d'émission), et c'est une variable de type P Cygni. Elle varie de 9,6 à 12,0.

Les variables de type Mira ont une période de plus de 50 jours, et des variations d'éclat de 2,5 à 6 magnitudes (donc une variation de luminosité de 10 à 250 fois). Les plus lentes ont une amplitude de variation plus importante.

Leur type spectral est M, C ou S ; M est très fréquent. Celles de type S sont très jeunes, elles appartiennent au disque galactique et sont de population I.

Elles présentent des raies d'émission intenses, en particulier de l'hydrogène (d'où un type spectral Me). Elles sont de classe de luminosité II ou III (géantes brillantes ou géantes).

On a essayé de définir une relation période-luminosité pour ces étoiles, mais elle est mal définie.

La cause des variations est inconnue ; elles sont pulsantes, mais les pulsations ne suffisent pas à expliquer l'amplitude des variations.

Les Céphéides et les Miras montrent des pulsations régulières et de grande amplitude, dont la vitesse est de quelques dizaine de km $s^{-1}$ Les pulsations amènent de la matière à une hauteur suffisante pour permettre la condensation de poussières, et entraîner une perte de masse. La perte de masse dans les géantes rouge serait due à des ondes sonores produites par les mouvements dans les grandes cellules de convection. Les Céphéides étant des supergéantes qui pulsent, pourraient perdre de la masse par les deux mécanismes, pulsation et convection.

On note des similitudes entre les supergéantes rouges Bételgeuse et μ Cep, et les étoiles de type Mira. Dans l'atmosphère, à 2 $R_*$ pour les Miras, et à 1,4 $R_*$ pour les supergéantes rouges, on observe une couche chaude moléculaire, contenant $H_2O$ et CO. Les températures sont de l'ordre de 2.000 K. Bételgeuse contient même du corindon ($Al_2O_3$), qui serait ainsi une base pour la formation des poussières silicatées.

Davantage de détails concernant les variables de type Mira se trouvent ici.

## *RV Tauri*

Les étoiles de type RV Tauri (RV Tauri elle-même en étant le prototype), sont :

- des supergéantes jaunes de type spectral F-G au maximum (visible), et K-M au minimum.
- Leur courbe de lumière montre des minima profonds et faibles alternativement, ;
- une période entre deux minima profonds de 30 à 150 jours :
- une amplitude de 3 à 4 magnitudes dans le visible.
- Elles semblent être intermédiaires entre les Céphéides et les Miras.
- Elles sont généralement entourées d'une enveloppe de poussières.

---

## *Variables semi-régulières*

Les **Variables semi-régulières** sont des étoiles pulsantes rouges, dont la courbe de lumière est plus complexe que celle des variables à longue période.

Leur amplitude n'excéde pas 2 magnitudes. Elles montrent des variations irrégulières, avec un cycle plus ou moins évident.

---

## *Caractéristiques des différents types de variables périodiques*

| type d'étoile | période (jours) | amplitude lumière | amplitude vitesse (km/s) | magnitude absolue visuelle | type spectral |
|---|---|---|---|---|---|
| Céphéides | 1 | 0,1 à 2 | 5 à 60 | 0 à -5 | F6 à K2 |
| RR Lyræ | 0,2 à 1 | 0,3 à 2 | 20 à 100 | 0,5 à 0 | A2 à F6 |
| δ Scuti | 0,02 à 0,3 | 0,01 à 0,3 | 10 à 100 | 3 à 0 | A2 à F2 |
| ZZ Ceti | $10^{-3}$ à $10^{-2}$ | 0,3 | .. | 8 à 10 | DA |
| RV Tauri | 30 à 150 | 3 à 4 | 20 à 30 | +1 à -2 | M, R, N, S |
| variables rouges | 30 à 1000 | 0,5 à 11 | 20 à 30 | +1 à -2 | M, R, N, S |
| β Canis Majoris | 0,1 à 0,3 | 0,02 à 0,25 | 5 à 150 | -5 à -3 | B0 à B3 |
| Variables B | > 0,02 | 0,01 à 0,06 | 5 à 30 | -8 à -2 | O9 à B7 |

**Suite :** variables explosives

---=OO=---




On nomme *variables explosives* des étoiles dont la luminosité augmente brutalement dans des proportions en général très importantes, et la plupart du temps une seule fois. Le phénomène explosif peut être destructeur, et marquer la fin de l'étoile, ou bien moins violent, et lui permettre de trouver un nouvel équilibre ensuite. Dans quelques cas même, l'explosion peut se reproduire plusieurs fois. Ces étoiles sont nommées *novæ*, *supernovæ*, *novoïdes* ou *novæ récurentes*.

**Novæ**

On a donné le nom de *nova* (latin *nova stella* ; au pluriel *novæ*) à des étoiles qui semblaient naître brusquement dans le ciel. En fait, il s'agit au contraire de vieilles étoiles devenues instables. Leur éclat augmente très brusquement.

- Etoile qui devient brusquement beaucoup plus brillante ;
- Amplitude de variation de 7 à 19 magnitudes ;
- Souvent, elle était invisible avant, non seulement à l'œil nu, mais même avec de puissants télescopes ; il n'est alors pas possible de déterminer l'amplitude des variations ;
- La plus brillante observée : Nova Aql 1918, magnitude apparente -1,1 ! (Sirius : -1,45)

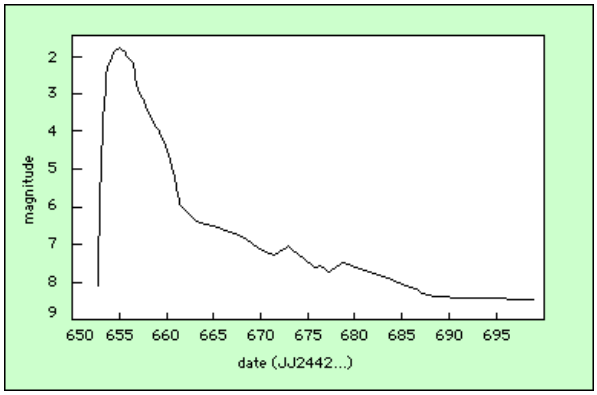
**Nova Cyg 1975**

C'est la plus récente des novæ brillantes.

Elle a été découverte le 29 août 1975, alors qu'elle était de magnitude 3. On l'a retrouvée sur des clichés pris quelques heures avant, où elle n'était que de magnitude 8. Elle a atteint son maximum le lendemain, à la magnitude 1,8. Son augmentation d'éclat a donc été très rapide. Son déclin a été immédiat et rapide : une magnitude par jour au début, pour être ensuite un peu plus lent.

Cette étoile ne figurait pas dans l'Atlas du Ciel de Palomar, qui pourtant contient toutes les étoiles jusqu'à la magnitude 21. Donc sa magnitude antérieure était supérieure à 21 !

Une telle augmentation de l'éclat, et par conséquent de l'énergie dégagée par l'étoile, a posé un problème délicat d'interprétation. D'ailleurs, l'amplitude de variation de Nova Cyg 1975 est un record pour une nova.




courbe de lumière de Nova Cyg 1975

Après avoir déterminé sa distance, on a pu calculer sa magnitude absolue : -10,3 ; c'est aussi un record pour ce type de phénomène !

**Classification**

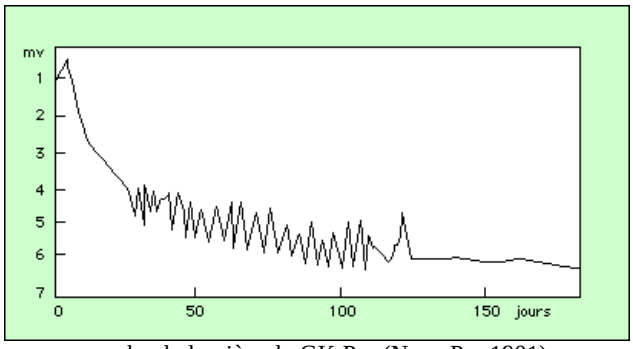
On sépare les novæ en :

- novæ rapides ;
- novæ lentes ;
- novæ récurentes.

**Novæ rapides**

- Le déclin commence immédiatement après le maximum (comme Nova Cyg 1975) ;

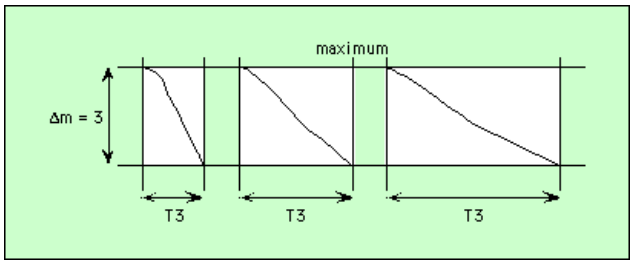
La montée est extrêmement brutale (jusqu'à 10 magnitudes en 24 h) ;
- Parfois on observe des oscillations sur la descente de lumière (jusqu'à 1 magnitude).



courbe de lumière de GK Per (Nova Per 1901)

**Quantification de la descente**

On définit le temps $T_3$ comme étant le temps mis par la nova pour perdre 3 magitudes, depuis son maximum.




Pour Nova Cyg 1975, $T_3$ a valu 5 jours. C'est l'une des plus rapides.

Pour les différentes novæ :

- $T_3$ est de l'ordre de quelques jours à quelques dizaines de jours ;
- La montée de lumière n'est en général pas observée (trop rapide) ;

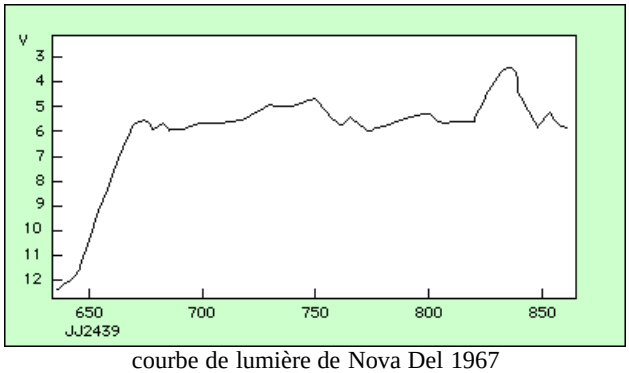
Les novæ rapides représentent 67 % des novæ galactiques.

**Les Novæ lentes**

Les novæ lentes sont caractérisées par :

- un palier assez long au voisinage du maximum de lumière ;
- des courbes de lumière variées ;
- une montée qui peut être très longue.

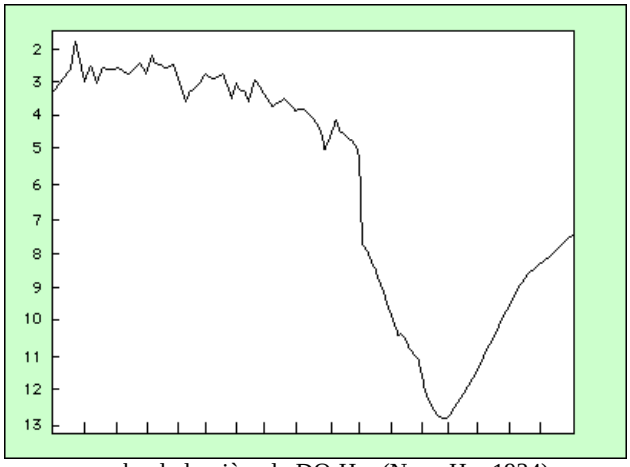
**Nova Del 1967**



courbe de lumière de Nova Del 1967

- La montée de m = 12 à m = 6 s'est faite en un mois ;
- Ensuite de m = 6 à m = 3,7 en 5 mois ;
- Déclin très lent.

**Nova Her 1934**



courbe de lumière de DQ Her (Nova Her 1934)

- Montée de m = 3,4 à m = 1,5 en 9 jours ;
- Déclin lent : $T_3$ = 94 jours ;
- Puis chute brutale de 8 magnitudes en 1 mois ;
- Enfin maximum secondaire à m = 6,8 ;
- Le déclin final a été très lent.

Les Novæ lentes sont moins nombreuses que les rapides : 26 %

**Les novæ récurentes**

Quelques novæ ont montré plusieurs fois le phénomène explosif. Leur variation est limitée à 10 magnitudes, et l'intervalle entre deux sursauts est variable.

Les principales sont :

| nom | mag max | Δm | intervalle ans | $T_3$ |
|---|---|---|---|---|
| **T Pyx** | 7,5 | 7,0 | - | long |
| | 7,2 | 7,3 | 12 | |
| | 6,6 | 7,9 | 18 | |
| | 7,1 | 7,4 | 24 | |
| | 7,0 | 7,5 | 23 | |
| **U Sco** | 9,0 | 10,0 | - | - |
| | 8,8 | 10,2 | 43 | |
| | 8,8 | 10,2 | 30 | |
| | 8,9 | 10,1 | 43 | |
| **RS Oph** | 4,5 | 7,8 | - | 9 j |
| | 4,6 | 7,7 | 35 | |
| | 4,8 | 7,5 | 25 | |
| | 5,3 | 7,0 | 9 | |
| **T CrB** | 2,0 | 8,6 | - | 6 j |
| | 1,8 | 8,8 | 80 | |

**Δm** est un symbole représentant la différence entre les valeurs extrêmes de m. C'est la variation de m.

Bien que les caractéristiques soient très variables d'une étoile à l'autre, pour une même étoile l'amplitude de variation est semblable pour les différentes éruptions, et les courbes de lumière sont identiques. Pour chacune, c'est donc bien un même phénomène qui se reproduit.

**Spectre des novæ**

Les spectres des novæ sont très particuliers, et ne ressemblent pas à ceux des étoiles calmes. On peut noter les caractéristiques suivantes :

Avant le maximum :

- fond continu intense ;

raies d'absorption H et K du calcium ionisé ;
- vitesses radiales de l'ordre de 1.000 km/s ;

Après le maximum :

- apparition puis disparition des raies d'émission de l'hydrogène (Balmer), calcium et fer ionisés ;
- puis hélium ionisé ;
- augmentation des vitesse radiales : 3.500 km/s ;
- apparition (après la perte de plusieurs magnitudes) d'un spectre nébulaire (O, He, Ne, C ionisés) ;
- élargissement des raies d'émission ;
- très forte émission infrarouge pour certaines.

Toutes ces caractéristiques doivent être prises en compte et expliquées par les modèles.

**Distance et magnitude absolue**

Toutes les novæ observées à ce jour sont assez lointaines : il est impossible de mesurer leur distance par parallaxe.

On a développé deux méthodes de mesure :

- pour les novæ qui présentent une nébulosité :
  - on mesure la vitesse d'expansion tangentielle de la nébulosité en mesurant son diamètre sur deux clichés pris à quelques temps d'écart ; le résultat est une mesure en minutes d'arc par an ;
  - on mesure sa vitesse radiale en km/s par le déplacement de ses raies spectrales ;
    en supposant que l'expansion est la même dans toutes les directions, on écrit que les deux mesures sont identiques. Une simple conversion d'unités donne le diamètre en km. Comme on le connait en minutes d'arc, on en déduit la distance.
- pour les novæ qui ne présentent pas de nébulosité :
  - on mesure l'absorption interstellaire. Celle-ci provoque un rougissement de la lumière reçue, qui est d'autant plus intense que plus d'espace a été traversé. Bien sûr, cette méthode est moins précise.

Les magnitudes absolues des novæ forment deux groupes :

- de + 3 à + 5 ;
- vers + 8.

Ce ne sont donc pas des étoiles très brillantes en dehors de leurs manifestations éruptives.

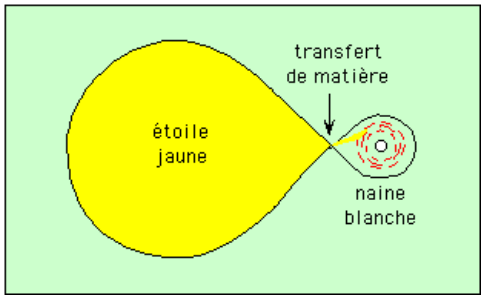
**Constitution des novæ**

L'analyse des spectres, dont on a parlé plus haut, montre que ce sont des étoiles doubles. Elles sont trop proches l'une de l'autre pour qu'on puisse les séparer dans un télescope. Ce sont donc des binaires spectroscopiques. Le couple est souvent très serré : les périodes sont de quelques heures seulement.

On détermine aussi, d'après les spectres, que les composantes sont très différentes : **une géante jaune ou rouge et une naine blanche**.

**Caractéristiques**

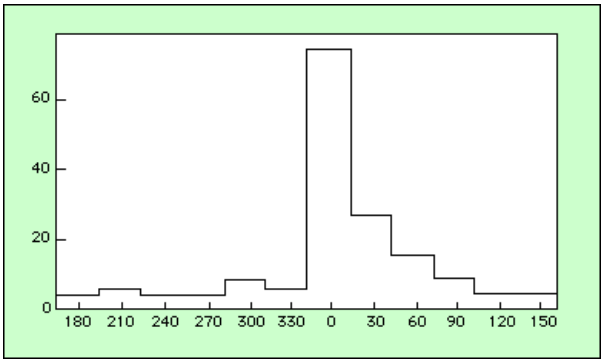
- Les novæ retournent à un état normal après l'explosion ;
- Certaines sont récurrentes ; ceci montre que le phénomène n'affecte pas gravement l'étoile ;
- L'apparition d'une nébulosité de grande vitesse montre de plus une éjection de matière.




Le couple est très serré, et l'une des étoiles est une géante. Elle arrive donc à remplir son lobe de Roche, et elle perd de la matière au profit de la naine blanche. Cette matière provient des couches externes, c'est donc de l'hydrogène. En tombant sur la naine il constitue une couche. La masse de cette couche augmentant, sa température augmente ; lorsqu'elle atteint à sa base les 10 millions de degrés, il se produit des réactions de fusion par le cycle CNO ; l'énergie libérée chauffe la couche au-dessus, en y déclenchant les réactions. C'est alors une explosion qui provoque l'augmentation de luminosité, et l'expulsion de l'enveloppe.

La masse éjectée est de l'ordre de 1/10.000 à 1/100.000$^{e}$ de masse solaire (faible par rapport à la masse de l'étoile). Elle forme une nébulosité temporaire autour de l'étoile, et se dilue progressivement dans l'espace.

**Répartition des novæ galactiques**




Histogramme de 161 novæ galactiques

L'histogramme donne le nombre de novæ visibles dans une direction donnée. On y voit un pic très important dans la direction 0° (vers le noyau de la Galaxie). Les novæ se produisent donc de préférence dans une région peuplée de la Galaxie.

D'autre part, elles sont toutes proches du plan de la Galaxie, surtout dans la direction du noyau.

**Novæ extragalactiques**

On observe des novæ dans de nombreuses galaxies, grâce à leur grande luminosité. Dans les galaxies proches, on constate qu'elles ont les mêmes propriétés que dans la nôtre ; on en déduit une mesure de la distance de certaines galaxies.

---

## *Les supernovæ*

La première supernova a été découverte en 1885 dans la galaxie d'Andromède. Il s'agissait d'une étoile nouvelle (*a priori* une nova), de magnitude visuelle 5,4. Mais dès qu'on a pu déterminer sa distance (s'assurer que ce n'était pas une étoile de notre Galaxie en premier plan), on s'est aperçu que sa magnitude absolue était très supérieure à celle d'une nova. Il s'agissait donc d'un objet nouveau auquel on a donné le nom de *supernova* (pluriel *supernovæ*).

**Observations historiques**

D'après les textes, on a pu retrouver les supernovæ suivantes :

| année | magnitude visuelle | constellation | objet associé |
|---|---|---|---|
| 185 | -2 | Centaure | pulsar MP 1449 source X |
| 437 | -3 | Gémeaux | |
| 827 | -10 (= Lune) | Sagittaire | |
| 1054 (Crabe) | -6 | Taureau | pulsar NP 05-31 source X Taurus A |
| 1572 (Tycho-Brahé) | -2 | Cassiopée | source X |
| 1604 (Kepler) | -2,5 | Ophiucus | source X |
| 1987 | 6 | GNM | |

Toutes ces supernovæ sont dans notre Galaxie, sauf SN 1987 A (la dernière du tableau). Le phénomène semble assez rare dans notre Galaxie.

On a observé des supernovæ dans de nombreuses galaxies :

- elles sont plus nombreuses dans les spirales ;
- certaines d'entre elles, dites SN I, sont présentes dans tous les types de galaxies ;
- les autres, SN II, se voient seulement dans les Sb et Sc (population stellaire I importante) ;
- les SN I atteignent la magnitude absolue -18 dans les spirales Sc, -20 dans les elliptiques, -21 dans les irrégulières.

De grande magnitude absolue, les supernovæ sont visibles de très loin.

Aussi, servent-elles parfois d'étalon de distance.

**Fréquence**

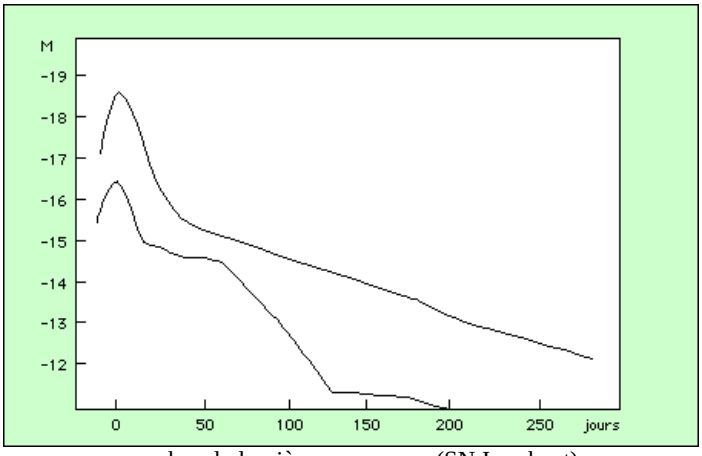
Rares en apparence dans la Voie Lactée, comme nous l'avons déjà mentionné, les supernovæ sont nettement plus fréquentes dans les galaxies extérieures. Leur fréquence est de 1 supernova tous les 25 ans dans les galaxies extérieures ;

Leur rareté apparente dans la Voie Lactée est due à une limitation observationnelle : l'absorption par les gaz interstellaires près du

noyau nous empêche de voir toutes celles qui explosent dans ces régions, ce qui explique les observations.

**Courbes de lumière**

L'analyse des courbes de lumière, et des magnitudes absolues, séparent les supernovæ en deux types : SN I et SN II.



courbes de lumières moyennes (SN I en haut)

1/3 des SN II ne présente pas le palier illustré sur la figure.

| | **SN I** | **SN II** |
|---|---|---|
| population stellaire | II (étoiles vieilles) | I (étoiles jeunes) |
| magnitude absolue | -19,9 | -17,6 |
| vitesse éjection gaz | 20.000 km/s | 15.000 km/s |

La luminosité des SNI est de l'ordre de $10^{10}$ L .

**Phénomène supernova**

Quelques temps après l'explosion, on voit apparaître une nébulosité autour de l'étoile, produite par les gaz éjectés lors de l'explosion, et qui en atteste la violence. Le phénomène supernova est beaucoup plus puissant que le phénomène nova.

Sur le plan physique, les supernovæ partagent une origine commune : un effondrement gravitationnel du cœur d'une étoile.

Mais nous allons voir que deux causes distinctes amènent à cet effondrement, et que la classification en SN I et SN II ne les reflète pas directement : les supernovæ de type I rassemblent dans une classe unique des phénomènes qui ne sont pas de même nature, et ce pour des raisons de ressemblance observationnelle.

Une autre classification est aujourd'hui utilisée, qui abandonne les propriétés spectrales, pour remonter aux phénomènes physiques responsables : on distingue les *supernovæ thermonucléaires* et les *supernovæ gravitationnelles*.

- L'effondrement se produit tout seul, initié par la seule masse de l'étoile, dans le cas gravitationnel ;
- il est provoqué par un apport de matière d'une autre étoile, dans le cas thermonucléaire.

**Supernovæ gravitationnelles**

Les supernovæ gravitationnelles sont le résultat de l'effondrement d'une étoile simple, massive, en fin de vie, lorsque la fin des réactions nucléaires centrales, ne produisant plus l'énergie qui assurait l'équilibre avec la gravitation, laisse cette dernière l'emporter définitivement.

L'étoile, **simple et massive**, a brûlé son hydrogène, puis ses éléments plus lourds, et présente une structure en pelure d'oignon. Elle arrive à la synthèse du fer.

Jusque là, les réactions produisaient encore de l'énergie pour combattre la gravitation, mais c'est maintenant terminé. La production du fer est endothermique, et **consomme de l'énergie** au lieu d'en produire. Elle ne conduit donc pas à un nouvel équilibre, mais au contraire accélère la rupture.

A partir de ce moment, la gravité l'emporte. Le cœur s'effondre en produisant le fer, les couches situées au-dessus du cœur tombent en chute libre, en se contractant et en se chauffant. Il y a production d'énergie gravitationnelle, mais cette énergie est utilisée pour la photodissociation du fer qui constitue maintenant le cœur : à la température qui y règne, l'énergie est produite sous forme de photons gamma très énergétiques, qui cassent les noyaux de fer. En quelques secondes, il ne reste plus que des neutrons, des protons et des électrons. Les protons absorbent alors les électrons par une réaction béta, produisant des neutrons en émettant des neutrinos : le cœur devient une étoile à neutrons.

Si la masse du cœur est élevée, il ne peut se stabiliser sous cette forme et s'effondre encore en trou noir. Sinon, les reste de l'étoile est une étoile à neutrons.

Les couches extérieures, dans leur chute, s'écrasent sur le cœur en s'échauffant et explosent. Elles sont expulsées à très grande vitesse. Ce sont elles qui constitueront la nébuleuse observée plus tard autour de l'explosion.

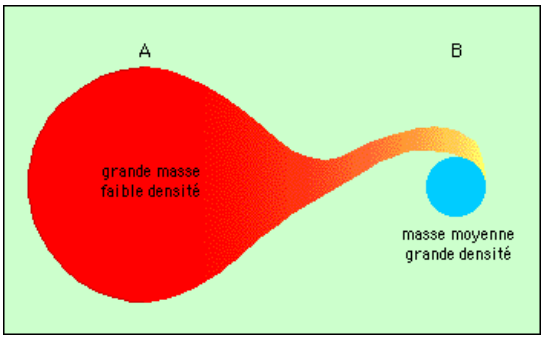
Le grand nombre de neutrinos produits, prédit par la théorie, a été effectivement détecté dans SN 1987 A. Ce sont eux qui emportent l'essentiel de l'énergie produite par l'explosion. La lumière visible ne représente qu'une infime fraction, de l'ordre du dix-millième de l'énergie totale.

**Supernovæ thermonucléaires**

Comme dans le cas des novæ, il s'agit de l'évolution d'un **couple d'étoiles de masses moyennes**. Les masses initiales des deux étoiles sont différentes, et la plus massive, disons B, évolue plus rapidement que l'autre. Après la fusion de l'hydrogène et de l'hélium, elle devient naine blanche. L'autre composante du couple, soit A, un peu moins massive et d'évolution par conséquent plus lente, n'est qu'au stade de géante rouge (fusion de l'hélium).

La masse de la naine blanche B est inférieure à 1,4 masses solaires (limite de Chandrasekhar), et sa densité est très forte.

La géante rouge A, de densité très faible car très dilatée, rempli son lobe de Roche, et perd de la matière au profit de B. Mais…




…lorsque la masse de B dépasse 1,4 masses solaires, la pression quantique des électrons ne peut plus s'opposer à la gravitation. Il y a effondrement instantané, et l'énergie dégagée en un temps si bref est libérée par l'explosion complète de l'étoile, qui répand la totalité de sa matière dans l'espace. Il n'en reste rien…

Les explosion thermonucléaires correspondent aux supernovæ de type Ia.

**SN II**

Une supernova de type II est une jeune géante bleue de plus de 10 masses solaires ; l'origine du phénomène est un brusque déséquilibre, qui entraîne une contraction brutale du cœur comme dans les deux théories précédentes.

Cette rupture de l'équilibre provient d'une grande production de neutrinos, qui emportent l'énergie produite sans exercer de pression sur les couches externes. Celles-ci s'effondrent donc.

La cause précise de modification des réactions, qui produisent soudainement des neutrinos, n'est pas connue à l'heure actuelle.

| | |
|---|---|
| SN I | implosion du cœur d'une étoile massive |
| | effondrement d'une naine blanche en étoile à neutron, par accrétion de matière en provenance d'un compagnon |
| SN II | implosion du cœur d'une géante bleue par production brutale de neutrinos |

**Action des supernovæ**

Lors de l'explosion, les couches externes qui viennent s'écraser sur le noyau et exploser, sont comprimées et chauffées à des températures que l'on n'atteint nulle part ailleurs. Les noyaux atomiques qui les composent sont ceux compris entre l'hydrogène et le fer, car les éléments plus lourds ne sont jamais synthétisés dans une étoile. Dans l'explosion, ces éléments fusionnent avec des noyaux d'hydrogène (protons) ou d'hélium (particules alpha), et produisent tous les éléments naturels plus lourds que le fer. Les éléments plus lourds que le fer trouvent, presque tous, leur origine dans ces explosions.

L'énergie produite par l'explosion propulse ces éléments dans l'espace à très grande vitesse, donc très loin ; ils vont enrichir le milieu interstellaire en éléments lourds (augmenter sa métallicité). Tous les éléments plus lourds que le fer que l'on trouve sur Terre proviennent d'un tel phénomène.

La matière éjectée à très grande vitesse vient percuter le milieu interstellaire, où elle produit une onde de choc. Lorsqu'elle rencontre un nuage d'hydrogène, cette onde de choc peut le déstabiliser, en provoquer la contraction. A partir de là, la gravité l'emporte et le nuage s'effondre. On pense qu'ainsi s'allument de nouvelles étoiles.

C'est peut-être le cas dans le complexe d'Orion, où de grands nuages d'hydrogène baignent des étoiles bleues très jeunes.

**Naissance du Soleil**

Il est possible aussi que notre propre Soleil se soit allumé à la suite d'une telle explosion proche. En effet :

- la présence d'aluminium 26, synthétisé dans de telles conditions, est attestée lors de sa formation par la présence, dans certaines météorites, de cristaux contenant normalement de l'aluminium, mais remplacé par le magnésium produit par sa désintégration radioactive.
- Un autre indice est donné par la découverte de chrome 54 dans la météorite d'Orgueil. Cet élément est forcément produit dans une explosion de supernova.
- Enfin, on observe une immense nébuleuse, très diluée, de même nature qu'une planétaire, mais sa particularité est que nous nous trouvons à l'intérieur… L'explication pourrait être simple : une étoile relativement proche a explosé, projeté sa matière dans l'espace environnant et l'a contaminé en éléments lourds. Un nuage proche, recevant l'onde de choc et les matériaux émis, s'est effondré et a donné naissance au Soleil et à ses planètes.

---

**SN 2006 gy**

Voilà un objet tout récent, comme son nom l'indique. C'est une supernova observée en septembre 2006.

Il s'agit de l'explosion la plus violente jamais vue ! Elle a dû être 100 fois plus violente qu'une supernova ordinaire… Pour expliquer un tel cataclysme, il faut admettre que l'étoile devait avoir la masse limite possible, de l'ordre de 150 M .

Elle a été observée par le satellite Chandra en rayons X. Celui-ci a montré que l'explosion ne pouvait être produite par une naine blanche atteignant la masse critique par accrétion, car elle aurait brillé 1.000 fois plus en rayons X.

Avant l'explosion, l'étoile a violemment expulsé une grande quantité de matière. Exactement comme le fait actuellement Eta Carinæ

L'effondrement d'une étoile très massive pourrait avoir une origine différente du mécanisme standard de supernova. Pour maintenir son équilibre, l'étoile doit avoir un cœur extrêmement chaud, tellement chaud qu'il produit des rayons gamma de grande énergie. Cette énergie est même suffisante pour qu'un photon se désintègre en créant une paire particule-antiparticule. Alors, la quantité d'énergie qui correspond à la masse au repos de la paire de particules disparaît, et ne sert pas à maintenir l'équilibre. Si de nombreuses particules sont créées dans un temps bref, une grande quantité d'énergie, nécessaire à l'équilibre, disparaît. L'équilibre se rompt alors brutalement, et le cœur de l'étoile s'effondre.

Ce mécanisme est prévu théoriquement depuis longtemps, mais n'avait jamais été observé. Il semble que SN 2006 gy vienne soutenir ces vues théoriques.



photo NASA

La photo de gauche montre la galaxie NGC 1260 dont on voit le noyau (à gauche, jaunâtre), et à droite la supernova qui lui appartient ! Elle est beaucoup plus brillante que l'ensemble de la galaxie. L'ensemble est situé à 240 millions d'AL de la Terre.

A droite, une photo prise en rayons X par la satellite Chandra.

**Eta Carinæ et les LVB**

Cette étoile est extraordinaire, car elle présente des variations importantes.

Eta Carinæ était connue au début du XIX$^{me}$ siècle, comme une étoile de magnitude 2, légèrement variable : sa magnitude descendait parfois jusqu'à 4. En 1837, elle a commencé à augmenter d'éclat, atteignant la magnitude 1, et même -1 en 1843. Elle fluctuait autour de cette valeur. Cette période si remarquable est nommée *Grande Eruption*. Cet événement a duré une vingtaine d'années, ce qui est tout à fait exceptionnel. Mais bien plus, au cours de cette période, elle aurait dépassé la luminosité d'Eddington ! Sa luminosité mesurée est de $10^{7,3}$ L .

Après cet épisode, elle est redevenue moins brillante, redescendant à une magnitude de 7 à 8.

Au début du XX$^{e}$ siècle, une nébuleuse est apparue autour de l'étoile. C'est la matière qui a été éjectée au cours de la Grande Eruption. Excitée par le rayonnement de l'étoile, la nébuleuse est aujourd'hui l'objet le plus brillant du ciel en IR.

Depuis 1940, l'éclat augmente lentement, et sa magnitude atteint presque 5 aujourd'hui.

Eta Carinæ est probablement une étoile hypergéante, dont on estime la masse à 100 M , et la luminosité à 4 millions de luminosités solaires. Comme SN 2006 gy, elle pourrait exploser dans peu de temps. Lorsque ceci se produira, il ne faudra pas manquer le spectacle, car il se passera à 7.500 AL de nous, juste à côté.

La luminosité de Eta Carinæ en fait une *Variable Bleue Lumineuse* (Luminous Blue Variables ou LBV) proches du type S Doradi. Ces étoiles montrent des éruptions très violentes, séparée par des périodes de calme. Au cours des éruptions, elle expulsent de grandes quantités de matière à un millier de km/s. Elles sont donc entourée d'une nébuleuse très dense, milieu complexe qui lui-même émet de la lumière. Il n'est donc pas facile de distinguer, dans le spectre, ce qui correspond aux propriétés de l'étoile, de la contribution de la nébuleuse. La cause de ces éruptions est inconnue, mais ces étoiles pourraient être un stade d'évolution vers les Wolf-Rayet.

L'étoile produit des raies d'émission, car elle est chaude. A côté des raies de l'hydrogène, on trouve d'abondantes raies du fer ionisé. Mais la largeur de ces raies n'est pas la même. Les plus larges proviennent de la masse éjectée à 1.000 km/s : selon l'angle sous lequel on voit la matière, la vitesse radiale est différente, c'est ce qui élargi les raies. Mais d'autres raies sont beaucoup plus fines, indiquant une vitesse plus homogène et bien plus basse : seulement 50 km/s. La matière qui émet ces raies est plus éloignée de l'étoile, à quelques UA.

Eta Carinæ est aussi, depuis cinquante ans, une variable périodique. Les raies de certains métaux ionisés (Néon, Fer, Argon), et de l'hélium, disparaissent du spectre avec une périodicité de 5,52 ans. Dans le même temps, le rayonnement infrarouge augmente. Cette périodicité est corrélée avec les éruptions.

Pour expliquer tout cela, on envisage l'opacité liée à l'ionisation du fer, à une tempértaure de l'ordre de 30.000 K, qui provoquerait une instabilité de l'enveloppe. Un tel mécanisme rendrait compte des éruptions, mais difficilement d'une périodicité aussi précise que 5,52 ans. Une période aussi marquée évoquerait plutôt une variable à éclipses, avec deux composantes de 70 M . Mais cette interprétation pose d'autres problèmes. En effet, la période de 5,52 ans indique une distance conséquente entre les deux composantes, qui empêche des interactions importantes, ou alors l'excentricité de l'orbite devrait être extrêmement forte.

Un flux X dur est observé depuis peu, présentant une augmentation du rayonnement autour de 5 keV, avec décroissance rapide. Ce flux varie selon la période de 5,52 ans, ce qui renforcerait l'hypothèse de l'étoile binaire. Si l'orbite est très excentrique, au périastre, la vitesse du compagnon est très importante. Or il se déplace dans un milieu dense. Donc, le choc sur ce milieu va dégager une grande énergie sous forme de rayons X. La température produite est estimée à 60 millions de degrés. Un comportement semblable a été observé pour d'autres LVB.

Mais on a observé en plus, depuis 1996, une variabilité du rayonnement X avec une périodicité de 85 jours... Cette nouvelle caractéristique a permi d'envisager même que l'étoile soit triple !

Le mystère reste entier !

**Novoïdes**

On appelle novoïdes des étoiles éruptives plus calmes que novæ et supernovæ. Elles forment un groupe disparate, classé en trois types :

- **type γ Cas**

  Ce sont de jeunes étoiles Be (donc chaudes, et à émission), en rotation rapide ; leurs variations sont de faible amplitude.

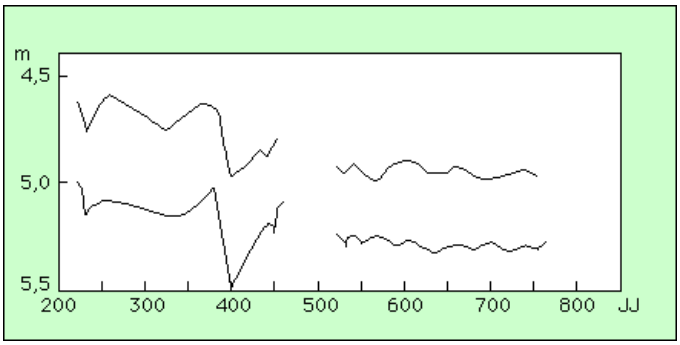
  γ Cas elle-même est de magnitude de base 2,2 ;

  elle a montré un sursaut à 1,47 ; puis elle a décliné jusqu'à 2,52 et présenté ensuite des oscillations.

  Pléione, l'une des Pléiades, est ce type.

  La vitesse de rotation élevée produit une force centrifuge très importante, qui équilibre presque la gravité à l'équateur. Ceci signifie que l'étoile doit être fortement déformée, avec un bourelet équatorial important. Mais aussi qu'une énergie supplémentaire assez faible de ce bourelet peut l'arracher à l'étoile.

  Tout excès de pression éjecte donc les couches équatoriales, et c'est ce qui provoque les sursauts.



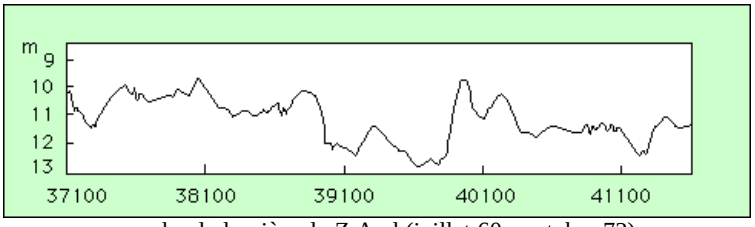

courbe de lumière de BU Tauri en U et V

- **type Z Andomedæ ou étoiles symbiotiques**

  Voici un nouveau type d'étoiles, dont les propriétés sont assez déroutantes. Les étoiles symbiotiques présentent deux spectres superposés :

  - un spectre normal de géante rouge M, ou quelquefois K ;
  - un spectre d'étoile chaude à émission bleue, beaucoup moins lumineux.

  Ce sont donc des systèmes doubles, alliant une composante bleue (trop faible pour être séparée spectroscopiquement) à une composante rouge.



courbe de lumière de Z And (juillet 60 - octobre 72)

**Explication**

Les étoiles symbiotiques ressemblent aux variables à longue période ; le compagnon très chaud variable perturbe.

Les variations pseudo-périodiques sont produites par la composante rouge brillante ;

Les maxima importants sont produits par la composante bleue.

- **type S Doradus**

S Dor est une curieuse étoile variable inversée : elle présente des minima !

Elle montre un spectre de supergéante à raies d'émission, et sa magnitude absolue est -10,7 (comme une nova au maximum ! )

Sa masse atteint 60 masses solaires, c'est une étoile très massive.

De ce fait, son évolution est extrêmement rapide : elle perd une masse solaire en 1.500 ans !!

P Cyg est une autre étoile du type SD

Son spectre est Be, avec des raies d'émission très larges. De plus, ces raies sont bordées de raies d'absorption côté violet (dues à une enveloppe gazeuse en expansion, qui se rapproche de nous). Sa magnitude absolue de -11,9 au maximum ;

---

**Novæ naines**

Semblables en certains points aux novæ, les novæ naines explosent souvent, mais leurs sursauts sont de faible amplitude. Elles forment encore un groupe très disparate.

On distingue deux types photométriques distincts :

- **type U Geminorum**

caractérisé par une augmentation d'éclat de 3 à 6 magnitudes, et des maxima séparés d'intervalles très variables de 10 jours à 3 ans.

U Gem est de magnitude 15, ses maxima de magnitude 9, l'intervalle de 60 à 200 jours.

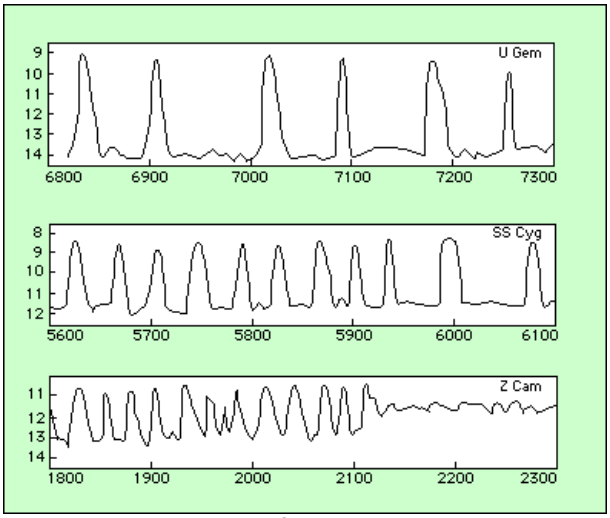
- **type Z Camelopardalis**

l'étoile ne reste pas à son minimum ;

intervalles de 10 à 25 jours ;

amplitude de 2 à 4 magnitudes ;

présence de paliers ;



courbes de lumière de 3 novæ naines

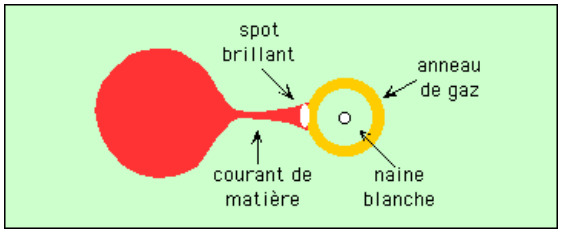
La magnitude absolue est probablement de 5 à 10, donc ce sont de petites étoiles faibles.

Elles présentent toutes des variations complexes et faibles au minimum :

- variations semi-périodiques ;
- flickering ;
- oscillations périodiques de très faible amplitude.

Ce sont des couples :

- une étoile chaude à raies d'émission, de type spectral Oe ;
- une étoile naine jaune ou orangée de grande densité, de type spectral G ou K ;
- l'étoile chaude perd de la matière au profit de l'autre ;
- un anneau de matière entoure l'étoile naine ;
- la matière tombant sur cet anneau l'échauffe, et produit une tache brillante ;
- à certains moments, cette zone explose.




L'anneau de matière émet des rayons X qui ont été observés ;

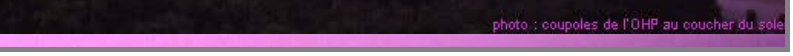
Les paliers du type Z Cam pourraient être produits par les éclipses du point chaud.

---

**Suite : variables nébulaires**

---=OO=---

# Variables nébulaires




## *Les étoiles jeunes*

On trouve dans le ciel de nombreuses nébuleuses diffuses, qui sont d'immenses nuages d'hydrogène (principalement). Elles peuvent être brillantes ou sombres, selon qu'elles sont éclairées par des étoiles brillantes proches, ou non. D'ailleurs, une même nébuleuse peut présenter des parties brillantes et des parties sombres, selon leur position dans l'espace.

Ces nébuleuses ont une structure très complexe, et contiennent de nombreux astres intéressants. La jeunesse de ces objets, attestée par de nombreuses observations, donne à penser que ces nébuleuses sont le siège d'une formation d'étoiles intense. Nous allons voir quelques unes de ces curiosités.

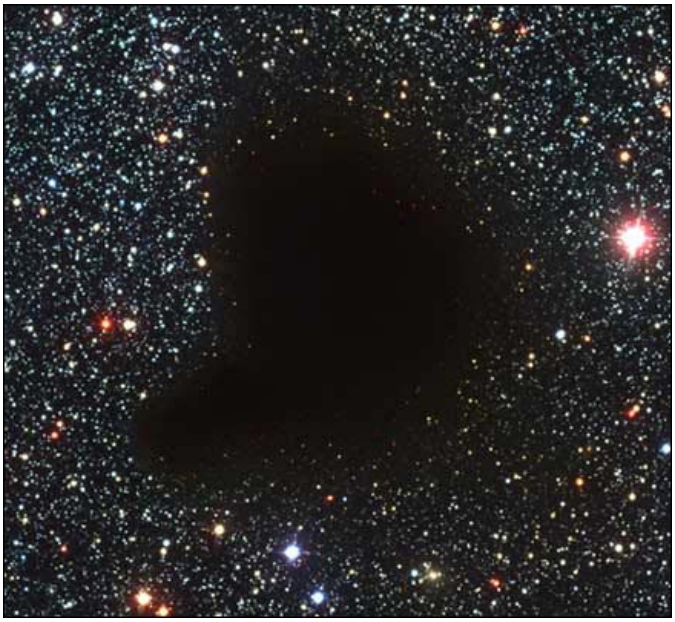
### Globules de Bok

Dans de nombreuses nébuleuses brillantes apparaissent de petites taches sombres. Elles ont été découvertes par Barnard, puis étudiées par Bart Bok à partir de 1948. Comme les nébuleuses dont ils sont issus, ces globules sont formés essentiellement d'hydrogène, d'un peu d'hélium et de poussières. Leur diamètre est de l'ordre d'une demie année-lumière, et leur masse est de l'ordre de deux masses solaires.

Les poussières atténuent la lumière des étoiles ou nébuleuses brillantes qui se trouvent derrière le globule, et l'analyse de cet obscurcissement permet de mesurer la densité du globule en fonction de la distance à son centre. Parfois, on distingue plusieurs condensations. On a montré que la densité croît régulièrement, en accord avec un modèle simple de quasi-équilibre entre la gravitation et la pression produite par l'échauffement (du à la contraction). La gravitation l'emporte très légèrement, et le globule se contracte lentement, sa densité augmente, et sa température centrale aussi. Cette phase de contraction dure quelques millions d'années.

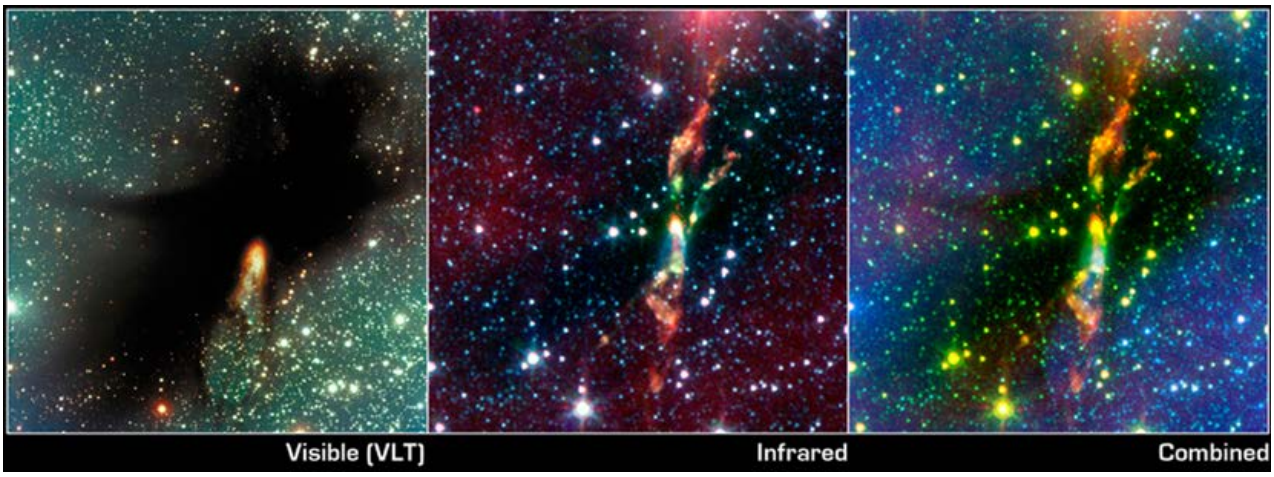
De plus, les observations dans le domaine submillimétrique ne montrent pas toujours les mêmes condensations que les observations dans l'infrarouge proche. Si on considère que les objets les plus évolués (les plus avancés dans leur contraction) sont aussi les plus chauds, on en déduit que les globules contiennent des objets d'âges différents.

**Exemples** : le globule Barnard 68, l'un des plus proches, se trouve à 410 AL. Il mesure 12.500 UA, soit 1/5 $^{me}$ d'AL, ou encore la taille du système solaire, nuage de Oort compris. Sa température est de 16 K (-257 °C) et sa pression au bord est 10 fois supérieure à celle du milieu interstellaire. Sa masse est 2 masses solaires.



Globule Barnard 68 photo FORS Team, 8.2-meter VLT Antu, ESO

Le globule BHR 71 a un diamètre de 1,5 AL et une masse de 40 masses solaires. Sa température est de 11 K seulement, et sa densité de 9 $10^{-3}$ $cm^{-3}$. On note, près du centre, deux jets opposés qui s'étendent jusqu'à près d'une AL. Ils sont de forme conique, l'angle du cône atteignant 30°. Le gaz est éjecté à 28 km/s. Il semble qu'il y ait au centre du globule une étoile dont la luminosité serait de 9 fois celle du Soleil.




Globule BHR 71 photos NASA / JPL-Caltech / T. Bourke (Harvard-Smithsonian CfA)

La formation des globules de Bok n'est pas très bien connue.Tout d'abord, ils se forment ! Etant donné qu'ils ne sont pas tout à fait en équilibre, ils ne peuvent pas être là depuis longtemps. Par contre, les immenses nuages d'hydrogène dans lesquels ils se forment sont en équilibre, car sinon, ils se seraient contractés depuis très longtemps et nous n'en observerions pas aujourd'hui. Leur gravité est égale à leur pression. Pour qu'un globule se forme, il faut donc qu'un déséquilibre soit induit par une force extérieure. Deux solutions se présentent :

- une force de compression s'exerce sur le nuage, augmentant le confinement de sa matière, donc sa gravité ;
- le gaz constitutif se refroidit.

Le **refroidissement** du gaz se conçoit en considérant le mélange de gaz et de poussières. La chaleur du gaz se communique aux poussières, dont la masse est énorme en comparaison. Les grains de poussière ainsi chauffés vont se refroidir en émettant des rayons infrarouges, qui ne sont pas absorbés par un gaz trop dilué. La température baissant, la pression baisse aussi, et la gravitation l'emporte.

Deux mécanismes ont été proposés pour produire **une force de compression** :

- le premier est mis en évidence par la forme des bras dans les galaxies spirales : s'ils étaient statiques, ils s'enrouleraient très rapidement sur le noyau. Donc, ce ne sont pas des masses de matière particulieres, mais des ondes de densité. Lorsqu'une telle onde arrive dans un nuage, elle provoque une légère augmentation de la densité, qui devrait produire l'effondrement de certaines parties du nuage ;
- le second est l'onde de choc produite par l'explosion proche d'une supernova, qui pourrait comprimer le gaz et amorcer l'effondrement.

**Objets de Herbig-Haro**

Ils ont été trouvés en 1954 dans la nébuleuse d'Orion par George Herbig et Guillermo Haro. On en connait maintenant plus de 400. Des photos prises en 1947 montrent de petites nébulosités. En 1954, ces nébulosités s'étaient fragmentées, et chaque fragment avait un aspect stellaire. Des observations ultérieures de ces objets, découverts en grand nombre, ont montré un cœur condensé entouré d'une enveloppe qui rayonne en IR. Ce cœur semble être une protoétoile au début de sa contraction gravitationelle. Fréquemment, deux jets opposés sont émis, qui produisent une onde de choc sur le milieu ambiant.

La masse des objets de Herbig-Haro est comprise entre 0,2 et 3 masses solaires. Leur diamètre va de 1 à 5 diamètres solaires. Ceci montre que ces objets, bien que d'aspect stellaire, ne sont pas encore condensés autant qu'une véritable étoile.

Dans la nébuleuse, on trouve de petits grains de silicates.

La température de la nébuleuse est de l'ordre de 1.000°.

Dans tous ces objets étudiés, les changements sont rapides.

**Etoiles T Tauri**

T Tauri a été découverte en octobre 1852. Son nom signifie qu'il s'agit de la troisième étoile variable découverte dans le Taureau. En 1890, une nébuleuse, la nébuleuse de Burnham, a été identifiée autour de T Tauri. Sa plus grande dimension est de 4 secondes d'arc pour sa partie condensée, mais elle s'étend faiblement jusqu'à 10 secondes.

A 40 secondes d'arc à l'ouest de l'étoile se trouve un jet, brillant surtout en infrarouge.

Enfin, on observe une nébuleuse par réflexion, qui est illuminée par T Tauri, prouvant qu'il existe encore du gaz proche de l'étoile.

En 1981, on a découvert que T Tauri est une étoile double. Le compagnon est uine étoile visible en infrarouge, à une distance de 0,5 à 0,7 secondes d'arc de l'étoile principale. L'étoile visible est nommée maintenant T Tauri N (nord), son compagnon est T Tauri S.

A. Joy a étudié en 1945 l'étoile T Tauri, dont le spectre présente des particularités :

- son aspect général est semblable à celui de la chromosphère du Soleil ;

- il montre des raies d'émission :
  - série de Balmer de l'hydrogène ;
  - raies métalliques de Ca, Fe, Ti... neutres ou faiblement ionisés ;
- il montre des raies du lithium intenses.

Déduite de l'importance des raies, l'abondance du lithium est de 50 à 400 fois supérieure à celle du Soleil. Le lithium, le béryllium et le bore sont présents dans le gaz des nébuleuses qui donne naissance aux étoiles, en faibles quantités. Mais le lithium est fragile, il est détruit par des réactions nucléaires à partir de 1 million de degrés. Aussi, dans les étoiles de la Séquence Principale a-t-il été détruit depuis longtemps. Sa présence en abondance dans le spectre de T Tauri montre que cette étoile vient à peine de se former, puisque son lithium n'a pas atteint les températures élevées qui le détruisent.

Sa température centrale n'a pas donc atteint les 10 millions de degrés, et la fusion de l'hydrogène ne peut s'y produire. Donc sa source d'énergie est ailleurs. Elle est probablement en grande partie d'origine gravitationnelle, la contraction n'étant pas encore terminée.

On a trouvé depuis de nombreuses étoiles du même type. Elles se situent dans le diagramme HR au-dessus et à droite de la Séquence Principale.

Ce sont des étoiles jeunes (lithium), de faible masse (entre 0,2 et 3 masses solaires). Leur âge est de l'ordre de 100.000 ans à 1 million d'années. Elles se trouvent pour la plupart dans des nuages sombres de la Voie Lactée (qui sont à leur origine). Si elles sont encore là, c'est que leur jeune âge ne leur a pas encore donné le temps d'en sortir.

Toutes les étoiles T Tauri sont variables, sans que leur courbe de lumière présente des caractéristiques marquées. Les variations traduisent une recherche d'équilibre, qui ne sera trouvé qu'au début de la Séquence Principale. Elles sont produites par des sursauts incessants, et qui arrivent à se superposer.

Elles émettent un très fort vent stellaire. Leur type est entre B et K.

**Exemples** : T Tauri varie de 9,6 à 13,5 ; son type spectral est G5 V ; elle est associée à la nébuleuse NGC 1555.

R Mon varie de 9,3 à 14,0 ; son type spectral est AF ; elle est associée à NGC 2261.

**Etoiles FU Orionis**

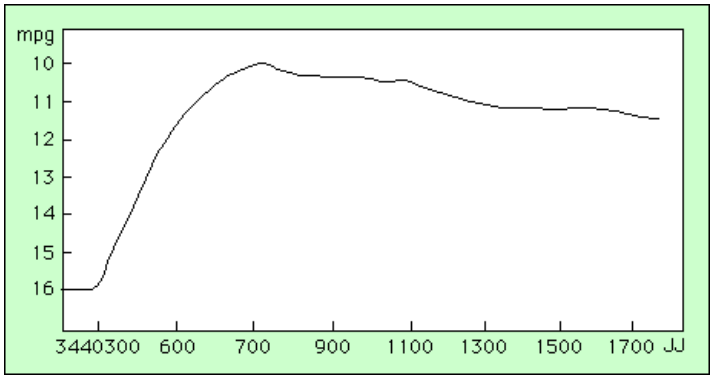
FU Orionis elle-même a été étudiée par Wachmann en 1939. Elle se trouve dans une association T nommée *Orionis T4*. Elle est connectée à la nébuleuse B35.

Elle apparut tout d'abord comme une nova lente, car sa magnitude est montée progressivement, en deux mois, d'une valeur stable de 16,5 à 9,7. Mais contrairement aux novæ dont la décroissance s'amorce très rapidement, elle est restée pendant 600 jours à cette valeur. Ensuite, elle a commencé un déclin, qui s'est vite stoppé : elle s'est stabilisée à 10,3 au bout de 50 jours.

Cette stabilisation semble exclure une nova. De plus, son spectre montre qu'elle est maintenant une supergéante de type spectral F2p I-II. Elle présente la raie Hα de l'hydrogène en émission. Le plus surprenant est la présence des raies du lithium.

Son association à B35 et à Orionis T4 est une autre preuve qu'il ne s'agit pas d'une nova.

**V 1057 Cygni** est du même type, mais elle était connue depuis 50 ans comme une étoile T Tauri, variant entre les magnitudes 15 et 16 ! Le changement s'est produit en 1969, où elle atteignit la magnitude 10 en 430 jours. Elle a ensuite légèrement varié pour se stabiliser à 10,2. Elle est associée à la nébuleuse America (NGC 7000).




Courbe de lumière de v 1057 Cygni

Son spectre était K, avec la raie Hα en émission. Il est passé à A1 IV, donc l'étoile est devenue beaucoup plus chaude, pour arriver maintenant à F. L'analyse Doppler montre une vitesse de 30 à 40 km/s pour les vents stellaires, ce qui exclu une explosion de nova.

Les étoiles de type FU Orionis gagnent 5 à 7 magnitudes sur des durées de quelques mois à un an, puis après quelques oscillations de 1 à 2 mois, se stabilisent à leur éclat maximal. Corrélativement, leur spectre passe d'un type avancé relativement froid au type A ou F, ce qui montre une grande élévation de température.

Elles sont toutes associées à des nébuleuses. Elles sont certainement très jeunes.

L'explication qu'on donne de ces astres, et qui rend compte des faits observés (présence du lithium en particulier) est la suivante : les T Tauri sont des protoétoiles, en cours de contraction, de grand diamètre. Leur source d'énergie est gravitationnelle. La contraction avançant, la température centrale augmente : l'étoile se rapproche de la Séquence Principale dans le diagramme HR. Jusqu'au jour où elle atteint, au centre même, les 10 millions de degrés nécessaires pour la fusion de l'hydrogène. Les réactions de fusion de l'hydrogène se déclenchent, mais participent très peu au bilan énergétique dominé par la contraction gravitationnelle. Alors, l'énergie disponible augmente, et ralenti la contraction. Celle-ci va se poursuivre, à un rythme de plus en plus lent, en augmentant encore la température : la température minimale pour la fusion est atteinte dans des couches autour du cœur. Une partie plus importante de l'étoile participant aux réactions, l'énergie disponible augmente.

La contraction ralentit donc. Elle s'arrête finalement, tarrissant la source d'énergie gravitationelle. A ce moment-là, toute l'énergie de l'étoile est d'origine thermonucléaire. Là commence la Séquence Principale. On parle de Zero Age Main Sequence (ZAMS) pour déterminer cet instant dans la vie de l'étoile. C'est en général à partir de ce moment que l'on compte son âge.

Il est donc probable que les quelques objets FU Orionis que l'on connaît nous montrent la dernière phase de contraction, depuis la phase T Tauri finale, jusqu'à la ZAMS. On a assisté en direct à la vraie naissance d'une étoile.

**Exemples** : FU Ori varie de 9,7 à 16,5 ; son type spectral est F2 I ; elle est associé à une nébuleuse cataloguée B 35.

V1057 Cyg est du type FU Ori. Elle varie de 10 à 16 ; son TS est A1 IV ; elle est associée à NGC 7000.

## *Associations*

Les nébuleuses diffuses contiennent de nombreuses étoiles, dont beaucoup sont variables, et qui sont regroupées en *associations*.

Les associations ont été définies par Ambartsumian en 1949. Au contraire des amas d'étoiles, elles contiennent des étoiles physiquement semblables. Elles vont d'une dizaine à quelques centaines d'étoiles.

Les amas d'étoiles contiennent des étoiles liées entre elles par la gravité, de types divers, et leurs diamètres vont de 2 à 15 parsecs.

Il y a deux types d'associations :

- Associations OB : les étoiles sont de type spectral O ou B; le diamètre va jusqu'à 200 parsecs ;
- Associations T : étoiles de type T Tauri ; plus petites que les associations OB, elles vont de 2 à 40 parsecs de diamètre ; elle peuvent contenir plusieurs centaines d'étoiles.

Toutes les associations sont situées dans les bras spiraux de la Galaxie, au sein des nuages d'hydrogène.

Les étoiles des associations forment souvent des figures géométriques particulières :

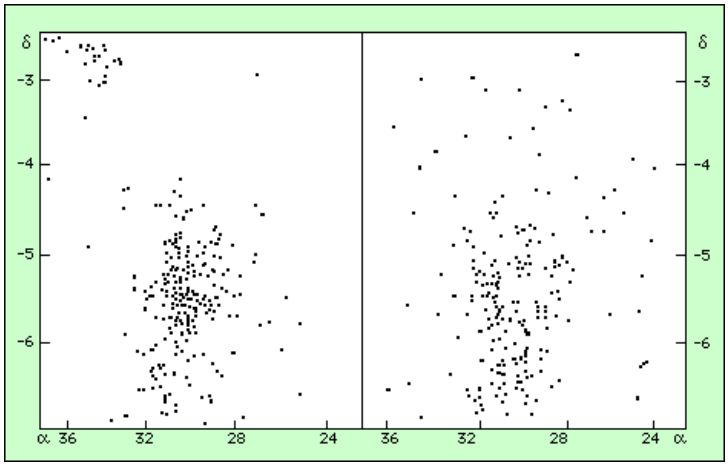
- Trapèzes, tel celui d'Orion ;
- Chaînes ;
- Anneaux de 6 ou 7 parsecs de diamètre.

Pour ces variables, la courbe de lumière n'a pas de forme standard. Elles sont classées en trois types :

- In : irrégulières associées à une nébuleuse ou très proches ; ce sont des géantes ou sous-géantes de type spectral :
  - O, B ou A : c'est le sous-type Ina pour les lentes et Inas pour les rapides ;
  - F, G, K ou M : c'est le sous-type Inb (lentes) Inbs (rapides) ;
  - T Tauri : sous-type InT (lentes) ou InsT (rapides) ;
- Is : semblables aux précédentes, de mêmes types spectraux, mais non connectées à la nébuleuse :
  - O, B ou A : c'est le sous-type Isa ;
  - F, G, K ou M : c'est le sous-type Isb ;
  - T Tauri : sous-type IsT ;
- UVn : étoiles à sursauts associées aux nuages d'hydrogène. Leurs spectres sont dK5 à dM. Elles sont faibles : magnitude absolue de +8 à +10. Les sursauts atteignent 3 à 4 magnitudes, et durent en général une heure ou deux, quelquefois plus.

Leurs variations sont irrégulières, et souvent très rapides.

Pour les T Tauri, les sursauts se succèdent sans interruptions, et même se superposent. Les variations atteignent 3 magnitudes. Elles sont d'autant plus importantes que le type spectral est plus avancé.




Variables In (à gauche) et UVn (à droite) dans la même région d'Orion

Les UVn sont plus dispersées que les In, qui se réunissent au centre du groupe. Cette différence provient de leur formation, et donc implique une différence d'origine. Ce ne sont pas exactement les même mécanismes qui président à leur naissance.

| DESIGNATION | max | min | type spectral | Type | et nébuleuse | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| RW Aur | 9,6 | 13,6 | G5Ve | IsbT | Aur T1 | IC 1579 |
| UY Aur | 11,6 | 14,0 | G5Ve | InbsT | Aur T1 | IC 1579 |
| T Cha | 10,0 | 13,8 | G5Ve | Inbs | Cha T1 | |
| R CrA | 10,0 | 13,6 | F5Ve | InbsT | CrA T1 | NGC 6729 |
| RU Lup | 9,6 | 13,4 | G5Ve | InbT | Lup T1 | B228 |
| R Mon | 9,3 | 14,0 | AFpe | InaT | | NGC 2261 |
| T Ori | 9,5 | 12,6 | B8-A3Vep | Inas | Ori T2 | NGC 1976 |
| CO Ori | 10,3 | 13,4 | Gpe | Inbs | Ori Tl | SG 139 |
| SV Sgr | 13,4 | 16,5 | dK0e | Inb | Sgr T2 | NOC |
| T Tau | 9,6 | 13,5 | G5Ve | InbT | | NGC 1555 |
| RR Tau | 10,2 | 14,0 | A2II.IIIe | Inas | Tau T4 | |
| RY Tau | 8,8 | 11,1 | G2Ve | InbT | Tau Tl | IC 359 |
| UX Tau | 10,6 | 13,3 | G2Ve | InbT | Tau T2 | |
| UZ Tau | 11,7 | 14,9 | G5Ve | InbT | Tau T3 | |

**Le complexe d'Orion**

C'est un immense nuage d'hydrogène, qui comporte plusieurs nébuleuses. La plus importante est M 42 ou NGC 1976, découverte en 1610 par Fabri de Peiresc. On trouve ensuite M 43 ou NGC 1984, puis NGC 1977 et NGC 1999. Son diamètre atteint 30 parsecs. On y trouve une association O, nommée Orionis O1, et une association T nommée Orionis T2.

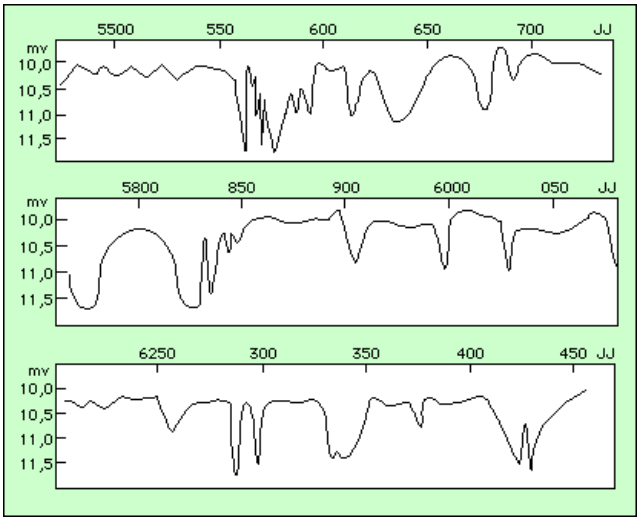
**Le trapèze d'Orion**

Le trapèze d'Orion est une étoile multiple, nommée θ2. C'est une association OB :

| | **mv** | **spectre** | **variable** | | **autre désignation** |
|---|---|---|---|---|---|
| Orionis A | 6,72 | B 0,5 V | à éclipses | 197,5 j | v1016 Ori |
| Orionis B | 8,1 | B 2 V | à éclipses | 6,470 j | BM Ori |
| Orionis C | 5,13 | O 7 V | spectroscopique | | |
| Orionis D | 6,70 | O 9,5 V | | | |

**T Orionis**

Découverte par Bond en 1863. Les variations sont irrégulières. T Ori est le type des variables Inas. On connait 780 variables de ce type.




Courbe de lumière de T Orionis pour 3 périodes entre 1927 et 1931
G.B. Lacchini, Asiago Obs

## *Les naines rouges variables*

Les étoiles rouges sont des étoiles de spectres K ou M, types avancés, de faible luminosité : leur magnitude absolue va de +8 à +18...

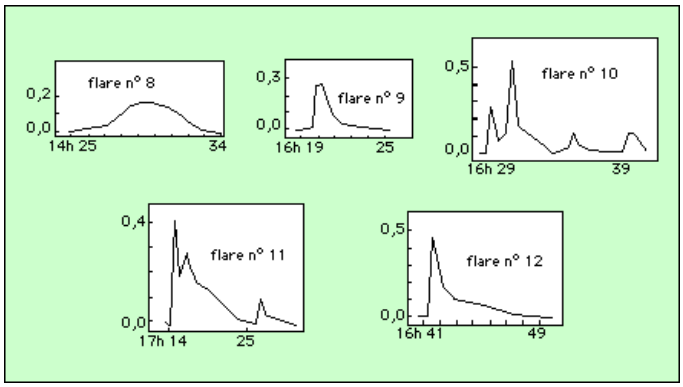
Elles sont souvent variables, en particulier les naines dans la proportion de 10 à 20%. Il y a deux mécanismes différents pour leurs variations :

- des sursauts lumineux très rapides et irréguliers, nommés flares. Ils ont été découverts par Van Maanen en 1940. L'étoile type est UV Ceti.
- la présence d'un spot brillant à la surface de l'étoile, qui est entraîné par la rotation. Il produit des variations de faible amplitude et périodiques. Le type de ces étoiles est BT Draconis.

**Type UV Ceti, variables à flares**

Les UV Ceti sont des étoiles très peu lumineuses, à tel point qu'on ne connait que les plus proches du Soleil (moins de 25 parsecs), ce qui fait tout de même une centaine d'objets.

UV Ceti elle-même est un couple de deux naines rouges de spectres dM5e et dM6e. Les raies d'émision sont intenses. Sa magnitude visuelle est de 12, elle est située à 2,58 parsecs. Sa magnitude absolue est de 15.




Les sursauts (*flares*) des UV Ceti sont très rapides : montée de plusieurs magnitudes en quelques secondes, puis retour à l'état normal en quelques minutes. Les flares sont des explosions chromosphériques, semblables à celles du Soleil, et de même énergie. Mais alors qu'une telle explosion passe inaperçue sur le Soleil, très lumineux, elle est relativement très importante pour une naine rouge 1.000 à 10.000 fois moins lumineuse. Les variations du spectre au cours des sursauts montrent que l'atmosphère de l'étoile s'échauffe énormément. On note un renforcement du spectre continu, des raies d'émission de l'hydrogène (mais pas du calcium), l'apparition de raies d'émission de l'hélium, neutre ou ionisé. Le spectre ultraviolet se renforce également. D'autre part, la rapidité du phénomène montre que seule une petite partie de l'atmosphère de l'étoile est concernée (quelques %). L'accroissement de température explique aussi l'importance décroissante des sursauts de U en V.

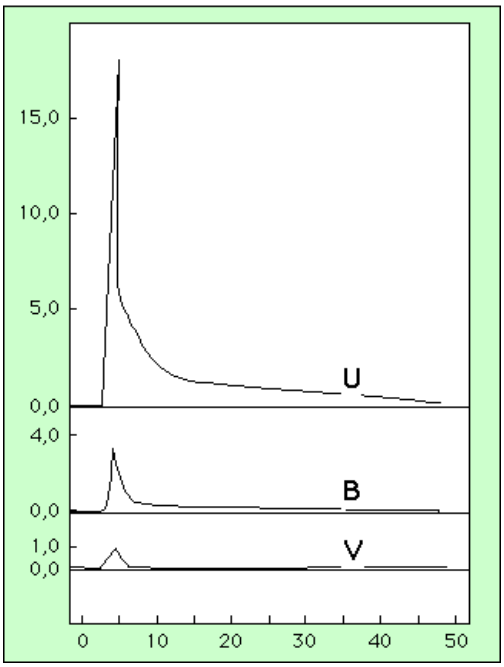
Les UV Ceti sont souvent des couples, quelquefois serrés. S'il sont assez écartés, chacune des étoiles présente son propre spectre et possède sa dénomination. Dans le cas contraire, le couple lui-même porte un nom, c'est le cas de UV Ceti, et le spectre observé est le spectre composite du couple.

On peut déterminer la masse des composantes d'un couple, ce qui permet de connaître les masses de nombreuses UV Ceti. Le couple Wolf 424 présente ainsi des masses de 0,068 et 0,085 masses solaires !

Les UV Ceti sont difficiles à observer, car elles sont très peu lumineuses, et leurs sursauts sont très rapides ! Elles ont nécessité dans le passé une surveillance visuelle très pénible. Elles sont maintenant étudiées à l'aide de spectromètres, mais il est évident qu'on ne peut surveiller en permanence une étoile particulière.

Une étude statistique sur une observation continue de 132 heures a montré que les sursauts les plus importants sont les moins nombreux. La fréquence des sursauts n'est pas constante ; ils peuvent être très rapprochés ou très espacés. De plus, les étoiles les moins lumineuses sont les plus actives.

L'amplitude des sursauts n'est pas la même selon la longueur d'onde considérée. Voici par exemple un sursaut de YZ CMi :




Un sursaut de YZ CMi en U, B et V

Enfin, on a noté quelques sursauts négatifs, où la luminosité diminue au lieu d'augmenter.

Proxima Centauri est une UV Ceti. Elle est de type spectral dM5e, elle se trouve à 1,30 parsecs de nous, et sa magnitude absolue est de 15,49.

On trouve des étoiles variables à sursauts assez semblables dans les amas galactiques : les Pléiades, Præsepe, Coma, les Hyades. Les amas les plus anciens sont les moins riches. Les sursauts sont plus longs et moins fréquents que ceux des UV Ceti typiques.

**Remarques générales sur les sursauts**

- les étoiles les moins lumineuses sont les plus actives ;
- plus l'étoile est lumineuse, plus longs sont les sursauts ;
- il n'y a pas de corrélation entre l'amplitude et la durée des sursauts ;
- les étoiles qui font partie d'un couple présentent une activité un peu plus importante.

Cette dernière remarque explique pourquoi les variables d'amas sont moins actives que les UV Ceti.

**Type BY Draconis**

C'est le même type d'étoiles que les UV Ceti, mais le mécanisme de variation est différent. Il s'agit d'une petite zone plus brillante, nommée spot, qui passe périodiquement en vue de l'observateur lors de la rotation de l'étoile. Les variations d'éclat sont faibles, inférieur à 0,1 magnitude.

Les BY Dra sont en général plus brillantes ques les UV Ceti, leur magnitude absolue est entre +7 et +12. Leur type spectral est de dK5 à dM0. Elle présentent les raies de l'hydrogène et du calcium en émission.

On connait 25 étoiles de ce type. Dans les cas où l'étoile est double, il arrive fréquement que la période de variations lumineuses soit la même que leur période orbitale. Il est donc probable que les interactions entre les deux étoiles favorisent la formation des spots.

## *Les étoiles vieilles*

A la fin de la Séquence Principale, la belle stabilité de l'étoile est rompue par manque de carburant.

**FG Sagittæ, une étoile extraordinaire**

L'étoile FG Sagittæ est vraiment un cas exceptionnel ; non pas que ses propriétés ne se retrouvent ailleurs, mais parce qu'elle semble se trouver actuellement dans une phase évolutive très rapide, que l'on a donc très peu de chance d'observer.

Elle figure sur des plaques photographiques datant de 1894, où elle apparaît à la magnitude 14. Sa variabilité a été découverte par Hoffmeister en 1943 : elle variait irrégulièrement entre les magnitudes photographiques 11,0 et 11,5. En 1960, sa magnitude variait de 10,0 à 10,5. Elle a atteint un maximum à 9,5 en 1967. Ensuite, elle a commencé à décliner.

De plus, il y a une faible nébuleuse planétaire autour d'elle, qui a été éjectée il y a quelques 6.000 ans. La masse de cette nébuleuse est estimée entre 0,2 et 0,6 masses solaires.

On est donc en présence d'une étoile augmentant régulièrement d'éclat, avec superposition de variations apériodiques de faible amplitude. Toutefois, à partir de 1962, ses variations sont devenues périodiques. Elle semblait devenir une Céphéide. Sa période était de 15 jours. Mais en 1964, sa période était passée à 22 jours... En 1979, elle atteignait 108 jours. Décidément, c'est une drôle d'étoile. L'augmentation de période est linéaire : la période monte de 4,9 jours par an

Passons à l'étude de son spectre. En 1955, il était de type B4 I (classe de luminosité I), donc la température de la photosphère était de 12.300 K. En 1967, son spectre était passé au type A5 I, sa température avait donc chuté à 8.300 K, soit une perte de 4.000 K en 12 ans. En 1970, le spectre était F2, en 80 il était G6. Soit une surface moins chaude que celle du Soleil, seulement 5.000 K. En extrapolant, on peut supposer qu'aux alentours de 1900 le type pouvait être O5, et la température superficielle atteindre 40.000 K.

Dans le même temps, le diamètre de l'étoile a varié considérablement : en 1962, elle était 20 fois plus grosse que le Soleil, mais 5 ans après, elle était 75 fois plus grosse. Soir une accroissement de 3 diamètres solaires par an ! Les pulsations d'une céphéide trouvent leur origine dans le cœur de l'étoile, mais se propagent dans l'atmosphère. Puisque la taille de celle-ci augmente, l'onde a davantage de chemin à parcourir, ce qui explique l'augmentation de la période.

Enfin, dernière particularité extraordinaire, de 65 à 72 l'abondance du baryum, du lanthane, du cérium, du zirconium, a été multipliée par 25. Les autres éléments n'ont pas été affectés. Depuis 72, les abondances n'ont plus varié.

La température superficielle diminue, le rayon augmente ; le résultat est que la magnitude bolométrique de l'étoile est constante !

Par analogie avec les céphéides de population II auxquelles elle ressemble, on estime la masse de FG Sge à une demie masse solaire. Etant donné qu'elle a perdu une demie masse solaire dans la nébuleuse planétaire, sa masse initiale devait être de l'ordre de celle du Soleil. Il faut considérer l'évolution d'une telle étoile.

En fin de Séquence Principale, le cœur de l'étoile se contracte, et son enveloppe se dilate en refroidissant. La combustion de l'hélium s'allume avec le flash de l'hélium. Il y a éjection d'une enveloppe sous la forme d'une nébuleuse planétaire. Le réchauffement du cœur de l'étoile va modifier son spectre, qui passe de M à O. L'équilibre entre production d'énergie et gravité est rétabli, mais il est moins stable que dans la Séquence Principale. Rapidement (beaucoup plus vite que dans la Séquence Principale), l'hélium s'épuise. La production d'énergie diminue, et l'étoile va encore changer de type : elle va retourner vers la droite du diagramme HR, vers le type M.

Les propriétés observées de FG Sge font penser qu'on assiste à son retour de la partie gauche du diagramme HR vers la partie droite ; c'est-à-dire au passage d'une étoile bleue à une géante rouge. Cette transformation s'effectue sous nos yeux, en 50 ans ! L'étoile devrait arriver rapidement au type spectral M. Combien de temps restera-t-elle dans cette état ? Après, elle s'effondrera en naine blanche.

Peut-être avons-nous là la chance inespérée de voir réellement l'évolution d'une étoile semblable à notre Soleil. La durée de cette phase étant extrêmement brève, la probabilité de l'observer est très faible. Si c'est bien là l'explication de cette étoile extraordinaire, nous avons beaucoup de chance.

---

## *Variables diverses*

**R Coronæ Borealis**

Ce sont des variables du genre inclassables ! ! Elles n'appartiennent à aucun des types précédents, qui sont pourtant nombreux. Elles sont pourtant très intéressantes. Elles sont peu nombreuses : on en connait un peu plus de 20.

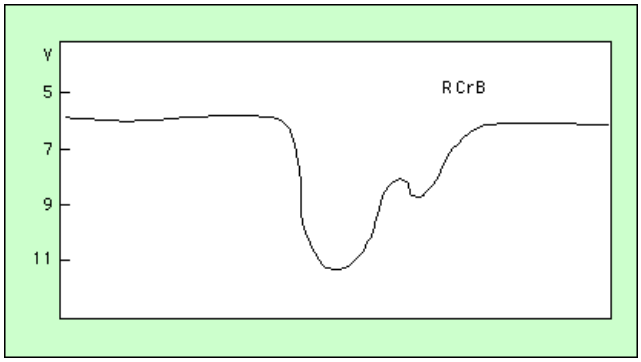
Leur état normal est leur maximum, contrairement à toutes celles que nous avons vues avant. De temps en temps, leur éclat diminue rapidement de 4 à 8 magnitudes, puis elle reviennent à leur éclat normal assez lentement, en quelques semaines à quelques années.

R CrB elle-même varie de 6 (magnitude normale) à 14. Entre 1864 et 1875, elle est restée autour de son minimum, avec des fluctuations parfois importantes.

Ce sont des supergéantes de type G, et de magnitude absolue -6. Leur spectre est très riche en carbone et pauvre en hydrogène. Au minimum, on voit des raies métalliques en émission, alors que l'hydrogène est en absorption. La vitesse radiale, obtenue par effet Doppler, ne varie pratiquement pas au cours des fluctuations d'éclat, donc il ne s'agit pas d'explosions.

Fait remarquable, elles sont beaucoup plus brillantes en infrarouge que dans le visible. RY Sgr est de magnitude visuelle 6,5 au maximum, mais elle atteint -0,4 en IR, plus que Véga !

Le mécanisme de variations proposé repose sur des transformations du carbone. Celui-ci est présent en abondance dans l'atmosphère. On pense qu'il se condense en particules de graphite dans les couches supérieures, plus froides, de l'atmosphère. A ce niveau, les grains sont écartés les uns des autres, et l'atmosphère reste transparente. Mais sous l'effet de la gravité, les grains vont bientôt tomber vers la photosphère. En tombant, leur densité augmente, ce qui arrive à obscurcir l'étoile et diminuer l'éclat. Mais la température augmente, et finalement les grains de graphite s'évaporent, ce qui rend à l'atmosphère sa transparence.




Un minimum de R CrB

**V1343 Aquilæ**

Connue depuis 1966 c'est une étoile qui présente des raies d'émission intenses. Mais celles-ci sont décalées par effet Doppler... simultanément vers le bleu et vers le rouge ! Chaque raie est visible trois fois, à sa position au repos, et avec les deux décalages...

Pire encore, la mesure des vitesses radiales sur les raies décalées donne des vitesses allant jusqu'à 35.000 km/s d'un côté et 50.000 km/s de l'autre. Les particules responsables de ces émissions s'éloignent donc les unes des autres à presque un tiers de la vitesse de la lumière !

Enfin, pour que le problème soit plus difficile, les décalages sont périodiques : le plus grand des deux, dont le maximum est 50.000 km/s, est alternativement vers le rouge et vers le bleu, avec une période de 164 jours. De quoi désespérer un astronome bien constitué.

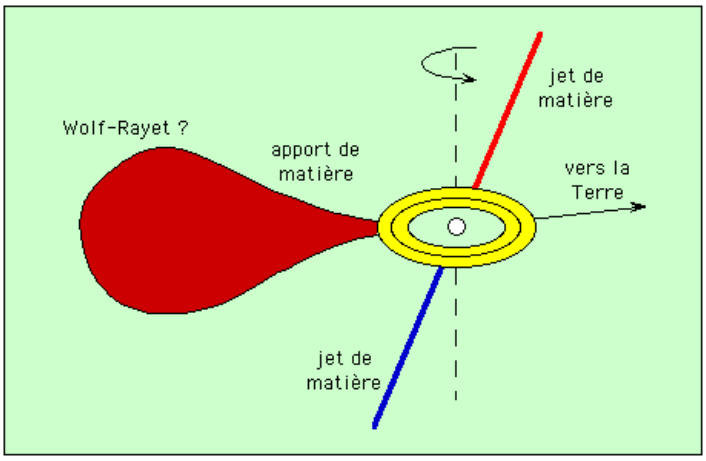
Ce n'est encore pas tout : elle est au centre d'une radio-source nommée W 50, et c'est une puissante source X... Ceci a fait penser à un reste de supernova, mais on a observé des filaments qui relient l'étoile à la radio-source, excluant cette interprétation.

Aurons-nous le courage d'ajouter qu'elle est variable... avec une amplitude d'une magnitude. Toutefois, ceci donne une indication intéressante, car on a pu montrer que c'est une variable à éclipse, de période 13,09 jours.

La coupable de ces excès est située à 3.000 parsecs de nous, dans notre Galaxie. Sa magnitude absolue est de -3,5 : elle est brillante.

**Explication** : on est en présence d'un couple formé d'une étoile très chaude et lumineuse, qui pourraît être une Wolf-Rayet, et d'une étoile très massive et petite, sans doute une étoile à neutrons. Cette dernière doit être entourée d'un disque de matière arrachée à l'autre étoile. Le disque entourant l'étoile à neutrons est éclipsé par l'autre. Ceci n'explique pas encore les décalages des raies spectrales.

L'explication la plus probable est illustrée sur le schéma suivant :




Les deux jets opposés, en tournant avec l'étoile, s'approchent et s'éloignent alternativement. L'inclinaison par rapport à la Terre entraîne l'alternance des décalages constatés.

Dernier point : la période de rotation des deux jets diminue à grande vitesse, de 0,011 jour par jour ! Ce phénomène ne durera donc pas longtemps, et dans quelques années au plus, l'étoile va évoluer vers une autre configuration. L'observation de ces changements attendus est très prometteuse pour l'explication du phénomène, et pour la physique des objets exotiques en général.

---

**Suite : variables nouvelles**

---=OO=---

# Les nouvelles variables




Les moyens d'observations récents, notamment spatiaux, nous ont permi d'accéder aux rayonnements invisibles depuis le sol. La transparence de notre atmosphère étant limitée à quelques petites fenêtres, visible, radio... , ceci est une révolution en matière d'observation. Les objets découverts sont parfois associés à des objets connus et brillants dans le visible, parfois isolés.

Nous avons vu que la variabilité est assez générale dans le domaine optique, et corrélée à l'évolution des objets. On peut prévoir qu'il en sera de même dans les autres domaines d'observation. Cette idée s'est rapidement vérifiée, permettant de découvrir de nouveaux objets dont les flux changent dans diverses gammes d'ondes. Certains ont une contre-partie optique, et nous pouvons voir l'astre émetteur, mais d'autres restent invisibles avec les moyens optiques actuels.

Nous allons étudier quelques uns de ces astres.

**Pulsars**

Les pulsars ont été découverts grâce à la radioastronomie. C'est Jocelyn Bell qui en a fait par hasard la première observation en 1967. Le radiotélescope de Cambridge lui a révélé un objet qui émettait un signal radio extrêmement bref, ce qui est déjà surprenant, mais qui de plus se répétait indéfiniment avec une période de 1,3373 seconde ! C'est le phénomène astronomique le plus rapide connu, et les plus courtes périodes connues à l'époque étaient de l'ordre de l'heure. L'objet était si étrange, que les astronomes de Cambridge ont entrepris de solides vérifications, et n'ont finalement publié leur découverte que plusieurs mois après. Il a posé un problème assez difficile à résoudre : le phénomène physique qui le produit est totalement nouveau. Pour cette magnifique découverte, le prix Nobel a été attribué... à son patron !

Il a fallu d'abord admettre qu'il s'agissait d'un objet naturel, ce qui n'était pas si évident en considérant ses propriétés.

L'objet découvert par Jocelyn Bell a été catalogué sous le nom de CP 19-19. En anglais, ce type d'objets a été nommé "pulsating stars", qui a été aussitôt abrégé en *pulsar*.

Une recherche systématique a permis ensuite de trouver de nombreux objets semblables, on en compte plus de 300 maintenant.

L'association d'une source radio avec un objet optique est toujours un problème. Il a été résolu grâce à une détermination précise de la position de la radiosource. Le plus célèbre des pulsars a une petite histoire.

En 1054, les chinois ont observé l'explosion d'une supernova, et l'ont mentionnée dans leurs chroniques. Les restes de cette supernova sont actuellement visibles : ils constituent la belle nébuleuse du Crabe. Il s'agit dune nébuleuse de forme globale circulaire, mais montrant de nombreux filaments qui lui donntent un aspect évoquant, de loin, un crabe. On dispose de photos de cette nébuleuse depuis le début du XX$^{me}$ siècle, et les variations d'aspect montrent qu'elle est en expansion. De plus, on peut mesurer la vitesse de l'expansion, et on trouve que l'explosion a dû se produire il y a un millier d'années. Au centre de la nébuleuse on a pu trouver une petite étoile de magnitude 15.

Plus récemment, on a observé un pulsar, nommé PSR 0531+21, dont la position correspond à celle de l'étoile. Ceci amène l'idée qu'un pulsar puisse être associé à une supernova.

Les périodes des pulsars sont toutes très brèves : la plus longue est de 4 secondes, et la plus courte est celle du pulsar du Crabe 0,033 seconde.

On a observé les pulsars dans d'autres fréquences radio : l'amplitude des pics peut être très différente, montrant la répartition de l'énergie en fréquence, mais la période est toujours exactement la même.

Enfin, la période des pulsars varie au cours du temps, mais très lentement : elle augmente de l'ordre de $10^{-8}$ seconde par an.

La rapidité des pulsations semblait indiquer un objet de très petites dimensions, mais justement vraiment trop petit ! Pourtant, l'interprétation actuelle est en accord avec cette vision. Pour expliquer toutes ces observations, on a défini le modèle basé sur une étoile à neutrons. Reste de l'explosion d'une supernova, une étoile à neutrons a été imaginée par les théoriciens, comme le cœur mis à nu après l'explosion. Ce cœur s'est gravitationellement effondré, et son rayon est passé de dimensions stellaires à des dimensions d'astéroïdes. Pourtant, la masse est restée la même, ce qui lui confère une densité extraordinaire.

D'autre part, la quantité de rotation se conserve : lorsque le rayon diminue, la rotation s'accélère, comme la patineuse qui ramène les bras le long du corps. Au moment de l'effondrement du cœur d'une supernova, le diamètre de l'étoile passe d'une valeur d'ordre stellaire ($10^6$ km) à 10 km seulement, soit un facteur $10^5$. La rotation s'accélère dans la même proportion, de l'ordre de 100.000 fois plus rapide. Si nous partons d'une rotation de l'ordre du jour, soit de 24 × 60 × 60 secondes = 86.400 secondes, et si nous la divisons par 100.000, nous trouvons justement une nouvelle période de l'ordre de la seconde. La vitesse de rotation ainsi calculée est en accord avec la fréquence des émissions radio des pulsars.

Comme la rotation, le champ magnétique produit se conserve au cours de la contraction. Le champ de l'étoile avant effondrement est normal,

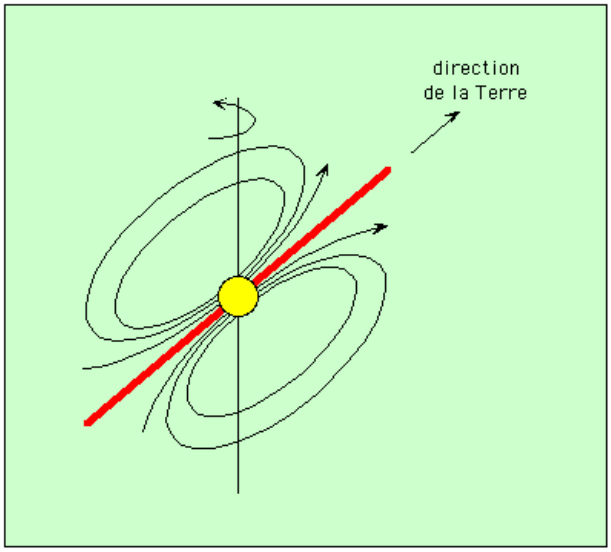
mais la contraction l'amène à une valeur extraordinaire, de $10^{10}$ à $10^{12}$ gauss. Et comme pour la Terre, les pôles magnétiques ne correspondent pas forcément avec les pôles de rotation.

Ce champ magnétique énorme est en interraction avec le champ magnétique interstellaire, et le résultat est un freinage de la rotation du pulsar. C'est insi qu'un pulsar qui se forme doit tourner en une milliseconde, mais il ralentit si rapidement que sa rotation s'arrêtera en un million d'années. Ce ralentissement a été effectivement observé.

On a pensé que les pulsars étaient d'une stabilité remarquable, jusqu'à ce que des mesures très fines montrent qu'elle décroît, mais à un taux très faible, de l'ordre de $10^{-8}$ seconde par an.

Il reste à expliquer le curieux rayonnement radio, avec le pic d'émission. Autour du pulsar se trouve une atmosphère portée à haute température, donc ionisée. Les électrons libres, pris dans le champ magnétique, sont accélérée à des vitesses relativistes. En se déplaçant dans le champ magnétique, elles spiralent et produisent un rayonnement synchrotron radio. C'est ce rayonnement que nous recevons sur Terre, à la condition que le jet soit orienté vers nous. Le jet, en tournant, se comporte comme un phare, dont le faisceau balaye l'espace. Si la Terre se trouve dans ce cône, le pulsar est détectable. Dans le cas contraire, il sera invisible. Etant donné l'angle d'ouverture du faisceau (qui n'est pas filiforme), on a calculé que 3% des pulsars se trouvent dans une position favorable à l'observation. Nous avons dit que de nombreux pulsars avaient été détectés. Ceci signifie qu'il y en a un grand nombre, mais le nombre calculé de cette façon est compatible avec les estimations du nombre de supernovæ qui ont dû exploser dans un passé assez récent.

Lorsque l'angle est grand entre l'axe de rotation et l'axe magnétique, il peut arriver que les deux jets opposés nous soient perceptibles ; dans ces cas-là, on doit observer un pic principal, correspondant au faisceau le mieux aligné avec la Terre, et un pic secondaire à mi-période correspondant à l'autre. De tels pulsars ont été observés, ce qui renforce la crédibilité du modèle.




Certains pulsars émettent un rayonnement X. On l'explique ne supposant que le pulsar est membre d'un couple, l'autre composante y déversant de la matière. Dans sa chute, celle-ci constitue un disque qui s'échauffe en se comprimant.

On a observé des pulsars doubles (les deux composantes sont des pulsars). Par exemple CP 1913+16 présente une période orbitale de 7 h 45 mn, et ses composantes ont des périodes radio de 1,616 s et 0,059 s. Ces couples sont difficilement observables, puisque les deux composantes doivent envoyer leurs faisceaux vers la Terre.

**Les binaires X**

La première a été découverte en 1971 par R. Giaconni grâce aux observations du satellite Uhuru. En effet, les rayons X ne parviennent pas au sol, et c'est bien heureux pour nous...

Nommée Cen X3 (Centaurus X3), il s'agit d'un système binaire dans lequel l'une des étoiles est un puissant émetteur X. La source Cen X3 est de plus une variable à éclipses de période 2,08726 jours. Pendant les éclipses, la source X est indétectable, ce qui montre que c'est l'objet éclipsé qui est l'émetteur. La période de variation X est courte, de 4,842 secondes.

On propose deux explications légèrement différentes pour ces objets : il s'agit d'une étoile chaude de type spectral O ou B, et d'une étoile à neutrons. L'étoile à neutrons accrète de la matière provenant de l'autre étoile, soit parce que celle-ci remplit son lobe de Roche, et déverse de la matière sur l'objet dense, soit parce que l'étoile à neutrons capte un vent stellaire très violent émis par l'autre composante. L'énergie potentielle de ce gaz est transformée dans la chute en énergie cinétique, qui chauffe le gaz et produit des températures telles que l'émission se fait dans le domaine X. Etant donné sa température, ce gaz est un plasma totalement ionisé, donc sensible au champ magnétique extrême da l'étoile à neutrons. Il doit alors se rassembler près des pôles magnétiques, et par conséquent produire un rayonnement dans cette zone.

La matière qui tombe sur l'astre dense accélère sa rotation. Dans le cas de Cen X3, la période pourrait passer de 4,8 à 3,3 secondes en un millier d'années. Un tel objet évolue donc très vite, et ne peut durer très longtemps.

La puissance de l'émission X est considérable : $10^{36}$ à $10^{38}$ ergs $s^{-1}$, c'est-à-dire 1.000 à 100.000 fois la puissance totale rayonnée par le Soleil !

Les étoiles principales de ces couples sont en général très massives, de l'ordre de 15 à 20 masses solaires, alors que le compagnon responsable de l'émission X est de l'ordre d'une masse solaire. Il existe toutefois une exception inquiétante, c'est Cyg X1. La composante principale est de 30 masses solaires, ce qui est tout à fait acceptable, mais la secondaire est de 6 masses solaires, au-dessus de la limite de masse d'une étoile à

leutrons. Il s'agirait alors d'un trou noir... Mais nous n'en avons pas la preuve, et d'autre part il existe une autre interprétation qui ne fait pas appel à un objet aussi exotique : il suffit de supposer que la seondaire est elle-même double, pour que les masses de chacunes de ses composantes soit en-dessous la masse limite.

Il existe d'autres cas, plus difficiles encore à interpréter : Her X1 par exemple présente trois périodes distinctes ! La première, celle de la variation X, est de 1,24 seconde. Mais il lui est associée une variation optique avec une période de 1,7 jour. Enfin, la source X fluctue en 35 jours... Et pour couronner le tout, le type spectral changeen 1,7 jours. L'explication avancée concerne une étoile volumineuse, chauffée par le rayonnement X de l'autre composante. Seul l'hémisphère tourné vers l'étoile à neutrons est concerné par ce chauffage, et l'orsqu'il est tourné vers la Terre, il présente une surface très chaude avec le type spectral correspondant, et lorsqu'il est tourné à l'opposé, on voit l'hémisphère non chauffé, avec un type spectral non modifié. La fluctutation de 35 jours proviendrait d'un effet de précession de l'anneau de matière entourant l'étoile à neutrons. Selon sa position, il est éclipsé ou non.

**Les novæ X**

Ce sont des objets dont l'émission X augmente très brutalement et dans de grandes proportions. Simultanément, on observe des variations lumineuses dans le visible. L'énergie X atteint 2.500 fois l'énergie visible...

Certaines novæ X sont récurentes, et présentent des explosions assez fréquentes.

Les novæ X semblent de nature très différente des novæ visibles, et leur interprétation n'est pas encore définie.

## *Conclusion*

La vie d'une étoile est un combat entre la gravitation et la production d'énergie.

- Naissance agitée (énergie gravitationnelle : globules de Bok, objets de Herbig-Haro, T Tauri, FU Orionis) ;
- Séquence Principale calme, dominée par la fusion de l'hydrogène ;
- Fin de vie agitée : géante rouge, étoile bleue... supernova.

L'étude des étoiles variables, si diverses et souvent curieuses, nous conte la vie tranquille ou dissolue d'une étoile.

La stabilité est un cas particulier, la variabilité la règle. Cependant, la phase de stabilité est plus longue que l'ensemble de toutes les phases variables. Si les étoiles qu'on voit dans le ciel nous semblent si stables, au point que les Anciens les appelaient les fixes, c'est parce que la seule phase stable de leur existence est de très loin la plus longue : c'est la Séquence Principale.

Toutes les autes phases sont brèves (à l'échelle astronomique), et par conséquent la proportion d'étoiles dans l'une de ces phases est faible. Parmi les étoiles visibles à l'œil nu, peu sont variables ; encore moins présentent de fortes variations.

**Qu'est-ce qu'une étoile variable ?**

Il est temps de se poser la question !

La définition de base (la plus simple et historiquement la première), "étoile dont l'éclat visuel varie au cours du temps" permet d'englober les T Tauri, les FU Orionis, les variables à éclipses, les céphéides, les novæ et supernovæ...

Elle n'intègre pas les autres longueurs d'ondes : gamma, X, infrarouge, UV, que les moyens modernes nous permettent d'observer. On pourrait la généraliser :

"étoile dont la luminosité, dans une ou plusieurs gammes de longueurs d'ondes, varie avec le temps".

Ceci semble donc plus satisfaisant, puisque les objets que nous avons étudiés sont englobés. Mais après avoir raisonné sur les **variations d'énergie** -l'un des termes de la définition- on peut se pencher un peu sur l'autre terme : "**avec le temps**".

Ceci est très vague, et nous avons vu que pour certaines variables le temps caractéristique était très court, de l'ordre de la minute pour les sursauts, de la milliseconde pour les pulsars, ou bien relativement long : de quelques mois pour la décroissance des novæ, de quelques milliers d'années si on considère les nébuleuses planétaires...

Si on ne place aucune limite sur le temps caractéristique des variations, toute étoile est forcément variable, puisqu'elle évolue ! D'ailleurs, beaucoup de variables que nous avons considérées sont dans des phases évolutives, soit brutale et unique comme les FU Orionis à la naissance et les supernovæ à la mort d'une étoile, soit plus calmes et répétitives, comme les ajustements des T Tauri par exemple.

On voit donc que la définition, qui doit fixer un cadre, a un côté arbitraire : trop vague, elle risque d'englober n'importe quoi ; trop restrictive, elle ne tiendra pas compte d'objets importants.

Enfin, les mécanismes de variablité sont très divers, et nos définitions n'en tiennent pas compte.

Il n'est sans doute pas souhaitable de donner une définition trop précise, qui ne serait pas sans inconvénients. Mieux vaut s'en tenir à un consensus informel, sans oublier la diversité des objets étudiés, et la place de chacun d'eux au regard de l'évolution stellaire.

**Différentes causes de variation**

- éclipses d'une composante par l'autre dans un couple : β Lyræ, Algol, W Ursæ Majoris ;

- instabilité provoquées par des variations de l'opacité de l'atmosphère :
  pas d'onde de choc : Céphéides, W Virginis, δ Scuti, β Canis Majoris ;
  onde de choc : RR Lyræ ;
- rotation très rapide, produisant une très forte force centrifuge, et donc un bourrelet équatorial ; une légère instabilité, produisant un excès d'énergie en surface, suffit à expulser le bourrelet : novoïdes γ Cas ;
- accrétion de la matière d'une étoile par une autre dans un couple serré : Novæ naines de type Z Camelopardalis ;
- couples de deux étoiles variables : étoiles symbiotiques ;
- rupture de l'équilibre hydrostatique par production brutale de neutrinos qui emportent l'énergie : SN II ;
- effondrement brutal du cœur au moment de la synthèse du fer, et explosion du reste de l'étoile : certaines SN I ;
- naine blanche qui dépasse brusquement la limite de Chandrasekhar et s'effondre en étoile à neutrons, par accrétion d'une compagne géante rouge : les autres SN I ;

---=OO=---



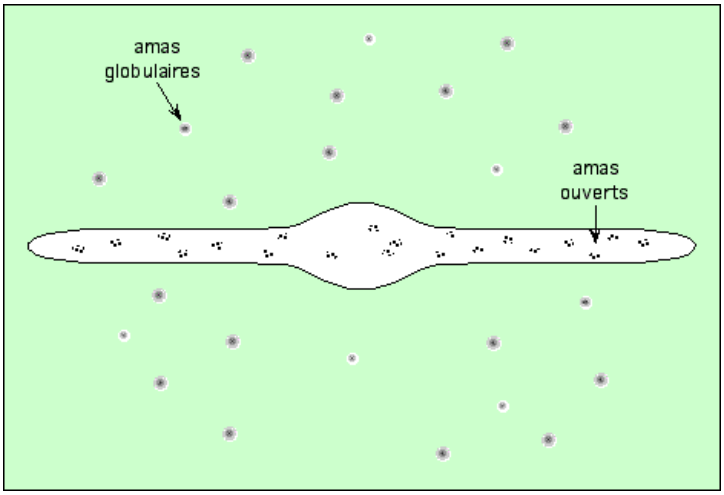

**Les amas d’étoiles**

Un amas d’étoiles est un regroupement d’étoiles visible dans le ciel. Dès le premier regard, on distingue deux types d’amas :

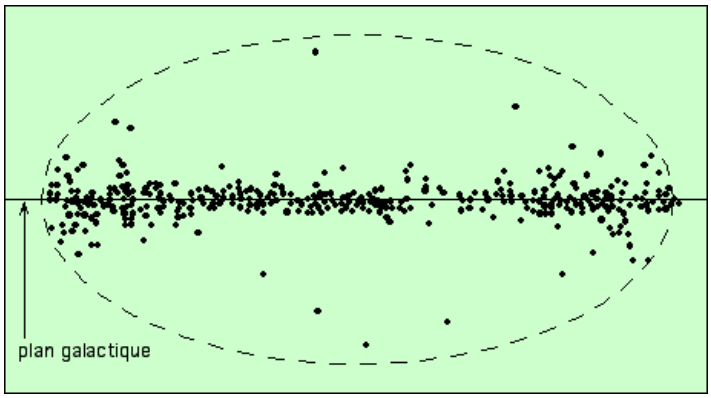
- les **amas ouverts**, contenant un petit nombre d’étoiles -de quelques dizaines à quelques milliers- assez régulièrement espacées. Les amas ouverts ne présentent pas de structure apparente, et leur couleur générale est bleue.
- les **amas globulaires**, qui rassemblent un très grand nombre d’étoiles -de quelques dizaines de milliers à quelques millions- et qui montrent une forme sphérique évidente. Comme leur nom l’indique, ils présentent un aspect globuleux, avec une concentration d’étoiles si forte vers le centre que leurs images se confondent. Leur couleur générale est rouge.

Cette différence visuelle n’est pas la seule, loin de là. Tout d’abord, leur localisation est différente :

- Les amas ouverts se trouvent dans le disque de la Galaxie, mélangés aux étoiles ;
- Les amas globulaires sont situés dans un immense halo sphérique, qui entoure le disque de la Galaxie.

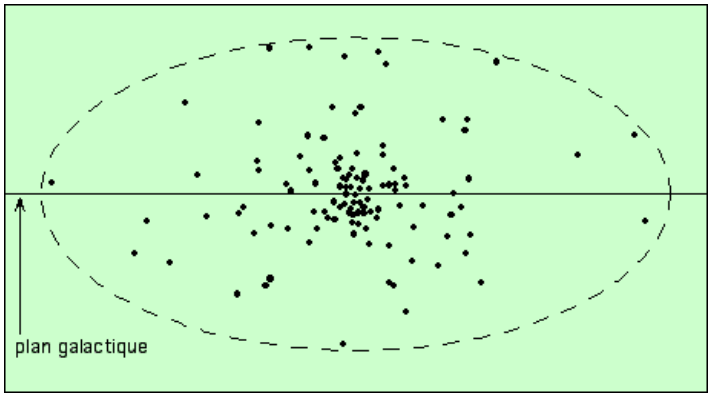



La répartition donnée dans le schéma ci-dessus est précisée par une cartographie de ces amas :




**Amas ouverts**

Le dessin ci-dessus montre l’emplacement des amas ouverts par rapport aux étoiles de notre Galaxie, le trait horizontal représentant le plan de celle-ci, le nord étant en haut. On remarque que tous les amas ouverts se trouvent dans une étroite bande autour du plan galactique. Or nous savons que tout le gaz contenu dans la Galaxie se trouve justement dans ce plan. Il y a donc là la matière nécessaire pour former de nouvelles étoiles.

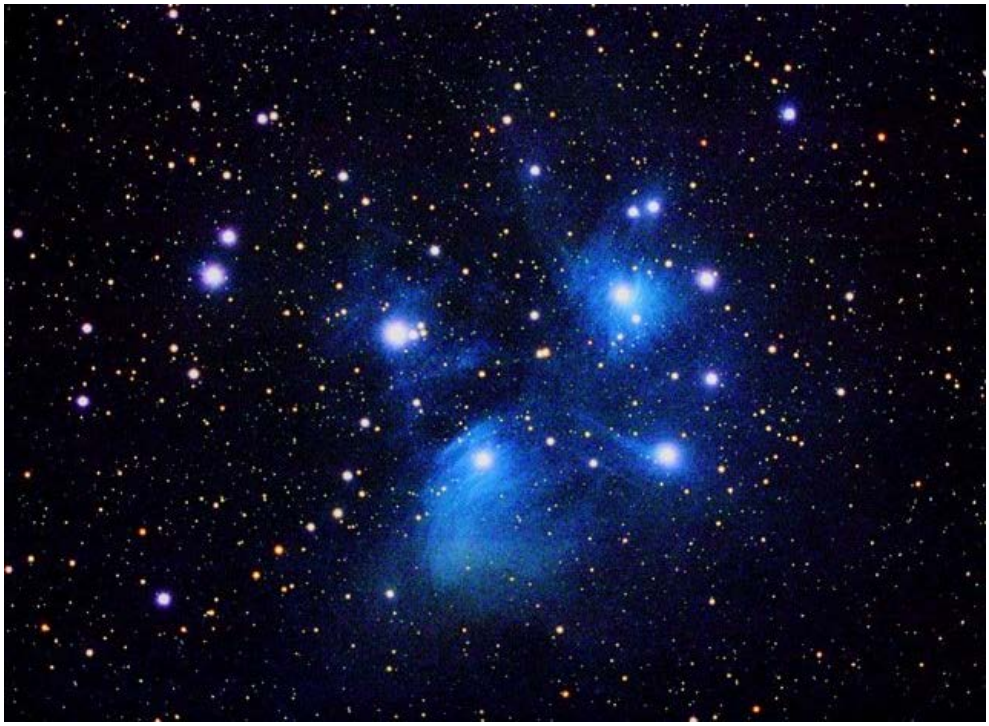



**Amas globulaires**

Contrairement aux amas ouverts, les amas globulaires se concentrent avec une répartition sphérique. Leur système possède un centre, qui correspond à celui de la Galaxie. C'est en observant l'ensemble de ces amas d'ailleurs que Harlow Shapley a déterminé pour la première fois le centre galactique, et montré que le Soleil en était assez loin.

**Amas ouverts**

Commençons par indiquer les plus beaux amas ouverts visibles dans l'hémisphère nord. Le plus connu, le plus beau, est celui des *Pléiades*. Il se trouve dans le Taureau, visible donc à l'automne (observation), et ressemble grossièrement à une Grande Ourse miniature.



Amas ouvert des Pléiades M45 lunette 155 mm pose 1 h 10 mn photo J.P. Bousquet

A l'œil nu, on distingue une dizaine d'étoiles bleutées. Mais l'amas en comporte quelques 400 visibles dans un télescope. C'est un amas jeune, qui affiche quelques 30 millions d'années seulement. Il est né dans un vaste nuage d'hydrogène, d'hélium et de poussières, qui est encore visible autour des étoiles brillantes, sous la forme d'une nébuleuse par réflexion de couleur bleue. Les Pléiades se trouvent à une centaine de parsecs de la Terre.

Le second amas à observer est celui des *Hyades*, qui se trouve tout proche des Pléiades. C'est le V du Taureau, dont la pointe est Aldébaran, mais attention, cette dernière n'appartient pas à l'amas. Il est nettement moins riche que les Pléiades, car il ne contient qu'une centaine d'étoiles. Il est aussi nettement plus proche, à 45 parsecs (alors qu'Aldébaran est à 15 parsecs). Les étoiles des Hyades ont une forte métallicité, plus forte que celle du Soleil. Ceci nous indique qu'elles sont très jeunes. Tous les types spectraux y sont représentés.

Le troisième amas remarquable est celui de *la Crèche* (dans le Cancer), encore nommé M44, ou *Præsepe*. Il contient 200 étoiles dont 4 géantes rouges seulement (amas jeune), son âge est de 200 millions d'années, sa distance de 165 pcs.

Enfin, citons NGC 188, car c'est un exemple de vieil amas : son âge atteint 10 milliards d'années.

Au-delà de 3.000 pcs, on ne distingue plus les amas ouverts des autres étoiles de la Galaxie.

On observe dans la Galaxie quelques centaines d'amas ouverts.

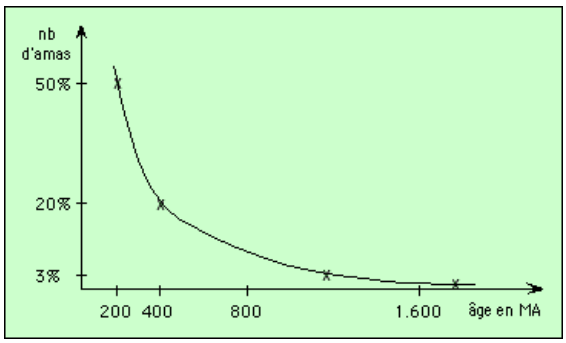
Les étoiles se forment rarement isolément. Les étoiles simples sont rares, les doubles fréquentes. Les étoiles se forment très souvent à partir de très gros nuages, qui se fragmentent en s'effondrant, et donnent naissance à de nombreuses étoiles en même temps. Ce sont les *amas ouverts*.

Au début, les étoiles d'un amas ouvert sont très proches les unes des autres, et elles se déplacent à peu près dans le même mouvement. Cependant, de très faibles fluctuations initiales suffisent pour qu'au cours du temps l'amas ouvert se disloque, les étoiles s'éloignant les unes des autres. Ainsi, la durée de vie d'un amas ouvert est brève. De ce fait, on comprend pourquoi ils contiennent tant d'étoiles bleues jeunes, puisque lorsque ces étoiles vieillissent l'amas se disperse, et se dilue dans le milieu ambiant.

**Age des amas ouverts**

Comme les exemples ci-dessus le donnent à penser, les amas ouverts sont très souvent jeunes. Ce qui signifie que leurs étoiles se sont formées il y a peu de temps, et donc que la matière nécessaire était disponible. Puisqu'ils sont localisés dans le plan de la Galaxie, où se trouve beaucoup de gaz, ceci s'explique. De nouveaux amas peuvent donc se former encore actuellement, dans un gaz enrichi en métaux par les explosions de supernovæ qui se sont produites depuis la formation de la Galaxie. Plus un amas est jeune, plus ses étoiles contiendront donc de métaux.

Le graphique ci-dessous montre le pourcentage des amas ouverts observés en fonction de l'âge. On y constate que la moitié ont moins de 200 millions d'années, et que moins de 1 % atteignent les 2 milliards d'années. La jeunesse des amas ouverts s'explique sans doute par les conditions de leur formation : toutes leurs étoiles naissent à peu près en même temps d'un immense nuage de gaz et poussières. Ce nuage possède une vitesse d'ensemble dans la Galaxie, et les étoiles qui en naissent possèdent donc également cette vitesse d'ensemble. Mais certaines sont légèrement plus proches du centre attractif de la Galaxie, et subissent donc une attraction un petit peu plus forte. Cette légère différence effiloche l'amas, les étoiles s'éloignent tout doucement les unes des autres. Un amas se dissoud en un temps de l'ordre du milliard d'années (correspondant à 4 tours de la Galaxie).




Les amas ouverts sont constitués d'étoiles de population I, comprenant des géantes bleues et des Céphéides.

La présence de ces géantes bleues jeunes et très brillantes (types spectraux O, B et A) donne aux amas ouverts une coloration d'ensemble bleutée. Bien que les étoiles moins massives et moins chaudes, donc rouges, y soient présentes en grand nombre, leur faible masse leur confère une luminosité beaucoup plus faible, et leur éclat est masqué par celui des géantes bleues.

**Diagramme HR**

La jeunesse des amas ouverts explique que, dans la plupart, le diagramme HR montre la Séquence Principale au complet. En effet, toutes les étoiles se formant ensemble apparaissent sur la Séquence Principale et commencent à brûler leur hydrogène. Les plus massives évoluent le plus vite, et quittent la séquence principale les premières pour grimper dans la branche des géantes. Mais dans les amas très jeunes (la plupart) elle n'en ont pas eu le temps.

**Associations**

On nomme *association* de petits amas ouverts, dont la population est trop faible pour mériter le nom d'amas. Les associations naissent ensemble dans des nébuleuses, et sont souvent variables. Pour cette raison, elles sont présentées dans le chapitre relatif aux variables nébulaires.

## *Amas globulaires*

L'explication de la nette différence entre les amas ouverts et les amas globulaires tient dans le moment de formation de ces deux types d'amas. Les amas globulaires sont vieux, ils sont consitutés presque exclusivement de vieilles étoiles, géantes évoluées rouges, naines blanches et étoiles à neutrons, alors que les amas ouverts sont formés d'étoiles bleues très jeunes. Dans les amas globulaires, il n'y a plus de gaz, donc plus de matière pour former de nouvelles étoiles, et ce depuis longtemps. Par contre, dans le plan de la Voie Lactée, on trouve beaucoup de gaz, et de nouvelles étoiles peuvent s'y former, tout spécialement dans les bras spiraux.

Lorsque les amas globulaires se sont formés, dans les premiers temps de la Galaxie, le nuage de gaz et de poussières qui a donné naissance à l'ensemble n'avait pas encore pris sa forme de disque aplati. Il était pratiquement sphérique, de faible densité, et les condensations qui allaient donner naissance aux amas globulaires tournaient autour du centre sur des orbites quelconques. La faible densité du milieu ne freinait pas leur mouvement. Du gaz de ces condensations sont nées les étoiles qui constituent les amas globulaires.

Plus tard, en se condensant, le nuage est devenu de plus en plus dense, et les collisions entre particules de plus en plus fréquentes. Lors d'une collision, il y a échange d'énergie, entraînant la chute vers le centre et provoquant l'aplatissement du nuage. Petit à petit, le système s'est transformé en disque, et les orbites des particules sont devenues des cercles inscrits dans le plan galactique. A partir de ce disque de gaz, des étoiles se sont formées forcément dans le plan de la Galaxie, et leurs orbites sont pratiquement des cercles (quoique ce soit un peu plus compliqué que cela).

Les amas globulaires, du fait de leur âge, sont constitués d'étoiles de populations II (vieilles). Nous verrons qu'il n'y a pas eu de renouvellement des générations. Leur métallicité est faible (elles se sont formées dans un gaz non encore enrichi).

Les amas globulaires ont un très grand intérêt pour plusieurs raisons :

- ils ont servi à déterminer le centre de la Galaxie,
- ils servent d'indicateurs de distance.

En effet, on constate qu'ils ont tous à peu près la même luminosité, donc la même magnitude absolue. Connaissant celle des amas les plus proches, et l'extrapolant à un amas lointain, la détermination de sa magnitude apparente permet d'estimer sa distance.



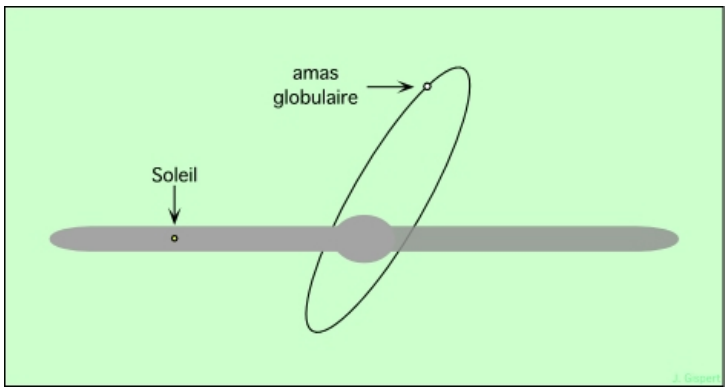
Amas globulaire M3, lunette 155 mm pose 1 h 45 mn photo J.P. Bousquet

Dans l'hémisphère nord, l'amas M13 (NGC 6205) offre un très beau spectacle l'été dans la constellation d'Hercules. Il présente un diamètre de 30 pcs, regroupe un peu moins d'un million d'étoiles, et se situe à une distance de 21.000 AL. C'est l'un des plus beaux objets célestes visibles des régions boréales.

Mais le plus beau de tous est ω du Centaure (NGC 5139), qui se trouve dans l'hémisphère sud. Il semble contenir une dizaine de millions d'étoiles, est situé à 15.000 AL, et mesure 150 AL en diamètre.

L'hémisphère sud est d'ailleurs favorisé, puisqu'il abrite aussi 47 Tucanæ (NGC 104), le deuxième amas globulaire par l'éclat. 47 Tuc est situé à un peu plus de 13.400 AL, et son diamètre atteint 120 AL.

**Orbite d'un amas globulaire**




L'orbite d'un amas globulaire est une orbite képlérienne autour du centre galactique, et très allongée. Le centre galactique occupe l'un des foyers de l'orbite. Comme pour les planètes autour du Soleil, l'amas va très vite lorsqu'il est près du centre attractif, et beaucoup moins lorsqu'il en est loin. Dans son mouvement, il reste donc peu de temps proche du centre, et beaucoup plus lorsqu'il en est loin. Il n'est donc pas étonnant de voir les amas globulaires en majorité loin du centre. On peut penser aussi que les amas globulaires, qui sont provisoirement dans le centre, sont noyés dans la poussière interstellaire et ne sont donc pas visibles.

Les amas globulaires orbitent autour du bulbe de la Galaxie, ils ne le traversent pas. La zone dans laquelle ils passent, le disque, contient assez peu d'étoiles pour qu'ils puissent traverser sans domages pour les étoiles. Par contre, le gaz que devaient contenir les amas globulaires après leur formation heurte violemment celui du disque de la Galaxie, y produisant une onde de choc. En quelques passages, l'amas globulaire va être dépouillé de son gaz.

Les amas effectuent un tour complet autour du centre galactique, en un temps de l'ordre de 100 millions d'années. Leurs passages dans le disque se produisent donc avec une fréquence caractéristique de 50 millions d'années.

**Détermination de l'âge d'un amas**

Rapidement après leur formation, les amas globulaires ont donc perdu leur gaz, et ne peuvent plus former de nouvelles étoiles. Ceci explique bien que toutes les étoiles de l'amas aient pratiquement le même âge. Formées à la naissance de la Galaxie, elles vieillissent de plus en plus et, chacune à son tour (selon sa masse), quittent la Séquence Principale.

Si un amas a, par exemple, 1,5 milliards d'années, toutes les étoiles dont la durée de vie est inférieure à 1,5 milliards d'années ont déjà quitté la Séquence Principale :

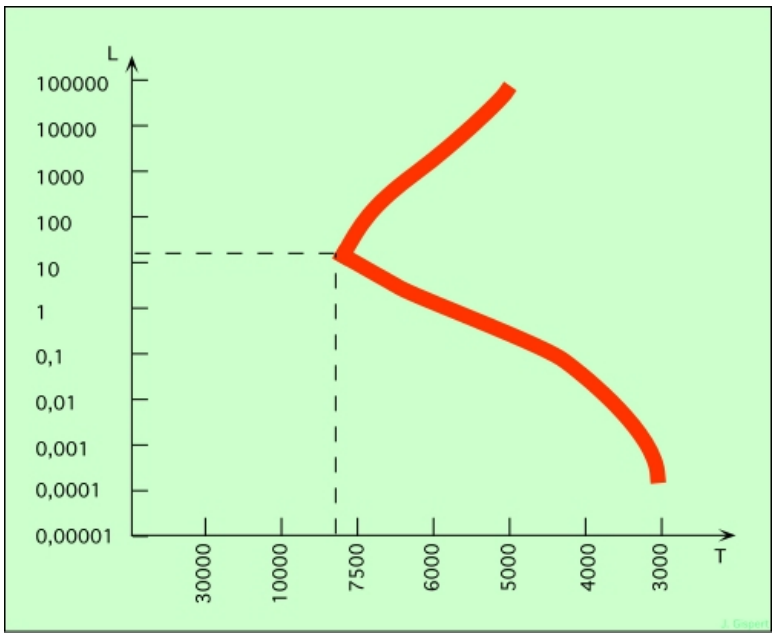



Les nombres à gauche sont les masses des étoiles, en masses solaires. Les traits horizontaux représentent la durée de vie de ces étoiles (sur la Séquence Principale). L'origine des coordonnées a été placée au moment de la formation de l'amas. Cette origine correspond au début de la Séquence Principale pour toutes ces étoiles. Au bout de 1,5 milliards d'années, toutes les étoiles de masse supérieure à 2,2 M ont disparu.

Comment s'en apercevoir ?

La façon la plus simple est de construire le diagramme HR des étoiles de l'amas. Si l'amas est assez important, toutes les catégories spectrales seront représentées, et le diagramme sera significatif. Considérons un amas âgé de 1,5 milliards d'années, comme dans l'exemple ci-dessus. Il ne contient plus que des étoiles de types spectraux correspondant à des masses inférieures à 2,2 M . Par conséquent, sa Séquence Principale ne sera pas complète, mais amputée de sa partie gauche, correspondant aux étoiles de grandes masses, et de durée de vie plus brève.

Les étoiles un peu plus massives sont en train de monter le long de la branche des géantes, les plus massives encore l'ont déjà quittée, et sont arrivées dans la branche des naines blanches (ou transformées en étoiles à neutrons, non visibles sur le diagramme HR). Le diagramme HR a donc un aspect caractéristique, et le *coude* de la courbe indique l'âge de l'amas :




D'autre part, les étoiles massives qui ont quitté la Séquence Principale sont devenues des géantes rouges, plus ou moins évoluées. On devrait donc trouver la branche des géantes.

Dans ce schéma, on voit la partie de la Séquence Principale restante, et le départ de la branche des géantes. Le coude de la courbe indique les propriétés (température effective et luminosité) des étoiles dont la durée de vie correspond exactement à l'âge de l'amas. Si on prend la luminosité de ces étoiles sur le schéma, on mesure à peu près 15 fois la luminosité du Soleil. Comme la luminosité croît avec la puissance 3,5 de la masse, ceci nous donne une masse de 2,2 masses solaires. En reprenant la formule qui donne la durée de vie, on obtient $V = 10 / M^{2,5} = 1,4$ milliards d'années. C'est l'ordre de grandeur de l'âge de l'amas.

Lorsque les étoiles quittent la Séquence Principale, elles ont consommé quelques 7/100 de leur masse : en effet, les réactions de fusion de l'hydrogène donnent une perte de masse (transformée en énergie) de 0,7 %. Le nombre indiqué est obtenu en supposant que toute la masse d'hydrogène de départ est transformée en hélium. Ce n'est vrai que pour les petites étoiles totalement convectives (M < 0,26 M ). Pour les

autres, la proportion sera un peu plus faible, mais l'ordre de grandeur est correct.

**Animation montrant l'âge des amas**

Cette animation est destinée à visualiser comment on calcule l'âge d'un amas ouvert. Il correspond au schéma commenté plus haut. Le temps d'évolution d'une étoile n'y est pas conforme à la réalité : les plus petites ont une durée de vie bien trop longue pour les représenter fidèlement dans l'animation.

Cliquez sur le bouton "créer" pour créer un amas ouvert. Vous verrez apparaître simultanément une étoile de chaque type spectral, qui se trouvera sur la Séquence Principale.

Ces étoiles vont commencer leur vie en brûlant leur hydrogène. Les plus massives (en haut à gauche) sont prodigues, et le brûlent très vite. La plus massive représentée, de type spectral O, quitte la Séquence Principale la première. Elle emprunte la branche des géantes, pour se transformer en géante rouge. Ensuite, l'étoile de type spectral B va la suivre. Et ainsi de suite, chacune à son tour quittant la Séquence Principale pour devenir géante.

Le bouton vous permet de stopper momentanément l'animation. Utilisez-le lorsque les 4 premières étoiles auront quitté la Séquence Principale. Toutes ces étoiles ont le même âge. Vous constaterez alors qu'il ne reste plus que les moins massives sur la Séquence Principale, et que la branche des géantes rouge est occupée. On obtient le diagramme en V dessiné plus haut.

Si on observe un amas ouvert, dont le diagramme HR a cet aspect-là, on pourra en déduire que toutes les étoiles qui ont quitté la Séquence Principale ont atteint l'âge au bout duquel leur hydrogène est brûlé. Puisque toutes les étoiles ont le même âge, c'est aussi l'âge de l'amas.

Les étoiles massives, en évoluant, laissent des étoiles à neutrons ou des naines blanches. Or les amas globulaires en contiennent beaucoup. D'ailleurs, la masse moyenne des étoiles dans les amas globulaires est de l'ordre de 0,4 M .

Le fait qu'on observe de nombreux amas **ouverts** présentant aussi un coude dans leur diagramme HR, justifie la théorie qui prédit l'âge des étoiles.

**Stabilité d'un amas globulaire**

Les amas globulaires existent depuis des milliards d'années, la troncature de la Séquence Principale le prouve. De plus, ils ont une densité très supérieure à celle du disque de la galaxie. Comment les interactions gravitationnelles entre leurs étoiles n'ont-elles pas, depuis longtemps, provoqué soit leur rupture, soit leur effondrement ?

L'explication est assez récente. Elle tient dans la répartition de l'énergie (cinétique et potentielle) entre les étoiles de l'amas.

Lorsque 3 étoiles passent à proximité, on montre que l'une d'entre elles perd de l'énergie au profit d'une autre. Alors, celle qui a perdu de l'énergie peut se mettre en orbite autour de la troisième, alors que celle qui en a gagné est éjectée au loin. De telles rencontres à trois sont assez fréquentes du fait de la densité, et la formation des couples stellaires aussi. On s'attend donc à observer davantage de couples à l'intérieur d'un amas globulaire que dans le disque de la galaxie.

**Traînardes bleues**

On donne ce joli nom à quelques étoiles bleues, chaudes et massives, qui apparaissent dans le diagramme HR des amas globulaires. Ces étoiles ne devraient pas exister ! Et pour les expliquer, on a invoqué des captures d'étoiles provenant du disque de la galaxie. Elles se seraient donc formées dans une région riche en gaz, puis auraient migré vers l'amas globulaire par un mécanisme d'interaction gravitationnelle.

Mais ce mécanisme n'a plus de raisons d'être. En effet, la présence de nombreux couples d'étoiles dans les amas globulaires nous fournit une explication bien plus plausible : 1 + 1 = 1 grosse !

Cette équation se traduit de deux façons différentes :

- l'un des membres du couple termine sa Séquence Principale, et devient une géante rouge. La présence de l'autre étoile produit des lobes de Roche, que l'enveloppe de l'étoile enflée va remplir. Et sa matière se déverse sur l'autre, dont la masse augmente. Les changements qui se produisent dans son équilibre convectif peuvent brasser la matière pour incorporer de l'hydrogène dans le cœur, et relancer les réactions de fusion. Une telle étoile ressemble assez à une étoile normale, et sa masse est plus élevée que celle des autres dans l'amas.
- les deux étoiles se raprrochent l'une de l'autre, au grès des perturbations, et finissent pas entrer en collision. L'objet ainsi produit est violemment brassé, et sa masse est la somme des masses des deux étoiles protagoniste. On obtient là encore une étoile bleue assez massive.

**Binaires X**

Observer un couple stellaire n'est en général pas facile, car les distances angulaires sont faibles. On ne les sépare qu'à faible distance. Et si la densité d'étoiles est élevée, comme dans un amas globulaire, il devient impossible de distinguer des étoiles qui se trouveraient en perspective.

Mais, alors que les étoiles simples n'émettent pratiquement pas dans le domaine X, de nombreux couples le font, par échange de matière. Il est plus facile de détecter les couples ainsi.

| | **amas ouverts** | **amas globulaires** |
|---|---|---|
| nombre d'étoiles | qq centaines à qq milliers | qq dizaines de milliers à qq millions |
| localisation | dans le disque de la Galaxie | dans le halo |

| âge | étoiles jeunes | étoiles vieilles (âge de la Galaxie, 12 milliards d’années) |
|---|---|---|
| population | I | II géantes rouges, naines blanches |
| couleur | bleue | rouge |
| diamètre | 30 parsecs | 8 à 120 parsecs |
| aspect | système lache | forte concentration centrale |
| distance | < 3.000 parsecs | 3.000 à 60.000 parsecs |
| métallicité | > métallicité solaire | < métallicité solaire |
| stabilité | < 1 milliard d’années | plusieurs dizaines de milliards d’années |

La relation $T_{eff}$ - Masse n’est valable que pour les étoiles de la Séquence Principale !

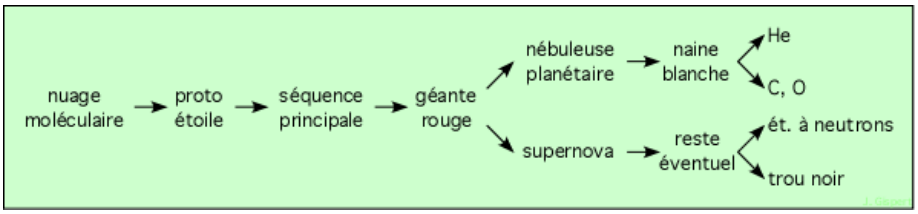
---=OO=---

# Evolution des étoiles




L'évolution stellaire concerne toute la vie des étoiles, de leur naissance à leur mort. Nous l'étudierons en 3 phases principales qui, nous le verrons, s'individualisent parfaitement. Chaque phase se divise elle-même en diverses étapes, certaines étant différentes selon la masse de l'étoile. Pour des raisons évidentes, nous adopterons l'ordre chronologique.

L'histoire complète d'une étoile peut se résumer par le schéma suivant :




La première phase est représentée par les deux premières étapes du schéma : un nuage moléculaire en effondrement va donner naissance à une proto-étoile. Celle-ci, dont la source d'énergie est gravitationnelle, est produite par la contraction du globule central du nuage.

Au début de la seconde phase, les réactions nucléaires commencent à se produire au centre, et on assiste à la véritable naissance de l'étoile. C'est la phase essentielle, de très loin la plus longue, nommée Séquence Principale. Pendant toute la durée de celle-ci, l'étoile va vivre sur ses réserves d'hydrogène, dont la transformation en hélium donne l'énergie nécessaire à l'équilibre.

Lorsque l'hydrogène est épuisé, l'étoile quitte la Séquence Principale et devient une géante rouge. Au-delà, son destin va dépendre de sa masse : les étoiles les moins massives évoluent en nébuleuses planétaires, alors que les autres deviennent supernovæ.

Les réactions nucléaires possibles dépendent de la température atteinte, car plus un noyau atomique est lourd (plus il contient de protons), plus la répulsion électromagnétique qu'il exerce est forte. Pour le fusionner, il faut une température d'autant plus élevée, atteinte grâce à la pression centrale, donc à la masse de l'étoile. Ainsi, ce n'est qu'au-dessus de 10 M que toutes les réactions se réaliseront, jusqu'à la fatidique synthèse du fer. Pour une telle étoile, la Séquence Principale ne dure que 35 millions d'années, et la fusion du silicium une journée !

Quelle est la liberté d'une étoile face à son évolution ?

Pratiquement aucune… Un théorème a été démontré qui indique que la masse est presque le seul paramètre qui décide du sort d'une étoile, avec quelques variations induites par la composition chimique (teneur en éléments plus lourds que l'hélium) :

**Théorème de Vogt-Russel**

> Les caractéristiques et l'évolution d'une étoile sont totalement déterminées par **sa masse et sa composition chimique**

La masse est de loin le paramètre le plus important, et peut être considéré comme le seul déterminant en première approximation. La composition chimique des étoiles varie dans de faibles proportions : les premières étoiles formées avaient une composition chimique identique à celle de l'espace juste après le Big Bang, donc presque 76 % d'hydrogène et 24 % d'hélium (pourcentages en masse), avec juste des traces de lithium 7. Tous les autres éléments plus lourds ont été synthétisés dans les étoiles, ou lors d'explosions de surpernovæ. Ces explosions successives ont enrichi le milieu interstellaire en éléments lourds, mais le taux actuel est de l'ordre de 2 % seulement. Bien que tous ces éléments aient de l'importance dans les réactions nucléaires (cycle CNO par exemple), la masse a une action beaucoup plus forte.

> Le cycle CNO ne peut se produire que si le gaz contient déjà du carbone et de l'azote, qui n'ont pas été produits lors du Big Bang. Donc, il ne peut se réaliser dans une étoile de métallicité quasiment nulle. La chaîne proton-proton étant bien moins sensible à la température que le cycle CNO, la zone de fusion est beaucoup plus vaste, puisqu'elle s'accomode de températures bien plus variées. On conçoit de ce fait que la production d'énergie dans l'étoile soit relativement différente en fonction de la métallicité, et son équilibre en découle.

Toute la vie d'une étoile, depuis sa naissance jusqu'à sa mort, est gouvernée par la gravitation. Elle lutte perpétuellement contre le poids… Ses armes pour lutter contre la gravité sont de nature différente selon la période :

- **à sa naissance**, elle n'est encore qu'un immense nuage d'hydrogène en contraction. Le gaz tombe vers le centre. Au début, la densité est si faible que les atomes de gaz sont en chute libre, et leur vitesse augmente ; ils gagnent de l'énergie cinétique. L'énergie rayonnée est perdue, car la matière est transparente. Le nuage est isotherme. Ensuite, la densité augmentant, les atomes commencent à se heurter, ce qui transfère de l'énergie de l'un à l'autre. L'énergie rayonnée commence à être absorbée par une matière plus dense, dont l'opacité devient significative. La température du gaz augmente donc, et il va commencer à briller. Lorsque ces heurts deviennent fréquents, ils empêchent la chute des atomes vers le centre, ce qui produit une pression. Il n'y a pas d'équilibre réellement, mais un ralentissement de la contraction. L'étoile brille, son quasi-équilibre est produit par l'énergie gravitationnelle (l'énergie de chute), mais elle brille au prix d'une contraction continue. La seconde phase verra un réel équilibre, mais avec une autre source d'énergie ;
- **à l'âge adulte**, l'étoile s'est suffisament contractée pour atteindre les 10 millions de degrés en son centre, et y produire de l'énergie par fusion de l'hydrogène, qui se transforme en hélium. Cette fusion chauffe l'étoile, suffisamment maintenant pour équilibrer la gravitation. Pour que la température centrale atteigne les 10 millions de degrés, il faut toutefois que sa masse soit assez grande, car le poids des couches supérieures, qui produit la pression, en dépend.
- **la vieillesse de l'étoile** survient lorsqu'elle n'a plus assez d'hydrogène, donc plus assez d'énergie pour équilibrer la gravité. Alors, le cœur se contracte à nouveau, ce qui l'échauffe un peu plus. Si la masse de l'étoile est suffisante, la température centrale atteint les 100 millions de degrés, l'hélium qui a été produit dans la phase précédente se met à fusionner à son tour, et rétablit un équilibre.
- **la mort de l'étoile** va survenir bientôt, mais pas au même stade pour toutes :
  - les moins massives, au-dessous de 0,26 masses solaires, n'arriveront pas aux 100 millions de degrés centraux nécessaires pour la fusion de l'hélium, et termineront leur vie comme *naine blanche d'hélium* (nous verrons plus loin pourquoi elle est entièrement en hélium), la contraction gravitationnelle bloquée par la pression de dégénérescence des **électrons**, induite par le principe d'exclusion de Pauli.
  - au-dessus de 0,26 masses solaires, les étoiles fusionneront l'hélium, mais n'iront pas plus loin, et vont devenir également des naines blanches, mais à cœur de carbone (ce qu'il reste de la fusion de l'hélium). Comme pour les précédentes, n'ayant plus de carburant, ces étoiles vont se refroidir, leur contraction bloquée par la pression de dégénérescence des électrons.
  - pour une masse supérieure, la pression quantique des électrons ne suffit pas à bloquer la contraction gravitationnelle : la température centrale augmente encore, et d'autres fusions peuvent se produire, formant des atomes de plus en plus lourds. Lorsque ces nouveaux carburants sont épuisés à leur tour, la gravité reprend le dessus, l'étoile continue son effondrement. La température devient si forte à la fin, que des photons gamma de très haute énergie vont être produits. Leur énergie est telle à la fin, qu'ils brisent les atomes : les noyaux éclatent d'abord en particules alpha (noyaux d'hélium 4), puis celles-ci sont à leur tour brisées en protons et neutrons. Les protons absorbent les électrons libres (produits lors de la contraction du nuage par ionisation) et sont transformés en neutrons. Il reste donc une soupe de neutrons. Ceux-ci ont le même comportement quantique que les électrons et produisent une pression quantique salutaire. L'étoile est devenue une étoile à neutrons. Son équilibre est donc produit par la pression quantique des **neutrons**.
  - pour les plus massives (plus de 8 masses solaires à la formation), le destin est tragique : on ne connait aucun mécanisme capable de bloquer la contraction quand les neutrons n'y parviennent plus. Si l'étoile ne se détruit pas complètement lors de l'explosion en supernova, l'effondrement est total. La gravité à la surface de l'astre est tellement forte, que même la lumière ne peut plus s'en échapper. C'est la raison pour laquelle on l'appelle *trou noir*.

Le texte ci-dessous donne les idées essentielles, assez détaillées, mais sans démonstrations. Quelques liens renvoient à des pages plus spécialisées.

# Phase I : Formation

## *Etape 1 : déstabilisation du nuage*

Une étoile se forme à partir d'un nuage en effondrement, à la suite d'une perturbation environnementale (explosion de supernova par exemple, qui produit une onde de choc). Le nuage est composé essentiellement d'hydrogène et d'hélium, mais contient aussi des poussières. Sa densité typique est de l'ordre de 1.000 atomes par $cm^3$. Il s'agit des nuages moléculaires denses, qui s'étendent sur des zones immenses, et dont la nébuleuse d'Orion donne un bel exemple. Ces nuages ont une masse de 100.000 à un million de masses solaires.

Tous les nuages sont en rotation très lente. Mais la théorie que nous allons considérer n'en tient pas compte. Elle ne sera incluse qu'à la fin de la contraction, lorsque l'étoile sera déjà formée.

Ils contiennent assez de matière pour former des milliers d'étoiles, et le mécanisme de formation est assez complexe. Tout d'abord, le nuage subit une légère perturbation extérieure, qui le comprime faiblement. Cette perturbation, dans certains cas, s'amorti et n'a pas de suite. Mais dans d'autres cas, lorsque la masse est suffisante, elle s'amplifie et conduit à l'effondrement du nuage. La masse minimum, ou *masse de Jeans*, qui conduit à l'effondrement initial est très supérieure à la masse d'une étoile. Pour un nuage typique, elle est au moins de 100.000 fois plus importante que la masse d'une étoile. Il est donc bien évident que ce n'est pas directement l'effondrement d'un tel nuage qui peut former une étoile.

La théorie de la fragmentation hiérarchique d'un nuage a été proposée par James Jeans en 1902. *Stricto sensu*, le calcul est très difficile, car la structure d'un nuage réel est très complexe. Mais il est possible de faire d'importantes simplifications, qui nous donnent l'ordre de grandeur de chaque phénomène.

Nous avons considéré que le gaz tombait en chute libre, car aucune pression ne s'y opposait. Mais la chute du gaz vers le centre du nuage dissipe de l'énergie potentielle ; celle-ci doit bien passer quelque part. Elle est transformée en énergie rayonnante, qui est émise par les molécules du gaz.

Le nuage étant extrêmement dilué, les photons peuvent passer à travers sans être absorbés : l'opacité est quasiment nulle. Dans ces conditions, le rayonnement quitte librement le nuage sans l'échauffer. La première étape se fait à température constante. C'est une contraction *isotherme*. Le nuage, qui était initialement à 10 K, conserve donc cette température.

**Durée de l'effondrement**

En combien de temps le nuage va-t-il se contracter ?

Nous avons vu que, dans les conditions de température et de densité qui règnent à l'intérieur du nuage, les atomes tombent vers le centre en chute libre. Le temps qu'une particule de la périphérie du nuage mettra pour faire la moitié du chemin vers le centre, est nommé temps caractéristique de chute libre.

Il dépend du rayon et de la masse du nuage. On le retrouvera dans des situations **très différentes**, et sa valeur sera sans rapport avec celle qui nous intéresse ici. Cependant, le problème est exactement le même.

Pour le nuage en effondrement, le calcul nécessite la connaissance du rayon initial du nuage. Il est facile de le déterminer d'après la masse (100.000 masses solaires), et la densité (1.000 atomes par $cm^3$). On trouve un rayon de l'ordre de 10 parsecs.

Enfin, on détermine le temps de chute libre : il est de l'ordre de quelques millions d'années.

Ce temps est très bref, à l'échelle astronomique !

## *Etape 2 : fragmentation hiérarchique*

Une fois amorcé, l'effondrement se poursuit puisque la gravité l'emporte sur la pression. Il entraîne une augmentation de la masse volumique (même nombre d'atomes dans un volume plus restreint, ce qui revient à davantage d'atomes dans un même volume).

La masse de Jeans varie inversement à la racine carrée de la masse volumique :

$$M_J = 7{,}75\ 10^{21} \sqrt{\frac{T^3}{\rho}} \quad kg$$

Lorsque la masse volumique croît, la masse de Jeans décroît.

Alors, la masse de Jeans du nuage diminue !

Ceci signifie que la moitié du nuage, par exemple, qui contient la moitié de la masse totale, va se trouver au bout d'un certain temps au-dessus de la masse de Jeans (sa masse ne change pas, alors que sa masse de Jeans diminue). Alors, cette moitié peut à son tour s'effondrer.

Aussi, le nuage se fragmente en unités plus petites… et cette fragmentation va se poursuivre hiérarchiquement, les fragments se fragmentant à leur tour.

Le scénario peut se répéter plusieurs fois, la masse volumique continuant d'augmenter, et la masse de Jeans de diminuer. La question est de savoir : jusqu'où ? Le nuage va-t-il se tranformer en un (gigantesque) tas de sable ?

Pour répondre à cette question, il faut revoir les conditions que nous avons imposées pour montrer l'instabilité, et en déduire la masse de Jeans. La seule condition qui soit susceptible de changer est le caractère isotherme de l'effondrement !

Pourquoi le nuage est-il isotherme pendant la contraction ? Tout simplement parce que le temps de l'effondrement est beaucoup plus long que le temps de transfert de l'énergie. La chaleur produite au centre se propage radiativement à l'extérieur en une quinzaine d'années (5 pcs de rayon = 15 AL  15 ans à la vitesse de la lumière), alors que l'effondrement du nuage dure des millions d'années. Pendant l'effondrement, la température a dix mille fois le temps de s'uniformiser…

Cette uniformisation se perpétue-t-elle pendant toute la fragmentation ?

> La réponse est : non !

A mesure que le nuage se fragmente, son opacité augmente. L'énergie s'en échappe de plus en plus difficilement : finalement, il devient si opaque qu'elle ne peut plus se dégager. La contraction se fera alors sans échange d'énergie avec l'extérieur. D'isotherme (même température partout), la contraction devient *adiabatique* (sans échange d'énergie avec l'extérieur).

L'énergie s'accumule alors, et crée une pression qui s'oppose à la contraction (par l'agitation thermique grandissante des molécules et atomes). Si on refait le calcul de la masse de Jeans, mais en supposant le nuage adiabatique (au lieu d'isotherme), on trouve qu'elle croît avec la masse volumique : plus le nuage se contracte, plus la masse de Jeans augmente. Le nuage ne peut donc plus se fragmenter.

**Pour quelle masse cet arrêt se produit-il ?**

On l'évalue en écrivant que l'énergie rayonnée est égale à l'énergie produite, et que la masse concernée est la masse de Jeans.

Il se trouve que la masse de Jeans à laquelle ce blocage, qui correspond à la transition isotherme-adiabatique, se produit, est de l'ordre d'une masse solaire.

L'ensemble de ce que nous venons de voir - déstabilisation du nuage, puis fragmentation hiérarchique - explique donc comment les grands nuages que nous voyons dans notre galaxie peuvent évoluer pour donner des objets de la masse d'une étoile. Il reste maintenant à voir comment un fragment final de nuage peut arriver à l'allumage des réactions thermonucléaires, et produire une véritable étoile.

**Accélération**

Les diverses phases de la fragmentation hiérarchique se réalisent toutes dans le temps de chute libre, adapté à la masse et au rayon de l'objet en contraction :

$$\tau_{ff} = \sqrt{\frac{R^3}{G\,M}}$$

L'effondrement du nuage initial est assez long, puisque son rayon est très grand. Il se chiffre en dizaines de millions d'années. Les fragments du nuage initial sont de plus petite taille, et de plus faible masse. Le temps de chute libre varie comme la racine carrée de $R^3$ / M. Si la masse M du fragment est 1.000 fois plus petite que celle du nuage initial, le rayon a diminué dans des proportions beaucoup plus importantes. Des 10 parsecs initiaux, on est arrivé à une dimension de l'ordre de 10 fois celle du système solaire. Le rayon a donc diminué 10.000 fois. Aussi, $\tau_{ff}$ est $(10.000^3 / 1.000)^{1/2}$ = 30.000 fois plus petit.

Ainsi, la dernière étape de la fragmentation se produit dans le temps de chute libre, de l'ordre de la centaine d'années pour une masse solaire... (10 pcs = 32,6 AL = 32,6 $10^{13}$ km ; divisé par 1 AL = 1,5 $10^8$ km  200 UA).

## *Etape 3 : formation de la protoétoile*

Nous allons maintenant considérer l'un des nuages obtenus au bout de la fragmentation, et voir comment il se transforme en protoétoile. Au cours de cette étape, le rayon de l'objet passe d'une centaine d'unités astronomiques, à 1/4 d'UA seulement.

Au début, la contraction du nuage est *homologue* : toutes les couches se contractent de la même façon. Mais la masse volumique augmente plus vite au centre, et l'opacité y augmente significativement. L'énergie qui y est dégagée ne peut plus s'en échapper, et participe donc à une augmentation de la température. La pression qui en découle va progressivement ralentir puis bloquer la chute libre à partir du centre.

Le centre de la protoétoile se trouve maintenant en équilibre thermique (les chocs des atomes sont assez fréquents pour uniformiser leurs vitesses, donc la température). Il est presque en équilibre mécanique : sa contraction continue, mais à faible vitesse, bien plus petite que la vitesse de chute libre.

Le reste du nuage est encore en chute libre : il se précipite donc sur le cœur, à une vitesse qui dépasse la vitesse du son dans ce milieu dilué. La matière qui tombe produit donc une onde de choc (comme le bang des avions supersoniques), dans laquelle se dégage son énergie cinétique.

Nous allons maintenant étudier ce qui se passe dans le cœur. Sa contraction continue lentement, puisqu'elle est limitée par la pression. La pression est produite par la température, qui est maintenue par l'opacité du milieu.

A quoi est due l'opacité ? Pour le savoir, il faut examiner la composition du nuage. Il est constitué essentiellement d'hydrogène moléculaire ( 76 % ), et d'hélium (  24 %). Dans ce gaz flottent des poussières. A basse température, ce sont les poussières qui constituent la principale source d'opacité : elles absorbent le rayonnement infrarouge, et font monter la température. Celle-ci produit une pression croissante, qui freine puis stoppe presque la contraction du cœur. Celui-ci se trouve alors en équilibre *hydrostatique*, mais pas en équilibre mécanique : la contraction se poursuit très lentement, en libérant toujours de l'énergie gravitationnelle.

Lorsque la température centrale atteint les 1.000 K, les poussières commencent à s'évaporer. Cette dissociation des molécules qui les constituent absorbe de l'énergie. La température ne monte plus, la pression n'augmente plus, alors la gravité l'emporte et la contraction du cœur reprend. La séparation des molécules est facile, car elle réclame très peu d'énergie, puisque les molécules s'attachent l'une à l'autre par des forces très faibles, résidu de celles qui assemblent les atomes en molécules. Ce mécanisme est semblable à l'ébullition de l'eau, qui maintient la température à 100°.

Lorsque toutes les poussières sont évaporées, ce mécanisme ne joue plus, et la température reprend son ascension. Avec elle, la pression augmente, et la contraction est à nouveau freinée. Est-ce définitif ?

Non, car la température augmente toujours et va bientôt atteindre les 1.800 K. A ce niveau-là, les molécules d'hydrogène vont se briser, et donner de l'hydrogène atomique (l'énergie à cette température est de l'ordre de l'électron-volt, correspondant à l'énergie chimique de liaison des atomes dans une molécule). Tout comme l'évaporation des poussières, la brisure des molécules d'hydrogène absorbe de l'énergie. Et le même enchaînement se reproduit : la température stagne, la pression aussi, la gravité l'emporte, la contraction reprend sans augmentation de température.

Ceci dure jusqu'à ce que tout l'hydrogène soit sous forme atomique. Alors, la température reprend sa montée, entraînant la pression, et la contraction s'arrête.

Il y a encore un palier, du même genre, lorsqu'on atteint la température d'ionisation de l'hydrogène (13,6 eV), de l'ordre de 10.000 K. Celle-ci consomme de l'énergie, et produit les mêmes phénomènes : la contraction reprend.

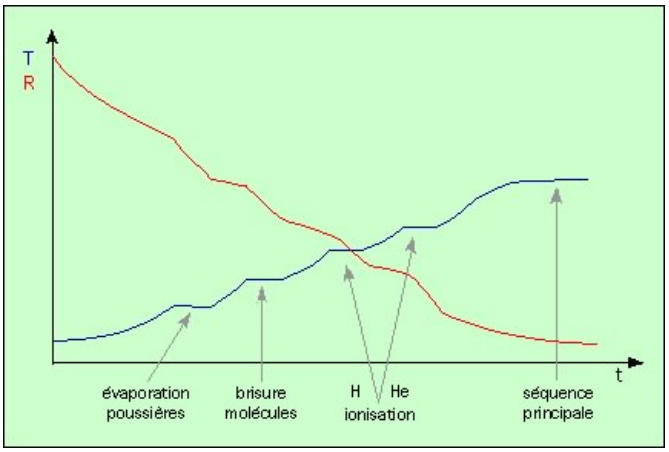
Elle s'arrête encore lorsque tout l'hydrogène est ionisé.

Puis on atteint la température d'ionisation de l'hélium… C'est le dernier palier de température, avec une contraction rapide du cœur (dans chacune de ces phases, la masse du cœur est de plus en plus grande, donc la gravité de plus en plus forte, et par conséquent la contraction de plus en plus rapide). La température du cœur est maintenant de l'ordre de 100.000 K. Le gaz est totalement ionisé. L'équilibre hydrostatique est définitivement acquis, et la contraction se pousuivra à un rythme très faible, qui continue de fournir l'énergie que la nouvelle protoétoile rayonne. Le cœur de la protoétoile est totalement ionisé ; il est constitué de plasma. Autour, se trouve un nuage d'hydrogène toujours en chute libre, qui la cache aux regards (difficultés d'observation), et qui continue d'augmenter la masse.

Le cœur ne fait plus qu'un quart d'unité astronomique de rayon (un peu plus petit que l'orbite de Mercure).

Le schéma ci-dessous résume ces étapes. Deux courbes y sont tracées :

- la température (en bleu) qui est croissante et présente des paliers ;
- le rayon de l'étoile (en rouge) qui décroît. Remarquez que lorsque la température présente un palier, le rayon décroît plus rapidement, puisque la pression reste stable.




**Luminosité**

On remarque que le nuage produit beaucoup d'énergie gravitationnelle. Or celle-ci est la plus rentable énergétiquement : pour comparer le rendement de deux sources d'énergie, on se base sur l'équivalence avec la masse par la célèbre équation d'Einstein $e = mc^2$. Connaissant l'énergie produite, on en déduit l'équivalent en masse. Puis on calcule sa valeur en pourcentage par rapport à la masse qui a produit l'énergie considérée.

Pour l'énergie chimique, le résultat est très faible, de l'ordre d'un millième de pourcent. Pour l'énergie nucléaire de fusion de l'hydrogène, moteur principal des étoiles, on trouve 0,7 %. Mais pour l'énergie gravitationnelle, on atteint les 50 % ! (ceci dans un cas limite, rarement atteint, mais tout de même…).

On conçoit de ce fait que la contraction du nuage fournisse énormément d'énergie. Dans toute la phase initiale d'effondrement du gros nuage, la température est très basse (10 K, phase isotherme), et l'énergie est rayonnée à très grande longueur d'onde (ondes radio millimétriques). A mesure que l'opacité - et donc la température - augmente, la longueur d'onde du rayonnement diminue. Lorsque la contraction est presque arrêtée, la température superficielle de l'objet est de l'ordre de 2.000 K, et il brille fortement en infrarouge, et un peu dans le visible.

**Convection**

La température centrale de la protoétoile reste basse : les 100.000 K sont très inférieurs à la température nécessaire pour la fusion de l'hydrogène !

A une telle température, et une densité déjà élevée, l'opacité est très forte. L'opacité, au-dessus de la température d'ionisation de l'hélium ( 100.000 K) est de la forme :

$$\kappa = \kappa_0 \rho / T^{3,5}$$

L'opacité $\kappa$ varie proportionnellement à la densité, et inversement proportionnellement à la température (à la puissance 3,5 c'est-à-dire un peu plus vite qu'au cube). La valeur $\kappa_0$ ne dépend que de la masse volumique. Nous en déduisons que l'opacité augmente avec la densité (il y a plus de matière, donc le milieu est moins transparent, ceci est logique). Mais nous voyons aussi qu'elle diminue fortement (puissance 3,5) avec la température. Cette formule sera de première importance dans l'étude de certaines phases évolutives des étoiles.

Sans chercher à déduire ici une valeur, nous admettrons que l'opacité est forte à la température (basse) atteinte par la protoétoile. En effet, la densité a beaucoup augmenté, et la température peu.

L'énergie produite au centre de l'étoile y reste donc piégée, tout au moins n'est-elle pas suffisamment évacuée par la radiation. Alors, la température monte… et la pression aussi, car on est dans un gaz parfait. Le gaz se dilate, et par la poussée d'Archimède se met à monter. La convection s'amorce. Ceci est dû à de petites différences locales de température. L'énergie accumulée par cette bulle est transportée plus haut, en direction de la surface de la protoétoile. Là, elle est évacuée par radiation vers l'espace, car les régions superficielles sont beaucoup plus transparentes. Et la bulle va se refroidir, se contracter, et redescendre…

Tout le cœur de la protoétoile est convectif… La convection est un mécanisme très efficace de dissipation, qui transporte une grande quantité d'énergie. Ainsi, le coeur se refroidit, ce qui diminue la pression et entretient la contraction gravitationnelle, qui produit beaucoup d'énergie. Aussi, la surface de la protoétoile est-elle très brillante.

Mais elle se trouve toujours à l'intérieur d'un nuage, et donc pour le moment invisible. Il sera difficile d'observer cette protoétoile, tout au moins dans le visible.

**Trajet de Hayashi**

Les protoétoiles ainsi formées sont totalement convectives. Hayashi a étudié ce genre d'astre, et a montré que les étoiles totalement convectives se placent, dans le diagramme HR, sur une ligne pratiquement verticale, que l'on a nommée *trajet de Hayashi*.

Le trajet de Hayashi sépare le diagramme HR en deux régions, à droite et à gauche de la ligne. Dans la région à gauche, une étoile est stable, et peut évoluer tranquillement. Par contre, dans la région à droite, l'étoile n'est pas totalement convective : en partant de la surface vers le centre, on doit rencontrer une zone radiative. Ceci modifie le transport d'énergie, et rend l'étoile instable. Elle doit évoluer vers la ligne de Hayashi pour retrouver sa stabilité.

A la fin de la contraction, l'étoile atteint le trajet de Hayashi par le haut. Sa température effective est maintenant stabilisée, et ne va plus changer pendant un certain temps.

**Rotation**

Le nuage initial était en rotation très lente. La conservation du moment angulaire montre que sa rotation doit s'accélérer pendant la contraction.

La contraction entraîne une augmentation de la densité. Les atomes et molécules ayant moins de place, se choquent plus fréquemment. Dans un choc, il y a échange d'énergie cinétique, donc modification de la trajectoire. Ceci crée une viscosité du gaz. On peut montrer facilement que le nuage en rotation doit s'aplatir : la viscosité du gaz amène les atomes à se réunir dans le disque équatorial. La matière ainsi rassemblée est disponible pour former des planétésimaux.

## *Etape 4 : vers la Séquence Principale*

Maintenant, la protoétoile, au centre du nuage, est en équilibre hydrostatique. L'énergie est produite par la contraction, et évacuée par convection.

Cette énergie est importante, et produit un vent stellaire très violent. Il se produit une collision entre le gaz du nuage qui continue de tomber vers la protoétoile, et le vent stellaire qui s'en échappe. Petit à petit, mais beaucoup plus lentement qu'à l'étape précédente, la matière qui entoure l'étoile va disparaître, en partie absorbée, et en partie chassée par le violent vent stellaire : l'étoile creuse une cavité dans son enveloppe, reste du nuage dont elle est issue. Avec la contraction, la rotation de l'ensemble s'est accélérée, et l'enveloppe est maintenant en orbite autour de la protoétoile.

Les réactions nucléaires ne sont toujours pas en vue, et l'évolution ne peut se poursuivre que par la contraction. Le cœur de l'étoile va se contracter doucement, mais la température effective n'augmente pas. Ainsi, la surface de l'étoile reste à température constante, donc son point représentatif dans le diagrammer HR reste sur une même verticale : le trajet de Hayashi.

L'enveloppe de l'étoile suit le même chemin que le cœur : elle se contracte à température constante. Le rayon diminuant, la surface de l'étoile diminue ; donc la luminosité va baisser également. Ainsi, l'étoile descend le long du trajet de Hayashi qui correspond à sa masse.

La luminosité L d'une étoile est la quantité d'énergie qu'elle rayonne par sa surface. C'est donc l'énergie $E_0$ rayonnée par chaque $m^2$, multipliée par la surface S de l'étoile :

$$L = E_0 S$$

La surface d'une sphère de rayon R est $S = 4\pi R^2$. L'énergie rayonnée par $m^2$ est le rayonnement du corps noir à la température T de l'étoile. Elle est donnée par la loi de Stefan-Boltzman $E_0 = \sigma T^4$. Donc :

$$L = E_0 S = \sigma T^4 4\pi R^2 = 4\pi \sigma T^4 R^2$$

L'étoile se contractant à température constante, la luminosité est proportionnelle à $R^2$. Lorsque le rayon est divisé par 2 (par exemple), la luminosité est divisée par $2^2 = 4$.

Au cours de cette descente, la température centrale augmente progressivement. Lorsqu'elle atteint les 4 millions de degrés, le deutérium qui se trouve en petite quantité dans le cœur commence à fusionner pour produire de l'hélium, par les réactions de la chaîne PP (sauf la première). Si la masse de l'étoile est inférieure à 0,08 masses solaires, elle ne pourra pas aller plus loin, et ne réalisera jamais la première des réactions de fusion de l'hydrogène (celle qui produit le deutérium). Ce sera une *naine brune*.

**Naine brune**

Dans une naine brune, la pression centrale augmente suffisamment pour produire la dégénérescence du gaz d'électrons. De ce fait, la température n'augmente plus avec la pression, et ne pourra donc pas atteindre la limite de fusion. Finalement, la pression quantique stoppe la contraction. L'étoile, si l'on peut l'appeler ainsi, n'a plus aucune source d'énergie disponible. Elle va se refroidir jusqu'à la température du milieu ambiant, quelques Kelvins (atteinte asymptotiquement au bout d'un temps très long).

**Les vraies étoiles**

Lorsque le cœur atteint les 10 millions de degrés, la fusion de l'hydrogène à proprement parler peut commencer.

A ce moment-là, la contraction du cœur s'arrête vraiment, et l'étoile atteint pour la première fois l'équilibre mécanique. Elle est donc à l'équilibre complet.

Elle se trouve sur la Séquence Principale, exactement sur la *ZAMS* (*Zero Age Main Sequence*, ou *Séquence Principale d'Age Zéro*). C'est la ligne inférieure de la Séquence Principale.

**Combien de temps dure cette étape ?**

L'équilibre hydrostatique se réalise entre la production d'énergie (gravitationnelle) et sa libération par rayonnement. La contraction va se poursuivre au rythme du rayonnement :

à une température donnée, l'objet rayonne à peu près comme un corps noir, donc l'énergie émise est proportionnelle à la quatrième puissance de la température (le flux d'énergie $F = \sigma T^4$). Il est impossible que l'objet rayonne davantage. Aussi, si l'énergie disponible est supérieure, la température augmente, ce qui augmente beaucoup l'émission. Mais alors, l'énergie étant dégagée, la température baisse… Le système se régule donc lui-même, et par conséquent il se trouve en équilibre.

La durée de cette étape est du même ordre de grandeur que le temps de refroidissement de l'objet, c'est le temps de Kelvin-Helmholtz :

$$\tau_{KH} = \frac{G M^2}{2 L R}$$

Ce temps est déterminé par la possibilité d'évacuer l'énergie produite par le rayonnement. Il constitue un ordre de grandeur seulement !

**Bilan**

Au cours de cette étape, la situation se présente ainsi :

- une protoétoile, qui brille toujours par énergie gravitationnelle ;
- sa masse n'a pas encore atteint sa valeur définitive, car elle n'a pas accrété tout le nuage ;
- la température de surface est maintenant élevée ; elle produit des atomes accélérés à grande vitesse, et comme le rayon de l'étoile est encore assez important, la gravité à la surface n'est pas suffisante pour retenir ces atomes. Ils s'échappent donc et constituent un vent stellaire important.
- un nuage d'hydrogène l'entoure, qui est encore en chute vers l'étoile ; toutefois, son mouvement est ralenti par le vent stellaire.

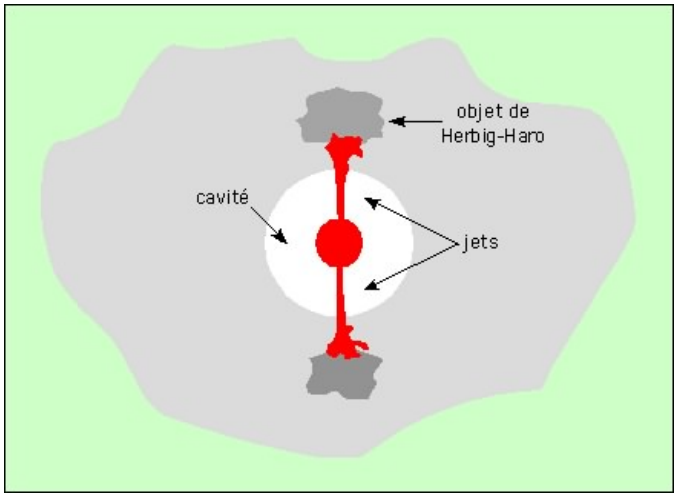
La protoétoile accrète donc de la matière en provenance du nuage, qui arrive sur elle à grande vitesse, et par contre elle perd de la masse par un vent stellaire très violent (bien plus que le vent solaire actuel). Le bilan est cependant largement positif.

**Etoiles de type T Tauri**

La phase T Tauri ne concerne que les étoiles de faible masse, disons jusqu'à 1,5 $M_\odot$ .

L'étoile est une sphère de gaz ionisé (particules chargées) en rotation. Elle produit donc un fort champ magnétique. Le vent stellaire violent qui s'en échappe est aussi ionisé, et donc sensible au champ magnétique. Dans les régions proches des pôles, il se trouve donc piégé dans les lignes de champ, et canalisé sous la forme de deux jets symétriques qui jaillissent violemment de l'étoile.

La matière de ces jets est accélérée à une vitesse pouvant atteindre plusieurs dizaines de kilomètres par seconde, largement supérieure à la vitesse du son dans le nuage. Lorsqu'elle pénètre dans le cocon gazeux, elle y produit donc une onde de choc : la matière est brutalement freinée, et produit une augmentation de la densité. Il se forme dans le nuage un objet de Herbig-Haro.




En tous les cas, le nuage qui entoure l'étoile se dissipe peu à peu, et l'étoile sort de son cocon. Lorsqu'elle devient visible, c'est une étoile de type T Tauri qui apparaît.

T Tauri elle-même a été découverte comme étoile variable en octobre 1852, et ses propriétés ne permettaient pas de la classer parmi un ensemble de variables déjà connues. Tout près, se trouve une nébuleuse par réflexion, qui nous renvoie une partie de la lumière produite par T Tauri. Légèrement plus loin se trouve un objet de Herbig-Haro.

**Fin de l'étape**

Cette étape s'achèvera lorsque l'énergie gravitationnelle ne sera plus le moteur de l'étoile, c'est-à-dire lorsque les réactions nucléaires auront pris le relais. La protoétoile sera alors devenu une véritable étoile, et commencera pour elle la Séquence Principale.

Il est surprenant de penser que cette étape, très rapide, puisse être observée. Pourtant, c'est sans doute le cas. L'étoile FU Orionis a présenté un phénomène de nova lente : sa magnitude est passée de 16,5 à 9,7 en deux mois. Mais alors que les novæ déclinent rapidement après leur maximum, FU Orionis est restée à cet éclat pendant 600 jours. Ensuite, elle a commencé un léger déclin, qui s'est vite stoppé : elle s'est stabilisée à 10,3 cinquante jours plus tard.

Cette élévation de la luminosité s'accompagne d'un changement de spectre : les FU Orionis passent d'un spectre d'étoile relativement froide (G ou K), à un spectre bien plus chaud A ou F.

L'explication de ce phénomène, qui rend compte des faits observés (présence du lithium en particulier) est la suivante : les T Tauri sont des protoétoiles, en cours de contraction, de grand diamètre. Leur source d'énergie est gravitationnelle. La contraction avançant, la température centrale augmente : l'étoile se rapproche de la Séquence Principale dans le diagramme HR. Jusqu'au jour où elle atteint, au centre même, les 4 millions de degrés nécessaires pour un début de fusion de l'hydrogène. Les réactions de fusion participent très peu au bilan énergétique dominé par la contraction gravitationnelle. Alors, l'énergie disponible augmente, et ralenti la contraction. Celle-ci va se poursuivre, à un rythme de plus en plus lent, en augmentant encore la température : la température minimale pour la fusion est atteinte dans des couches autour du cœur. Une partie plus importante de l'étoile participant aux réactions, l'énergie disponible augmente.

La contraction ralentit donc. Elle s'arrête finalement, tarrissant la source d'énergie gravitationelle. A ce moment-là, toute l'énergie de l'étoile est d'origine thermonucléaire. Là commence la Séquence Principale. On parle de *Zero Age Main Sequence* (*ZAMS*) pour déterminer cet instant dans la vie de l'étoile. C'est en général à partir de ce moment que l'on compte son âge.

Il est donc probable que les quelques objets FU Orionis que l'on connaîtnous montrent la dernière phase de contraction, depuis la phase T Taurifinale, jusqu'à la ZAMS. On a assisté en direct à la vraienaissance d'une étoile.

**Diagramme HR**

Il s'agit de décrire l'évolution de la protoétoile, depuis le nuage initial jusqu'à l'état ci-dessus. Résumons :

Au début, la température est de l'ordre de 10 K, ce qui place l'objet très à droite du diagramme. Le rayonnement produit est celui d'un corps noir à cette température, c'est un rayonnement millimétrique. L'énergie produite est extrêmement basse, aussi la luminosité de l'objet est voisine de 0. Par conséquent, son point représentatif se trouve sur l'axe horizontal, loin à droite de la partie correspondant à la Séquence Principale.

A mesure que la contraction se produit, la température augmente, et donc le point représentatif se déplace vers le bleu, vers la gauche. Simultanément, l'énergie dégagée augmente, et donc aussi la luminosité. Le point se déplace donc vers le haut et la gauche.

Ceci va se poursuivre jusqu'à la stabilisation de la protoétoile,lorsqu'elle atteint l'équilibre hydrostatique, et qu'elle devient entièrementconvective.

La protoétoile vient d'atteindre le trajet de Hayashi, et s'y positionne au point qui correspond à sa masse.

La suite des événements dépend de la masse de la protoétoile :

- si sa masse est inférieure à 0,08 masses solaires, sa température centrale reste inférieure à 4 millions de degrés, aucune réaction de fusion ne peut s'y produire. Privée d'une source d'énergie, l'objet va continuer à se contracter. Jusqu'où ? Rien ne s'opposant à la contraction, le cœur devient de plus en plus dense. Jusqu'au moment où les électrons sont si proches les uns des autres, qu'ils sont dégénérés. Ils opposent alors une pression quantique (pression de Fermi) à la contraction, qui est définitivement stoppée. Désormais, l'étoile ne produit plus d'énergie gravitationnelle, et ne pouvant non plus produire d'énergie nucléaire, elle va se refroidir lentement. On appelle *Naines Brunes* ces étoiles, qui n'atteignent jamais la Séquence Principale. La première observée est Gliese 229 B.
- pour les étoiles de masse comprise entre 0,08 et 3 masses solaires, c'est le stade T Tauri. La contraction continue, mais dans un temps plus long, le temps de Kelvin-Helmholtz.
- dans les protoétoiles de grande masse, la température centrale est plus élevée. C'est le cycle du carbone qui sera la source d'énergie prépondérante.

L'étoile produit maintenant de l'énergie de fusion, qui prend le relais de l'énergie gravitationnelle, et bloque la contraction. L'étoile se trouve pour la première fois en équilibre, non seulement mécanique mais aussi thermique. C'est le début de la Séquence Principale.

# Phase II : Séquence Principale

## *Etape 5*

La Séquence Principale a déjà été étudiée, puisqu'elle regroupe toutes les étoiles que nous voyons la nuit (presque…). C'est la phase la plus stable et la plus longue de la vie d'une étoile.

Nous avons supposé que l'étoile n'évoluait pas sur la Séquence Principale, mais ceci n'est pas tout à fait exact !

Si nous avons fait cette supposition, c'est parce que l'étoile reste très stable mécaniquement et thermiquement pendant cette phase. Son diamètre varie dans de très faibles proportions (20 % sur toute la période, pour fixer les idées), et sa luminosité reste tout aussi stable.

Mais cependant, un paramètre de l'étoile varie significativement, sans avoir de conséquences importantes sur l'aspect extérieur. C'est **la composition chimique**. Pendant toute la Séquence Principale, l'étoile transforme l'hydrogène en hélium, donc sa composition chimique évolue. Toutefois, c'est au centre que se produisent les réactions nucléaires, et la modification chimique concerne au premier chef le cœur. Elle le concerne même seul, sauf si un mécanisme de brassage intervient pour mélanger la matière du cœur à celle des couches extérieures.

Au début de la Séquence Principale, les réactions de fusion viennent de s'allumer à l'endroit le plus chaud de l'étoile, au centre (pour certaines, un peu en dehors du centre). La température étant relativement basse, c'est la chaîne proton-proton qui produit l'énergie.

L'hydrogène qui se trouve au centre est progressivement transformé en hélium, qui à cette température est inerte, et ne peut produire d'énergie. Le cœur se transforme donc progressivement en hélium. C'est au centre que l'hydrogène disparait en premier ; l'énergie n'y est plus produite, et la pression y baisse donc. Il se contracte et entraîne dans cette contraction les couches au-dessus. L'énergie gravitationnelle ainsi libérée augmente leur température, et la couche la plus centrale atteint ainsi le seuil de fusion de l'hydrogène. La fusion se poursuit donc dans une coquille qui entoure le cœur.

Cette coquille, au fil du temps, se transforme en hélium, devient inerte à son tour, et se contracte. Le scénario se reproduit, en réchauffant une couche un peu plus externe.

Ainsi, petit à petit, la fusion de l'hydrogène se propage du centre vers l'extérieur, laissant derrière elle un cœur d'hélium inerte de plus en plus gros, de plus en plus dense.

Dans cette lente transformation, le cœur se réchauffe, et se contracte. Pour lutter contre son poids grandissant (la masse est inchangée, mais le rayon du cœur diminue, donc la gravité augmente), l'étoile produit davantage d'énergie. Sa luminosité augmente donc légèrement. Les couches externes étant chauffées de plus en plus (luminosité du cœur croissante), se dilatent légèrement, et le rayon de l'étoile augmente un peu. Par suite, la surface de l'étoile (disons sa photosphère pour être correct) se refroidit un peu, et l'astre devient un peu plus rouge.

La lente et modeste évolution de l'étoile à l'intérieur de la Séquence Principale est due à cette évolution chimique.

Le cœur d'hélium ne produisant plus d'énergie, donc plus de chauffage, la température s'y égalise progressivement. A partir de là, le coeur est donc isotherme.

> A son arrivée sur la ZAMS (sa naissance), le diamètre du Soleil était de 94 % son diamètre actuel, sa température était de 5.500 K (5.770 aujourd'hui), et sa luminosité de 70 % de celle d'aujourd'hui.
>
> Lorsque l'hydrogène du cœur sera épuisé, le diamètre sera 75 % plus grand qu'aujourd'hui, et la luminosité sera doublée.

**Différences**

Selon leur masse, les étoiles se comportent de manière différente sur la Séquence Principale. Toutes transforment l'hydrogène en hélium, mais pas de la même manière !

Nous savons qu'il n'y a pas une réaction telle que 4 H → He. Si parfois on symbolise ainsi l'évolution chimique de l'étoile, ce résultat n'est acquis que par l'enchaînement de plusieurs réactions successives, chacune ayant ses particularités. La transformation chimique est produite par deux familles de réactions : la chaîne proton-proton (PP, avec trois variantes), et le cycle du carbone (ou cycle CNO, ou cycle de Bethe, avec une variante).

Ces mécanismes ont des particularités, mais le plus important se trouve dans deux caractéristiques différentes :

- la chaîne proton-proton se produit à température plus basse que le cycle CNO ;
- elle est beaucoup moins sensible à la température.

Le premier point indique que la chaîne PP fournit l'énergie aux petites étoiles, le cycle du carbone aux grosses. En effet, plus la masse est importante, plus la compression et la température centrales sont élevées. Dans les grosses étoiles, la température est suffisante pour les réactions du cycle CNO, qui y sont plus productives que celles de la chaîne PP. La limite se trouve vers 1,5 masses solaires, avec une température centrale de 18 millions de degrés. C'est ce qui fait la séparation entre les étoiles légères et les étoiles massives. Notez toutefois que ceci est vrai aujourd'hui, les étoiles contemporaines contenant le carbone et l'azote nécessaires pour le cycle CNO. Dans les premières étoiles, de métallicité nulle, seule la chaîne PP était possible.

Le second point précise que le taux de réactions est beaucoup plus sensible à la température dans le cycle CNO. Or la température décroît du centre vers la périphérie du cœur. De ce fait, la chaîne PP s'adapte mieux à une température décroissante, et peut se produire sur une bien plus grande zone dans le cœur de l'étoile. Le cycle CNO ne fonctionne que dans un cœur minuscule, ou une coquille très mince.

Les étoiles de masse inférieure à 0,26 masses solaires ont un taux de production énergétique si bas, qu'elle vont rester totalement convectives pendant la Séquence Principale (comme dans la phase T Tauri). Bien sûr, c'est la chaîne proton-proton qui leur fournit l'énergie, puisque la température reste basse. Dans ces étoiles, la convection assure le mélange de toutes les couches, et donc tout l'hydrogène est transformé en hélium.

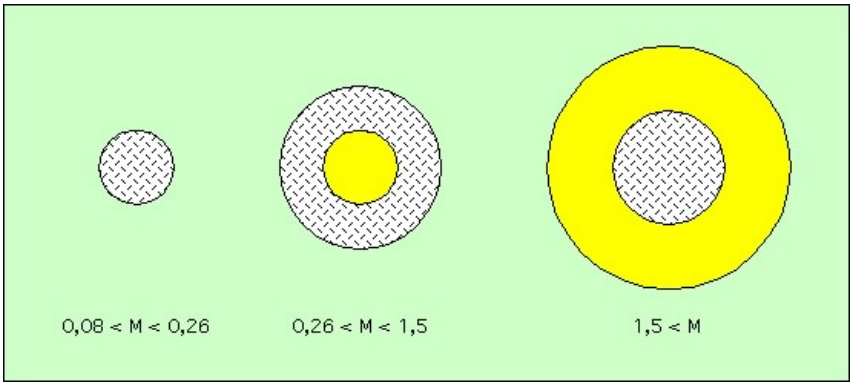
Dans les petites étoiles, entre 0,26 et 1,5 masses solaires, la production d'énergie est diffuse, puisque les conditions de température sont peu

contraignantes. L'énergie ainsi se dégage par radiation à l'intérieur du cœur : le cœur est radiatif. Au-delà du cœur, la température baisse, ce qui entraîne une augmentation significative de l'opacité. La radiation a de plus en plus de difficultés à se propager, si bien que finalement elle se trouve bloquée. Alors, la température de la matière qui se trouve au-dessus s'élève. Cette matière se dilate, sa masse volumique diminue, et la poussée d'Archimède entraîne son ascension dans l'étoile. La convection est déclenchée. Il s'ensuit que ces étoiles ont un cœur radiatif et une enveloppe convective.

Par contre, dans les étoiles plus massives, la température centrale s'élève suffisamment pour que le cycle CNO soit prépondérant. L'énergie est donc produite dans une toute petite coquille (au centre d'abord), qui se trouve très chaude. Dans ces conditions, l'énergie produite ne peut être transportée par rayonnement. La convection assure son évacuation. Dans ces étoiles, le cœur est donc convectif. Plus haut, la masse volumique baisse suffisamment pour diminuer l'opacité. L'énergie s'échappe alors par radiation et la contraction s'arrête. Le transfert de l'énergie est alors radiatif (voir plus haut : l'opacité $\kappa = \kappa_0 \rho / T^{3,5}$ augmente lorsque la densité augmente, et lorsque la température baisse).

Les étoiles de grande masse ont donc un cœur convectif, avec une enveloppe radiative.

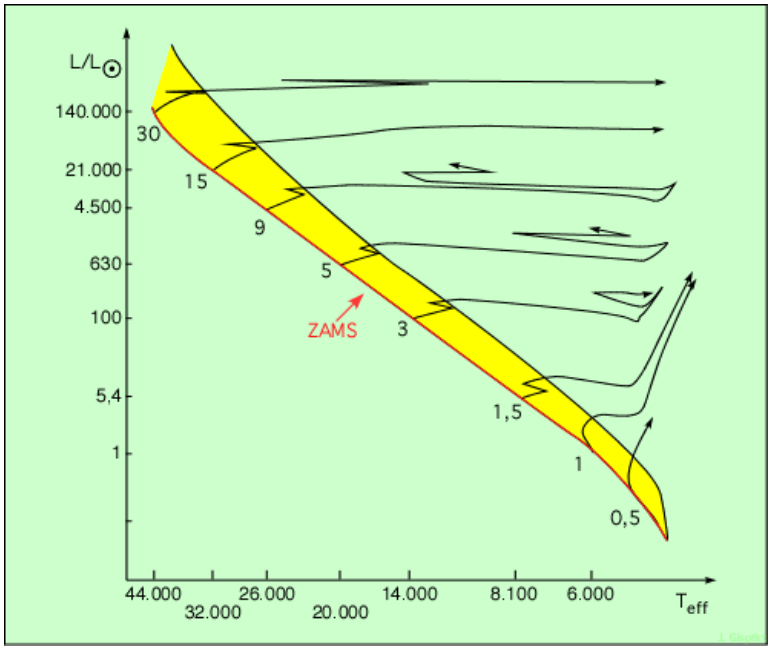
Tout ceci est résumé sur le schéma ci-dessous, dans lequel les rayons ne sont pas à l'échelle :




Les parties hachurées sont les zones convectives ; les parties jaunes sont les zones radiatives. Il est assez curieux que vers 1,5 masses solaires, les zones radiative et convective s'échangent ! De plus, le cœur n'est radiatif que pour les étoiles de masse intermédiaire.

**Evolution sur le diagramme HR**

Sur le diagramme HR, notre étoile a atteint la Séquence Principale sur la ligne inférieure de *ZAMS* (*Zero Age Main Sequence*, ou *Séquence Principale d'Age Zéro*).




**Résumé**

L'évolution sur la Séquence Principale est légère, et très lente. Elle n'est pas la même pour toutes les étoiles, la distinction se faisant par la masse.

- pour les plus petites étoiles (M < 0,26 M , chaîne PP seule)
  - l'étoile est totalement convective ;
  - toute sa masse est brassée, et transformée en hélium ;
  - elle ne se contracte que lorsque l'hydrogène est épuisé.
- pour les étoiles de faible masse (0,26 M < M < 1,5 M , chaîne PP prépondérante)

le cœur est radiatif
pas de brassage
l'hydrogène n'est brûlé qu'au centre même ;
- lorsqu'il est épuisé au centre du cœur, la fusion se déplace vers l'extérieur ;
ce passage est **progressif**, alors que dans les étoiles massives il est brutal (tout le cœur ayant été épuisé).
Ici aussi, la contraction produit une élévation de la luminosité, donc montée dans le diagramme HR.
- dans un premier temps, les couches externes étant beaucoup plus proches du cœur, se dilatent peu, et donc se réchauffent. L'étoile bleuit légèrement, donc se déplace vers la gauche dans le diagramme HR. Rapidement, la dilatation l'emporte sur la gravité, les couches externes s'éloignent et se refroidissent ; l'étoile commence à rougir, et son point rerésentatif se déplace vers la droite.

- pour les étoiles massives (M > 1,5 M , CNO prépondérant)
  - le cœur est convectif
  brassage énergique
  cœur homogène
  évolution chimique identique en tout point ;
  - le cœur se contracte très lentement dans son ensemble, entraînant une faible augmentation de la luminosité ;
  - l'enveloppe se dilate très lentement aussi, entraînant un refroidissement superficiel
  - dans le diagramme HR, déplacement vers le haut (luminosité croissante) et vers la droite (rougissement) ; le trajet est la ligne qui part de la ZAMS et monte vers la droite ;
  - lorsque le cœur a épuisé son hydrogène, il se contracte rapidement sous la pression, et la fusion se déplace vers l'extérieur.
  - la rapidité de cette phase produit une élévation de la température superficielle
  dans le diagramme HR, déplacement vers le haut toujours, mais vers la gauche (bleuissement)
  lorsque la fusion atteint la zone où la température est à sa limite inférieure pour la fusion, la production d'énergie diminue ;
  la contraction gravitationnelle reprend ;
  la température du cœur monte rapidement, chauffe les couches externes qui se dilatent et rougissent.
  C'est le départ vers la branche des géantes rouges.

La faible évolution pendant toute la fusion de l'hydrogène donne son épaisseur à la Séquence Principale.

Viendra un jour où la contraction chauffera une coquille dont la densité est trop faible pour y allumer la fusion de l'hydrogène. L'étoile est alors privée de sa source d'énergie, et son équilibre mécanique est rompu. C'est le moment où elle quitte la Séquence Principale.

# Phase III : fin de vie

Que se passe-t-il à la fin de la Séquence Principale ?

**Source d'énergie**

Il n'y a plus d'hydrogène à fusionner, mais il y a beaucoup d'hélium. L'hélium peut-il fusionner ?

Un noyau d'hélium pourrait fusionner avec un proton, ce qui donnerait un noyau de masse 5 (4 nucléons provenant de l'hélium, et 1 du proton). Mais il n'existe aucun noyau stable de masse 5 (avec trois protons, ce serait du lithium). Alors, ces réactions ne sont pas possibles (voir l'explication dans le chapitre réactions nucléaires).

C'est la fusion presque simultanée de trois particules alpha qui produit un noyau de carbone stable. Cette réaction est nommée *triple alpha*.

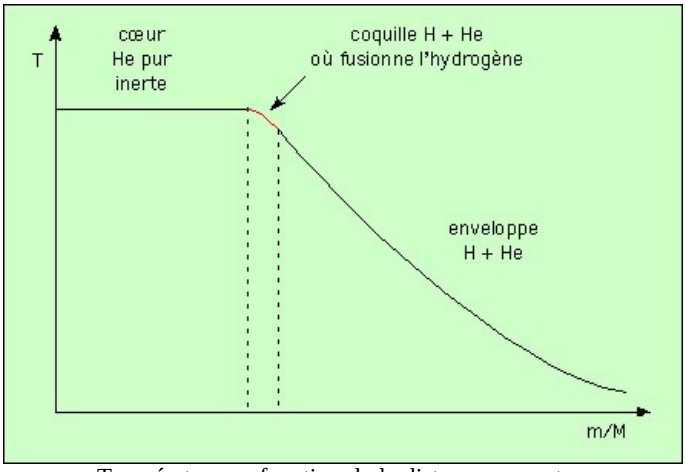
Elle nécessite une température très élevée, de l'ordre de 100 millions de degrés. Ceci se comprend très bien puisque chaque noyau d'hélium porte deux charges positives : leur répulsion électrostatique est très violente, et ne peut être vaincue que grâce à une grande énergie cinétique, donc une haute température. Celle-ci n'est atteinte que lorsque le cœur d'une étoile se contracte fortement après la fusion de l'hydrogène.

**Equilibre**

Autre problème : l'étude de la Séquence Principale est la modélisation d'une étoile en équilibre complet (ceci parce que le temps nucléaire est beaucoup plus long que le temps de Kelvin-Helmholtz).

Cet équilibre va-t-il se maintenir ? Sinon, un nouvel équilibre va-t-il se produire ?

Lorsque l'hydrogène central est épuisé, l'étoile est constituée d'un cœur d'hélium, entouré d'une enveloppe contenant beaucoup d'hydrogène. Pourquoi cette enveloppe ne fusionnerait-elle pas à son tour ?



Température en fonction de la distance au centre.

Ce schéma montre la courbe de température à partir du cœur de l'étoile, vers sa périphérie. La variable en abscisse (m/M) est la proportion de masse en dessous du point considéré ; elle est plus pratique que la distance au centre dans les calculs. m représente la masse de l'étoile contenue dans la sphère de rayon r. m/M est donc la proportion de masse à la distance r. On peut passer de r à m/M ou inversement. Lorsque m = 0, on est au centre de l'étoile, donc r = 0. Lorsque m = M, toute la masse est en-dessous, on est donc à la surface de l'étoile, donc r = R. Mais dans l'évolution, la masse du cœur augmente, alors qu'il se contracte (r diminue). Les deux variables jouent en sens inverse, ce qui complique beaucoup les calculs. Par contre, m/M augmente toujours !

De plus, m/M a la même signification pour toutes les étoiles, quelle que soit leur masse.

La température est la même en tout point du cœur (courbe constante), car il est isotherme, ne produisant plus d'énergie. Il est aussi inerte. Au-dessus du cœur, la température commence à décroître. Elle reste assez élevée pour la fusion de l'hydrogène dans une enveloppe, représentée par la partie rouge de la courbe.

L'hydrogène de l'enveloppe se transforme petit à petit en hélium, qui va s'ajouter à la masse du cœur. L'étoile est toujours en équilibre, mais jusqu'à quand ?

Après la Séquence Principale, le cœur de l'étoile continue sa contraction, donc son chauffage. Les derniers restes d'hydrogène disponibles fusionnent dans une coquille, produisant encore un peu d'énergie. A celle-là s'ajoute l'énergie gravitationnelle libérée par la contraction du cœur. La somme des deux permet à l'étoile de briller et de maintenir un quasi équilibre : elle se contracte lentement sans s'effondrer. Dans la contraction, la gravité augmente (puisque le rayon diminue), donc le précaire équilibre nécessite de plus en plus d'énergie. Par suite, la luminosité de l'étoile augmente : elle monte dans le diagramme HR. Ses couches externes se dilatent, et sa température superficielle diminue. Donc elle se déplace aussi vers la droite. Elle monte vers la *branche des géantes*.

## *Etape 6 : ascension vers la branche des géantes*

**Evolution générale**

La partie convective de l'étoile augmente de diamètre, et l'étoile se rapproche du trajet de Hayashi. Si elle le franchissait, elle serait en déséquilibre (la partie à sa droite dans le diagramme HR est interdite). Elle est donc condamnée à rester à gauche de la ligne de Hayashi. Le cœur continuant sa contraction, qui entraîne une augmentation de la luminosité, l'étoile est obligée de monter le long du trajet de Hayashi. C'est la seconde fois au cours de son existence, que l'étoile se trouve dans cette zone.

Dans son ascension, l'étoile atteint finalement la branche des géantes. Son enveloppe étant très dilatée, se trouve relativement froide en surface. Elle est donc rouge.

Les modèles théoriques expliquent assez bien cette transformation de l'étoile.

La suite de l'histoire dépend encore de la masse !

**Masse < 0,26 M**

Le problème est vite réglé. Tout d'abord, une telle étoile est totalement convective, aussi sa matière est brassée en permanence. Alors, l'hydrogène qui se trouve à la surface est bientôt entraîné vers le centre, et sera concerné par la fusion. De ce fait, tout l'hydrogène disponible sera transformé en hélium. A la fin de la fusion de l'hydrogène, l'étoile est une sphère d'hélium pur.

La matière (électrons) sera dégénérée avant que la température suffisante pour la fusion de l'hélium ne soit atteinte. La dégénérescence produit une pression, qui bloque la contraction. En plus, le cœur est isotherme, à cause de la haute conductivité thermique de la matière dégénérée.

La température de fusion de l'hélium ne sera donc jamais atteinte. Cette étoile est condamnée, lorsque l'hydrogène est définitivement épuisé autour du cœur, à se refroidir lentement. Elle devient une *naine blanche* constituée entièrement d'hélium.

Il n'y a plus de production d'énergie, donc la luminosité de l'étoile diminue. Mais il reste à évacuer la chaleur interne. Ceci se fera pendant le temps de Kelvin-Helmholtz, et maintiendra la luminosité de l'étoile provisoirement. Simultanément, la température superficielle diminue, entraînant l'étoile vers la gauche dans le diagramme HR. Ensuite, lorsque la chaleur nucléaire a été évacuée, la température de l'étoile baisse, et

avec elle la luminosité. L'étoile va descendre dans le diagramme HR, et atteindre la zone des naines blanches, au-dessous de la Séquence Principale. Là, l'étoile se trouve vers la gauche, car elle est encore très chaude. Au cours du temps, très lentement, elle va se refroidir, et se diriger vers la droite du diagramme. Elle finira par devenir une naine noire, mais l'Univers n'est pas assez vieux pour qu'il en existe encore aujourd'hui !

L'étape 6 est la dernière pour ces petites étoiles, avant leur état définitif de naine blanche.

Pour une étoile de masse supérieure à 0,26 masses solaires, l'augmentation de pression centrale entraîne une augmentation de la température suffisante pour atteindre les 100 millions de degrés, malgré la dégénérescence électronique du cœur. La fusion de l'hélium peut alors se produire, mais les conditions dépendent de la masse. Nous étudierons en premier les étoiles les **plus massives**.

**Masse entre 2,5 et 10 M**

La masse impose une différence de comportement par l'intermédiaire de la dégénérescence. Pour les étoiles de masse supérieure à 2,5 masses solaires, la dégénérescence du cœur (due à la contraction) **n'intervient pas avant** que la température de fusion de l'hélium ne soit atteinte. Le cœur reste donc un gaz parfait, et toute variation de température entraîne une variation de pression.

Au-dessus de 10 M , des phénomènes de semi-convection en particulier viennent perturber les transferts d'énergie. C'est pour ces raisons que nous nous limitons ici à la famille d'étoiles entre 2,5 et 10 M .

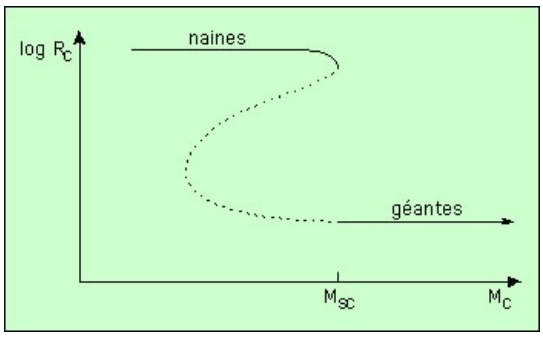
La théorie des étoiles en équilibre a mis en évidence la *limite de Schönberg-Chandrasekhar*. C'est la masse maximale (relative) que peut avoir **le cœur** d'une étoile massive, pour que les réactions de fusion de l'hydrogène produisent encore de l'énergie. Pendant toute la Séquence Principale, cette fusion se produit dans le cœur convectif ; à la fin, lorsque le cœur est presque entièrement transformé en hélium, la fusion se poursuit dans une coquille autour de lui. Cette coquille se déplace vers l'extérieur au cours du temps, laissant derrière elle de l'hélium qui accroît la masse du cœur.

Lorsque la limite de Schönberg-Chandrasekhar est atteinte, la fusion de l'hydrogène s'arrête, parce que la température de la dernière coquille est insuffisante. L'étoile entre dans une phase d'instabilité, qui va la conduire vers la région des géantes rouges. Là, elle connaîtra un nouvel équilibre, un peu moins stable et de plus courte durée que le précédent.

Cette évolution s'explique assez bien par les modèles que l'on a pu construire pour représenter les étoiles.

Après la fusion de l'hydrogène, l'étoile possède un cœur d'hélium isotherme. L'isothermie découle de l'absence de source d'énergie dans le cœur : très rapidement, les températures s'y mettent en équilibre avec celle de la surface du cœur, qui est chauffé par la coquille d'hydrogène en fusion.

A mesure que l'hydrogène fusionne dans la coquille, celle-ci se transforme en hélium inerte. La fusion se déplace donc vers l'extérieur, et l'hélium laissé derrière augmente la masse du cœur. On peut construire un schéma représentant l'évolution du rayon du cœur en fonction de sa masse :




La branche supérieure est horizontale. Elle montre que lorsque la masse croît, le rayon reste constant. Le cœur ne grossit pas, l'augmentation de masse est compensée par une compression de plus en plus grande.

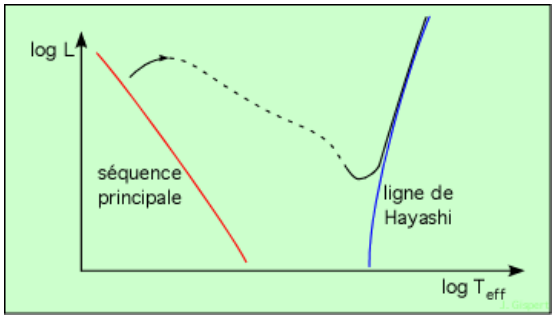
La limite de Schönberg-Chandrasekhar est représentée par le virage à l'extrémité droite de cette branche. Avec l'augmentation de la masse, le cœur commence à réduire sa taille. La compression augmente plus vite que l'apport de masse.

Lorsque cette limite est atteinte, nous savons que l'étoile n'est plus en équilibre.

Mais il existe une autre branche, en bas du schéma. Elle modélise d'autres états d'équilibre pour une étoile, avec un cœur beaucoup plus compact (rayon beaucoup plus petit), avec des masses du même ordre de grandeur dans la partie gauche. Le saut de la branche supérieure à la branche inférieure s'accompagne donc d'une forte contraction du cœur, et cette phase est instable. C'est celle qui mène l'étoile de la Séquence Principale à la branche des géantes rouges.

La contraction se fait sans production d'énergie nucléaire. La luminosité de l'étoile n'est donc plus produite que par le refroidissement, qui se fait dans le temps de Kelvin-Helmholtz. Cette phase est donc rapide.

Au cours du refroidissement, la luminosité diminue donc, et l'étoile se déplace vers le bas dans le diagramme HR. En même temps, le cœur se contractant, sa température augmente. L'enveloppe est chauffée de plus en plus à sa base, et se dilate. Son rayon est fortement augmenté ; il est multiplié par 25 pour une étoile de ??? M . La surface (photosphère) de l'étoile est donc de plus en plus vaste (mulitpliée par $25^2 = 625$ pour cette même étoile). Cette surface évacuant la même quantité d'énergie qu'auparavant, est beaucoup plus froide. Donc l'étoile rougit, et se déplace vers la droite dans le diagramme HR :




La Séquence Principale est un état d'équilibre complet (en particulier thermique) ; elle est suivie par un état de déséquilibre thermique ; et enfin, par un nouvel état d'équilibre complet (géante rouge).

La luminosité de l'étoile se calcule comme dans l'étape 4 plus haut.

$$L = 4\pi \sigma T^4 R^2$$

Ainsi, la luminosité varie comme le carré du rayon, et la puissance 4 de la température. Dans l'ascension de la branche des géantes, le rayon augmente, et la température baisse. Mais pas dans les mêmes proportions : pour le Soleil, le rayon passera de 1 à 100 R (multiplié par 100), et la température de 5.770 à 3.500 K (multipliée par 0,6). Donc, la luminosité est multipliée par $0{,}6^4 \times 100^2 = 0{,}13\ 10^4 =$ 1.300.

On attend donc que la luminosité soit multipliée par un facteur de l'ordre de 1.000.

**Lacune de Hertzprung**

L'évolution de l'étoile après la fusion de l'hydrogène est si rapide, qu'elle passe très peu de temps entre la Séquence Principale et la branche des géantes. Aussi, les chances de l'observer dans cette phase transitoire sont-elles très faibles. Par conséquent, le nombre d'étoiles dans cette zone du diagramme HR est forcément très réduit. L'espace qui y est laissé vide est nommé *lacune de Hertzprung* (*Hertzprung gap*).

**Allumage de l'hélium**

La phase de contraction du cœur se fait dans un gaz parfait (on parle toujours d'étoiles de masse > 2,5 M ). En effet, la densité du cœur dépend de l'évacuation de l'énergie, elle-même liée à l'opacité du milieu. Or l'opacité (absorption de photons) est produite par deux phénomènes différents : l'absorption par les niveaux électroniques (électron qui change d'état d'énergie en absorbant un photon), et la diffusion. Le premier de ces mécanismes nécessite que les atomes ne soient pas totalement ionisés, sinon il n'y a plus d'électrons périphériques pour absorber les photons. Le second au contraire demande beaucoup d'électrons libres, pour intéragir directement avec les photons. Si le milieu est neutre (taux d'ionisation nul), le second mécanisme ne joue pas. Si le milieu est totalement ionisé, le premier ne peut se produire. Dans ces deux cas extrêmes, l'opacité n'a qu'une seule source. Il s'ensuit qu'elle est maximale lorsque les deux mécanismes peuvent jouer ensemble, donc lorsque le taux d'ionisation est moyen.

Par ailleurs, le taux de dégénérescence augmente si :

- la température baisse ;
- la densité augmente.

La conjugaison de l'opacité et de cette dépendance de la dégénérescence fait que le cœur d'une étoile de faible masse est dégénéré, alors que celui d'une étoile massive ne l'est pas (densité plus forte, mais température beaucoup plus élevée).

La température de fusion de l'hélium sera donc atteinte dans un gaz parfait pour les étoiles massives.

Lorsque la température centrale atteint les 100 millions de degrés, l'hélium commence à fusionner. Mais parfois, les neutrinos émis au centre même refroidissent celui-ci, et la température maximale est atteinte un peu à l'extérieur, dans une coquille. L'hélium commence donc à fusionner au centre ou dans une coquille qui l'entoure directement.

L'énergie produite entraîne une augmentation de la pression, qui bloque la contraction, et augmente la luminosité de l'étoile. Donc son point représentatif doit monter dans le diagramme HR. Simultanément, l'enveloppe se dilate encore un peu, et rougit. Le point se déplace légèrement vers la droite.

Dès l'allumage de l'hélium, l'enveloppe devient convective, à partir de la surface. La convection s'enfonce d'autant plus profondément que la masse de l'étoile est plus grande. Pour une étoile de 7 masses solaires, elle atteint le 1/3 de l'étoile en masse. Ceci correspond à une profondeur telle que de la matière dans laquelle l'hydrogène a fusionné au cours de la Séquence Principale se trouve concernée. Ce mécanisme amène donc à la surface de l'étoile des matériaux (He) ayant été produits dans le cœur. Ces espèces chimiques pourront être emportées partiellement par le vent stellaire.

L'hélium produit du carbone par la réaction triple-alpha. Cette réaction étant très sensible à la température, ne se produira que dans une zone très concentrée du cœur. Elle concerne en gros 5 % de la masse de l'étoile (contre 10 % pour l'hydrogène).

L'hélium se raréfie, au profit du carbone dont la concentration augmente. Mais la disparition progressive de l'hélium entraîne une baisse du taux de réaction triple-alpha, et donc de la production de carbone, qui atteint un maximum. Ensuite, il reste trop peu d'hélium pour produire une quantité significative de carbone. Par contre, le carbone peut à son tour fusionner avec l'hélium pour donner de l'oxygène. Ceci est dû au fait que le taux de réaction triple-alpha est proportionnel au cube de la concentration en hélium $X_{He}^3$(puisqu'il faut 3 atomes), alors que le taux de la réaction qui produit l'oxygène est proportionnel à la concentration en carbone multipliée par la concentration en hélium $X_C X_{He}$.

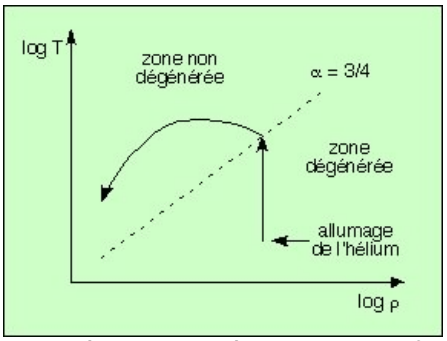
Cette nouvelle réaction consomme donc du carbone, dont la concentration diminue maintenant, pendant que celle d'oxygène augmente.

A la fin, on obtient un mélange en parts à peu près égales de carbone et d'oxygène. Une dernière réaction est possible, qui fusionne l'oxygène avec l'hélium, et donne un peu de néon.

## *Masse entre 1 et 2,5 M*

**Flash de l'hélium**

Comme dans les étoiles de plus faible masse, le cœur est dégénéré et isotherme. Mais la masse est suffisante pour que la température augmente jusqu'à la limite des 100 millions de degrés. Lorsque cette température est atteinte, elle l'est dans l'ensemble du cœur (isotherme). Alors, la fusion de l'hélium commence partout à la fois ; elle concerne la masse totale du cœur, et non pas seulement le centre.



Evolution de la densité et de la température pendant le flash de l'hélium

Cette énergie entraîne une augmentation de la température (flèche verticale sur le schéma), mais pas de la pression, puisque le gaz est dégénéré. Il n'y a donc pas de dilatation qui permettrait une régulation. L'augmentation de température entraîne une augmentation du taux de fusion de l'hélium (barrière électrostatique plus facile à franchir), ce qui augmente l'énergie produite… C'est un emballement des réactions.

Il y a donc, en très peu de temps, énormément d'énergie libérée. La différence avec les étoiles massives tient dans la dégénérescence du cœur, qui bloque la régulation.

Cette énergie produit une onde de choc sur les couches qui entourent le noyau. Ces couches sont suffisamment massives pour absorber l'énergie, sans être éjectées. Après une rapide dilatation de l'ensemble de l'étoile, un nouvel équilibre va être trouvé. L'augmentation de température se fait à densité constante. Mais le taux de dégénérescence diminue lorsque la température augmente : c'est donc le cas ici. Bientôt, la dégénérescence disparaît. Alors, la loi des gaz parfaits s'applique à nouveau au gaz, et la température élevée entraîne une brusque dilatation ! Ceci produit une explosion dans le cœur. C'est le flash de l'hélium. Depuis l'allumage de la fusion, jusqu'à la levée de la dégénérescence, il s'écoule seulement quelques secondes, ce qui justifie l'appellation.

La dilatation du cœur fait baisser la masse volumique (courbe vers la gauche). L'isothermie du cœur disparaît, la température décroît maintenant rapidement du centre vers l'extérieur, et donc les réactions de fusion de l'hélium vont se limiter au centre seulement. Le taux de réactions sera juste suffisant pour assurer l'équilibre de l'étoile, puisque maintenant toute élévation de température entraîne une augmentation de volume, qui baisse le taux de réaction. La régulation se passe à peu près de la même manière qu'avec la fusion de l'hydrogène dans la Séquence Principale. L'étoile est maintenant devenue une géante rouge, et va le rester tant qu'elle aura de l'hélium à fusionner.

La luminosité interne du cœur, juste avant le flash de l'hélium, est très élevée, atteignant $10^{11}$ M (comparable à la luminosité d'une galaxie) pendant un temps très bref de quelques secondes.

S'il y a une forte production de neutrinos au centre de l'étoile, la température n'y augmentera pas autant que ce que l'on disait plus haut par soucis de simplification. En réalité, la température augmente fortement dans une coquille qui entoure le centre. Cette mise au point ne change pas significativement les résultats exposés.

## *Etape 7 : Fusion de l'hélium ; la branche horizontale*

Après le flash, la matière reste non dégénérée. La fusion va se poursuivre calmement au centre de l'étoile, puique c'est là que la température est la plus élevée. Elle sera, grâce à la régulation, juste suffisante pour équilibrer l'étoile. Ceci va conférer à l'astre une luminosité qui est de l'ordre de 100 luminosités solaires.

La transition entre le flash de l'hélium et la phase calme qui le suit a été assez peu étudiée. Elle est très difficile à modéliser car de nombreux paramètres changent.

Dans cette phase, la masse totale de l'étoile peut être assez variable, mais celle du cœur est de l'ordre de 1/2 masse solaire.

Le cœur est constitué d'hélium non dégénéré qui fusionne en C et O. Il est entouré d'une coquille riche en hydrogène qui fusionne en hélium à sa base. La luminosité de l'étoile provient à la fois des deux fusions. Le cœur est convectif.

Petit à petit, l'étoile se constitue un cœur de C et O, à l'intérieur d'une coquille d'hélium fusionnant en carbone et oxygène, et d'une coquille d'hydrogène qui fusionne en hélium.

L'étoile quitte lentement la branche horizontale, puis s'approche de la ligne de Hayashi lorsque l'hélium central est épuisé. C'est la *branche asymptotique*.

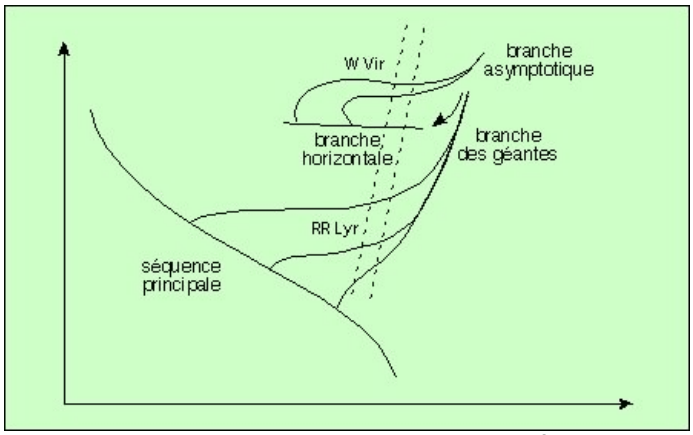


Diagramme HR montrant les branches des géantes

La branche des géantes, que monte une étoile après la fusion de l'hydrogène, et la branche asymptotique, qu'elle monte après la fusion de l'hélium, se heurtent à la ligne de Hayashi. La branche des géantes est celle qu'empruntent les étoiles avant l'allumage de l'hélium, alors que la branche asymptotique correspond à la fin de la fusion de l'hélium. La *bande d'instabilité* est figurée en pointillés.

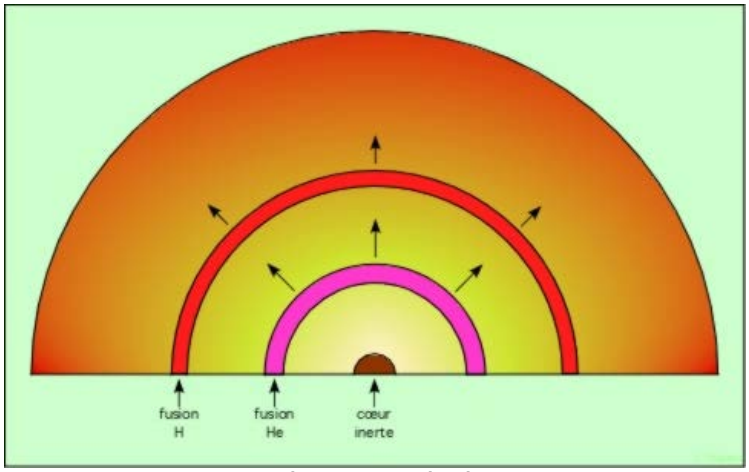
En se dirigeant vers la branche asymptotique, les plus bleues de ces étoiles coupent la bande d'instabilité, et deviennent pour un temps des W Virginis.

La coquille de fusion de l'hydrogène se propage vers l'extérieur, et sa température diminue. Finalement, cette chute de température arrête la fusion. Mais simultanément, la fusion de l'hélium se déplace aussi vers l'extérieur du cœur. Cette migration entraîne une remontée de la température à la base de l'enveloppe, et la fusion de l'hydrogène en hélium repart. Le même phénomène d'augmentation-diminution de la température va se reproduire un certain nombre de fois. On appelle *pulsations thermiques* ces variations. Elles se produisent de manière à peu près cyclique, avec une périodicité de l'ordre de quelques milliers d'années. Elles ne concernent que l'enveloppe de l'étoile.

**Pulsations thermiques**

Dans ces étoiles, deux coquilles de fusion coexistent : la fusion de l'hélium, près du centre, la fusion de l'hydrogène plus loin. Les deux fusions se produisent à des températures bien différentes : disons 30 millions de degrés pour l'hydrogène (cycle CNO), et 100 pour l'hélium. La chaleur produite par l'une peut accélérer l'autre, elles s'influencent donc.

Dans les deux, la température est un peu plus élevée à la base qu'au sommet, puisque la pression est un peu plus forte. Donc, les réactions y sont plus rapides, et le combustible (He et H respectivement), s'y épuise plus vite. Ce qui entraîne une légère contraction, et une élévation de température dans toute la coquille. La température augmentant, les réactions de fusion s'accélèrent dans la partie déjà active, et se déclenchent un peu au-dessus. Ainsi, les deux coquilles migrent doucement vers l'extérieur.



Ce schéma n'est pas à l'échelle

La question est de savoir à quelle vitesse se fait cette migration. Il n'y a aucune raison pour que les deux coquilles migrent à la même vitesse ! On montre même que pour cela, il faudrait que la coquille de fusion de l'hydrogène produise juste 7 fois plus d'énergie que celle d'hélium, condition bien difficile à réaliser.

La coquille d'hydrogène se propage vers l'extérieur, donc vers une zone de moins en moins chaude. Finalement, elle atteint de la matière trop froide pour la fusion, et s'éteint. Pendant ce temps, la zone d'hélium continue sa lente ascension, et se rapproche. Elle provoque une lente

montée de température, jusqu'à ce que la fusion de l'hydrogène reprenne. Cette remontée de la température s'accompagne d'une légère augmentation de la densité, puisqu'il y a une contraction Ainsi, ces coquilles peuvent s'allumer, migrer doucement vers l'extérieur, s'éteindre, reprendre…

Ces variations provoquent des instabilités, qu'on nomme *pulsations thermiques*.

Les coquilles de fusion, en migrant vers l'extérieur, se produisent dans des zones de masse décroissante.

## *Etape 8, masse faible : nébuleuse planétaire*

Par rapport à la Séquence Principale, l'étoile a bien changé d'aspect. Sa masse est maintenant très concentrée dans un cœur de très forte densité, dont la température est dix fois plus élevée. La luminosité est cent fois plus forte, le rayon cent fois plus grand. Les couches extérieures subissent donc un échauffement considérable, qui confère au gaz de grandes vitesses d'agitation thermique. La matière qui constitue l'enveloppe étant maintenant très loin du cœur, subit une gravité faible, et le vent stellaire devient violent. Sur la branche asymptotique, la perte de masse est de l'ordre de $10^{-4}$ M par an, mais la vitesse d'éjection est faible, de 10 km $s^{-1}$.

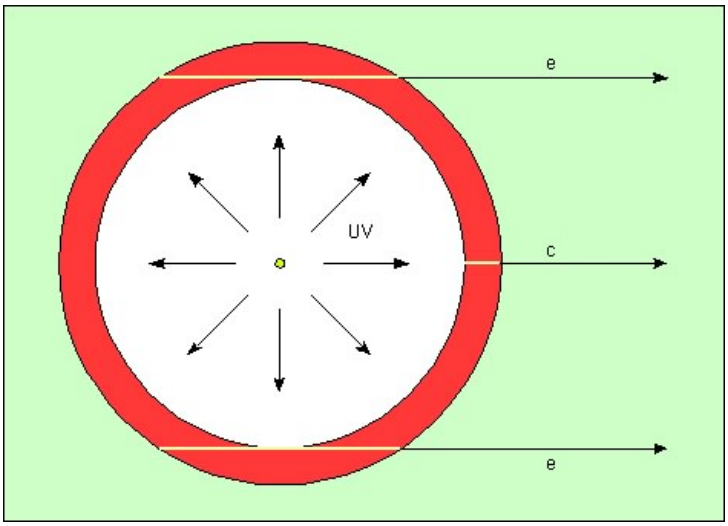
Après le départ de la branche asymptotique, la surface de l'étoile s'évapore dans l'espace. L'enveloppe devient ainsi de plus en plus transparente, et le regard porte de plus en plus profondément dans l'étoile. La partie visible, étant toujours plus profonde, est aussi plus chaude. Au cours de cette étape, l'étoile bleuit, et se déplace vers la gauche dans le diagramme HR.

On observe à ce stade un profil P Cygni des raies spectrales (voir ci-dessous). Ce profil indique clairement une forte perte de masse, et permet de mesurer les vitesses d'éjection. On trouve ainsi une perte de masse de l'ordre de $10^{-7}$ M par an, et une vitesse de ce vent de 1.000 à 4.000 km $s^{-1}$. Ce vent stellaire très rapide rattrape le précédent, beaucoup plus lent. La rencontre produit une onde de choc, et augmente la densité de matière dans une coquille sphérique entourant l'étoile.

Lorsque l'étoile atteint la limite du bleuissement, l'enveloppe subit l'échauffement maximal, et ce qu'il en reste s'évapore très rapidement. C'est la phase de *nébuleuse planétaire*.

Toute cette matière éjectée se répand dans l'espace, en conservant la symétrie sphérique. Il se crée une enveloppe en expansion autour de l'étoile. Elle est fortement chauffée par le cœur de l'étoile qui est presque à nu, très chaud, et qui émet énormément d'ultra-violet. L'enveloppe éjectée absorbe cet ultra-violet, et réémet de la lumière visible, par laquelle elle brille.

Elle à la forme d'une coquille. Mais vue de la Terre, elle nous apparaît comme un anneau. Ceci s'explique facilement : dans la partie extérieure de la coquille, la lumière qui nous parvient a traversé tangentiellement une grande épaisseur de matière. Par contre, la lumière provenant du centre traverse la coquille perpendiculairement, sur une épaisseur beaucoup plus faible. Elle est donc beaucoup moins visible.

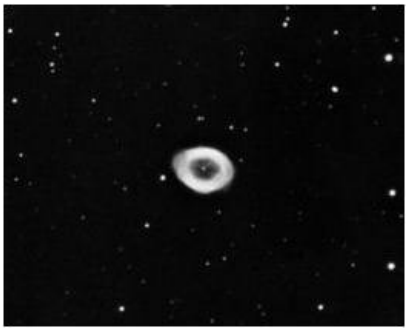



On voit sur le schéma ci-dessus que les ultraviolets émis par l'étoile centrale viennent exciter les atomes qui constituent l'enveloppe en expansion. Ils excitent ces atomes, qui se désexcitent en cascade, en émettant des rayonnements visibles. Les rayons représentés par des flèches viennent vers la Terre (située à droite). Les rayons e sont constitués de photons produits par la partie en jaune, qui est beaucoup plus longue que la partie jaune correspondante dans le rayon c central. Par conséquent, les rayons e transportent beaucoup plus de photons, et sont beaucoup plus lumineux. Ce qui fait que les parties externes de l'enveloppe, vues depuis la Terre, sont plus lumineuses que la partie centrale, et donnent ainsi son aspect d'anneau à la coquille.

Les modèles donnent une vitesse résultante d'expansion de la nébuleuse de 40 km $s^{-1}$. Après quelques centaines d'années, la coquille possède une masse de 0,1 M , un rayon de 0,1 parsec, une épaisseur de 0,01 pc et une densité de $10^3$ $cm^{-3}$. L'expansion assez rapide lui confère une durée de vie limitée, de quelques milliers d'années seulement.

Le nom particulièrement impropre de nébuleuse planétaire est d'origine historique : à l'époque de leur découverte, ces nébuleuses étaient observées avec de petits instruments très imparfaits, et présentaient une petite tache lumineuse ressemblant à l'image d'une planète. Bien sûr, on ne pouvait les confondre avec un objet du système solaire, car elles ne se déplacaient pas sur le ciel. Les astronomes ont bien compris qu'il s'agissait de nuages de gaz, d'où le nom de nébuleuse, mais ils ont voulu les distinguer des autres nébuleuses irrégulières par le qualificatif de planétaires. Un nom correct pourrait être *nébuleuse d'aspect planétaire*, mais il est bien trop long pour être accepté.

Au cours de cette étape, le vent stellaire est extrêmement violent, et l'étoile perd beaucoup de masse. D'autant plus qu'elle est plus massive au départ, et les grosses étoiles de 8 masses solaires finissent avec moins de 1,44 masses solaires, et deviennent des naines blanches. Au-dessus, leur destin est différent.



Nébuleuse planétaire de la Lyre M57, lunette de 155 mm, pose 30 mn photo J.P. Bousquet

## *Etape 9, masse faible : naine blanche*

La partie la plus centrale de l'étoile est maintenant constituée de C et O, et ressemble beaucoup à une naine blanche. L'enveloppe, très vaste mais très légère, donne à l'étoile un aspect de géante rouge. Lorsque la masse de l'enveloppe tombe en dessous de 1 % de la masse totale, elle devient tellement transparente qu'elle n'absorbe plus d'énergie, donc se refroidit et se contracte sous l'effet de la gravité. Le cœur de l'étoile, ou tout au moins son enveloppe immédiate, apparaît alors avec une température effective croissante, qui déplace rapidement l'étoile vers la gauche du diagramme HR. La fusion s'arrête, entraînant une baisse de luminosité qui déplace l'étoile vers le bas du diagramme HR. C'est maintenant une naine blanche. Pour elle, l'histoire est finie...

Un paramètre qui s'avère important est la concentration en carbone, en azote et en oxygène présents dans l'enveloppe. Ces trois éléments permettent la fusion de l'hydrogène par le cycle CNO, dans une coquille à l'extérieur du cœur.

La proportion plus ou moins grande de CNO modifie le taux de fusion de l'hydrogène, et affecte directement la température effective (superficielle) de l'étoile. C'est pour cette raison que les géantes se répartissent sur la branche horizontale dans cette phase. Les étoiles au-dessous de 0,75 M sont proches de la ligne de Hayashi (plutôt rouges) alors que celles de 0,6 M atteignant une température effective de 9.000 K, sont beaucoup plus bleues.

Cette dépendance pose un problème important. Si on considère l'éventail naturel des masses, on n'obtient pas la répartition observée sur la branche horizontale. Pour l'expliquer, il faut faire intervenir une répartition modifiée des masses des étoiles, qui peut très bien s'expliquer par une perte de masse variable de l'une à l'autre. Si c'est le cas, deux astres ayant un cœur de même masse peuvent avoir des masses totales différentes.

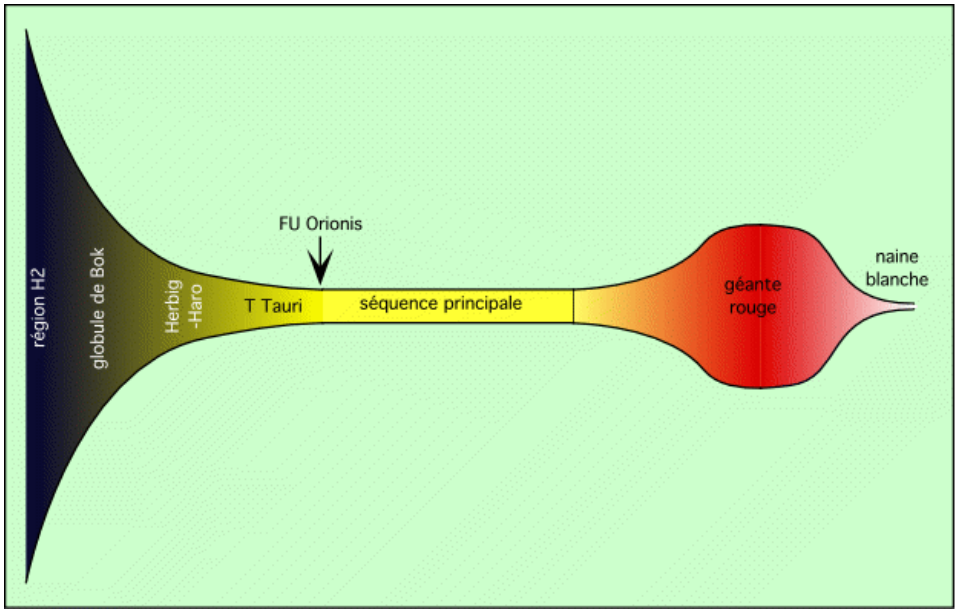
Mais on peut résoudre ce problème d'une autre manière. Si les étoiles effectuent des aller-retours le long de la branche horizontale (variations superficielles de la température effective) le temps de présence en chaque point de cette ligne est modifié, et peut expliquer les observations.

L'équilibre de l'hélium est moins stable que celui de l'hydrogène, et l'étoile peut se déplacer quelque peu dans le diagramme HR.

**Durée de la fusion de l'hélium**

Pour assurer l'équilibre d'une étoile beaucoup plus concentrée, donc avec une gravité très augmentée, il faut une production d'énergie très supérieure à celle de la Séquence Principale. Ceci entraîne une luminosité beaucoup plus importante de l'étoile. D'autre part, la fusion de l'hélium produit, par unité de masse, 10 fois moins d'énergie que celle de l'hydrogène. Ces deux paramètres jouant dans le même sens devraient donner une durée de vie extrêmement courte dans cette phase. Mais nous n'avons tenu compte dans ce raisonnement que de la seule énergie produite par l'hélium. Or l'hydrogène fusionne dans une coquille autour du noyau. Il en découle un allongement de la durée, qui atteint 20 % de celle de la Séquence Principale. La contribution de He à la production d'énergie augmente au cours du temps dans cette phase, et passe de 6 % à 48 % à la fin.

Un schéma peut résumer l'évolution de diamètre d'une étoile de faible masse (sans fusion de l'hélium), depuis sa formation jusqu'à sa fin sous forme de naine blanche à cœur d'hélium :




Evolution du diamètre d'une étoile de faible masse

A gauche du schéma est figurée la fin de l'effondrement du nuage qui donne naissance à l'étoile. En effet, ce nuage est à l'origine d'une dimension sans commune mesure avec celle de l'étoile à laquelle il donne naissance. De plus, les dimensions ne sont pas à l'échelle, et seules les variations sont à prendre en considération. Dans la phase géante rouge, l'étoile est beaucoup plus grosse que dans la séquence principale.

## *Etape 8, grande masse : pelure d'oignon*

Dans les étoiles de grande masse, la température centrale s'élève davantage, alors que la densité reste plus faible. Ces deux paramètres jouent dans le même sens : le cœur n'est pas dégénéré. Aussi, toute élévation de la température due à la contraction provoque une augmentation de la pression, dans un gaz qui reste parfait. Nous avons déjà vu qu'il n'y avait pas de flash de l'hélium, puisque celui-ci se produit dans les étoiles de faible masse à cause de la dégénérescence du cœur.

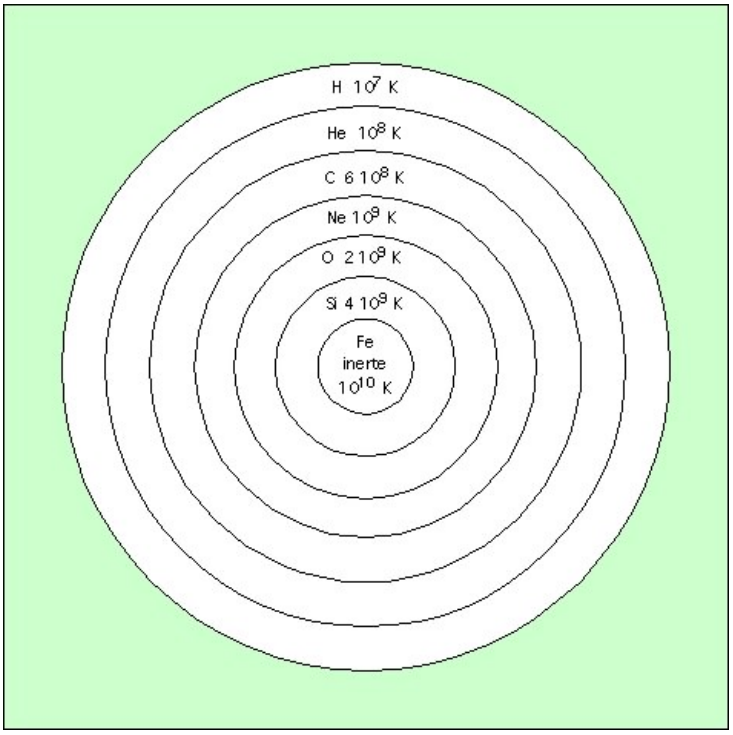
La combustion du carbone se produit au-dessus de 2,25 M .

Si nous considérons une étoile de masse juste assez grande pour éviter la dégénérescence à la fin de la fusion de l'hydrogène (plus de 15 masses solaires), nous n'aurons pas de flash de l'hélium. Celui-ci s'allumera calmement, et brûlera jusqu'à disparition. A ce moment-là, le cœur sera constitué d'un mélange en parts à peu près égales de carbone et d'oxygène. Les réactions de fusion de l'hélium s'arrêtant par manque de carburant, le cœur va se contracter. La masse étant forte, la densité sera assez forte pour provoquer la dégénérescence du cœur de carbone. Et ce qui se passe pour l'hélium à masse plus faible, va se produire ici avec le carbone : déclenchement des réactions de fusion du carbone, qui avec l'hélium restant produit encore de l'oxygène, et du magnésium. Le cœur étant dégénéré, l'augmentation de température produite se fait à pression constante. Les réactions s'emballent, et en quelques secondes l'étoile produit énormément d'énergie. Cette explosion se nomme naturellement *flash du carbone*, ou *flash de l'oxygène* puisque les deux sont concernés, ou encore *détonation du carbone*.

Contrairement au flash de l'hélium, le flash du carbone est certainement destructeur de l'étoile complète. Toute sa matière doit être dispersée dans l'espace, dans une explosion de supernova. Ainsi doivent finir les étoiles de masse intermédiaire.

Si la masse de l'étoile est plus importante, le cœur ne sera pas dégénéré. Alors, l'allumage du carbone se fera calmement, sans explosion. Bien sûr, c'est le centre de l'étoile qui est concerné. Au-dessus, la température sera suffisante, dans une coquille d'hélium, pour la fusion de celui-ci. Plus haut encore, une autre coquille d'hydrogène fusionnera pour donner de l'hélium.

Pour une étoile très massive, la dégénérescence du cœur ne se réalisera jamais, même pour les plus hautes températures. Il n'y aura jamais d'explosion lors du déclenchement des réactions de fusion, et le cœur de l'étoile prendra une structure en *pelure d'oignon* :




Ce cœur ne dépasse pas le centième du diamètre du Soleil, donc il est de l'ordre de la taille de la Terre ! Il est entouré d'une enveloppe mille fois plus étendue que le Soleil... On mesure là l'extrême condensation de la matière dans ces étoiles, presque toute la masse étant concentrée dans un volume minuscule, entouré par une enveloppe presque vide.

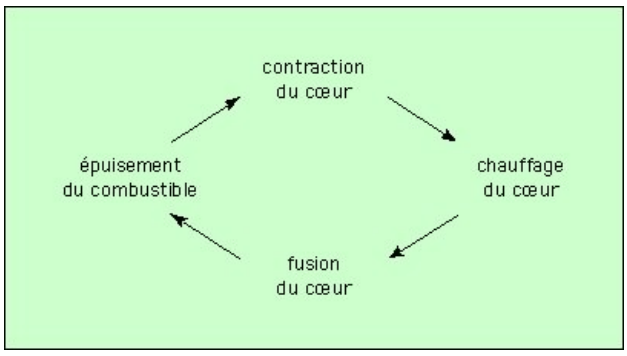
En partant de l'extérieur vers le centre, la température augmente. Et la masse des atomes qui fusionnent aussi. Or l'atome le plus stable de la nature est le fer. En fait, la fusion d'un élément produit d'autant plus d'énergie que les atomes participants sont plus légers. Ainsi, la fusion de l'hydrogène est la réaction la plus énergétique, de très loin. C'est pour cette raison que la Séquence Principale est la phase la plus longue de la vie d'une étoile. Les phases successives, régies par la fusion d'éléments de plus en plus lourds, sont de plus en plus courtes. La fusion de l'hélium correspond, en ordre de grandeur, à 20 % de la durée de la Séquence Principale. La fusion du carbone est encore plus rapide.

Lorsqu'on arrive au fer, l'étoile vit une véritable catastrophe. Le fer étant très stable, la réaction qui le donne ne produit pas d'énergie, mais en consomme ! L'équilibre entre la production d'énergie centrale et la gravitation est donc complètement rompu. L'étoile s'écroule sous son propre poids, et ses couches tombent en chute libre. Le temps de cette chute est extrêmement court, de quelques secondes !!!

Le fer est donc le dernier élément qui puisse être produit par le cœur d'une étoile.

Cette structure en pelure d'oignon est complète. **Elle n'existe que pendant quelques heures avant l'effondrement**. Auparavant, la structure n'est que partielle.

Toute l'évolution d'une étoile peut se résumer par un cycle très simple :




Le cycle s'arrête lorsque le chauffage du cœur par contraction ne produit plus de fusion.

Pour résumer ceci, les étoiles terminent leur existence comme naines blanches si :

- leur cœur devient dégénéré après la fusion d'un élément ;
- leur masse finale (après perte de masse) est inférieure à la masse de Chandrasekhar.

La masse de Chandrasekhar, masse limite, est bien connue. Mais la masse initiale, qui peut conduire l'étoile à respecter cette limite, n'est pas bien déterminée. Les estimations varient de 4 à 10 masses solaires. La raison en est que la perte de masse n'est pas bien quantifiée. Elle dépend de nombreux paramètres, qui en rendent l'étude théorique difficile, et son observation directe n'est pas possible. Les modèles proposés ne peuvent que rarement être confrontés aux observations.

**Explosion, supernova**

La théorie des phases finales des étoiles massives n'est pas très sûre. Mais l'observation donne ici des contraintes fortes, tout particulièrement depuis l'explosion de SN 1987 A, pour laquelle on a même observé un flux de neutrinos.

L'observation d'une supernova montre deux phases : la phase photosphérique initiale, et la phase nébulaire qui la suit.

On distingue plusieurs types de supernovæ, mais le classement n'est pas si simple. Il est historiquement basé sur les observations, car le spectre des supernovæ vers le maximum montre des raies de l'hydrogène absentes, ou fortes. Les premières ont été étiquettées de type I, les autres de type II. Donc, observationnellement, on distingue :

| | |
|---|---|
| SN I | pas de raies de l'hydrogène |
| SN II | raie Hα présentant un profil P Cygni |

Dans les SNI, les raies d'autres éléments ne sont pas présentes systématiquement, et ont donné une sous-classification. Pour les SN II, c'est la courbe de lumière qui présente des variations significatives. La classification qui découle de tout cela est la suivante :

| | | | |
|---|---|---|---|
| SN I | pas de raies de l'hydrogène | SN I a | raies de Si, Fe, Mg, Ca |
| | | SN I b | pas de Si, raie He I 5876 |
| | | SN I c | pas de Si, pas de He |
| SN II | raie Hα présentant un profil P Cygni | SN II-P | plateau sur la courbe de lumière |
| | | SN-L | pas de plateau |

Une supernova déverse énormément d'énergie dans l'espace, en un temps très bref. Il faut, pour expliquer ce débordement, trouver un moteur assez puissant. On en a trouvé deux, dont les propriétés sont donc différentes.

Ci-dessous, voici presque le même tableau, avec une colonne de plus en tête. Cette colonne définit une nouvelle classification, en deux groupes également, mais portant cette fois sur la physique et non plus sur l'observation. On conserve cependant, pour désigner les supernovæ, la classification observationnelle :

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **explosion thermonucléaire** | SN I | pas de raies de l'hydrogène | SN I a | raies de Si, Fe, Mg, Ca |
| **effondrement gravitationnel cœur d'étoile massive** | SN I | pas de raies de l'hydrogène | SN I b | pas de Si, raie He I 5876 |
| | | | SN I c | pas de Si, pas de He |
| | SN II | raie Hα présentant un profil P Cygni | SN II-P | plateau sur la courbe de lumière |
| | | | SN II-L | pas de plateau |

Le premier groupe ne contient que les SN I a, dont l'origine est une explosion thermonucléaire. Le second groupe voit l'origine du phénomène dans un effondrement gravitationnel. Les mécanismes qui amènent à ces cataclysmes sont fort différents.

**Explosion thermonucléaire : supernovæ SN Ia**

Les SN Ia ne font pas partie de l'évolution des étoiles, au sens strict. Elles trouvent leur place après la transformation d'une étoile de masse moyenne en naine blanche. De ce point de vue, elle n'ont leur place ici que sur le plan observationnel.

Une SN Ia typique éjecte une quantité de matière atteignant une masse solaire.

Nous avons déjà vu que les SN Ia sont pauvres en hydrogène. L'hydrogène constituant les 3/4 de la matière primordiale de l'univers, a forcément été détruit dans ces étoiles. Ceci indique qu'elles ont terminé la Séquence Principale. Ce qui est confirmé par l'observation de ces phénomènes dans les populations d'étoiles vieilles.

L'énergie est libérée par l'explosion en très peu de temps, et explique le pic de luminosité. Mais l'explosion n'explique pas la décroissance lente qui suit. Pour cela, on considère le temps de décroissance, qui contient des enseignements. La longueur de ce temps ne peut s'expliquer que par une libération lente d'énergie, en contraste avec la brusquerie de l'explosion elle-même. De plus, la décroissance est exponentielle, ce qui indique une production d'énergie en baisse avec un taux constant. Où trouver le réservoir d'énergie ?

La solution se trouve certainement dans une désintégration radioactive : lors de l'explosion, des éléments radioactifs à courte période sont synthétisés (les conditions de température et densité sont réunies) ; ils commencent tout de suite à se désintégrer. La courbe de lumière s'explique ainsi très bien par la désintégration de nickel 56 en cobalt 56. La période est de 6,1 jours. Après 6,1 jours, il reste donc la moitié du Ni 56 ; après 12,2 jours, il en reste le quart  Cette décroissance exponentielle reproduit bien la forme de la courbe et la durée de l'éclat.

Donc, il doit y avoir une explosion initiale, suivie d'une décroissance radioactive. D'où vient l'explosion ?

L'explication de ce type de supernova met en scène une naine blanche. Dans les phases précédentes de son évolution, elle a transformé son hydrogène en hélium, puis en carbone et oxygène. Sa masse est insuffisante pour provoquer la fusion du carbone avant que le cœur ne soit dégénéré. Aussi, la pression de dégénérescence bloque la contraction, l'élévation de température, et par suite toute réaction de fusion.

Nous avons vu un cas semblable, dans des étoiles de masse plus importante : la contraction s'est poursuivie, provoquant l'élévation de température dans le milieu dégénéré, donc sans augmentation de pression. Il s'en est suivi la fusion explosive du carbone (détonation du

carbone), qui détruit l'étoile.

Si, pour une raison quelconque, une naine blanche démarre les réactions de fusion du carbone, le scénario ci-dessus se produira, et entraînera l'explosion complète de l'étoile. Tout semble indiquer que c'est effectivement ce qui se passe.

Le modèle met en jeu un couple composé d'une naine blanche et d'une géante rouge. Les deux étoiles sont nées en même temps, et ont le même âge. La naine blanche est plus évoluée, donc elle est issue d'une étoile plus massive (évolution plus rapide). Elle a perdu ses couches extérieures, dont une partie a pu être récupérée par le compagnon. Ce dernier est maintenant devenu une géante rouge, et emplit son lobe de Roche. De la matière, à la surface du lobe de Roche, tombe sur la naine blanche, augmentant sa masse. Lorsque celle-ci dépasse la masse de Chandrasekhar, la pression des électrons dégénérés ne suffit plus à maintenir l'équilibre.

Le cœur s'effondre, provoquant une brusque remontée de la température dans le milieu dégénéré, et provoque l'explosion.

Ce modèle donne une bonne explication du phénomène observé, mais souffre d'un appui observationnel insuffisant. Plusieurs points demeurent obscurs :

- toutes les SN Ia ne sont pas strictement identiques. Les vitesses d'éjection sont assez variables, ainsi que la masse de Ni 56 produit.
- on observe quelques SN Ia dans des populations jeunes, de moins d'un milliard d'années.
- l'accrétion de matière provenant d'un compagnon est asymétrique ; en est-il de même de l'allumage des réactions nucléaires ?
- y a-t-il une onde de choc dans la matière éjectée ?
- le compagnon qui, dans le modèle, fourni la matière ajoutée, n'a jamais été directement observé. L'accrétion de matière doit produire un rayonnement X, mais celui-ci est trop faible pour être détectable à l'heure actuelle.

## *Etape 9, effondrement gravitationnel : supernovæ SN I b et c, et SN II*

Ces supernovæ sont produites par l'effondrement gravitationnel du cœur, dans l'évolution normale de certaines étoiles.

Les étoiles concernées sont massives, plus de 8 masses solaires. En effet, pour une masse initiale inférieure à 8 masses solaires, la perte de masse conduit finalement à un objet en-dessous de la masse de Chandrasekhar, c'est-à-dire une naine blanche.

Dans les étoiles massives, donc, le cœur continue sa contaction, et les éléments plus lourds que le carbone et l'oxygène sont synthétisés. La perte de masse devrait être plus importante ici que dans les étoiles plus petites. Mais le mécanisme d'évacuation de l'énergie n'est pas le même.

Dans le cœur dense et chaud, il y a création de paires neutrino-antineutrino $\nu-\overline{\nu}$. Chaque paire extrait une quantité d'énergie que ses particules emportent. Or les neutrinos n'interagissent pratiquement pas avec la matière, et traversent l'étoile en conservant leur énergie. L'enveloppe de l'étoile n'est pas affectée par cette perte d'énergie, alors que dans les étoiles de masse plus faible elle est chauffée, et s'évapore. Ce mécanisme refroidit le cœur.

Le résultat de ces créations de paires est une évacuation de l'énergie sans augmentation de la température du cœur, et sans éjection de l'enveloppe (tout au moins cette éjection est-elle beaucoup moins importante).

Ceci se produit jusqu'à la synthèse du fer, au-delà de laquelle il n'y a plus de production d'énergie. L'étoile possède alors la structure en pelure d'oignon. Elle possède un cœur de fer, surmonté d'une couche de silicium qui fusionne en fer à sa base, surmontée…

Les pertes neutriniques produisent une contraction de ce cœur de fer, puisque la température augmente moins vite. Puisque le fer ne peut fusionner (élément le plus stable), il ne produit pas d'énergie.

**Résumé de la situation :** le cœur de fer se contracte, et la température monte peu à cause des pertes neutriniques. Température faible, et densité croissante entraînent finalement la dégénérescence du cœur (pas toute la masse de fer, mais la partie centrale). Le cœur de cette étoile ressemble à une naine blanche : sa stabilité est de même nature. Mais la fusion du silicium continue autour, et augmente la masse de fer, qui atteint la limite de Chandrasekhar. C'est le moment de la rupture. La masse volumique est de l'ordre de $10^7$ g cm$^{-3}$ (à peu près 10 fois celle d'une naine blanche).

Nous avons dit que la masse de Chandrasekhar valait 1,4 M pour une naine blanche. Mais ici, il faut prendre en compte un autre paramètre dans son calcul, qui modifie beaucoup les résultats. C'est la proportion d'électrons par rapport au noyaux. Ici, la masse de Chandrasekhar n'est que de l'ordre de 1,3 M , alors que la masse de fer totale est de l'ordre de 1,5 à 1,6 M . Ces valeurs dépendent peu de la masse initiale de l'étoile.

Le processus URCA transforme alors, à l'intérieur des noyaux de fer, les protons en neutrons, par capture électronique. La disparition de nombreux électrons diminue la pression quantique qu'ils produisent. La gravité l'emporte alors, et la contraction s'accélère. Ce qui augmente l'efficacité du processus URCA. Donc baisse le nombre d'électrons…

On voit bien que ce mécanisme une fois amorcé, se renforce lui-même. Comment l'arrêter ?

La contraction rapide amène la masse volumique à $10^{11}$ g cm$^{-3}$ (mulitipliée par 10.000). Les atomes sont alors si proches les uns des autres, que même les neutrinos n'arrivent plus à leur échapper, et se trouvent relativement piégés à l'intérieur du cœur. Le refroidissement n'est donc plus assuré. De plus, l'absorption des neutrinos modifie la masse de Chandrasekhar, qui ne vaut plus maintenant que 0,8 M . Les neutrinos produisent une pression, qui s'ajoute à celle des électrons. La masse de Chandrasekhar de ce fait ne change plus.

Pour l'instant, rien n'arrête la contraction, et les noyaux sont de plus en plus proches les uns des autres. La masse volumique atteint $10^{15}$ g cm$^{-3}$, valeur que l'on mesure à l'intérieur des noyaux atomiques ! Ils se touchent donc, il n'y a plus de vide entre eux. Il est facile de comprendre que les propriétés de la matière sont changées : les interactions entre les noyaux ne sont plus négligeables. On parle alors de matière nucléaire.

L'effondrement s'est produit en 0,1 seconde ! Et la masse volumique a été multipliée par $10^8$ = 100 millions !

Maintenant, il va être très difficile de comprimer davantage le cœur, puiqu'il n'y a plus d'espace libre entre les noyaux. La contraction est donc stoppée brutalement.

Que sont devenues les couches au-dessus du cœur ?

Comme dans les dessins animés, où le personnage ne tombe pas tout de suite lorsqu'il a franchi le bord du précipice, l'enveloppe de l'étoile (tout ce qui est situé au-dessus du cœur effondré) ne réagit pas aussi vite à cause de son inertie. Sa chute est moins rapide que l'effondrement du cœur.

L'arrêt de l'effondrement ne peut se propager vers l'extérieur qu'à la vitesse du son (puisque c'est une onde de compression). La chute de l'enveloppe est-elle subsonique ou supersonique ? La réponse est plus complexe : elle est subsonique près du cœur, et supersonique plus loin. Alors, l'onde d'arrêt se propage normalement jusqu'à cette frontière, et là produit une onde de choc.

Quelle est l'énergie dissipée par le choc ? Les théoriciens s'accordent sur une valeur E de l'ordre de 2 ou 3 $10^{51}$ erg.

Ce qui pose un problème difficile…

On s'attend à ce que cette énergie projette les couches extérieures dans l'espace, et assure la luminosité de la supernova. Or l'énergie de choc a été produite par le centre de l'étoile, une masse de fer de l'ordre d'une demi-masse solaire. Mais l'étoile contient une masse solaire de fer en tout. Donc l'énergie du choc doit traverser une demi-masse solaire de fer.

Dans les conditions où ce fer se trouve, les photons qui transportent l'énergie sont absorbés, et brisent les atomes de fer : c'est la photodissociation du fer. On montre que seulement $1/10^e$ de masse solaire de fer suffisent pour absorber toute l'énergie produite par le choc… Si bien que, aussi spectaculaire qui puisse être l'effondrement, il est loin de suffire à expliquer l'éclat de la supernova. Il n'atteint que le centième de l'énergie requise.

Ce problème a agité la communauté astrophysique pendant quelques années ! Il n'est pas totalement résolu… Cependant, les innombrables travaux qui ont été effectués, en particulier des simulations numériques précises, ont montré l'impossibilité de justifier la quantité d'énergie nécessaire pour l'explosion.

Donc, les supernovæ ne peuvent pas exister !!

Et pourtant, on les observe…

**Energie de liaison**

La formation de l'étoile à neutrons au centre de l'étoile dégage de l'énergie, dont nous n'avons pas tenu compte jusqu'ici. Cette énergie provenant de la contraction finale du cœur est de l'ordre de 2 $10^{53}$ ergs. Elle est de nature à expliquer le phénomène observé. Seulement, elle est produite sous forme de paires neutrinos-antineutrinos $\nu-\overline{\nu}$. Et les neutrinos quittent l'étoile pratiquement sans interactions, gaspillant cette énergie.

En fait, il suffirait que 1% des neutrinos déposent leur énergie dans l'enveloppe pour que l'énergie du choc puisse franchir la barrière de fer. Depuis que cette idée a été publiée, de nombreuses simulations numériques ont tenté d'expliquer cela, sans succès.

**Explosion asymétrique**

Il faut bien se faire à l'idée que quelque chose ne va pas dans les belles théories. Un paramètre a été oublié, ou une simplification faite à tort.

Après l'explosion, le cœur de l'étoile s'est tranformé en étoile à neutrons. Ces étoiles sont observées couramment comme pulsars, dans le domaine radio. Mais il est curieux de constater que les pulsars se déplacent dans le ciel à des vitesses de l'ordre de 200 km $s^{-1}$, alors que les étoiles qui les entourent n'atteignent que 20 km $s^{-1}$, soit dix fois moins. Ce fait observationnel doit trouver une explication théorique.

Une idée assez nouvelle est que l'explosion pourrait ne pas présenter la symétrie sphérique, mais se produire initialement en un point particulier de l'étoile.

L'excès de vitesse des pulsars trouverait là une explication, mais aussi la polarisation observée du rayonnement synchrotron dans l'enveloppe éjectée des SN II.

Il reste encore du travail pour les astrophysiciens.

**SN 1987 A**

C'est la seule supernova proche qui ait explosé depuis 1604. Elle présente de ce fait un immense intérêt. Une page lui est réservée.

**Nucléosynthèse explosive**

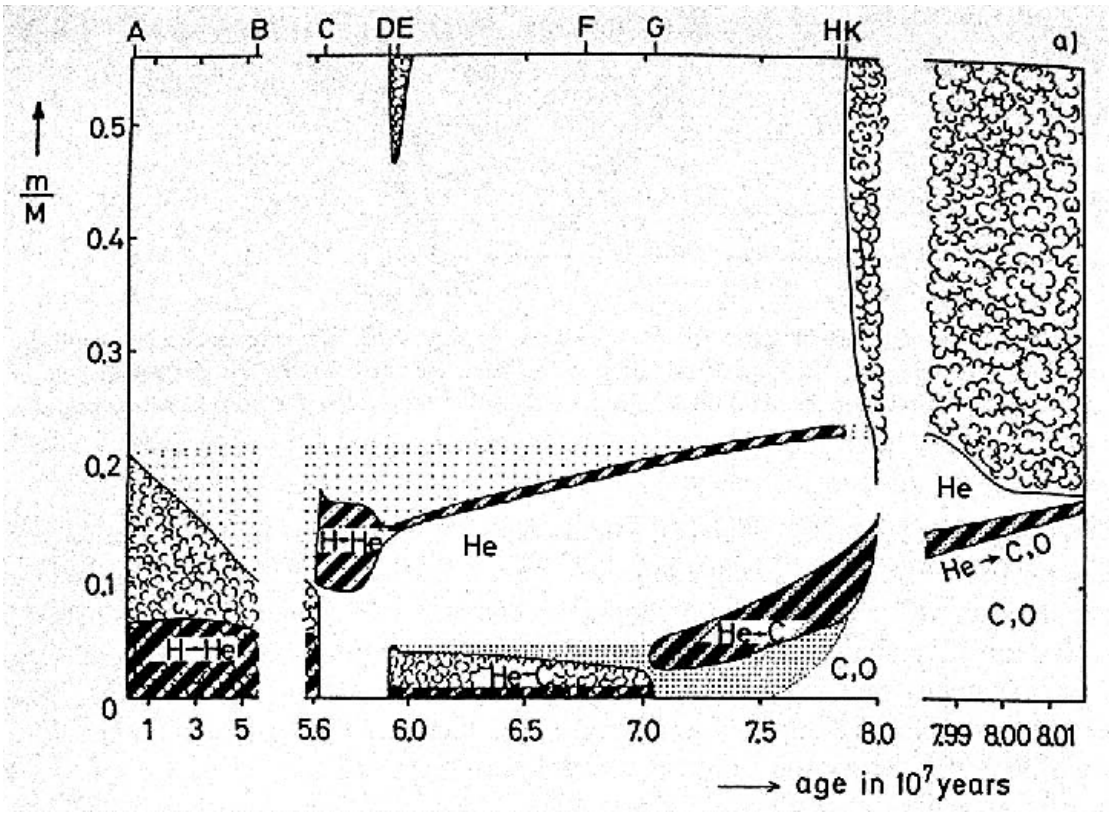
La nucléosynthèse est le résultat de trois choses :

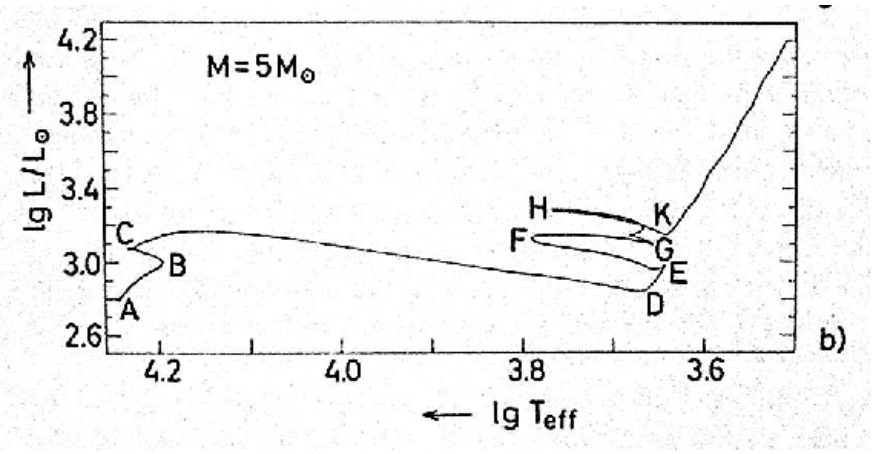
- l'état de l'étoile juste avant l'explosion ;
- la part de matière qui participe à l'explosion ;
- les modifications qui interviennent pendant l'explosion.

La nucléosynthèse est très importante pour les modèles de supernovæ, car elle prévoit des émissions, dont l'observation ou non va contraindre les modèles. Par exemple, la décroissance radioactive du nickel 56 produit une émission lumineuse qui prolonge l'éclat de l'étoile après l'explosion elle-même.

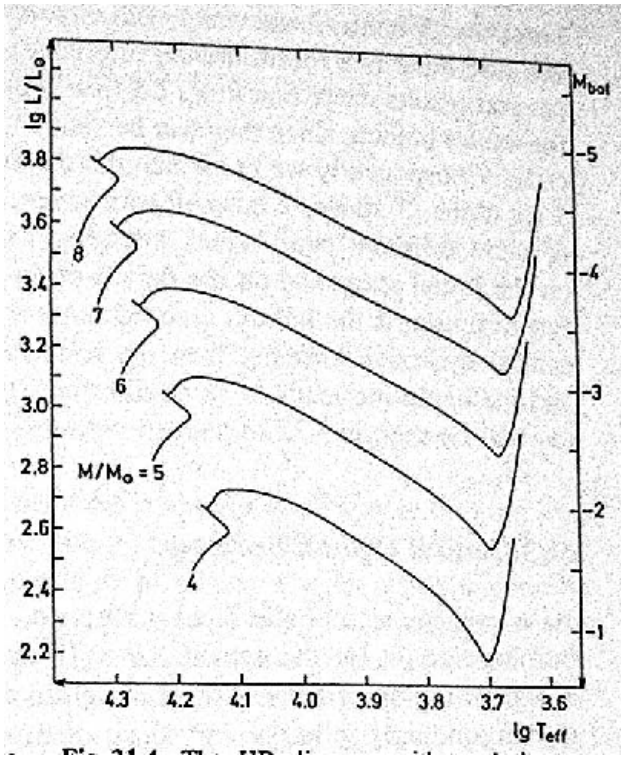
L'explosion d'une supernova d'effondrement produit une nébuleuse dont la composition peut être subdivisée en trois types :

- les éléments produits par fusion hydrostatique pendant la phase pré-supernova. Ils sont évidemment indépendants de l'explosion. Ce sont $^{12}C$, $^{16}O$, $^{20}Ne$, $^{24}Mg$ principalement. La proportion de ces éléments dépend fortement de la masse.
- les éléments produits par la fusion explosive de l'oxygène et du silicium : $^{28}Si$, $^{32}S$, $^{36}Ar$, $^{40}Ca$. Cette fusion ne dépend presque pas de la masse de l'étoile.
- les éléments du groupe du fer (au-dessus du titane) : Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni. Ce sont de bons tests pour les modèles.

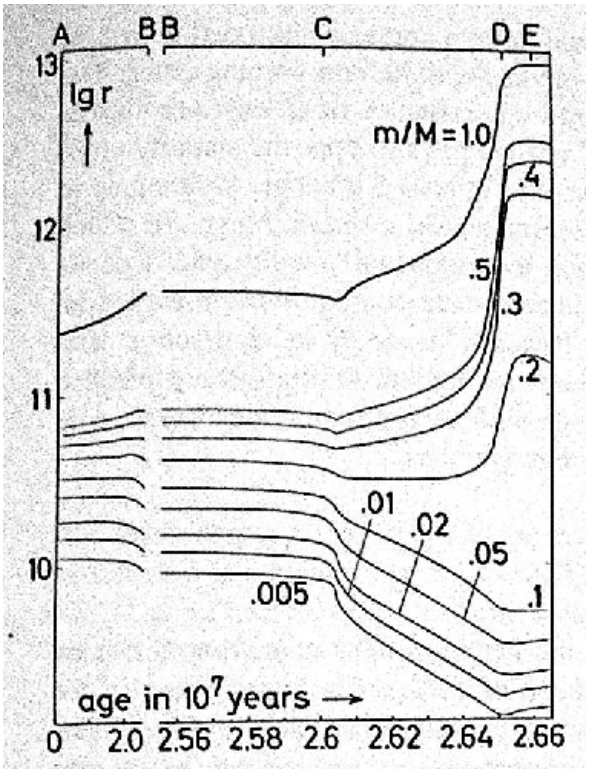



montée vers la zone des GR pour une étoile de 5 M




montée vers la zone des GR en fonction de la masse

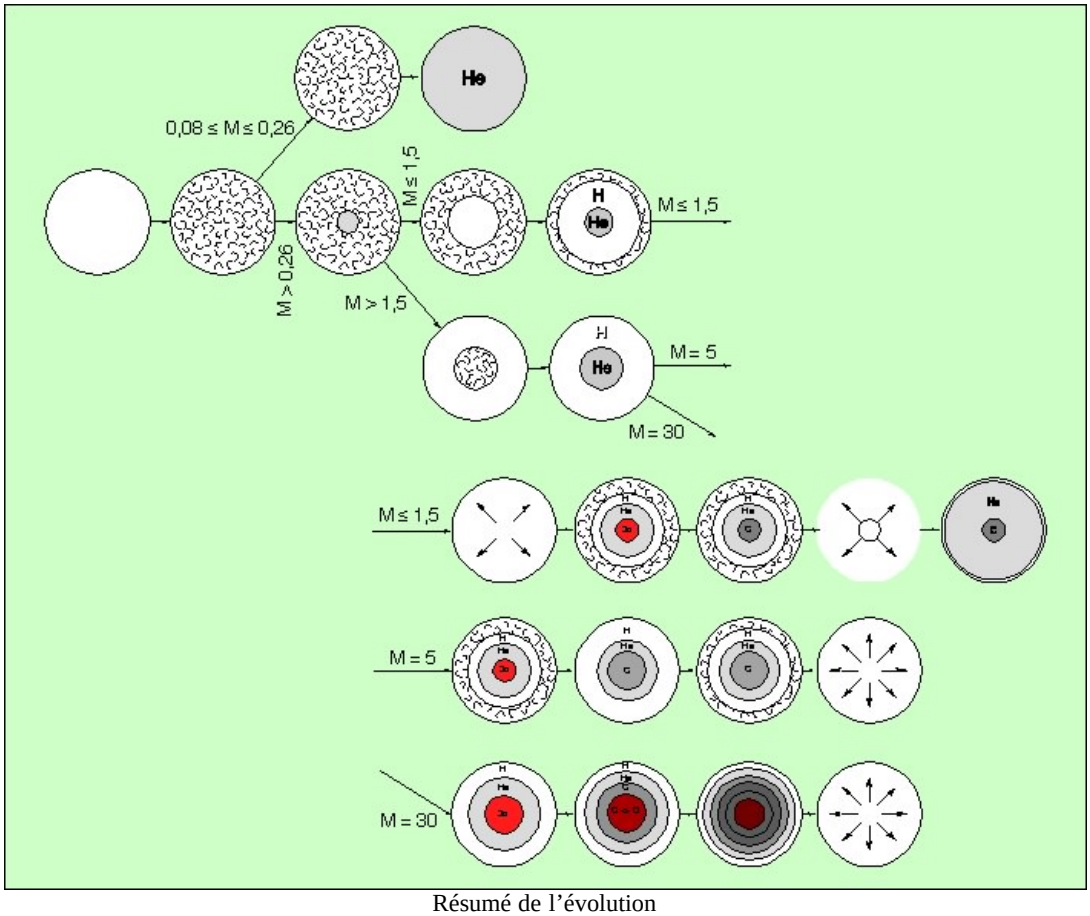



variation du rayon des différentes zones

.

.

.




Résumé de l'évolution

Ce schéma montre l'évolution depuis le nuage de gaz, jusqu'à la fin de l'étoile sous forme de naine blanche, ou de reste de supernova.

Les disques représentés ne sont absolument pas à l'échelle. Il serait impossible de dessiner à l'échelle une géante rouge et une naine blanche !

Lors de cette contraction, la température commence à augmenter dans le cœur. Mais pas assez pour provoquer une fusion.

Le cœur d'une étoile massive, à la fin de la fusion du silicium (qui dure moins d'une journée), s'effondre en chute libre. En combien de temps ?

Puisqu'il n'y a plus de pression pour contrebalancer la gravité, c'est le temps caractéristique de chute libre. Prenons le rayon du cœur de l'ordre de 50.000 km, et sa masse de l'ordre de 20 masses solaires. Alors,

$\tau_{ff}^2 = R^3 / G\,M = (5\ 10^7\ m)^3 / (6{,}673\ 10^{-11}\ m^3\ kg^{-1}\ s^{-2} \times 40\ 10^{30}\ kg) = 125\ 10^{21}\ m^3 / (267\ 10^{19}\ m^3\ s^{-2}) = 0{,}47\ 10^2\ s^2 = 47\ s^2$

$\tau_{ff} = 6{,}8\ s$

**Effondrement du Soleil :**

$\tau_{ff}^2 = R^3 / G\,M = (7\ 10^8\ m)^3 / (6{,}673\ 10^{-11}\ m^3\ kg^{-1}\ s^{-2} \times 2\ 10^{30}\ kg) = 343\ 10^{24}\ m^3 / (13{,}35\ 10^{19}\ m^3\ s^{-2}) = 25{,}7\ 10^5\ s^2 = 257\ 10^4\ s^2$

$\tau_{ff} = 16\ 10^2\ s = 1.600\ s = 27\ mn$

## *Résumé*

**Phase I : Formation**

- Etape 1 : déstabilisation du nuage
- Etape 2 : fragmentation hiérarchique
- Etape 3 : formation de la protoétoile
- Etape 4 : vers la Séquence Principale

**Phase II : Séquence principale**

- Etape 5 : fusion de l'hydrogène

**Phase III : fin de vie**

- Etape 6 : ascension vers la branche des géantes

- Etape 7 : fusion de l'hélium ; la branche horizontale
- Etape 8, masse faible : nébuleuse planétaire
- Etape 9, masse faible : naine blanche
- Etape 8, grande masse : pelure d'oignon
- Etape 9 : explosion, supernova

| Masse | Evolution |
|---|---|
| < 0,08 M | Naine brune |
| 0,08 - 0,26 M | SP - Naine blanche |
| 0,26 - 8 M | SP - Géante rouge - Branche asymptotique - Nébuleuse planétaire - Naine blanche |
| > 8 M | SP - Géante rouge - Pelure d'oignon - Supergéante rouge - SN effondrement |

SP = Séquence principale
SN = Supernova

Les réactions sont explosives lorsque le temps de production d'énergie est plus court que le temps de réajustement hydrostatique de l'étoile.

Une explosion de supernova est très rapide, et la décroissance béta n'a pas le temps de se produire. Donc, les neutrons et protons se conservent pendant l'explosion.

La fusion dans une enveloppe se fait en général à température plus élevée que la fusion centrale pour un même élément. Ainsi, un élément donné peut produire des dérivés différents selon qu'il fusionne an centre ou dans une coquille.

**Plan log ρ / log T**

Un autre diagramme est intéressant pour comprendre l'évolution d'une étoile. Il consiste à considérer le plasma qui se trouve en son centre, et à en considérer les propriétés. Le diagramme présente diverses zones dans lesquelles une étoile se trouve selon sa densité et sa température. On peut y suivre le trajet de l'étoile selon sa masse.

---=OO=---

# Etoiles T Tauri



**Découverte**

T Tauri a été découverte en octobre 1852 par Hind. Il s'agissait d'une étoile variable dont la courbe de lumière montrait une irrégularité qui ne permettait pas de la classer dans un type de variables connu. L'étoile est donc le prototype d'un nouveau genre.

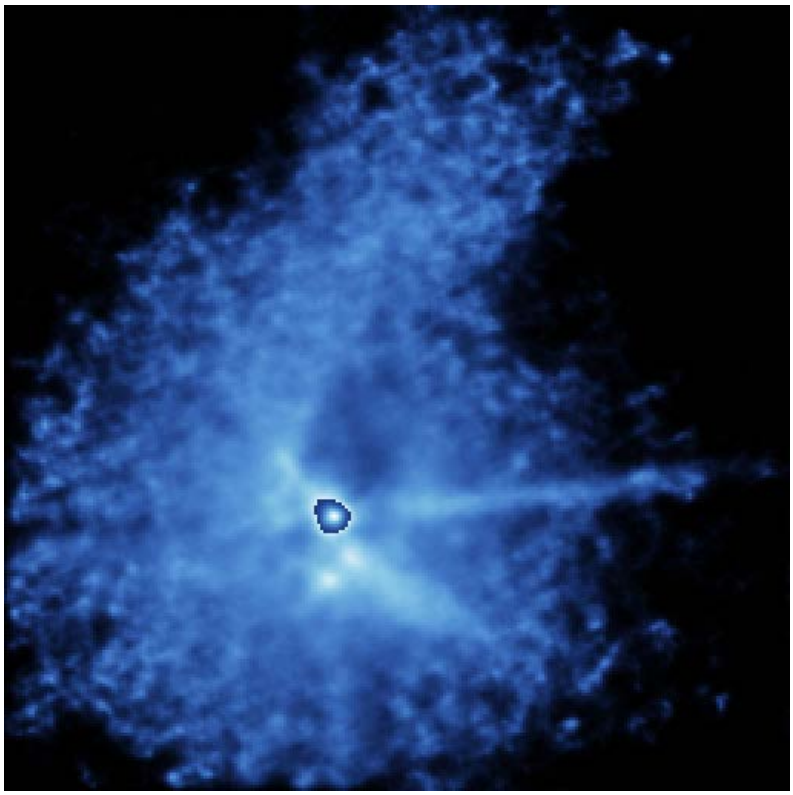
Proche de cette étoile, une nébuleuse par réflexion a été detectée, puis a disparu (avec les moyens de l'époque), puis a réapparu... En fait, la visibilité de la nébuleuse dépend de l'émission de lumière par l'étoile. Celle-ci étant variable, la nébuleuse l'est aussi.

En 1890, Burnham a observé une faible nébuleuse entourant l'étoile elle-même. La densité irrégulière de cette nébuleuse explique la visibilité variable de l'étoile (en partie au moins), et de la nébuleuse qu'elle illumine.

Plus tard, on a découvert une faible nébulosité un peu plus loin. C'est la nébuleuse de Hind, qui est éclairée par T Tauri, et qui subit donc les variations d'éclat de celle-ci.

T Tauri est un système triple. T Tauri a subi un changement d'orbite en passant à proximité de l'une des deux autes étoiles. Il n'est pas exclu qu'elle ait été éjectée du système, car un système triple est dynamiquement instable.

T Tauri varie de 9,6 à 13,5 ; son type spectral est G5.



T Tauri dans son nuage Photo : C. & F. Roddier (IfA, Hawaii), CFHT

Cette photo montre le nuage qui entoure l'étoile T Tauri. On y voit en haut (occultée pour éviter la saturation) T Tauri nord, et juste au-dessous, le point brillant est T Tauri sud. Les deux parties brillantes du nuage en haut et à gauche de T Tauri nord, et en bas et à sa droite, sont probablement deux jets émis par l'étoile (vent stellaire).

**Caractéristiques**

Les étoiles T Tauri :

| | |
|---|---|
| sont associées à des nébulosités souvent | |

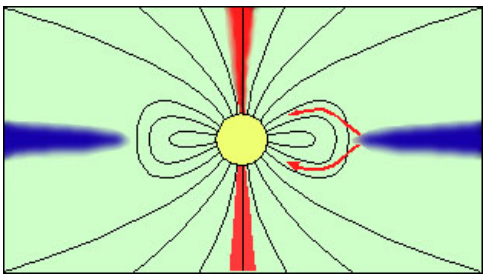
| | |
|---|---|
| obscures ; | une partie du nuage qui lui a donné naissance . |
| sont entourées d'un disque d'accrétion ; | reste du nuage de formation, aplati par la rotation et la viscosité. La masse de ce disque est estimée entre 0,001 et 1 masse solaire, et son diamètre entre 100 et 1.000 masses solaires. Le taux d'accrétion est de l'ordre de $10^{-7}$ masses solaires par an. |
| présentent les raies d'absorption du lithium ; | le lithium étant détruit au-dessous de 4 millions de kelvins, ceci prouve que ces étoiles sont très jeunes, n'ayant pas encore allumé la fusion de l'hydrogène. |
| présentent les raies d'émission de l'hydrogène (série de Balmer), et H et K du calcium ionisé ; | |
| présentent les raies d'absorption d'une étoile de la Séquence Principale de type avancé, G ou K ; | |
| montrent un excès de luminosité dans l'infrarouge et l'ultraviolet ; | l'excès d'infrarouge est dû au disque d'accrétion : éclairé par le rayonnement de l'étoile, il l'absorbe et le réémet en IR ; mais il est aussi chauffé par sa chute vers l'étoile. |
| sont variables, apériodiques (bien que certaines montrent une périodicité, due sans doute à la présence de taches) ; | l'étoile n'a pas encore atteint son équilibre. |
| les variations se montrent dans toutes les longueurs d'onde, depuis l'infrarouge jusqu'aux rayons X ; | |
| ces variations se retrouvent dans l'intensité et la largeur des raies ; | |
| sont de faible masse, typiquement inférieure à 2 ou 3 masses solaires | |

On sépare les T Tauri en deux classes, selon l'intensité de la raie Hα :

- T Tauri classiques (CTTS, pour "Classical T Tauri Stars") ;
- T Tauri à faibles raies (WTT, pour "Weak Line T Tauri Stars").

Elles se différencient par la largeur des raies d'émission : dans les T Tauri à faibles raies, la largeur de la raie Hα est très faible. Ceci est le moyen quantifiable de les distinguer. Mais on observe également un très faible excès en IR, et pas du tout en UV.

**Modèle**



Ce schéma montre une étoile T Tauri telle qu'on la conçoit actuellement. L'étoile elle-même, au centre en jaune, est encore deux ou trois fois plus grosse que lorsqu'elle sera sur la Séquence Principale. Elle est entourée par un disque d'accrétion, reste du nuage qui lui a donné naissance (en bleu, vu par la tranche).

Les premiers modèles supposaient que le disque touchait l'étoile, et l'alimentaient ainsi en matière. Il était en orbite képlérienne autour de l'étoile. Mais ces modèles se heurtaient à une difficulté majeure : en tombant, la matière communique du moment angulaire de rotation à l'étoile, et celle-ci devrait tourner à une vitesse linéaire de 120 km/s, ce qui est loin d'être observé : la vitesse réelle est de l'ordre de 20 km/s.

Il est assez normal de penser que l'étoile possède un champ magnétique, puisqu'elle est en rotation, et constituée de particules chargées. Alors, ce champ magnétique avec le vent stellaire très fort, produit un vide dans le disque, qui se trouve donc éloigné de l'étoile. Le disque se trouve dans le plan équatorial de l'étoile, et le champ magnétique est un champ dipolaire, orienté grossièrement selon l'axe de rotation.

Alors, la matière ionisée tombant vers l'étoile, est canalisée par les lignes de champ et perd une grande partie de son moment de rotation.

Enfin, le vent stellaire très violent qui s'échappe de l'étoile, ne peut réellement s'éloigner que dans les régions polaires, là où la densité de matière le lui permet. Cette fuite est d'ailleurs facilitée par le champ magnétique, et produit deux jets polaires, symétriques par rapport à l'étoile et à son disque d'accrétion. Il est de l'ordre de 10-7 M / an, mais de courte durée. De ce fait, ma masse perdue se limite à 0,1 M .

---=OO=---

# Les géantes rouges



**Définition**

Les géantes rouges sont les étoiles qui ont terminé la fusion centrale de l'hydrogène, et fusionnent l'hélium en leur centre.

Leur cœur est beaucoup plus compact et chaud que celui d'une naine. Leur enveloppe, beaucoup plus chauffée par le bas, est très dilatée, ce qui justifie le qualificatif de géante. La surface de l'étoile (sa photosphère) est donc très éloignée de la source de chaleur. Elle est de ce fait relativement froide, ce qui lui donne une couleur rouge.

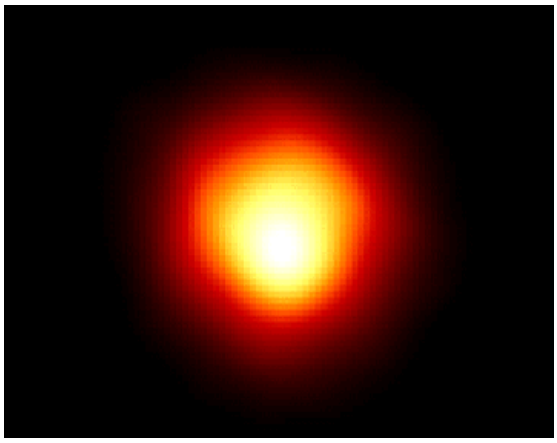
La longévité des géantes rouges est très faible, comparée à celle d'une naine.

La gravité dans les régions centrales est beaucoup plus forte. Pour maintenir l'équilbre, production d'énergie beaucoup plus importante longévité beaucoup plus faible

**Bételgeuse**

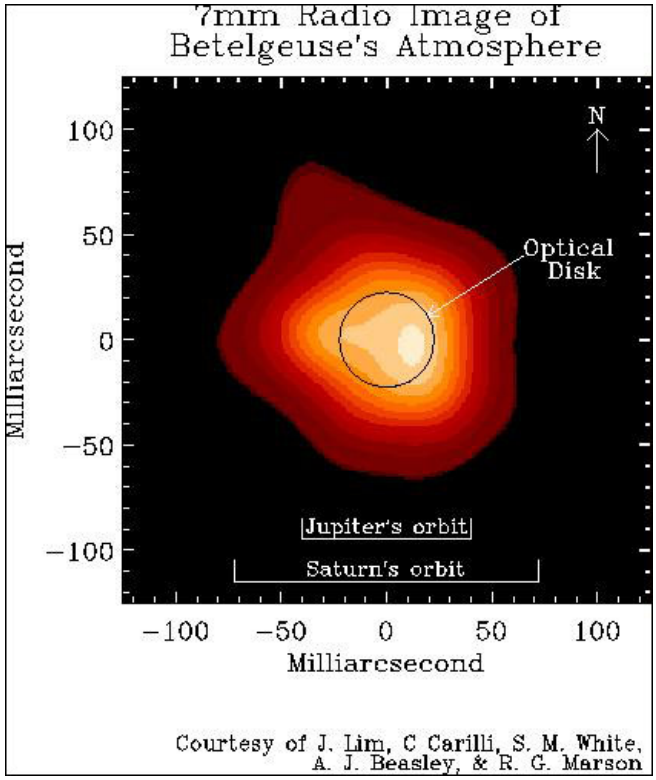
Bételgeuse est une supergéante rouge très belle à l'œil nu. Elle se trouve dans la constellation d'Orion, à près de 600 AL de nous, et montre une belle coloration (pour se souvenir quelle est Bételgeuse, il suffit de penser que Bételgeuse, dont le nom commence par B, est Rouge, Alors que Rigel est Bleue). Bételgeuse est 10 fois plus massive que le Soleil.

Dans un télescope normal, il est impossible de résoudre sa surface, mais avec l'interférométrie on peut mintenant l'imager, à faible résolution encore. On a donc pu mesurer directement son diamètre, et trouvé qu'elle est 600 fois plus grosse que notre Soleil.



Surface de Bételgeuse photo HST crédits A. Dupree, R. Gilliland

Observée en radio à 7 mm, sa surface montre de grands panaches convectifs qui s'élèvent à grande hauteur dans l'atmosphère.


7mm Radio Image of
Betelgeuse's Atmosphere
N
Optical
Disk
Jupiter's orbit
Saturn's orbit
100
50
0
−50
−100
Milliarcsecond
−100
−50
0
50
100
Milliarcsecond
Courtesy of J. Lim, C Carilli, S. M. White,
A. J. Beasley, & R. G. Marson

---=OO=---




**Définition**

| |
|---|
| Naine, parce que minuscule ;<br><br>Blanche, parce que très chaude. |

Les *naines blanches* représentent l'aboutissement de l'évolution des étoiles de masse relativement faible. C'est en particulier la destinée de notre Soleil.

Une naine blanche est une étoile de masse comparable à celle du Soleil, mais dont le diamètre est comparable à celui de la Terre. Elle est donc très compacte, et sa densité très forte.

Elle ne produit plus d'énergie, et se refroidit lentement. Son cœur est inerte (plus aucune activité nucléaire).

Lors de sa formation, sa température superficielle est de l'ordre de 100.000 K , et sa température centrale très élevée. Nous verrons qu'il y a deux types de naines blanches, de composition chimique différente, et la température en dépend. Les plus chaudes sont à 100 millions de degrés.

La décroissance de température, assez rapide au début, est de plus en plus lente. Elle tend à s'équilibrer avec celle du milieu interstellaire, de l'ordre de quelques dizaines de Kelvins, mais il lui faut pour cela des milliards d'années.

L'équilibre d'une naine blanche provient de la pression de dégénérescence des électrons. Les noyaux sont très libres de leurs mouvements au début, puis les forces électrostatiques les forcent à s'arranger en un réseau cristallin. Une naine blanche refroidie, dite *naine noire*, est donc un énorme cristal d'hélium ou de carbone, selon son origine. Un diamant d'une masse solaire, de quoi faire rêver…

**Carte d'identité**

| **rayon** | **masse** | **masse volumique** |
|---|---|---|
| 10.000 km | 0,08 M à 1,4 M | $10^6$ g cm$^{-3}$ |
| **vitesse d'évasion** | **champ magnétique** | **magnitude abs.** |
| 0,02 c | $10^{12}$ à $10^{13}$ Gauss | +10 à +16 |

La magnitude absolue des naines blanches étant de +10 à +16, elles sont très peu lumineuses, et donc visibles seulement si elles sont très proches de nous. La magnitude absolue du Soleil est de +5. Les naines blanches les plus brillantes sont donc 50 fois moins lumineuses que lui, et les moins brillantes 25.000 fois moins.

La naine blanche est un véritable solide cristallin.

Il est facile d'évaluer la masse volumique d'une naine blanche, dont la masse est de l'ordre de celle du Soleil (2 $10^{30}$ kg), et le rayon de l'ordre de 10.000 km. Son volume est :

$V = 4/3\ \pi\ r^3 = 4/3\ \pi\ 10.000^3\ km^3 = 4,189\ (10^4)^3\ km^3 = 4,189\ 10^{12}\ km^3$

et sa masse volumique :

$\rho = 1\ M / V = 2\ 10^{30}\ kg / 4,189\ 10^{12}\ km^3 = 0,4777\ 10^{18}\ kg\ km^{-3} = 0,4777\ 10^{18}\ 10^3\ g\ (10^5)^{-3}\ cm^{-3} = 0,4777\ 10^{18} 10^3\ g\ 10^{-15}\ cm^{-3} = 0,4777\ 10^6\ g\ cm^{-3}$

Champ magnétique de 1.000 à 10.000 milliards de Gauss (de 1.000 à 10.000 milliards de fois le champ magnétique terrestre). Ceci s'explique tout simplement par la contraction du cœur de l'ancienne étoile, qui a entraîné le champ magnétique. La quantité de magnétisme est conservée, mais condensée dans un volume un million de fois plus petit, il est donc de l'ordre de 1 million de fois plus intense.

**Formation**

Une étoile normale tient en équilibre tant que les réactions nucléaires internes sont capables d'équilibrer la gavitation. Ceci se réalise pendant la

plus grande partie de la vie de l'étoile, par la fusion centrale de l'hydrogène qui produit énormément d'énergie.

Lorsque l'hydrogène est épuisé, cet équilibre est rompu, et la gravitation l'emporte.

Le cœur de l'étoile reprend alors sa contraction, augmentant le densité et dégageant de l'énergie gravitationnelle. Cet apport d'énergie entraîne une augmentation de la température. Cette hausse se propage dans tout le cœur de l'étoile, et certaines couches proches voient leur température atteindre les 10 à 15 millions de degrés nécessaires à la fusion de l'hydrogène. Si le centre même de l'étoile est devenu inerte, son enveloppe proche est une nouvelle source d'énergie.

Dans le cœur de l'étoile, la matière est à très haute température (quelques dizaines de millions de degrés). Dans ces conditions, elle est ionisée, et donc se présente sous une forme particulière. Les noyaux lourds ont une faible mobilité, alors que les électrons légers peuvent se déplacer très vite. Ils constituent un gaz de particules chargées électriquement.

Ces particules possèdent une autre propriété de nature quantique : elles possèdent un spin (moment cinétique), dont la valeur est 1/2. Toutes les particules ayant un spin demi-entier obéissent à la statistique de Fermi-Dirac, contrairement à celle de spin entier, qui obéissent à la statistique de Bose-Einstein. On appelle alors les premières des *fermions*, les secondes des *bosons*.

La statistique de Fermi-Dirac interdit à deux fermions de se trouver dans le même état quantique. Deux fermions ne peuvent donc avoir à la fois la même énergie et la même position.

Lorsque la gravité comprime le gaz d'électrons au cœur de l'étoile, les électrons se rapprochent progressivement les uns des autres… jusqu'au moment où cet effet quantique va devenir prépondérant. Alors, les positions se rapprochant, les énergies doivent différer de plus en plus. De deux électrons proches, l'un au moins doit posséder une grande énergie cinétique, donc se déplacer à grande vitesse. Dans son mouvement, il va rapidement heurter un noyau, auquel il va communiquer son énergie. Ces chocs, appliqués à d'innombrables noyaux, créent une pression qui va bloquer la contraction de l'étoile. On dit que cette matière est dégénérée.

Le déplacement de la fusion vers l'extérieur va se poursuivre, jusqu'à ce que :

- la masse étant trop faible, la pression quantique des électrons bloque définitivement la contraction. L'étoile a atteint un nouvel équilibre, sans production d'énergie. Son diamètre est devenu très petit, de l'ordre de 10.000 km (proche du diamètre de la Terre). C'est une *naine blanche à cœur d'hélium* (l'hélium qui a été produti par la fusion de l'hydrogène au cours de la Séquence Principale).
- la masse est suffisante pour comprimer le cœur à tel point que la température centrale atteigne les 100 millions de degrés. Alors, l'hélium qui a été produit sur la Séquence Principale va commencer à fusionner. C'est une nouvelle source d'énergie, qui va remettre l'étoile en équilibre. Cette étoile deviendra une naine blanche, en équilibre par la pression de dégénérescence des électrons, si sa masse es inférieure à 1,4 masses solaires. Lorsque ceci arrivera, la fusion de l'hélioum aura produit un cœur de carbone et oxygène, baignant dans un gaz d'électrons dégénérés. Un tel objet est une *naine blanche à cœur de carbone*.
- les objets plus massifs auront une autre destinée, et ne deviendront pas des naines blanches.

**Evolution d'une naine blanche**

A la fin de la Séquence Principale, la fusion migre du centre de l'étoile vers des couches de plus en plus éloignées. La température des couches externes augmente, entraînant une augmentation de la vitesse des atomes. Correlativement, l'enveloppe grossit un peu, et les atomes les plus extérieurs subissent de ce fait une gravité moindre. Moins liés à l'étoile, possédant une vitesse plus grande, il leur est plus facile de s'en échapper. Ils produisent donc un vent stellaire important, qui entraîne une évaporation des couches externes. La couverture qui cache le cœur s'amincit, et la température superficielle de l'étoile augmente. Elle dépasse les 10.000 K lorsque les réactions nucléaires s'arrêtent.

A partir de là, on a un objet très chaud, ne produisant plus d'énergie. Il va obligatoirement se refroidir par rayonnement dans l'espace. Ce refroidissement ne remet pas en cause l'équilibre, puisque celui-ci est dû à un phénomène quantique indépendant de la température.

La naine blanche va donc se refroidir lentement. Au début, elle brille fortement, sa température étant élevée, et sa couleur est blanche, d'où son nom.

Ce nom est d'ailleurs trompeur, car les naines blanches ne sont plus sur la Séquence Principale, dont les étoiles sont pourtant les naines !

Le temps de refroidissement de la naine blanche est très long, et elles brillent chichement pendant des milliards d'années.

**Constitution**

A l'intérieur de la naine blanche, les électrons sont totalement libres, non liés aux noyaux. Ces derniers possédant une charge électrique, se répartissent dans l'espace disponible de façon à distribuer uniformément les charges. Entre eux, les électrons se déplacent à grande vitesse.

La densité centrale atteint $10^6$ à $10^7$ g cm$^{-3}$. La température superficielle est de 10.000 K.

Ceci se calcule à partir d'une propriété des objets compacts : l'énergie de Fermi des électrons (celle qui produit la pression quantique), est proportionnelle à la puissance 2/3 de la densité :

$$E_F = \rho^{2/3}$$

De l'ordre de 1 eV pour les conditions terrestres où $\rho$ = 1 g cm$^{-3}$, elle est donc de $E_F = (10^6)^{2/3} = 10^4$ eV dans une naine blanche. De là, on déduit la température centrale : $E_F = k\,T$, d'où :

$$T = E_F / k = 10^8 \text{ K}$$

**Atmopsphère et spectre**

Une naine blanche a un rayon de l'ordre de 10 km, soit quelques 100 fois plus petit que celui du Soleil. Alors, la gravité à sa surface, qui est inversement proportionnelle au carré du rayon, est donc $100^2$ = 10.000 fois plus forte. Pour mémoire, la gravité du Soleil est 26 fois celle de la Terre, donc la gravité à la surface d'une naine blanche est 260.000 fois plus forte que chez nous ! Un kilo y peserait 260 tonnes…

Avec une telle gravité, aucun problème pour retenir les gaz, même les plus légers. Aussi, la présence d'une atmosphère est envisageable. Mais *a contrario*, on doit s'attendre à ce qu'elle soit très concentrée près de la surface, avec une pression énorme.

Etant donné que la surface de la naine blanche est portée à très haute température (au moins dans la jeunesse de celle-ci), elle rayonne fortement. Et le rayonnement traverse une atmosphère très dense. Donc il s'y produit un phénomène d'absorption, qui donnera un spectre de raies à l'étoile. Mais les conditions physiques qui règnent à sa surface étant très différentes de celles qu'on observe sur une étoile normale, on doit s'attendre à des différences importantes.

Luyten a proposé de noter les naines blanches avec la lettre D, placée devant celle qui désigne le type spectral. Ce dernier est déterminé par une ressemblance de spectre, ou tout simplement par une couleur analogue. Aucun naine blanche de type DM n'a été trouvée (ce serait une naine blanche rouge…). Certaines naines blanches montrent un spectre continu, dépourvu de toute raie spectrale. Le type DC leur a été alloué. D'autres types spectraux spéciaux ont été définis pour ces objets.

**Relation Masse-Rayon**

Dans les conditions qui règnent à l'intérieur d'une naine blanche, les électrons occupent des niveaux d'énergie de plus en plus hauts, car les plus bas sont tous peuplés en premier (définition de la matière dégénérée).

C'est une relation trouvée par Chandrasekhar (1931) entre la masse et le rayon des naines blanches. Contrairement à une planète, plus une naine blanche est massive, plus son rayon est petit ! A la limite, R = 0, m = 1,44 M .

Applet relation masse-rayon pour une naine blanche

Relation Masse-Rayon pour une naine blanche

L'animation ci-dessus montre la relation existant entre le rayon d'une naine banche et sa masse, en comparaison avec les mêmes paramètres pour une étoile de la Séquence Principale. On voit à gauche une étoile naine jaune (Séquence Principale), et à droite une naine blanche. Les échelles sont notées en dessous, car les deux objets ne sont pas dessinés à la même ! Une naine blanche d'une masse solaire a un rayon de 0,013 rayons solaires, alors qu'évidemment une étoile de la Séquence Principale de même masse à un rayon d'un rayon solaire. Le rapport entre les deux est donc d'une centaine, et il est impossible de les dessiner ensemble. L'animation a pour but de montrer que, lorsque la masse croît, le rayon d'une naine croît également comme le bon sens l'indique, alors que celui d'une naine blanche décroît. Si on y ajoute de la matière, la naine blanche diminue…

**Pression**

La pression est indépendante de la température. Elle est due à l'agitation des électrons dégénérés. Plus la gravité est forte, plus les électrons se déplacent rapidement dans l'étoile. Mais ils ne peuvent dépasser la vitesse de la lumière ! Lorsqu'ils s'en approchent, on dit qu'ils sont relativistes. Lorsqu'ils en sont très près, on les dit ultra-relativistes. Cette caractéristique dépend de la masse : c'est pour une grande masse que les électrons vont vite.

Que se passerait-il si la masse augmentait ? Les électrons ne pourraient pas aller plus vite, et donc ne pourraient plus augmenter la pression de dégénérescence. Alors, rien ne pourrait plus s'opposer à la gravité, et l'objet devrait s'effondrer. C'est ce qui montre que la masse d'une naine blanche a une limite supérieure. La théorie permet d'évaluer cette masse limite, mais montre qu'elle dépend de la composition chimique de l'étoile. Or il existe deux types de naines blanches, qui dépendent encore de la masse : les naines blanches à cœur d'hélium, et celles à cœur de carbonne et oxygène.

**Structure**

En raison de la très forte gravité qui règne à la surface de l'étoile, une différenciation se produit, et les éléments plus lourds que l'hydrogène tombent vers le fond. Il ne reste qu'une atmosphère d'hydrogène très pur. Ainsi, 80 % des naines blanches ont une atmosphère d'hydrogène pur, les 20 % restant ayant une atmosphère d'hélium pur également.

Dans le cœur de la naine blanche, les électrons sont totalement dégénérés. Ils confèrent à l'étoile une très grande conductivité thermique, et la rendent à peu près isotherme. Mais en allant vers l'extérieur, la densité diminue. La dégénérescence baisse donc, et la conductibilité thermique avec. L'évacuation de la chaleur est de moins en moins efficace en allant vers la surface, si bien que le transfert radiatif ou convectif prend le relais. L'étoile est donc entourée d'une couche non dégénérée, dans laquelle la température chute rapidement de l'intérieur vers l'extérieur. Cette couche isole l'intérieur isotherme, de l'espace environnant. A la base de cette enveloppe, la densité est de l'ordre de $10^3$ g $cm^{-3}$.

Cette enveloppe est très mince, elle occupe moins de 1 % du rayon de l'étoile.

La température interne de l'étoile nous donne une limite de son contenu en hydrogène. Elle est de l'ordre de $10^6$ à $10^7$ K. S'il y avait beaucoup d'hydrogène, il fusionnerait, augmentant la luminosité. De la mesure de la luminosité et de la température centrale, on déduit donc que le taux d'hydrogène doit être inférieur à $10^{-4}$.

**Cristallisation**

Lorsque la naine blanche se refroidit, l'agitation thermique des noyaux diminue. Alors, l'interaction électromagnétique devient importante. Les noyaux étant positifs, se repoussent. Il existe une répartition dans l'espace telle que l'énergie électromagnétique soit minimale. C'est un réseau

régulier, de type cristallin.

De ce point de vue, on peut donc considérer une naine blanche évoluée comme un énorme cristal.

Mais ce cristal possède une énergie interne. Les noyaux atomiques ne peuvent être au repos, et sont animés d'une vibration. Entre les noyaux, se déplacent à grande vitesse les électrons qui assurent l'équilibre.

**Réactions nucléaires**

Ce n'est pas tout. Nous savons que les réactions nucléaires sont limitées par la répulsion électromagnétiqaue entre les noyaux. Nous avons vu que, dans les conditions relativement normales qui règnent à l'intérieur d'une étoile de la Séquence Principale, les réactions sont rendues possibles par l'agitation thermique violente qui projette les noyaux les uns contre les autres, franchissant la barrière électromagnétique. C'est pourquoi on nomme *thermonucléaires* ces réactions.

Mais dans le cœur d'une naine blanche évoluée, la température n'est plus suffisante pour assurer ces réactions. Mais la densité y est tellement grande, que les noyaux sont pressés les uns contre les autres, par la gravité. Et dans ces conditions, on montre que des réactions nucléaires peuvent se déclencher à basse température. Plus précisément, pour une masse volumique supérieure à $10^6$ g $cm^{-3}$, et une température inférieure à $10^7$ K, la dépendance du taux de réactions à la température chute, alors que la dépendance vis-à-vis de la densité augmente. A masse volumique plus élevée, et température plus basse, les réactions produites par l'écrasement deviennent non négligeables, et produisent de l'énergie.

Ces réactions, enclenchées par la densité, sont nommées *réactions pycnonucléaires*.

Il existe une densité critique en-dessous de laquelle ces réactrions ne se produisent pas. Lorsque la densité critique est atteinte, les réactions démarrent assez brusquement. Elles se produisent dans un temps relativement bref, de l'ordre de 100.000 ans.

Bien sûr, la densité critique n'est pas la même pour les différentes réactions. D'autre part, les densités nécessaires pour les déclencher ne sont pas accessibles au laboratoire. Aussi, les densités critiques sont assez mal connues. Elles augmentent avec la masse des noyaux. La densité critique de l'hydrogène est de l'ordre de $10^6$ g $cm^{-3}$, celle de l'hélium de $10^9$ g $cm^{-3}$, et celle du carbone de $10^{10}$ g $cm^{-3}$.

**Vents stellaires**

$dM = 2\ 10^{-13}\ L^{1,4}\ R^{0,6} / M$

pour le Soleil : $2\ 10^{-14}$ M / an

pour les géantes : $10^{-8}$ à $10^{-6}$ M / an

supergéantes : $5\ 10^{-6}$ à $4\ 10^{-5}$ M / an

En faisant un calcul inverse, on montre que la masse initiale des NB est < 8 M , et celle des étoiles à neutrons est < 40 M .

Il y a des électrons relativistes, puisque la matière est totalement dégénérée. Ils s'échappent en spiralant autour du champ et sont accélérés rayonnement synchrotron radio.

**Recyclage des naines blanches**

Lorsque les deux membres d'un couple d'étoiles sont de masses différentes, la plus massive évolue le plus vite. Terminant sa Séquence Principale, elle devient géante rouge, puis termine sa vie comme naine blanche (à la condition bien sûr que sa masse initiale ait été inférieure à 40 masses solaires). Le couple est alors constitué d'une étoile normale, sur la Séquence Principale, et d'une naine blanche.

La seconde composante vient alors à épuiser son hydrogène, et quitte à son tour la Séquence Principale. Devenant géante rouge, son enveloppe grossit énormément. Si le couple était très serré, la géante rouge peut arriver à remplir son lobe de Roche. Alors, sa matière peut se déverser sur sa compagne naine blanche, dont la masse augmente. C'est essentiellement de l'hydrogène, puisqu'il s'agit des couches extérieures non transformées de l'étoile. Cet hydrogène s'échauffe en tombant sur la naine blanche, et il peut arriver à fusionner brutalement : on voit une nova.

Mais petit à petit, la masse de la naine blanche augmente. Si elle atteint la limite fatidique des 1,44 masses solaires, la pression quantique des électrons ne suffira plus à maintenir l'équilbre, et l'étoile va de nouveau s'effondrer. Elle va se transformer en étoile à neutrons.

**Recherche des naines blanches**

Il y a deux méthodes principales :

- on recherche des étoiles faibles avec de forts mouvements propres. Si le mouvement propre est important, l'étoile est forcément proche. Et si elle est faible, c'est qu'elle est réellement peu lumineuse. Parmi les étoiles ainsi trouvées, on recherche celles qui sont blanches ou bleues.
- on recherche dans des zones de l'espace où il ne devrait pas y avoir d'étoiles lointaines. C'est le cas dans la direction des pôles célestes, puisqu'on regarde dans l'épaisseur de la Galaxie, ou devant un nuage d'hydrogène absorbant (on ne voit pas ce qui se trouve derrière).

La seconde méthode a permi de trouver une nouvelle classe d'objets, des étoiles faibles mais bleues.

Historiquement, les naines blanches ont été décrites théoriquement par Chandraskhar. S'embarquant sur un bateau en partance de son Inde natale vers les Etats-Unis, il a résolu le problème à bord pendant la traversée. L'avion supersonique n'a pas que du bon…

La première naine blanche observée a été découverte indirectement avant d'être observée. Des mesures de position très précises de Sirius on mis en évidence une marche anormale sur la voute célestre. En projection sur le ciel, l'étoile devrait suivre une ligne droite. Or elle suivait une ligne ondulée, présentant une boucle longue suivie d'une boucle courte, ce motif étant répété. L'explication de ce mouvement anormal est gravitationnelle : un corps perturbateur dévie l'étoile. La différence de longueur des boucles permet de déterminer l'excentricité de l'orbite, et la masse de Sirius étant connue, la masse du corps perturbateur est calculable. Connaissant la distance de Sirius, et la sensibilité des télescopes de l'époque, il était facile de déterminer la magnitude minimum du compagnon.On a ainsi déterminé qu'il possédait une masse et une luminosité compatibles avec une nature de naine blanche.

Plus tard, des télescopes de plus grand diamètre (collectant davantage de lumière), on permis de photographier cette étoile et de vérifier les hypothèses qui avaient été émises à son sujet.

---=OO=---




Les étoiles à neutrons sont des objets compacts, les seconds après les naines blanches par ordre de densité croissante. Comme les naines blanches, ce sont des résidus d'étoiles, mais les astres qui les ont formés étaient plus massifs. Comme les naines blanches encore, leur stabilité provient de la pression quantique de dégénérescence d'un fermion, qui est dans ce cas le neutron.

Les étoiles à neutrons sont des objets à la fois théoriques et observés. Prévus par le calcul, ils ont étés découverts sous différentes formes, dont la plus connue est le pulsar.

**Processus URCA**

Lorsque la densité est très forte, les électrons ne supportent plus le poids, et l'objet se contracte. Les électrons se rapprochent des noyaux, et peuvent même y pénétrer à la faveur d'une réaction β transformant un proton en neutron :

$$p + e^- \rightarrow n + \nu_e \qquad (1)$$

p : proton, $e^-$ : électron, n : neutron, $\nu_e$ : neutrino électronique.

Mais le neutron n'est pas une particule très stable, et il se désintègre selon la réaction inverse :

$$n \rightarrow p + e^- + \overline{\nu}_e \qquad (2)$$

Ces deux réactions constituent un processus d'équilibre, l'une annulant l'effet de l'autre. Elles transforment un noyau (Z, A) de masse atomique A (nombre de nucléons, protons et neutrons), et de numéro atomique Z (nombre de protons), de la manière suivante :

$$(Z, A) + e^- \rightarrow (Z-1, A) + \nu_e$$
$$(Z-1, A) \rightarrow (Z, A) + e^- + \overline{\nu}_e$$

La première fait disparaître un électron, la seconde en crée un ; et ces deux réactions sont en équilibre. Mais cet équilibre va être rompu.

Dans le cœur d'une étoile massive, les électrons libres constituent un gaz dégénéré dans lequel baignent les noyaux. Un état dégénéré est un état dans lequel tous les niveaux d'énergie quantiques les plus bas sont occupés. Lorsque la pression est très forte, il ne reste plus de niveaux de faible énergie. La seconde des deux réactions, ne pouvant en général produire un électron de très haute énergie, se trouve bloquée. Mais la première n'est pas affectée.

Il s'ensuit que les électrons peuvent être absorbés par les protons dans le processus β de la première réaction, transformant les protons en neutrons, mais ensuite ces neutrons ne peuvent plus redevenir protons.

Les noyaux conservent le même nombre de nucléons (masse atomique A constante), mais leur nombre de protons décroît. Alors, leur énergie de liaison diminue, et ils finissent par se briser. A une densité de $10^{14}$ g $cm^{-3}$, ils sont tous brisés, et les neutrons sont libres. Dans des conditions normales, le neutron libre n'est pas stable, et se désintègre spontanément par la réaction 2. Mais dans les conditions qui règnent dans ces objets compacts, le neutron est stable.

La faible probabilité (non nulle) de produire un électron de haute énergie dans la réaction 2 permet de maintenir un taux de 0,5 % de protons et d'électrons.

Outre la conversion des protons en neutrons, le processus URCA produit des neutrinos électroniques. Ces neutrinos équilibrent la balance énergétique de la réaction :

$$\text{énergie}(Z, A) + \text{énergie}(e^-) = \text{énergie}(Z-1, A) + \text{énergie}(\nu_e)$$

Or le neutrino, particule fantôme, passe à travers l'étoile et s'échappe, emportant son énergie. Le bilan énergétique de la réaction, pour l'étoile, est donc négatif. Ce mécansime est très efficace, du fait de la très faible section efficace du neutrino. L'étoile perd énormément d'énergie, en très peu de temps.

Or pour maintenir son équilbre hydrostatique, elle a besoin de produire beaucoup d'énergie au centre. Cette perte accélère donc la contraction, qui se tourne en effondrement.

L'effondrement s'arrête lorsque, les protons ayant été changés en neutrons, l'étoile est devenue un gaz de fermions. Les neutrons jouent dans l'étoile à neutrons, le même rôle quantique que les électrons dans les naines blanches. La pression quantique de dégénérescence bloque la

contraction, à condition que la masse ne soit pas trop forte. Les neutrons peuvent supporter jusqu'à 3 M .

**Où les astronomes font fermer un casino…**

Le nom du processus a une origine qui vaut la peine d'être contée ! Le difficile problème de l'explosion d'une supernova a été résolu en partie, par la découverte de ce mécanisme, à Rio de Janeiro. La particularité du phénomène est la disparition, qui semblait bien mystérieuse, de l'énergie. Or il existait à Rio un casino un peu particulier, où l'argent des joueurs s'évaporait de façon tout aussi mystérieuse... Le nom du casino a été donné par analogie à ce groupe de deux réactions.

Quelques temps plus tard, les autorités, ayant eu connaissance de cette analogie, ont fermé le casino !

**Formation**

L'étoile à neutrons se forme à très haute température, de l'ordre de 10 milliards de degrés. Un fort flux de neutrinos entraîne un refroidissement très rapide, qui amène l'étoile à 1 milliard de degrés seulement (!) en une journée. Le refroidissement se ralentit ensuite, et il faut un siècle pour diviser encore par 10 la température, ce qui donne 100 millions de Kelvins.

Au début de l'effondrement, la pression est produite presque exclusivement par les électrons dégénérés. Plus la densité augmente, plus les électrons sont capturés par les protons pour donner des neutrons (avec émission de neutrinos). Les électrons sont ainsi progressivement remplacés par des neutrons, et finalement c'est la pression de dégénérescence des neutrons qui produit pratiquement la pression totale. Le densité centrale est alors de $2\ 10^{13}$ g cm$^{-3}$. A plus haute densité, $2{,}4\ 10^{14}$ g cm$^{-3}$, les noyaux sont pratiquement au contact, et perdent leur individualité. Il reste un gaz de neutrons, contenant quelques protons et électrons (de l'ordre de 1%).

**Equilibre**

L'équilbre d'une étoile à neutrons est assuré par le principe d'exclusion de Pauli, comme dans les naines blanches, mais appliqué ici aux neutrons (qui sont aussi des fermions).

Tout comme dans les naines blanches, il existe une masse limite, au-dessus de laquelle la pression quantique des neutrons ne peut plus supporter la gravité, et l'objet s'effondrera encore plus, pour former un trou noir. La limite se situe là où la vitesse quantique d'un neutron approche la vitesse de la lumière, ce qui correspond à une densité de l'ordre de $6\ 10^{15}$ g cm$^{-3}$. La masse limite correspondante se situe autour de 3 masses solaires.

La construction d'un modèle d'étoile à neutrons est difficile, et reste un peu floue, car il est impossible de reproduire en laboratoire les conditions qui y règnent. On n'a jamais observé directement le gaz de neutrons qui constitue le centre de l'étoile.

La nature précise de l'interaction forte n'est pas connue à très courte distance : on sait qu'elle est attractive à des distances de l'ordre du fermi (distance entre deux nucléons dans la matière normale), et devient répulsive plus près, vers 0,3 fermi. Lorsqu'elle est attractive, elle diminue la pression, et lorsqu'elle est répulsive, elle l'augmente.

Les moyens techniques actuels ne permettent pas de déterminer le potentiel d'interaction forte à des distances plus courtes encore, qui sont à considérer lorsque la masse du cœur dépasse les 3 M . Ceci se traduit par une incertitude sur les propriétés de ces objets.

La rotation, bien que très rapide, n'affecte pas la masse maximum. La gravité est si forte, que la force centrifuge reste négligeable, sauf peut-être dans un pulsar ultra-rapide.

Lorsqu'on parle de la masse d'une étoile à neutrons, il faut considérer deux choses différentes :

- la masse au repos de ses contituants ;
- la masse sensible pour les astres extérieurs.

La différence entre les deux est l'énergie de liaison, et correspond à l'énergie qui a été libérée au cours de la contraction. La masse sensible, qui influence gravitationnellement les astres environnants, est plus petite que la masse qui a formé l'étoile.

**Les hypérons**

Les hypérons sont des particules, semblables à des nucléons lourds. Ce sont tous des fermions (spin demi-entier), qui obéissent à la statistique de Fermi-Dirac (donc obéissent au principe d'exclusion de Pauli). Ils interagissent par interaction forte (ce sont des hadrons).

Les hypérons sont constitués, comme les nucléons, de trois quarks, incluant un quark étrange s (proton = uud, neutron = udd). Les hypérons sont donc des particules étranges.

Ils sont instables, et se désintègrent en proton, neutron ou méson en $10^{-10}$ à $10^{-8}$ seconde.

Quelques hypérons : $\Delta$, $\Lambda$, $\Xi$ et $\Omega$.

On trouve des hypérons dans les rayons cosmiques, et on en produit dans les accélérateurs de particules. La masse des hypérons étant plus grande que celle des nucléons, les hypérons sont moins stables, et nécessitent beaucoup plus d'énergie pour produire une paire hypéron-antihypéron.

**Contraction**

Lors de l'effondrement, les principaux paramètres physiques de l'étoile sont conservés. Ainsi, le moment cinétique de rotation ne change pas, alors que le rayon diminue fortement. Ceci entraîne une très forte accélération de la rotation, qui amène l'étoile à neutrons à tourner, d'après les

calculs, en un temps de l'ordre de la seconde !

Bien sûr, la gravité extraordinaire qui règne à la surface de cet objet empêche la force centrifuge de projetter sa matière dans l'espace. Une telle vitesse de rotation est donc parfaitement possible.

Un autre paramètre physique conservé est le champ magnétique. Comprimé dans un volume beaucoup plus petit, son intensité à la surface devient très grande.

Lorsque la densité devient suffisante, l'énergie correspondante permet la création de paires hypéron-antihypéron. On nomme cette transformation *hypéronisation du cœur* de l'étoile. Il a une influence sur les propriétés physiques, conséquences mal connues.

Une autre désintégration devient possible lorsque la densité atteint le double de la densité nucléaire :

$$n \rightarrow p + \pi^-$$

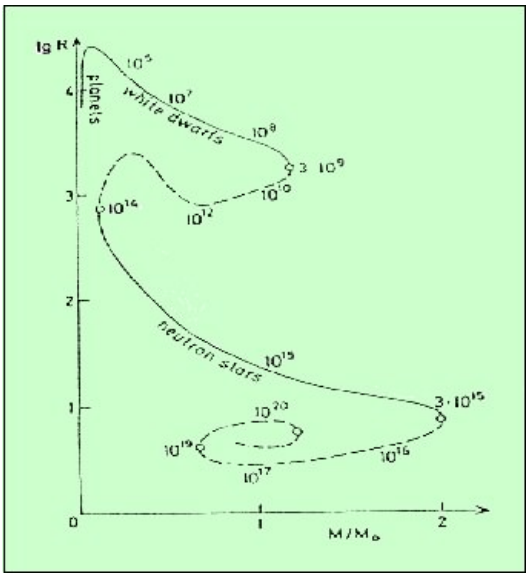
Or les $\pi$ sont des bosons, et tendent à se placer tous dans le même état quantique d'énergie minimum, donc de vitesse nulle. On appelle un tel ensemble de bosons un condensat de Bose-Einstein. Dans cette réaction, un neutron (fermion) a disparu, au profit d'un $\pi$ (boson), donc la pression quantique diminue.

Un autre problème des modèles concerne la proximité des particules. Pour représenter correctement leurs interactions, il faut résoudre le problème des n-corps, comme en mécanique céleste. Ce problème ne peut pas se résoudre de manière analytique.

Toutes ces difficultés produisent une incertitude importante dans les modèles d'étoiles à neutrons. En fait, selon le choix que l'on fait pour le potentiel, les propriétés changent. Mais il est intéressant de noter que l'observation peut, parfois, interdire certains modèles. Il est possible qu'on obtienne ainsi des renseignements sur la physique même de ces particules, dans des conditions inaccessibles au laboratoire.

Par exemple, le pulsar binaire PSR 1913+16 est une étoile à neutrons de 1,42 M . Tous les modèles (définis par une équation d'état) qui prévoient une masse limite en-dessous de cette valeur sont donc invalidés.

**Modèles**



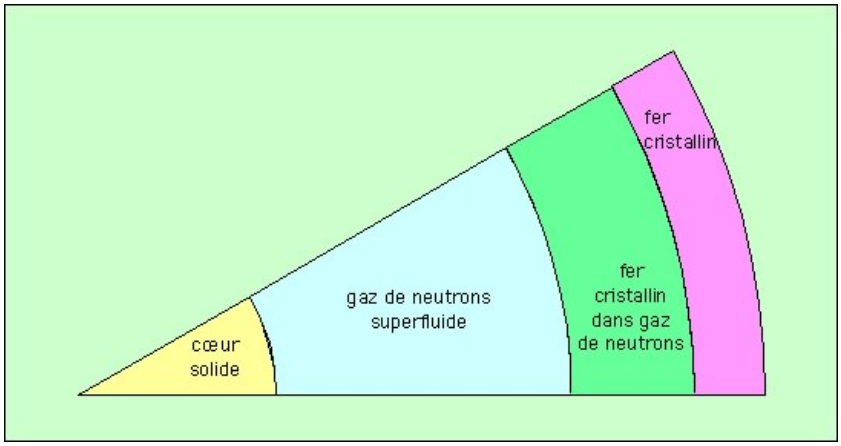
Relation masse-rayon, des planètes aux trous noirs

**Anatomie d'une étoile à neutrons**

Les valeurs ci-dessous sont calculées pour une étoile à neutrons de 1,4 M . Son rayon est de l'ordre de 10 km.

Les étoiles à neutrons ont une atmosphère, si l'on peut nommer ainsi la fine enveloppe gazeuse qui les entoure. La gravité à la surface ($g = 1{,}3\ 10^{14}$ cm $s^{-2}$) est 10 milliards de fois supérieure à celle du Soleil ($g = 2{,}7\ 10^4$ cm $s^{-2}$) ! Aussi, l'atmosphère n'est qu'une infime couche de quelques centimètres de gaz, à une température de plusieurs millions de degrés. La matière n'y est pas dégénérée.

Sous l'atmosphère, se trouve une surface solide ! C'est assez inhabituel pour une étoile, et ce simple fait suffirait à les rendre extraordinaires. Il s'agit d'une croûte métallique, constituée essentiellement de fer, dont l'épaisseur totale n'est que de 900 mètres. Sa masse volumique est de $10^6$ g $cm^{-3}$ à la surface, et atteint $2{,}4\ 10^{14}$ g $cm^{-3}$ à la base. Les atomes de fer forment un treillis, qui produit la structure cristalline. L'arrangement des noyaux de fer dans ce treillis lui assure une énergie d'interaction coulombienne minimale, et cette matière ressemble à celle qui forme l'intérieur d'une naine blanche. Elle est divisée en deux parties, la séparation se trouvant à une profondeur de 300 mètres, lorsque la masse volumique atteint $4\ 10^{11}$ g $cm^{-3}$. Au dessous de cette limite, les noyaux de fer, toujours arrangés en réseau cristallin, baignent dans un gaz de neutrons et d'électrons libres. A la base de cette croûte, tous les noyaux sont détruits, et les neutrons sont tous libres. La destruction des noyaux se fait progressivement avec la profondeur croissante.




Sous la croûte se trouve la soupe de neutrons. La masse volumique est supérieure à 2,4 $10^{14}$ g $cm^{-3}$. Elle est mélangée à une faible quantité de protons et d'électrons qui subsistent. Le gaz de neutrons est bien évidemment dégénéré, et superfluide. Le gaz de protons est de son côté superconducteur, ce qui devrait avoir une grande importance en considérant le champ magnétique. L'étendue de cette zone est d'une dizaine de kilomètres.

Enfin, il est possible - mais on n'en a pas la certitude - qu'il y ait un noyau solide au centre, d'un kilomètre de diamètre. Si c'est le cas, les neutrons doivent y former une structure cristalline. La masse volumique centrale atteint 1,3 $10^{15}$ g $cm^{-3}$.

**Observation**

On n'a pas observé directement une étoile à neutrons. Sa petite taille et sa faible brillance nous en empêchent. Mais la découverte des pulsars, puis leur intreprétation, ont donné une observation indirecte.

---=OO=---




## *Observation*

### Observations historiques et découverte

Les *pulsars* ont été découverts grâce à la **radioastronomie**. C'est Jocelyn Bell qui en a fait par hasard la première observation en 1967. Le radiotélescope de Cambridge lui a révélé un objet qui émettait des pics parfaitement périodiques, ce qui est déjà une curiosité, mais dont la période était extrêmement courte, de 1,3373 secondes ! C'était le phénomène astronomique le plus rapide connu, les plus courtes périodes déterminées à l'époque étant de l'ordre de l'heure. Chaque bip dure 0,04 seconde. L'objet était si étrange, que les astronomes de Cambridge l'ont dénomé humoristiquement LGM1 (Little Green Man), permettant de rêver à des extraterrestres qui nous contacteraient. Cette interprétation a bien sûr fait le bonheur des journalistes...

L'équipe a alors entrepris de solides vérifications, et n'a finalement publié sa découverte que plusieurs mois après. Cet objet a posé un problème assez difficile à résoudre : le phénomène physique qui le produit est totalement nouveau !

Une recherche systématique a permis ensuite de trouver de nombreux objets semblables, on en compte plus de 2.000 maintenant.

En anglais, ce type d'objets a été nommé *pulsating stars*, qui a été aussitôt abrégé en *pulsar*, mais ce sont *a priori* des objets radio. L'objet découvert par Jocelyn Bell a été catalogué sous le nom de CP 19-19 ; il est maintenant dénommé PSR B1919+21(PSR signifie pulsar, les chiffres qui suivent indiquent sa position en coordonnées équatoriales : hhmm±déclinaison ; ici, hh = 05 heures, mm = 31 minutes, et la déclinaison est +21°).

Les périodes des pulsars sont toutes très brèves : la plus longue est de 4 secondes, et la plus courte est celle du pulsar du Crabe : 0,033 seconde.

On a observé les pulsars dans d'autres fréquences radio : l'amplitude des pics peut être très différente, montrant la répartition de l'énergie en fréquence, mais la période est toujours exactement la même.

On a pensé que les pulsars étaient d'une stabilité remarquable, jusqu'à ce que des mesures très fines montrent qu'elle décroît, mais à un taux très faible, de l'ordre de $10^{-8}$ seconde par an.

### Observation en optique

L'association d'une source radio avec un objet optique a été un problème difficile, à cause du mauvais pouvoir séparateur des radiotélescopes anciens. Il a été résolu grâce à une détermination précise de la position de la radiosource. Le plus célèbre des pulsars a une petite histoire.

Les Chinois ont observé l'explosion d'une supernova le 4 juillet 1054, et l'ont notée dans leurs chroniques. Ils ont correctement mentionné la position de l'étoile dans le ciel, nous permettant aujourd'hui de voir l'endroit où elle se trouvait. On y observe une nébuleuse, nommée Nébuleuse du Crabe. C'est un nuage de gaz de forme globalement circulaire, mais montrant de nombreux filaments qui lui donnent un aspect évoquant, de loin, les pattes d'un crabe. On dispose de photos de cette nébuleuse depuis le début du XX$^{me}$ siècle, et les variations d'aspect montrent qu'elle est en expansion. La vitesse d'expansion, déterminée par effet Doppler, nous permet de calculer à quel moment a eu lieu l'explosion, et on trouve une date tout à fait compatible avec celle indiquée par les Chinois. La concordance ne laisse aucun doute, il s'agit bien des restes de la supernova. Au centre de la nébuleuse, on a pu trouver une petite étoile de magnitude 15.

Plus récemment, on a observé un pulsar, nommé PSR 0531+21, dont la position correspond à celle de l'étoile. Ceci amène l'idée qu'un pulsar puisse être associé à une supernova.

Le phénomène a été observé ailleurs, et les indiens de Chaco Canion, en Amérique du sud, ont laissé une peinture rupestre le représentant. On y voit une main, un croissant de lune, et une grosse étoile. Les doigts montrent la direction dans laquelle se trouvaient les deux astres, le calcul de la position de la lune au moment du phénomène le montre.

Sur la pierre horizontale en-dessous, on distingue facilement trois cercles concentriques, et beaucoup moins bien des vagues issues du plus grand cercle et dirigées vers la droite. Cette représentation est interprétée comme une figuration de la comète de Halley, qui était visible dans le ciel à peu près à la même époque.



Peinture rupestre de Chaco Canion

**Modèle**

Il a fallu d'abord admettre qu'un pulsar était un objet naturel, ce qui n'était pas si évident en considérant ses propriétés. Mais les théoriciens ont vite trouvé un mécanisme susceptible d'expliquer ces phénomènes sans faire intervenir les petits hommes verts...

- pour expliquer des variations d'intensité aussi rapides, il fallait admettre un objet extrêmement petit, bien plus petit qu'une planète. Tout modèle devra accepter cette propriété.
- maintenant, qu'en est-il de la masse ? On a observé des pulsars en orbite avec des étoiles, permettant de mesurer cette masse. Le résultat est simple : les pulsars ont des masses semblables à celles des étoiles du bas de la Séquence Principale : un peu au-dessus de la masse du Soleil.

On a donc trouvé des objets de masses stellaires, et de dimensions astéroïdales. Les théoriciens se sont vus obligés de considérer des objets compacts.

Les objets compacts proviennent de la contraction d'une étoile. Les étoiles tournent sur elle-mêmes, à une vitesse de l'ordre d'un tour par jour. Lorsque le rayon diminue, la rotation s'accélère, comme celle de la patineuse qui ramène les bras le long du corps. Au moment de l'effondrement du cœur d'une supernova, pour former une étoile à neutrons, le diamètre de l'étoile passe d'une valeur d'ordre stellaire ($10^6$ km) à 10 km seulement, soit un facteur $10^5$. La rotation s'accélère dans la même proportion, de l'ordre de 100.000 fois plus rapide. Une rotation de l'ordre du jour, soit de 24 × 60 × 60 secondes = 86.400 secondes, divisée par 100.000, donne justement une nouvelle période de l'ordre de la seconde. La vitesse de rotation ainsi calculée est en accord avec la fréquence des émissions radio des pulsars. Ces caractéristiques sont celles des hypothétiques étoiles à neutrons.

Des étoiles à neutrons en rotation très rapide, qui émettraient un rayonnement radio localisé à leur surface, expliqueraient donc les observations. L'émission se fait comme celle d'un phare, et si l'observateur se trouve dans le bon plan, il voit le faisceau à chaque tour, sous forme d'un éclair.

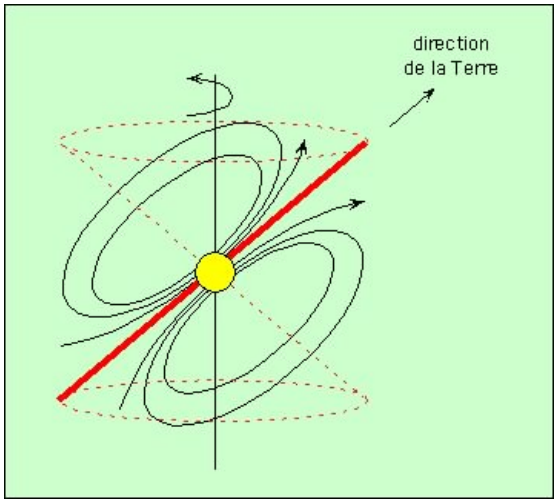
Il reste à expliquer le curieux rayonnement radio, avec le pic d'émission. Autour du pulsar se trouve une atmosphère portée à haute température, donc ionisée. Les électrons libres, pris dans le champ magnétique, sont accélérés à des vitesses relativistes. En se déplaçant dans le champ magnétique, ils spiralent et produisent un rayonnement synchrotron radio. C'est ce rayonnement que nous recevons sur Terre, à la condition que le jet soit orienté vers nous. Le jet, en tournant, se comporte comme un phare, dont le faisceau balaye l'espace. Si la Terre se trouve dans ce cône, le pulsar est détectable. Dans le cas contraire, il sera invisible. Etant donné l'angle d'ouverture du faisceau (qui n'est pas filiforme), on a calculé que 3 % des pulsars se trouvent dans une position favorable à l'observation. Nous avons dit que de nombreux pulsars avaient été détectés. Ceci signifie qu'il y en a un grand nombre, mais le nombre calculé de cette façon est compatible avec les estimations du nombre de supernovæ qui ont dû exploser dans un passé assez récent.

Lorsque l'angle est grand entre l'axe de rotation et l'axe magnétique, il peut arriver que les deux jets opposés nous soient perceptibles ; dans ces cas-là, on doit observer un pic principal, correspondant au faisceau le mieux aligné avec la Terre, et un pic secondaire à mi-période correspondant à l'autre. De tels pulsars ont été observés, ce qui renforce la crédibilité du modèle.

Revenons à l'effondrement de l'étoile. Elle possède un champ magnétique assez fort, un peu comme le Soleil. En se contractant, son champ magnétique est amplifié comme le carré du rayon. Il atteint des valeurs extraordinaires de $10^{10}$ à $10^{12}$ gauss ($10^8$ T). Le champ magnétique produit par la compression du champ intial suffit donc pour expliquer le rayonnement d'un pulsar. Dans les étoiles et les planètes, le champ magnétique n'est en général pas aligné avec l'axe de rotation. Les pôles magnétiques ne correspondent pas avec les pôles de rotation. Si c'est le cas, cet écart sera maintenu dans la contraction, et l'axe magnétique peut jouer le rôle du faisceau du phare.

Reste à comprendre pourquoi l'étoile produirait une émission radio orientée par le champ magnétique.

Ce champ magnétique représente une énergie colossale. Une particule chargée (proton ou électron) est accélérée par cette énergie. Or une particule chargée qui se déplace dans un champ magnétique (le long d'une ligne de champ) décrit non pas une droite, mais une hélice autour de la ligne. Le rayon de l'hélice est d'autant plus petit que le champ est intense. Pour tourner, la particule doit être accélérée. Et toute accélération d'une particule chargée produit un rayonnement. En l'occurence, ce rayonnement est un rayonnement synchrotron, du nom de l'accélérateur de particules qui a permi de l'observer pour la première fois. C'est ce rayonnement qui est invoqué pour expliquer les pulsars. Il est forcément dirigé selon l'axe magnétique de l'étoile :




Le rayonnement synchrotron se comporte alors comme un phare qui balaie l'espace de son faisceau. Si la Terre se trouve dans ce cône, le pulsar est détectable. Dans le cas contraire, il sera invisible. Le faisceau a un angle d'ouverture faible, mais non négligeable, qui permet de calculer que 3% des pulsars se trouvent dans une position favorable à l'observation. Nous avons dit que de nombreux pulsars avaient été détectés. Ceci signifie qu'il y en a un grand nombre, mais le nombre calculé de cette façon est compatible avec les estimations du nombre de supernovæ qui ont dû exploser dans un passé assez récent.

L'énergie rayonnée de cette façon doit être prise quelque part. Le pulsar ne produisant plus d'énergie, vit sur ses réserves. C'est son énergie de rotation qui est la source du rayonnement observé. De plus, le champ magnétique du pulsar est en interraction avec le champ magnétique interstellaire, et il en résulte un freinage de la rotation du pulsar. Un pulsar jeune tourne donc vite sur lui-même, de l'ordre de quelques tours par seconde, mais sa vitesse doit diminuer au cours du temps. C'est ce qui est observé, bien que le détail des interactions soit trop complexe et la structure du champ trop mal connue.

Les pulsars sont tous des objets relativement jeunes, car leur fréquence diminue avec le temps, de telle manière qu'au bout de quelques millions d'années, ils ne présentent plus ce phénomène. L'énergie rayonnée est bien prise quelque part : c'est l'énergie de rotation de l'étoile à neutrons qui la fournit, et par conséquent cette énergie est perdue pour l'étoile. Donc, son mouvement se ralentit. Le lien entre rotation et émission fait que, au bout d'une certain temps, le pulsar n'aura plus assez d'énergie pour émettre. En quelques millions d'années, la rotation d'un pulsar devient trop faible pour que le signal émis soit encore significatif.

**Son d'un pulsar**

Les signaux radio des pulsars sont des clics, plus ou moins proches les uns des autres selon la vitesse de rotation. Il est facile de reproduire ce signal par un haut-parleur, et le résultat est surprenant. En voici quatre, classés par fréquence croissante :

| Vela | Le Crabe | PSR J0437-4715 | PSR B1937+21 |
|---|---|---|---|
| | | | |
| 89 ms | 33 ms | 5,757 ms | 1,558 ms |
| Objet permanent le plus lumineux en gamma | Découvert en 1968. Ralentissement de 38 ns par jour. | Possède un compagnon de faible masse ; la période orbitale est de 5,7 jours | Premier pulsar milliseconde, découvert en 1982 |

Non, le premier n'est pas l'enregistrement d'un chalutier au départ du port, mais bien le pulsar Vela ! (Vela, les voiles, on reste en mer...).

Le dernier fait entendre une note intermédiaire entre le ré# et le mi 4, le troisième est pratiquement un fa 2. Les deux premiers sont des infrasons, peut-être audibles par les baleines...

**Pulsars binaires**

On appelle *pulsar binaire* un pulsar en orbite avec un autre astre, en général une étoile ordinaire de la Séquence Principale, mais plus rarement (parce que la durée de vie est plus brève) avec une géante rouge. L'existence de pulsars binaires ne doit pas nous surprendre, puisque les étoiles naissent très souvent en couple, si ce n'est par groupes plus importants. La masse des deux membres du couple n'a pas de lien direct, aussi l'un des deux, plus massif que l'autre, va évoluer plus vite et devenir un pulsar, alors que l'autre est encore dans un stade d'évolution plus précoce.

**Les pulsars milliseconde**

On a observé quelques 150 pulsars qui tournent encore plus vite que ce qui a été mentionné plus haut. Certains atteignent presque les 1.000 tours par seconde, donc une période presque aussi courte que la milliseconde. Ce n'est pas la contraction au moment de l'effondrement qui justifie une telle vitesse : un mécanisme doit obligatoirement avoir accéléré le pulsar. Ce mécanisme n'est pas encore déterminé avec certitude, mais il provient probablement de l'accrétion de matière par le pulsar, matière en provenance d'une autre étoile. Le moment cinétique de la matière accrétée est transféré au pulsar, dont la rotation s'accélère.

Cette autre étoile peut être un compagnon orbital du pulsar, puisque les pulsars binaires doivent être nombreux. En effet, les pulsars milliseconde sont souvent des pulsars binaires. Mais il pourrait aussi s'agir d'étoiles voisines, à la condition que la densité d'étoiles soit assez grande. Ce qui est le cas dans les amas globulaires. Justement, sur tous les pulsars milliseconde connus, 80 se trouvent dans un tel environnement. C'est en

particulier le cas du pulsar le plus rapide connu aujourd'hui, PSR J1748-2446ad, qui effectue 716 tours par seconde, et qui se trouve dans l'amas globulaire Terzan 5.

On appelle donc *pulsar milliseconde* un pulsar dont la vitesse de rotation est supérieure à celle que la contraction seule pourrait expliquer. Aucun n'atteint les 1.000 tours par seconde, et donc leurs périodes sont toutes supérieures à la milliseconde. La vitesse standard pour un pulsar milliseconde est de l'ordre de 300 tours par seconde, ce qui lui donne une période de l'ordre de 33 ms.

Peut-on trouver, dans l'avenir, des pulsars encore plus rapides ? Bien sûr, si comme en sport on recherche le record au millième de seconde, on en trouvera probablement d'un peu plus rapides. Mais il semble bien qu'il y ait une limite théorique : si le pulsar tournait à plus de 1.000 tours par seconde, il générerait des ondes gravitationnelles, qui lui feraient perdre très vite de l'énergie, et donc le ralentirait. Le temps pendant lequel on pourrait observer de telles vitesses serait très bref, rendant cette observation fort improbable.

**Age d'un pulsar**

Nous avons dit que les pulsars sont jeunes, puisque leur énergie de rotation est dissipée par leur rayonnement. Lorsqu'elle est épuisée, ce ne sont plus des pulsars, mais de simples étoiles à neutrons. Comment évaluer l'âge d'un pulsar ? En lui regardant les dents, ce qui se traduit ici par en mesurant la vitesse de rotation. Plus elle est élevée, plus il est jeune. Une formule a été définie pour donner un âge approximatif à un pulsar, en fonction de sa fréquence (donc de sa vitesse de rotation).

On appelle temps caractéristique d'un pulsar le résultat suivant :

$$t_c = P / 2 P'$$

Elle indique une estimation du temps que le pulsar a mis pour ralentir jusqu'à sa période actuelle P. P' est la dérivée de P par rapport au temps, c'est donc une mesure du ralentissement de la rotation. Sur une durée de quelques mois à quelques années, elle est mesurable.

Mais deux astronomes Canadien, Victoria Kaspi et Mallory Roberts, ont observé le pulsar du Sagittaire à l'aide du satellite X Chandra. La position obtenue pour le pulsar le place très près du centre du reste de supernova G11.2-0.3. Cette coïncidence justifie l'origine commune. De plus, les pulsars quittent assez rapidement leur lieu de naissance, car l'explosion qui les engendre est en général asymétrique. Il s'ensuit une poussée violente, qui propulse le reste de l'étoile à grande vitesse. Ce pulsar étant proche du centre de la nébuleuse, n'a pas eu le temps de s'en éloigner.

La supernova qui a donné naissance à cet objet a été observée par les Chinois (encore eux), tout comme l'explosion du Crabe en 1054. C'est donc le second pulsar dont on connait l'âge exact. Ils ont noté l'explosion d'une supernova (en parlant d'étoile invitée) en 386 après J.-C. Ce qui affecte au pulsar un âge de 1.622 ans. Or la formule lui assigne 24.000 ans d'après sa fréquence de 14 tours par seconde.

Ce pulsar tournant lentement, et n'ayant pas eu le temps que l'on imagine nécessaire à son ralentissement, a peut-être toujours tourné lentement. Mais ceci remettrait en cause notre connaissance de ces astres, notamment leur accélération lors de la contraction.

**Tremblements d'étoile**

L'observation de la période d'un pulsar montre une très grande régularité, avec une décroissance lente. Mais on a observé parfois de brusques accélérations de la rotation.

On suppose que ces accélérations sont dûes à des tremblements d'étoile. La croûte de fer de l'étoile à neutrons est en tension gravitationnelle (exactement comme la croûte terrestre avant un séisme). Et comme sur Terre, la tension trop forte entraîne finalement une rupture, avec un réarrangement des forces. Ceci se traduit, pour une étoile à neutrons, par une légère contraction, qui entraîne une accélération de la rotation.

**Pulsars doubles**

On a observé un *pulsar double* (les deux composantes sont des pulsars). Par exemple PSR 1913+16 présente une période orbitale de 7 h 45 mn, et ses composantes ont des périodes radio de 1,616 s et 0,059 s. Ces couples sont difficilement observables, puisque les deux composantes doivent envoyer leurs faisceaux vers la Terre, ce qui est assez rare.

Ce couple est exceptionnel ! Il est constitué de deux objets en orbite elliptique très serrée, la période orbitale étant de 7,75 heures. Au plus près, les deux objets se rapprochent à 770.000 km ! C'est deux fois la distance Terre-Lune... Au plus loin, ils sont à 3.400.000 km. La vitesse variable des objets sur l'orbite entraîne une variation de l'espacement entre les pulses. Le calcul de ces variations permet de retrouver les paramètres orbitaux. On en déduit que la vitesse orbitale au plus près est de 300 km/s.

Les deux corps ont une masse de l'ordre de celle du Soleil. Ce sont donc des objets compacts (sinon ils se heurteraient). La Relativité, qui explique l'avance du périhélie de Mercure, prévoit une avance bien plus importante dans le cas de ce pulsar. En une journée, l'orbite tourne autant que celle de Mercure en un siècle ! Cette avance est observée.

De plus, une révolution aussi serrée devrait produire des ondes gravitationnelles. Prédites par la Relativité Générale, elles n'ont jamais été observées. Mais le pulsar double montre une diminution de sa période de révolution : en 12 ans, elle a diminué d'une seconde. D'où vient cette diminution ? Elle s'explique par une perte d'énergie, qui doit être rayonnée. Ceci est en excellent accord avec les ondes gravitationnelles prévues par la Relativité Générale, qui déforment l'espace-temps. C'est la **première vérification**, indirecte, de l'existence de ces ondes. Des vérifications directes sont en cours, à l'aide en particulier de l'instrument VIRGO en cours d'installation près de Pise.

**Pulsars en X**

Les étoiles naissent très souvent par couples. Les deux membres d'un couple n'ont pas forcément la même masse, et donc n'évoluent pas à la même vitesse. La plus massive termine sa Séquence Principale la première, et parfois évolue en étoile à neutrons. Si l'axe magnétique passe par la Terre dans la rotation de l'étoile, elle apparaîtra comme un pulsar.

L'autre membre du couple évolue plus tard, devenant géante rouge. A ce stade, il rempli son lobe de Roche, et la matière qui se trouve à sa surface ne lui est plus vraiment liée gravitationnellement. Elle se déverse alors sur l'étoile à neutrons (ou le pulsar). Le champ magnétique d'une étoile à neutrons étant très fort, canalise cette matière et la dirige vers les pôles magnétiques. Etant fortement comprimée par les lignes de champ magnétique, la matière en chute sur l'étoile à neutrons se chauffe tellement qu'elle émet des rayons X.

Les pulsars qui sont dans une telle configuration nous apparaissent donc comme pulsars X, visibles dans cette gamme d'ondes.

**Pulsars X anormaux**

Certains pulsars X présentent des caractéristiques étranges, en particulier leur champ magnétique est beaucoup plus intense que la normale, atteignant $10^{10}$ teslas. Ils sont nommés AXP (*Anomalous X-ray Pulsar*). On en connait à peine une dizaine, ce qui représente une très faible proportion de pulsars.

Ce sont des objets jeunes, comme en attestent les restes de supernovæ qui les entourent, et qui n'ont pas eu le temps de se dissiper.

Outre leur très fort champ magnétique, leur période est anormalement longue en rapport avec leur âge, de l'ordre de 6 à 12 secondes : la décélération due à l'émission dans les ondes radio et X ne suffit pas à expliquer une rotation si lente. De plus, le ralentissement, qu'on peut mesurer très précisément, est beaucoup plus rapide que pour les autres pulsars. Ces caractéristiques rapprochent les AXP des magnétars, qui ont été étudiées à propos des sursauts gamma. Les magnétars sont des étoiles à neutrons très magnétisées, dont le champ a été amplifié lors de l'effondrement par des ondes de choc. Ces magnétars ont parfois leur axe magnétique passant par la Terre, ce qui en fait des pulsars.

**Etoiles étranges**

Lorsqu'une étoile à neutrons dépasse la masse limite de 3 masses solaires, la pression quantique des neutrons ne peut plus supporter la gravité. On envisage donc que l'astre s'effondre en trou noir.

Mais Edward Witten a envisagé une possibilité théorique, déduite du modèle standard des particules élémentaires. Les protons et neutrons qui constituent la matière ordinaire sont des assemblages de quarks, réunis par l'interaction forte, ou force de couleur. Un proton est constitué de deux quarks up et d'un quark down (uud), alors qu'un neutron est un assemblage de deux quarks down et d'un quark up (udd). Ce sont les deux quarks les plus légers. On sait que la force de couleur est d'autant plus forte que la distance qui sépare les particules est plus grande. A très courte distance, elle devient pratiquement insensible, c'est ce que l'on appelle *liberté asymptotique*.

Dans les conditions de pression, et de température, qui règnent à l'intérieur d'une étoile à neutrons, si elle s'effondre, on envisage que les neutrons eux-même soient détruits, l'énergie disponible séparant les quarks constituant. Ceci expliquerait la présence de quarks up et down uniquement. Mais la collaboration G 0, groupe de chercheurs en physique, a mené des expériences qui ont montré que le proton, bien que constitué de deux up et un down, contient également des quarks virtuels étranges. Ceux-ci sont produits par les mouvements des quarks up et down dans le proton : lorsque deux quarks s'éloignent, l'énergie de rappel augmente. Quand elle atteint l'énergie suffisante, une paire s s/ est créée. Elle s'anihile très rapidement, mais entre-temps elle a pu modifier transitoirement les propriétés du proton. Les expériences ont mis en évidence cette influence sur les propriétés des protons (leur moment magnétique en particulier). Ce qui est valable pour le proton doit l'être pour le neutron, expliquant la présence de quarks étranges dans ces étoiles, et justifiant leur nom.

Lorsqu'une étoile étrange est formée, la force qui réunit ses quarks constituants est l'interaction forte entre quarks, et non plus la gravité. Ceci parce que la gravité est beaucoup moins intense que l'interaction forte.

L'étoile tout entière serait alors devenue une particule, de nature baryonique. Cette transformation s'accompagne d'une diminution du rayon de l'étoile, et d'une augmentation de la densité. Cette dernière atteindrait $2\ 10^{15}$ g $cm^{-3}$, et le rayon serait inférieur à 10 km.

Deux pulsars, considérés comme étoiles à neutrons, paraissent plus froids et plus petits que le voudrait leur type. Ce pourait être des étoiles étranges, mais rien ne permet de l'affirmer aujourd'hui. Il faudra attendre pour savoir si cette possibilité théorique a une réalité. Si c'était le cas, on apprendrait beaucoup sur la physique des particules.

RX J1856.6-3754 est une étoile visible dont la distance est bornée par l'existance d'un nuage situé derrière elle, et de distance connue. Si les mesures sont exactes, son diamètre serait de 10 km seulement, deux fois trop petit pour que l'objet soit une étoile à neutrons. Il faudrait admettre que ce soit une étoile étrange. Des recherches seront nécesaires encore avant d'en arriver là.

---=OO=---




Le mot *trou noir* n'est encore souvent qu'un somptueux déguisement de notre ignorance
Jean-Pierre Luminet

La notion de trou noir est aussi ancienne que la mécanique de Newton. Cependant, elle ne prend tout son sens que dans le cadre de la Relativité Générale, car les conditions qui règnent dans un tel objet ne sont pas compatibles avec les théories classiques. Sont-elles compatibles même avec la Relativité Générale ? Celle-ci a été élaborée pour des champs gravitationnels très forts, mais comme nous le verrons, l'horizon d'un trou noir marque la frontière de nos connaissances physiques.

**Rappel**

En Relativité Générale, l'espace-temps est courbé par les masses. La masse d'une étoile, par exemple, déforme la géométrie de l'espace-temps autour d'elle. Une planète qui est lancée à son voisinage, suit une géodésique de l'espace-temps, c'est-à-dire une courbe de moindre action. Il se trouve que cette courbe est une ellipse, produite par la déformation. En fait, la planète suit exactement le même genre de ligne que s'il n'y avait pas d'étoile : elle poursuit son chemin par inertie (elle continue sur sa lancée). Mais en l'absence de masse, le chemin est droit, en présence de masse, il est courbe. Si l'espace-temps n'est pas déformé, elle va tout droit ; sinon, elle suit les déformations.

Ainsi, toute particule lancée dans l'espace-temps suivra les géodésiques de l'espace, qu'elle soit massive ou non ! C'est ainsi qu'un photon, de masse nulle, sera dévié de la même manière qu'une étoile. On possède aujourd'hui de multiples preuves observationnelles de cette affirmation.

**Définition élémentaire**

Un trou noir est un objet dont la gravité est assez forte pour empêcher la lumière (et toute forme de matière) d'en sortir.

En mécanique classique, on définit la vitesse de libération, qui est la vitesse nécessaire pour s'échapper de la surface d'un astre. Celle-ci dépend de la masse et du rayon de ce dernier. Si on augmente la masse, la vitesse de libération augmente aussi. Elle peut ainsi atteindre la vitesse de la lumière. C'est ainsi que les trous noirs ont été imaginés d'après la théorie de Newton.

**Rayon de Schwarzschild**

L'énergie cinétique d'un corps tombant sur un trou noir est $E_c = 1/2\ m\ v^2$

Si v = c (vitesse de la lumière, vitesse limite) alors : $E_c = 1/2\ m\ c^2$

Or l'énergie totale $E_{tot} = E_c + E_p = 0$, puisqu'il n'y a pas d'échange d'énergie avec l'extérieur. Or l'énergie potentielle est $E_p = -G\ M\ m\ /\ R_s$

Donc $1/2\ m\ c^2 - G\ M\ m\ /\ R_s = 0$. D'où :

$$\mathbf{R_s = 2\ G\ M\ /\ c^2}$$

Cette valeur est le rayon de Schwarzschild. C'est la distance au centre du trou noir en-deça de laquelle la vitesse de libération dépasse la vitesse de la lumière.

En calculant la constante $2\ G\ /\ c^2$ dans les bonnes unités, on obtient $R_s = 1{,}483\ 10^{-30}$ km $kg^{-1}$ M. Cette xpression est plus partique, puisque déjà en partie calculée. Mais elle nécessite de donner la masse de l'objet en kilogrammes, ce qui n'est pas très habituel. Calculons le rayon de Schwarzschild du Soleil :

$M = 2\ 10^{30}$ kg donc $R_s = 1{,}483\ 10^{-30}$ km $kg^{-1} \times 2\ 10^{30}$ kg = 2,97 km. C'est la valeur habituellement donnée : 3 km.

Calculons maintenant le rapport $R_s\ /\ R_s = (2\ G\ M\ /\ c^2)\ /\ (2\ G\ M\ /\ c^2) = M\ /\ M$

Donc $R_s = R\ (M\ /\ M) = 3\ (M\ /\ M)$

Ici, M / M représente la masse de l'objet en unités de masse solaire. Donc le rayon de Schwarzschild s'écrit tout simplement :

$$R_s = 3\ M$$

M étant donnée en **masses solaires**, et le résultat étant obtenu en **kilomètres**.

Si on choisit M = 1, on retrouve bien 3 km.

Pour un trou noir de 3 millions de masses solaires, comme celui qui semble se trouver au centre de la Voie Lactée, on trouve 9 millions de km.

Déduite ici par les moyens de la mécanique classique, la valeur du rayon de Schwarzchild est la même en Relativité Générale. Tant qu'on se trouve en-deça du rayon de Schwarzchild, on peut dire, toujours avec un raisonnement classique, qu'aucun objet matériel ne peut s'échapper d'un tel astre, puisqu'il lui faudrait pour cela aller plus vite que la lumière (on utilise pour dire cela le principe fondateur de la Relativité Restreinte, attesté par l'expérience).

En faisant le raisonnement correct en Relativité Générale, la masse du trou noir déforme l'espace-temps à l'entour, et tout mobile suit dans cet espace une géodésique. Les photons suivent la règle générale et, bien que sans masse, sont influencés par le trou noir. Mais il y a une différence fondamentale entre matière et rayonnement ici. Pour qu'un élément matériel s'échappe du trou noir, il faut qu'il se déplace, à l'opposé du centre, à une vitesse supérieure à la vitesse de libération. Pour que ce soit possible, il faut qu'il soit au départ au-delà du rayon de Schwarzchild. Par contre, un rayon lumineux se déplace toujours à la vitesse de la lumière. Le voisinage du trou noir ne change rien à cela. Mais dans un champ très intense, l'énergie du rayonnement $e = h \nu$ diminue. Par conséquent, sa fréquence $\nu$ diminue également. Il devient donc plus rouge. Sa fréquence tend donc vers 0, valeur qui est atteinte à l'horizon du trou noir. Toute lumière émise à l'horizon du trou noir a donc une longueur d'onde infine, et semble complètement figée. Le temps est arrêté pour un observateur extérieur.

**Masse volumique d'un trou noir**

Toute information étant piégée à l'intérieur du trou noir, il est impossible de savoir ce qu'il se passe en son sein. Impossible en particulier de connaître la répartition de la matière en fonction du rayon (est-elle concentrée en une vraie singularité au point central ?). Donc, on ne peut pas définir la masse volumique en fonction de la distance au centre, comme on le ferait pour un astre ordinaire. La seule mesure possible est celle de la masse volumique moyenne, qui est simplement le rapport de la masse au volume.

La masse volumique moyenne d'un objet est définie par : $\rho = M / V = M / (4/3\ \pi\ R^3) = 3\ M / 4\ \pi\ R^3$

Remplaçons R par $R_s$ :

$\rho = 3\ M / 4\ \pi\ R^3 = 3\ M / 4\ \pi\ (2\ G\ M / c^2)^3 = 3\ M\ c^6 / 4\ \pi\ 8\ G^3\ M^3 = (3c^6 / 32\ \pi\ G^3)\ M^{-2}$

Le facteur $3c^6 / 32\ \pi\ G^3$ est constant. Si on le remplace par k, il vient $\rho = k\ M^{-2}$

*Donc, plus un trou noir est massif, plus faible est sa masse volumique moyenne !*

Cette petite démonstration détruit l'idée reçue selon laquelle un trou noir est un objet exceptionnellement dense (la densité est le rapport de la masse volumique d'un corps à celle de l'eau, qui est de 1 g $cm^{-1}$). Si sa masse est faible, en effet il aura une grande densité. Par exemple, si le Soleil se transformait en trou noir (mais ceci n'est pas son destin), sa masse volumique serait :

$\rho = (3c^6 / 32\ \pi\ G^3)\ M_\odot^{-2}$

Il faut exprimer toutes les valeurs dans des unités cohérentes, par exemple cm, g et s

$c = 300.000\ km\ s^{-1} = 3\ 10^5\ km\ s^{-1} = 3\ 10^{10}\ cm\ s^{-1}$

$G = 6{,}6726\ 10^{-11}\ m^3\ kg^{-1}\ s^{-2} = 6{,}6726\ 10^{-5}\ cm^3\ kg^{-1}\ s^{-2} = 6{,}6726\ 10^{-8}\ cm^3\ g^{-1}\ s^{-2}$

$M_\odot = 1{,}9891\ 10^{33}\ g$

$\rho = 3 \times (3\ 10^{10})^6 / 32\ \pi\ (6{,}6726\ 10^{-8})^3\ (1{,}9891\ 10^{33})^2 = 3 \times 729\ 10^{60} / 100{,}53 \times 297\ 10^{-24} \times 3{,}956\ 10^{66} = 2187\ 10^{60} / 118115{,}9\ 10^{42} = 1{,}85\ 10^{-2}\ 10^{60}\ 10^{-42}$

$\rho = 1{,}85\ 10^{16}\ g\ cm^{-3}$ soit 20 milliards de tonnes par $cm^3$

Faisons le rapport entre la masse volumique d'un trou noir quelconque et celle du Soleil :

$\rho / \rho_\odot = M^{-2} / M_\odot^{-2} = (M / M_\odot)^{-2}$ ; donc $\rho = \rho_\odot\ (M / M_\odot)^{-2} = 1{,}85\ 10^{16}\ g\ cm^{-3}\ (M / M_\odot)^{-2}$

$M / M_\odot$ représente la masse du trou noir par rapport à celle d'un trou noir d'une masse solaire ; c'est donc la masse de ce trou noir en unités de masse solaire. Par suite :

$$\rho = 1{,}85\ 10^{16}\ M^{-2}$$

$\rho$ est obtenu en g $cm^{-3}$, M étant exprimée en masses solaires. Ci-dessous, le tableau donne la masse volumique de quelques trous noirs, obtenue d'aptrès cette formule :

| masse | masse volumique |
|---|---|
| 1 | $1{,}85\ 10^{16}$ |
| 10 | $1{,}85\ 10^{14}$ |
| $10^6$ | $1{,}85\ 10^{4}$ |
| $10^9$ | $1{,}85\ 10^{-2}$ |

On voit qu'un trou noir d'un milliard de masses solaires est 100 fois moins dense que l'eau...

**Production d'énergie**

L'énergie produite par un corps qui tombe en chute libre sur un trou noir, atteignant pratiquement la vitesse de la lumière c, est son énergie cinétique :

$$E_c = 1/2\ m\ c^2$$

On en déduit que la moitié de la masse du corps sera transformée en énergie. Par conséquent, la chute d'un corps sur un trou noir a un rendement de 50 % par rapport à son énergie de masse. Il faut comparer ceci avec le rendement des réactions de fusion (de l'hydrogène), qui est de l'ordre de 0,7 % !

Il est bien évident par conséquent que l'accrétion d'un trou noir expliquera beaucoup mieux l'énergie prodigieuse des quasars, que toutes les fusions possibles...

Toutefois, il y a une limitation qui empêche d'atteindre ce rendement maximal. Cette conclusion ne serait valable que si la surface du trou noir (son horizon) était rigide, et que le corps s'y écrase. Ce n'est pas le cas. Même, le corps va traverser l'horizon sans être ralenti... Donc pas de dégagement d'énergie !

Mais si le trou noir est en rotation, les choses changent, surtout que cette rotation doit être très rapide, à cause de la très petite taille du trou noir. La matière qui tombe est entraînée dans le tourbillon, et ne peut plus chuter directement. Elle se met à tourner très vite autour du trou noir, à une vitesse approchant celle de la lumière. En s'approchant, le volume disponible diminue, et donc elle se comprime. Sa température augmente, et elle se met à rayonner.

On montre théoriquement qu'on peut atteindre ainsi 40 % de l'énergie de masse. Dans la réalité, il est probable que cette valeur n'est pas atteinte, mais on pense qu'au moins 10 % de l'énergie de masse est libérée, ce qui n'est déjà pas si mal.

Considérons alors un quasar qui rayonne $10^{40}$ W. Si cette valeur correspond à 10 % de l'énergie de masse lui tombant dessus, donc à 10 % de m $c^2$, alors :

$10^{40}\ W = 10 / 100 \times m\ c^2$

d'où : $m = 10^{41}/ c^2 = 10^{41}/ (3\ 10^8)^2 = 10^{41}/ 9\ 10^{16} = 1 / 9\ 10^{41-16}$

c'est-à-dire à peu près$10^{24}$ kg. Cette valeur est de l'ordre de la masse de la Terre.

**Eclipse totale de Soleil**

La Relativité Générale prévoit donc que la lumière est déviée par les masses. Pour les masses faibles, la déviation est strictement négligeable. Pour la masse du Soleil, elle devient difficilement mesurable. C'est pourtant ce qui a été fait au cours de l'éclipse totale de Soleil de 1919.

Une photo du ciel étoilé a été faite alors que le Soleil était à l'opposé. Une nouvelle photo, prise au cours de l'éclipse, a montré que les étoiles entourant le Soleil avaient légèrement changé de place. La mesure du déplacement, difficile mais significative, a donné une première confirmation de la R.G. Les rayons étant déviés vers l'observateur, les images des étoiles sont écartées de leur position naturelle. Tout se passe comme s'ils avaient traversé le verre d'une lentille convergeante. C'est ce qui justifie le nom que l'on donne maintenant à certains phénomènes.

**Lentilles gravitationnelles**

Depuis cette éclipse de Soleil, on a considéré de bien plus grandes masses que celle du Soleil : les objets produisant la déviation sont maintenant des galaxies, voire des amas de galaxies. Bien sûr, la distance est bien plus élevée, et les lumières déplacées encore plus lointaines. Il y a une autre différence avec l'éclipse : la Terre tournant autour du Soleil en un an, six mois suffisent pour que le Soleil sorte de devant les objets déviés. Par contre, les galaxies et amas qui vont produire le même phénomène resteront pour une durée extrêmement longue (des millions, voire des milliards d'années) devant les mêmes lumières. Impossible donc de faire une différence entre deux photos avec et sans l'objet déflecteur.

Depuis quelques années, on connait de très nombreux exemple de lentilles gravitationnelles, produites par des galaxies et des amas. Des phénomène bien plus curieux encore, tels les croix d'Einstein, ont été découverts. Ceci est encore une confirmation éclatante de la R.G.

**Trous noirs galactiques**

Il semble qu'il y ait, au centre de chaque galaxie ou presque, un trou noir plus ou moins massif. De récentes observations du centre de notre Voie Lactée le confirment, par le mouvement d'une étoile très proche. On peut voir ici l'orbite décrite par l'étoile S2 autour d'un trou noir de

2,6 millions de masses solaires.

Les données actuelles donnent à penser que toutes les galaxies (presque) sont passées par l'état de quasar lorsque suffisament de gaz se trouvait dans les régions centrales pour alimenter le trou noir. Les collisions entre galaxies peuvent réalimenter un quasar endormi, des observations le montrent.

L'existence des trous noirs galactiques, dont la masse atteint des millions de masses solaires, est donc bien assurée.

**Trous noirs primordiaux**

Il s'agit de trous noirs de faible masse, et de taille absolument minuscule. Ils auraient été produits immédiatement après le Big Bang, alors que la densité de l'Univers le permettait. Aucune indication observationnelle n'en atteste l'existence.

**Trous noirs stellaires**

Ce sont des trous noirs de masse intermédiaire entre les deux types précédents, et produits par l'évolution des étoiles (soit seule, après épuisement des sources d'énergie, soit par échange de matière). Ceux-là semblent bien exister, comme l'indiquent les observations dans les rayonnements énergétiques, X ou gamma.

**Effets sur la lumière**

La formidable gravité d'un trou noir dévie les rayons lumineux qui passent à proximité, et produisent des mirages vraiment extraordinaires. Une page leur est consacrée.

---=OO=---




Les rayons gamma étant, fort heureusement pour nous, totalement arrêtés par l'atmosphère terrestre, n'ont jamais été observés avant l'avénement de moyens aériens ou spatiaux. Dès que ceux-ci l'ont permi, des expériences ont été faites, et des sources gamma découvertes dans le ciel. En étaient responsables certains objets qui émettent des rayons gamma en continu, même si leur flux est variable (quasars par exemple). Ceux que nous détaillons dans ce chapitre sont produits par des sources transitoires, visibles seulement pendant une brève période.

**Découverte**

Le 4 juin 1967, une expérience américaine, emportée en ballon stratosphérique, a observé la nébuleuse du Crabe, et y a détecté un flux de photons gamma de basse énergie. Ceci un peu avant la découverte du pulsar (radio) du Crabe. Et il s'est avéré que la période de variation en gamma était la même qu'en radio. L'association entre les deux objets était donc faite. Un pulsar émettait des rayons gamma, et cette émission est continue. En 68, une confirmation de ces résultats était donnée par Jacques Paul, de Saclay, dans une gamme de haute énergie. Remarquez que le pulsar du Crabe fait partie de notre Galaxie, qui à ce jour était l'unique source connue de rayons gamma.

En 1968 encore, le satellite américain OSO 3 (*Orbiting Solar Observatory*), équipé d'un détecteur rudimentaire de rayons gamma, découvrait quelques sources dans la Voie Lactée, localisées plutôt vers son centre. L'instrument ne permettait pas d'en dire plus sur ces sources. Mais d'après ce qu'on connaissait alors, les sources gamma étaient galactiques, et elles étaient continues.

Les *sursauts gamma*, tels qu'on les nomme aujourd'hui, ont été découverts plus tard, tout à fait marginalement, par les militaires ! Dans la course aux armements des années 60, chacun s'équipait de systèmes de plus en plus puissants, qu'il fallait bien sûr valider expérimentalement. Pour cela, on a fait d'abord des essais nucléaires en surface, puis des essais souterrains. Tout ceci était facile à détecter par les sismographes utilisés pour analyser les tremblements de Terre. Alors, la tentation a été forte de procéder à des essais dans l'espace, au-dessus de l'atmosphère.

Une explosion hors de l'atmosphère serait-elle facilement détectable ? Que produirait-elle ? Pas de bruit (pas d'air, donc pas de son) ; pas de champignon atomique (même raison, pas d'air) ; un éclair particulièrement brillant, puis une bouffée de rayons gammas émis par les désintégrations. C'est ce point que les deux signataires ont décidé de controller, parce que c'était plus facile.

Le traité SALT (*Strategic Arms Limitation Talks*) signé le 26 mai 1972, prévoyait la limitation des armements nucléaires, et par conséquent aussi de leurs essais. Américains et Soviétiques se sont alors lancés dans une nouvelle compétition pour traquer les éventuelles violations du traité par l'autre. Rapidement, un flash gamma a été enregistré. Le risque était assez grand que les militaires prennent ce phénomène naturel pour une explosion provoquée par l'autre camp. En réalité, ils ont fait preuve les uns et les autres d'un grand sang froid ! Car il leur a bien fallu en venir à la bonne explication : il n'y avait pas eu d'explosion artificielle, mais bien un événement astronomique qu'il fallait donc comprendre. Ce fut le début d'une longue quête…

**Rayons gamma**

Les rayons gamma sont simplement des rayons électromagnétiques, comme la lumière, mais bien plus énergétiques. Puisque $E = h \nu$, l'énergie étant bien plus élevée, la fréquence l'est également. Et par suite, la longueur d'onde est bien plus courte. La longueur d'onde est même plus courte que les distances interatomiques dans la matière normale. Aussi, les rayons gamma peuvent-ils pénétrer profondément dans la plupart des matériaux, sans interactions. C'est ce qui les rend très pénétrants. C'est en particulier l'explication de leur dangerosité : ils peuvent pénétrer profondément dans le corps, et finissent par interagir en déposant une énergie énorme, capable de détruire toute molécule biologique. Cette propriété va rendre également difficile leur utilisation astronomique.

Les rayons gamma ont, par définition, une longueur d'onde $\lambda < 10^{-11}$ m (le diamètre d'un atome est de l'ordre de $10^{-10}$ m, donc au moins 10 fois plus gros), et une fréquence correspondante $\nu > 3\ 10^{19}$ Hz. L'énergie d'un photon gamma est donnée par $E = h \nu$. Donc $E_\gamma > h \times 3\ 10^{19}$ Hz $= 6{,}626\ 10^{-34}$ J s $\times\ 3\ 10^{19}$ Hz $= 19{,}878\ 10^{-15}$ J. On a l'habitude de caractériser les rayons de très haute énergie (gamma en particulier), non pas par leur fréquence ou leur longueur d'onde, mais par l'énergie associée. De plus, l'unité usuelle est l'électron-volt, eV, ou ses multiples le kilo électron-volt keV, et le méga électron-volt MeV. Dans cette unité, le résultat que nous venons d'obtenir s'écrit : $1{,}2407\ 10^{-1}$ MeV = 0,124 MeV, ou 124 keV. Cette valeur étant peu commode, on considérera que les photons gamma sont ceux dont l'énergie est au-dessus de 100 keV, les X étant au-dessous. Bien que leur nature profonde (électromagnétique) soit la même, les rayons X sont produits par le nuage électronique des atomes, alors que les gamma proviennent du réarrangement des nucléons à l'intérieur du noyau. C'est cette propriété qui permet de les distinguer, mais il existe d'autres mécanismes de production de rayons gamma.

**Détecteurs**

Pour détecter les rayons gamma, il faut des matériaux lourds (de masse atomique élevée) car leurs atomes sont plus gros, et restent proches. Leur probabilité d'arrêter un rayon gamma en est d'autant plus élevée. Le mécanisme de détection est *la scintillation* : un cristal scintillateur est couplé à un photomultiplicateur, qui amplifie considérablement le signal. Lorsqu'un photon gamma pénètre dans le cristal scintillateur, il finit par être absorbé par un atome, auquel il arrache un électron. L'électron est éjecté à grande vitesse, et va ioniser un atome un peu plus loin. L'atome se désexcite en émettant un photon dans le visible, qui déclenche le photomultiplicateur. Dans ce processus, toute mémoire de la

direction d'arrivée du photon gamma est perdue… Le résultat est le même, d'où que vienne le photon. Seule son énergie peut être évaluée. Les détecteurs les plus utilisés contiennent un cristal d'iodure de césium (le césium est de masse atomique 133). Pour les militaires, ce principe de détection était suffisant, mais nous verrons plus loin que ce n'est pas le cas pour les astronomes.

Ces détecteurs ne permettent pas de déterminer précisément la fréquence des photons capturés, et donc ne permettent pas de faire de la spectroscopie.

**Nature des sursauts**

La première caractéristique est la brièveté du phénomène, qui le distingue des sources observées dans la Voie Lactée en 1967. Cette brièveté en fait d'ailleurs la difficulté : le temps d'apercevoir un sursaut, il est déjà éteint…

Les paramètres essentiels pour la compréhension de ces phénomènes sont l'énergie mise en jeu, et son évolution dans le temps. Les premières observations ont fourni l'énergie reçue par le détecteur, et une courbe de lumière grossière (comptage de photons). Pour remonter à l'énergie émise, il faudrait connaître la distance de l'objet. C'est là le problème essentiel. Comment déterminer la distance ?

La première méthode envisageable consisterait à associer à l'émetteur gamma un objet connu par ailleurs, par exemple visible, et dont on connait la distance. Ceci s'appliquerait en particulier à des objets proches (dans notre Galaxie).

Si les émetteurs gamma sont lointains, le décalage vers le rouge pourrait s'appliquer, mais il n'est pas possible de le mesurer sur le rayonnement gamma lui-même. En effet, chaque photon gamma porte beaucoup d'énergie, et à puissance rayonnée égale, le nombre de photons gamma est bien moindre que celui de photons visible (dans le rapport des énergies, c'est-à-dire des fréquences, donc de l'ordre de 100.000 fois moins). On en revient donc à déterminer le décalage spectral dans une autre longueur d'onde, donc à trouver un objet associé dans cette gamma-là.

La clé du problème semble donc, au moins pour l'avenir proche, de trouver une association. Mais alors, comment l'obtenir ? Les photons gamma, comme les photons visibles, se déplacent en ligne droite (plus généralement selon une géodésique de l'espace, mais la même pour les deux). Donc, la direction d'arrivée des photons gamma et visibles émis par un même objet est la même. Alors, il *suffit* de déterminer la position précise de la source gamma pour résoudre le problème… Mais c'est là la grande difficulté !

**Direction de la source**

Les premières observations ont montré que les rayons gamma se manifestaient pendant un temps très bref (quelques secondes, d'ou le nom de sursauts), et qu'il était impossible de prévoir où et quand. Dans ces conditions, il devenait très difficile de les comprendre, les détecteurs rudimentaires ne fournissant pratiquement pas d'informations à leur sujet. Nous allons voir les différentes méthodes qui ont été utilisées pour cela, avec leurs caractéristiques (présentées par ordre de réalisation historique) :

- collimation
- optique gamma (miroirs)
- réseaux
- masque codé

**Collimation**

Pour déterminer la direction d'arrivée d'un photon gamma, la première solution consiste à **collimater le détecteur**. On place le cristal au fond d'un cylindre en matériau absorbant (du tungstène par exemple), de telle sorte que seuls les photons arrivant par l'ouverture du cylindre puissent atteindre le cristal. Ceci limite l'angle de vision du détecteur, pour lequel de nombreuses sources deviennent inaccessibles : le ciel n'est plus couvert en totalité. Mais lorsqu'un événement est détecté, on connait sa direction à quelque chose près. Plus le cylindre est étroit, meilleure sera la précision, et pire sera la couverture du ciel. On doit donc trouver un compromis entre ces deux caractéristiques. Le plus raisonnable donne un angle de vision de quelques degrés. Malheureusement, une telle grossièreté de position ne permettra pas de trouver une éventuelle contrepartie optique de l'objet émetteur, car de nombreuses sources envisageables se trouveront dans la boîte d'erreur (projection sur le ciel de l'ouverture de l'instrument). Cette méthode rudimentaire a été utilisée par de nombreuses sondes.

**Optique gamma**

Une autre méthode de détection serait de faire de l'**optique gamma**, comme on fait de l'optique dans le visible. Mais le pouvoir de pénétration des rayons gamma interdit de faire de véritables miroirs : les photons passent au travers… Sauf, si on place les miroirs en incidence rasante. Alors, le photon gamma ricoche sur le miroir comme une pierre sur l'eau. Mais ceci ne permet pas de faire de l'optique comparable à celle du visible. Pourtant, on a construit des instruments basés sur ce principe, qui ont donné de très bons résultats. Mais leur précision en direction n'est pas meilleure. Remarquez que les télescopes optiques concentrent la lumière pour améliorer la sensiblilité. En gamma, c'est pour le moment impossible.

Le physicien allemand Hans Wolter a montré (1952) que la combinaison d'un paraboloïde et d'un hyperboloïde permet de focaliser un faisceau X très près de l'axe (il a produit 3 combinaisons différentes, dite Wolter I, II et III). La combinaison Wolter I permet de placer plusieurs doublets concentriques, et donc d'augmenter le champ de l'instrument. Pour cela, les miroirs que l'on produit sont en métal lourd (plus le métal est lourd, mieux il réfléchit les rayons X), et sous une épaisseur très réduite (170 µm).

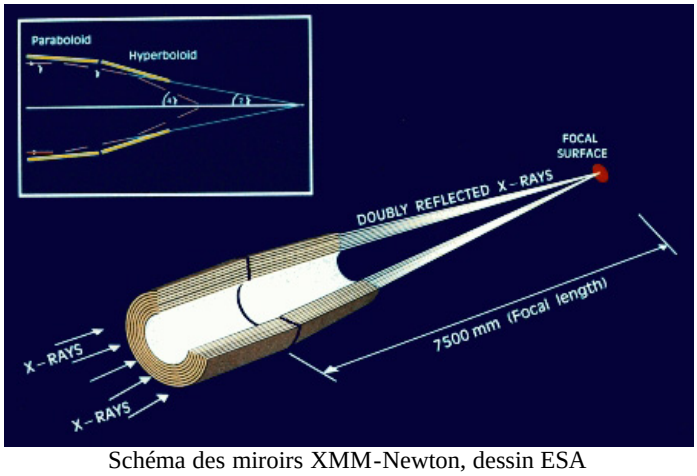
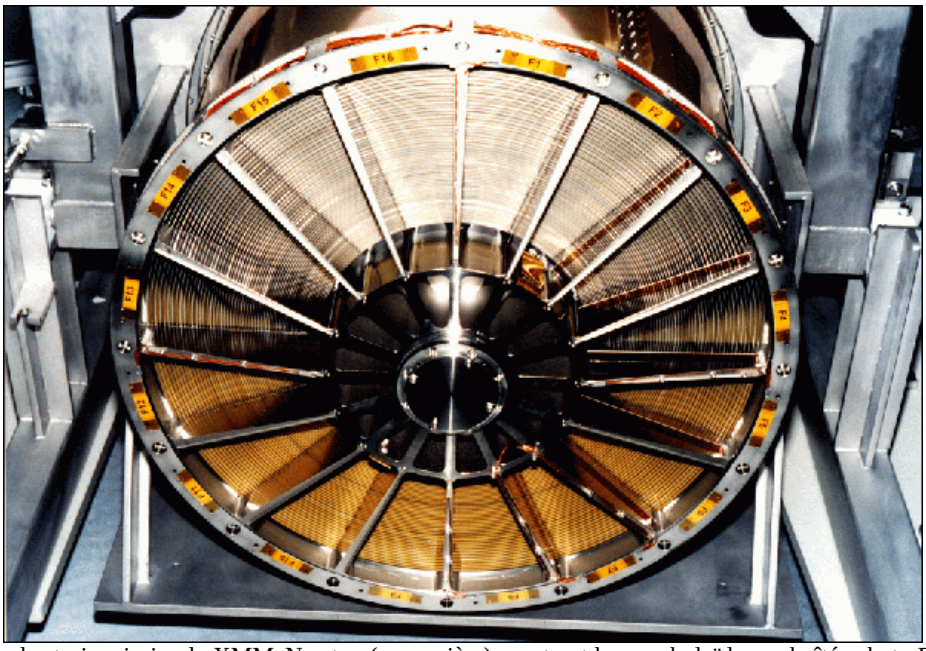


Schéma des miroirs XMM-Newton, dessin ESA

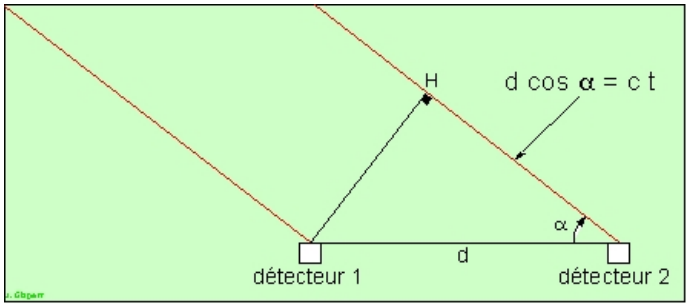
Le satellite XMM-Newton emporte trois mroirs identiques, de type Wolter I, constitués de 58 doublets de miroirs, le plus grand (extérieur) mesurant 70 cm de diamètre.


L'un des trois miroirs de XMM-Newton (vue arrière) montrant les paraboloïdes emboîtés photo ESA

Une technique astucieuse a été utilisée par les savants soviétiques à bord des sondes Venera (à destination de Vénus, vous verrez pourquoi un peu plus bas). Au lieu de mettre un détecteur, **ils en ont placé six** ! Ces détecteurs étaient colimatés par un cylindre, mais le matériau absorbant était relativement mince, et laissait passer le flux gamma, affaibli. Si un flot de photons arrive de face, il frappe le cristal de plein fouet, et le signal est très fort. S'il arrive par le côté, il traverse le matériau absorbant, et ne produit dans le cristal qu'un signal atténué. On saura donc si le flot est arrivé de face ou non. Alors, on place deux détecteurs opposés l'un à l'autre. Puis on place ainsi trois couples selon trois axes perpendiculaires. Toute bouffée de photons gamma va frapper tous les détecteurs, mais plus ou moins selon leur angle d'arrivée. L'analyse des signaux produits par les différents détecteurs permet de reconstruire la direction, avec une précision qui est de 1 à 4°, mais avec une couverture totale du ciel. Les sondes Venera conjuguaient donc la surveillance de tout le ciel à la mesure grossière de la direction.

**Réseaux**

Une technique plus coûteuse permet d'améliorer la précision de position. Il s'agit d'observer le même flux par **plusieurs détecteurs éloignés l'un de l'autre**. Une considération géométrique toute simple montre que la direction d'arrivée d'une bouffée de photons se déduit facilement si deux détecteurs (non directionnels) l'observent avec un décalage temporel. Les photons arrivant de l'infini (rayons parallèles) le retard d'arrivée sur le second détecteur dépend simplement de l'angle avec la ligne qui joint les détecteurs :



Les rayons (en rouge) étant parallèles, les deux détecteurs les recevront avec un léger décalage temporel. Lorsque le rayon de gauche arrive, celui de droite est encore au point *H*. La distance qu'il lui reste à parcourir pour déclencher le détecteur 2 est égale à $d \cos \alpha$. Parcourue à la vitesse de la lumière ($c$), elle correspond à un temps $t$ tel que $d \cos \alpha = c\ t$. On ignore l'angle $\alpha$. On peut l'obtenir si on a mesuré $t$ : $\cos \alpha = c\ t / d$, et donc $\alpha = arc \cos (c\ t / d)$.

Pour déterminer la position d'un sursaut, il faut connaître à la fois la position de chacune des sondes, et l'instant très précis d'arrivée des premiers photons (qui déterminent le début du sursaut). Ceci n'est pas simple. La mesure en elle-même est difficile à faire, car il faut des horloges bien synchronisées à bord de chaque sonde, et il faut que les premiers photons soient détectés par toutes les sondes. Si, pour des problèmes de sensibilités différentes, les premiers photons sont observés par une partie seulement des sondes, l'instant de début ne sera connu qu'avec une erreur inhérente à cette différence. Puis, lorsque les mesures sont transmises à la Terre, il faut les collecter en un endroit unique, et les analyser. Tout ceci prenait beaucoup de temps.

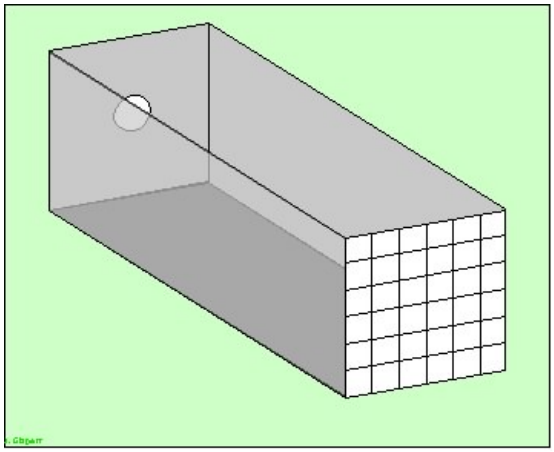
Si on place trois instruments, on détermine très bien la direction. Mais la précision dépend fortement de la distance $d$ entre les sondes…: la distance $d$ correspond à un temps de parcours de la lumière de $d = c\ t$, d'où $t = d / c$ (plus elle est grande, plus le temps $t$ est grand).

Une première expérience de ce type a été faite par les sondes Vela américaines, qui étaient lancées par paire (pour détecter les expériences nucléaires, c'étaient des satellites militaires). Les deux sondes étaient éloignées de 200.000 km à peu près, située chacune d'un côté de la Terre, et la précision était médiocre.

La solution viable était donc celle d'un **réseau interplanétaire** (voilà pourquoi les Venera ont été concernées). L'époque s'y prêtait bien, car l'engouement pour l'exploration des planètes proches était grand : Vénus, Mars étaient des cibles alléchantes, et Américains et Soviétiques se faisaient une concurence farouche pour faire les premières découvertes. Avec une base de plusieurs millions de kilomètres, la précision devient suffisante pour trouver l'objet visible éventuellement associé au sursaut. Mais, car il y a un mais… le temps nécessaire à la récupération des données en provenance de chacune des sondes (en l'absence de réseau Internet…, avec les difficultés politiques qui pouvaient s'ajouter quand il s'agissait de franchir le rideau de fer, dans un sens ou dans l'autre), atteignait deux mois ! Si un éclair visible s'était manifesté, il s'était eteint depuis longtemps lorsqu'on pouvait tourner les télescopes vers lui. Ceci n'était pas encore la solution, mais la laissait entrevoir : il fallait observer un sursaut, en déterminer immédiatement la position précise et la transmettre à des télescopes optiques disponibles pour observer une éventuelle contrepartie.

**Masque codé**

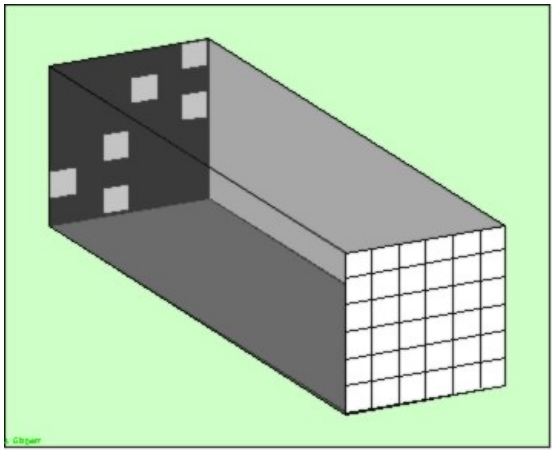
Il a fallu développer une nouvelle méthode pour déterminer la position précise du sursaut. Imaginons de diminuer l'ouverture du télescope. Si on la diminue jusqu'à un petit trou, on obtient le sténopée des anciennes chambres noires. On peut former une image de bonne qualité, mais au détriment de la luminosité. Jusqu'à maintenant, les détecteurs que nous avons considérés n'avaient qu'un seul pixel (le cristal détecteur ; on est loin des 5 à 15 méga pixels des appareils photo numériques grand public…). Si on remplace ce détecteur primitif par une gamma caméra, on obtient un véritable appareil photo gamma (sans objectif évidemment).



Télescope à sténopée et camera

La lumière entre par le sténopée (en haut à gauche du dessin), et vient sur la grille sensible (en bas à droite, au fond du télescope). Si la source est ponctuelle, un seul pixel sera excité, et la position de la source sera bien définie, avec une erreur qui ne dépend que de la taille des pixels, et de la distance du sténopée.

Avec ce principe, on obtient une excellente résolution (quelques minutes d'arc, ou même moins), mais une faible sensibilité. Si on perce un second trou, on augmente la lumière admise, mais on brouille l'image. Toutefois, on a montré qu'on peut percer de nombreux trous, à condition de les placer selon une mosaïque bien précise : c'est le **masque**. Alors, l'image produite est toute brouillée, mais une opération mathématique nommée *déconvolution* permet de reconstruire l'image correcte. Ainsi, on a gagné sur les deux tableaux : sensibilité et précision. C'est ce principe qui a révolutionné l'astronomie gamma, en passant la précision des positions de 10° à quelques minutes, ou quelques dizaines de secondes.



Le sténopée est remplacé par le masque codé

Sur le dessin, le masque présente une structure répétitive, dont l'utilisation permet de simplifier grandement les calculs pour effectuer la déconvolution. C'est pourquoi on lui donne le nom de *masque codé*. On pourrait aussi utiliser des masques aléatoires, mais les caculs seraient plus longs. La technique du masque codé a été imaginée dans les années 70.

**Les observations**

Les premières observations ont amené à la découverte des sursauts gamma. Elles n'avaient qu'un but militaire, pour lequel la direction importait peu. Les américains ont lancé à partir de 1963, une série de satellites, de nom générique *Vela* (de l'espagnol *veilleur*). Les Vela étaient lancés par couples, chacun observant une moitié du ciel : en orbite autour de la Terre, ils ne pouvaient pas voir ce qu'elle leur cachait, en particulier une explosion éventuelle de l'autre côté ; c'est ce qu'observait l'autre satellite. On n'envisageait pas la possibilité de phénomènes naturels émettant de tels rayonnements, donc il n'était pas nécessaire de déterminer précisément d'où venaient les rayons gammas éventuellement captés. Par contre, une couverture complète de l'environnement terrestre était primordiale.

Le premier événement reconnu comme tel a été enregistré le 2 juillet 1967. Entre juillet 69 et juillet 72, 16 événements ont été enregistrés, par les **deux** satellites de la paire ! Ces événements étaient donc visibles de deux positions opposées par rapport à la Terre, et donc ne provenaient pas de cette dernière. L'application du schéma donné plus haut (pour expliquer l'utilisation des réseaux) a permis de déterminer la position de l'émetteur à 10 degrés près. Et ces sources n'étaient effectivement pas dans l'environnement terrestre. Elles étaient bien naturelles. C'est ainsi que les sursauts gamma ont été identifiés. La première publication est parue le 1$^{er}$ juin 1973.

Un autre instrument était en orbite autour de la Terre en même temps. Il était destiné à la préparation des missions Apollo, en surveillant le Soleil, afin de prévoir les éruptions qui auraient pu être fatales aux astronautes. Pour atteindre son but, cet instrument devait déterminer l'énergie des photons gamma émis par le Soleil. Il a fourni des spectres de 6 des sursauts connus. Bien évidemment, les soviétiques étaient eux aussi sur la piste des sursauts gamma, mais leurs publications ne franchissaient par le rideau de fer.

Les 16 sursauts connus étaient des émissions brèves, comprises entre 0,1 s et 30 s. Leurs courbes de lumière (intensité en fonction du temps), les séparait en deux classes :

- courbes simples, présentant une montée brusque, suivie d'une descente exponentielle ;
- courbes complexes, avec des pics de durée parfois inférieure à 0,1 s.

Cette description apporte une information capitale sur la source : puisqu'elle varie en moins de 1/10$^{e}$ de seconde, sa dimension est inférieure à 0,1 c = 0,1 s × 300.000 km/s = 30.000 km (c'est la dimension maximale de la zone émissive ; ce n'est pas forcément la dimension de l'objet responsable, qui peut être plus petit). Elle est minuscule, à peine plus grosse que la Terre. Quels sont les objets connus, de si petite taille, et possédant suffisamment d'énergie pour émettre des rayons gamma ? Ceci donne une première piste, celle des objets compacts, étoiles à neutrons ou trous noirs (d'ailleurs, le Crabe était déjà associé à une émission gamma).

**Evénement du 5 mars 1979**

Cet événement est à plusieurs titres extraordinaire, et son impact sur la connaissance des sursauts gamma est capital.

A cette époque, de nombreux instruments gamma étaient en vol, à bord de diverses sondes interplanétaires européennes, soviétiques, ou américaines, dans le voisinage de la Terre et de Vénus. Neuf de ces instruments ont enregistré le sursaut, dans un intervalle de 25 secondes. Ils ont pu, grâce à leurs grandes capacités d'analyse temporelle, déterminer précisément l'instant de début. Ils ont été facilités dans ce domaine par la montée extrêmement rapide du signal, qui s'est produite en moins de 0,25 ms ! Ceci facilite la détermination de l'instant précis de début du signal. Cette précision a permi de calculer, connaissant la position exacte des différentes sondes, une position très précise du sursaut gamma dans le ciel. Mais il a fallu deux mois pour réunir les données et les traiter… Bien que tout ait été parfait sur le plan scientifique, il n'en a pas été de même sur le plan politique, ce qui a entraîné ce retard. La précision atteinte est de 1,25' d'arc, soit une centaine de fois mieux que ce que l'on faisait à l'époque avec un instrument isolé.

A bord des sondes Venera, le compteur de rayons gamma enregistrait un flux à peu près constant d'une centaine de coups par seconde. Mais brutalement, le taux de comptage est passé à 200.000 coups par seconde ! Les photons responsables étaient des gammas durs (haute énergie). Cette bouffée a été très brève (0,2 s), mais elle a été suivie par un flot de rayons gamma mous (énergie plus basse).

Après cet épisode, et pendant toute la durée (4 ans) de survie de leur instrument, les soviétiques ont enregistré 16 nouveau sursauts provenant de la même source. Tous étaient bien moins intenses et bien

plus courts que le premier.

Les sondes concernées sont : Venera 11 et 12, Prognoz 7 (Union Soviétique), Helios 2 (Allemagne), Pioneer Venus Orbiter, les satellites militaires Vela, Einstein (USA).

Mais l'important est que la boîte d'erreur, déterminée ainsi, contenait un reste de supernova, nommé N49 (SNR 0525-66.1). Un objet assez exotique se trouvait donc au même endroit que l'événement inconnu. La probabilité qu'il en soit l'origine était donc très forte, et l'association pratiquement acquise.

Mieux, ce sursaut était plus de 10 fois plus intense que les précédents. Il contenait beaucoup de photons de basse énergie. Mais tout ceci, bien que ce soit des données de type nouveau, qui précisaient la nature du phénomène, a été encore amélioré par la situation de l'objet dans le Grand Nuage de Magellan. Cette galaxie voisine de la nôtre est à 170.000 A.L. Pour la première fois, on connaissait la distance d'un sursaut gamma ! De la mesure de l'énergie reçue, il devenait possible de déduire l'énergie émise : elle s'élève à plus de $10^{36}$ Joules !

Si la source se trouvait dans notre Galaxie, à quelques centaines d'années-lumière seulement, l'énergie qu'elle rayonne, déduite de sa distance et de l'énergie effectivement reçue, se trouverait en-dessous de la limite d'Eddington d'une étoile normale. La source pourrait donc être une étoile tout à fait ordinaire, même si elle devait être de grande masse.

Mais sa situation dans le Grand Nuage de Magellan ruinait cette idée, car la luminosité réelle de l'objet était **un million de fois supérieure à la limite d'Eddington**. Aucune étoile normale ne pourrait exister dans de telles conditions.

En 0,2 secondes, le sursaut gamma du 5 mars 1979 a émis autant d'énergie que le Soleil en dispense pendant 10.000 ans !

Mais ce n'est pas fini, trois autres sursauts ont été enregistrés : le lendemain 6 mars (14 h 30 après le premier), et les 4 et 24 avril de la même année. Ces répliques étaient 2.000 fois moins intenses que le premier sursaut, et n'ont pu être observées que par les instruments soviétiques *Konus*, à bord des sondes *Venera*, seuls capables d'une telle sensibilité. L'événement était donc répétitif. Par conséquent, **il n'entraîne pas la destruction de sa source**.

Revenons à la montée en énergie du sursaut. En 0,25 ms, il atteignait sa valeur maximum, donc présentait un temps de variabilité inférieur à 0,25 ms. On sait très bien que la dimension d'un objet qui varie aussi vite est inférieure à 0,25 ms-lumière, c'est-à-dire $0{,}25\ 10^{-3}$ s × 300.000 km $s^{-1}$ = 0,25 × 300 km = 75 km… Vraiment, l'objet responsable de cette émission gamma est minuscule. Seul un objet compact, comme une étoile à neutrons ou un trou noir, peut être aussi petit et rayonner autant d'énergie.

Mieux encore, la phase de décroissance du sursaut a été périodique, avec une période de l'ordre de 8 secondes. Une telle périodicité, surtout si on l'applique à un objet compact, fait aussitôt penser à la rotation d'un astre dont l'axe magnétique ne coïncide pas avec l'axe de rotation, à un pulsar.

La périodicité de 8 secondes du signal émis élimine le trou noir des hypothèses envisageables. En effet, un trou noir n'a pas de structure apparente, et ne peut donc pas produire par lui-même une telle périodicité.

Donc, l'observation de ce phénomène isolé faisait déjà penser à une étoile à neutrons qui serait capable d'émettre des rayons gamma par bouffées. Mais comment expliquer l'intensité impressionante de l'émission ?

Il y avait un autre problème : la nébuleuse N49 correspondait à un reste de supernova récent, de moins de 5.000 ans. Or l'étoile à neutrons n'est pas au centre ! En si peu de temps, elle ne devrait pas pouvoir s'éloigner autant. De plus, un pulsar naît très rapide, et ralentit progressivement en rayonnant sur ses réserves d'énergie de rotation. Mais ceci prend beaucoup de temps, ce ralentissement est peu efficace. Ici, il n'explique pas une période aussi longue que 8 secondes.

Mais en général, on considère que l'explosion d'une supernova est à symétrie sphérique. Or les gaz éjectés possèdent une quantité de mouvement, qu'ils empruntent à l'étoile. Si maintenant on accepte l'idée que l'explosion pourrait ne pas être symétrique, alors il pourrait y avoir beaucoup plus d'énergie évacuée d'un côté de l'étoile que de l'autre. Et tout se passe comme si les couches éjectées par l'explosion étaient les gaz éjectés par la tuyère d'une fusée : ils communiquent une accélération à l'étoile. Une étude précise montre que l'étoile à neutrons qui subsiste de l'explosion pourrait très bien être accélérée à 1.000 km $s^{-1}$. Alors, une telle vitesse explique parfaitement que l'étoile à neutrons responsable du sursaut gamma se trouve si loin de son lieu de naissance. Voilà un problème résolu.

Le problème de la rotation lente est plus difficile. Mais si on considère que l'étoile est devenue une *magnétar*, avec un champ magnétique énorme, alors ce champ est tout à fait capable de ralentir très vite la rotation de l'étoile en communiquant son moment de rotation à la nébuleuse qui l'entoure.

### Magnétar

Encore un nouveau type d'astre, dont le nom est formé sur le modèle de *pulsar*. Magnétar signifie évidemment *magnetic star* (nom donné par Duncan et Thompson ; le nom provenant d'un sigle anglais, il ne faudrait pas mettre d'accent à *magnetar*). Ce nom pourrait passer pour un pléonasme, puisque toute étoile développe un champ magnétique plus ou moins intense. Mais si on prend la peine de le préciser, c'est que l'intensité du champ atteint ici des sommets.

On imagine être en présence d'une supernova qui a explosé, et qui laisse un résidu sous la forme d'une étoile à neutrons. On sait très bien que le moment angulaire de rotation se conserve, et qu'il entraîne l'étoile à neutrons dans un ballet infernal, lui faisant faire parfois 1.000 tours par seconde… Mais juste avant l'explosion, l'étoile possédait déjà un champ magnétique.

Lorsque son noyau s'est contracté, le champ magnétique a été confiné dans un volume de rayon de plus en plus petit (divisé par 100.000), et s'est renforcé (comme le carré du rayon, donc par un facteur $100.000^2$ = 10.000.000.000). Par conséquent, partant d'un champ magnétique standard pour une étoile, on s'attend à observer un champ extrêmement puissant. Mais pourtant, si énorme soit-il, il n'est pas suffisant pour expliquer le débordement d'énergie des sursauts gamma. Alors ?

L'explication semble se trouver dans la physique de l'effondrement d'une étoile en étoile à neutrons. Lorsque la contraction commence, les simulations sur ordinateur montrent qu'une convection importante se développe dans l'enveloppe de l'étoile, convection n'ayant rien à voir avec celle des étoiles de la Séquence Principale. La période de convection (temps de cycle d'un élément de matière), est de 10 millisecondes. La densité du milieu est de $10^{14}$ g $cm^{-3}$. Bien que la matière en mouvement soit essentiellement neutronique (sans charge électrique), une petite fraction, de quelques pour cent, est encore constituée de protons et d'électrons. Elle suffit à produire un champ magnétique par effet dynamo, en considérant le même rendement de 10 % que dans le Soleil : 10 % de l'énergie des particules sont prélevés pour produire le champ magnétique. Ce champ s'ajoute au champ contracté de l'étoile. Mais la convection ne dure qu'une dizaine de secondes, car l'astre se refroidit très vite par perte de neutrinos. Lorsqu'elle cesse, elle ne produit donc plus de champ magnétique, mais celui qu'elle a engendré juste avant reste figé dans la matière maintenant stabilisée. Il s'ajoute donc au champ initial. Les simulations montrent que la convection peut produire un champ 1.000 fois plus intense qu'en son absence. Et là, le compte est bon. Ce champ exacerbé est suffisant pour expliquer les jets de matière et la production de rayons gamma.

Mais les pulsars *ordinaires* n'ont pas un champ magnétique si violent. D'où vient que deux étoiles fort semblables avant l'effondrement puissent donner deux astres aux propriétés si éloignées ? Une réponse est donnée par une théorie qui prend en compte la période R de rotation de l'étoile (après effondrement, mais liée à la période de rotation avant l'effondrement), et celle C des mouvements convectifs dans l'étoile à neutrons naissante. Si R est inférieure à C, l'étoile tourne très vite, la convection est entraînée et se développe globalement dans l'étoile, en bloc en quelque sorte. La rotation joue le rôle de chef d'orchestre pour synchroniser tous les mouvements. Les mouvements de convection produisent un effet dynamo, amplifié par la synchronisation.

Dans le cas contraire, la convection se développe localement seulement, chaque région indépendamment des autres ; chaque région produit donc son propre champ magnétique, les différents champs locaux ne partagent pas la même orientation, et s'annulent les uns les autres.

La période de la convection étant de l'ordre de 10 ms, une étoile à neutrons en formation dont la période de rotation est plus petite (plus de 100 tours par seconde), deviendra une magnétar. Dans le cas contraire, ce sera un simple pulsar. Le pulsar du Crabe tourne actuellement en 33 ms. D'après le ralentissement mesuré, on estime à 20 ms sa période au moment de sa formation (en 1054). Elle était donc bien supérieure aux 10 ms de la période de convection, ce qui justifie que le Crabe ne soit pas une magnétar.

Cette théorie explique donc la rotation lente de l'étoile à neutrons. Lorsqu'elle s'est formée, elle était rapide, et tournait plus de 100 fois par seconde. La convection y a développé un champ magnétique 1.000 fois plus intense que dans un pulsar, c'est devenu une magnétar. Le champ magnétique, en interagissant avec le milieu dans lequel baigne l'étoile, l'a ralentie suffisamment en transférant son moment de rotation à la nébuleuse environnante. Ce mécanisme est efficace, et justifie qu'une étoile à neutrons de moins de 5.000 ans puisse tourner en plus de 8 secondes.

Le tableau ci-dessous, pour fixer les idées, donne l'intensité du champ magnétique produit par quatre sources différentes. La seconde seule est artificielle, et correspond à ce qu'on sait faire de plus puissant aujourd'hui : c'est un électro-aimant équipant l'instrument Atlas à Genève, au LHC.

| source | intensité | rapport/Terre |
|---|---|---|
| Terre | $4{,}7\ 10^{-5}$ T | - |
| Aimant | 0,1 T | 2.000 |
| Electro-aimant supraconducteur (LHC) | 10 T | $10^5$ |
| Etoile normale (Séquence Principale) | $10^2$ T | $10^6$ |
| Etoile à neutrons normale | $10^8$ T | $10^{13}$ |
| Magnétar | $10^{11}$ T | $10^{16}$ |

**Energie dissipée**

Mais le champ magnétique d'une magnétar explique aussi l'énergie dégagée par le sursaut gamma qui est à l'origine de cette étude. Il faut se remettre en mémoire la structure d'une étoile à neutrons. Elle comprend une croûte solide de fer, qui surmonte un océan de neutrons. Cette croûte de fer est naturellement sensible au champ magnétique, qui la déforme et l'étire. Sous ces tensions, à la mesure du champ qui les produit, la croûte de fer arrive à casser à certains endroits. Il se produit les mêmes phénomènes que dans un tremblement de Terre, bien que ceux-ci trouvent leur énergie dans la tectonique des plaques et non dans le magnétisme. L'énergie dégagée en un temps extrêmement bref (de l'ordre de la milliseconde) sature l'espace entourant l'étoile. Il y a formation de paires électron-positron en abondance, et émission de rayons gamma doux.

> L'analyse des sursauts a montré qu'ils présentent le même comportement statistique que les tremblements de Terre ! Les plus intenses sont très rares, les plus fréquents sont de faible énergie. C'est ce qui a mis sur la piste de l'explication.
>
> De plus, l'évolution de l'énergie ressemble beaucoup à celle de nombreux systèmes proches d'un point de rupture, comme la neige avant une avalanche (ou la croûte terrestre avant un tremblement de Terre). La moindre perturbation provoque une transition brusque.

Les sursauts gamma de faible intensité sont bien expliqués ainsi. Mais pas les monstres comme celui du 5 mars 1979. Dans certains cas, le

champ magnétique devient globalement instable, et subit un réarrangement complet. C'est analogue à ce qui se passe dans l'atmosphère du Soleil, lorsque les lignes magnétiques se rapprochent, et finissent par se rejoindre en éjectant une boucle magnétique (reconnexion magnétique) qui s'élève en emportant du gaz chaud : ce sont les éruptions solaires. La formation des paires électron-positron est intense, les rayons gamma émis également. Tout ceci forme une boule de plasma, dont une partie s'élève en se refroidissant, le reste étant piégé par le champ magnétique. Les rayons gamma durs sont produits au tout début, par la reconnexion elle-même ; le refroidissement de la boule de feu donne au contraire des rayons gamma mous, pendant un temps bien plus long. La partie de la boule qui reste piégée dans le champ magnétique s'évapore progressivement, en produisant un rayonnement X.

**SGR, Sursauteurs gamma**

Lors d'une réunion tenue à Toulouse en juillet 86, les spécialistes ont décidé de donner un nom à ce genre d'objet, et se sont mis d'accord sur le terme *SGR* (*Soft Gamma Repeater*). Cette locution désigne donc un émetteur à répétition de rayons gamma mous (basse énergie). Pourtant, des gamma durs sont produits au début du sursaut. Mais bien que le terme ne soit pas parfait, c'est celui qui est utilisé. Les SGR sont nommés en français *sursauteurs gamma*.

Disposant enfin d'un nom générique associé au type d'objet, il fallait trouver un nom particulier pour chacun. Deux méthodes sont en vogue en astronomie pour fabriquer des noms : l'utilisation de la date, ou celle des coordonnées. Puisque les sursauts considérés sont répétitifs, la date ne convient pas. Ce sera donc la position sur le ciel qu'on choisira. Un objet sera désigné par les lettres SGR suivi de ses coordonnées équatoriales : ascension droite (deux chiffres pour l'heure, deux chiffres pour les minutes), suivi de la déclinaison (le signe + ou -, deux chiffres pour les degrés).

Le sursaut qui a servi pour tant d'études, celui du 5 mars 1979, est situé à 5 h 26 mn d'ascension droite, et -66° de déclinaison. Il est ainsi nommé SGR 0526-66. Etant de forte intensité, on conclut qu'il a été le résultat d'une reconnexion magnétique dans une magnétar. L'absence de contrepartie optique interdit d'interpréter cet objet comme une étoile à neutrons entourée d'un disque d'accrétion. La présence d'un tel disque ne pourrait passer inaperçue, ceci a été démontré par D.L. Kaplan en 2001.

D'autres magnétars ont été observées, associées à divers sursauts. En particulier SGR 1806-20, entre le Sagittaire et le Scorpion, est associé au reste de supernova G10.0-0.3 qui présente un pulsar jeune au centre, semblable au Crabe. Il se trouve à 50.000 AL de nous, et se trouve dans une grande région H II. Les rayons X émis par ce sursauteur ont une périodicité de 7,47655 s, ce qui précise l'association avec une étoile à neutrons. Sur les données reçues du satellite japonais *Asca*, comparées à celles de *RXTE*, la variation de période sur trois ans a été mesurée. La période a augmenté de 8 ms. Si l'objet n'était qu'un pulsar, ralentissant par la perte de l'énergie rayonnée, son éclat serait bien inférieur à ce qui est observé. Il faut bien une magnétar pour expliquer l'éclat reçu. Le 27 décembre 2004, cette magnétar a émis le sursaut le plus violent observé à ce jour : il a été 35 fois plus énergétique que celui du 5 mars 79. Ce sursaut a eu des conséquences sur la Terre : le taux d'électrons libres dans la haute atmosphère est passé brusquement de 4 / $m^3$ à 400.000 / $m^3$.

SGR 1900+14, associé au reste de supernova G 42.8+0.6, a donné un sursaut le 27 août 1998 comparable à celui du 5 mars 1979. Sa période est de 5,16 s. Il s'agit bien encore d'une magnétar.

| émetteur | date | énergie | période | distance | constellation |
|---|---|---|---|---|---|
| SGR 1900+14 | 27/08/98 | 2 $10^{37}$ J | 5,17 s | 16.000 AL | Aigle |
| SGR 0526-66 | 5/03/79 | 6 $10^{37}$ J | 8 s | 180.000 AL | Dorade (GNM) |
| SGR 1806-20 | 27/12/04 | 2 $10^{39}$ J | 7,46851 s | 50.000 AL | Sagittaire |

**Physique fondamentale**

L'étude de ces objets est très intéressante, car elle ouvre une voie d'investigation pour les physiciens : il est impossible sur Terre de produire des champs magnétiques aussi forts, et par conséquent d'expérimenter ce qui pourrait se produire dans un tel environnement. On est dans la même situation qu'avec les rayons cosmiques, qui atteignent parfois $10^{20}$ eV, plusieurs ordres de grandeur au-dessus de ce qu'on peut faire dans les grands accélérateurs de particules. Encore une fois donc, la physique expérimentale est dépassée, et la Nature nous offre le meilleur laboratoire possible. L'ennui dans ce genre de situation est l'aspect aléatoire : un événement se produit lorsque les conditions nécessaires sont réunies, pas lorsqu'on appuie sur un bouton… Et de plus il se produit où il peut, sans nous prévenir en général !

Pour donner une idée des problèmes de physique que cela pose, considérez un atome, avec son cortège d'électrons. Les électrons étant des particules chargées, sont sensibles à un champ magnétique. Dans les conditions habituelles, le champ produit par le noyau est prépondérant, et le cortège électronique prend une symétrie sphérique. Mais dans les champs extrêmes des magnétars, le cortège électronique serait très déformé, prenant une forme allongée dans le sens des lignes de champ. Que se passe-t-il alors ? La physique que nous connaissons bien s'applique-t-elle sans modificationsnbsp;?

## *Autres sursauts*

Les instruments placés à bord des diverses sondes spatiales ont détecté beaucoup de sursauts (quelques 500 sur 20 ans). Mais seuls quelques uns ont été étudiés particulièrement et ont amené à la définition des magnétars et des SGR. Ces sources présentaient une attaque très brusque, rendant beaucoup plus facile la détermination de leur début, donc de leur position. A partir de là, leur étude dans d'autres longueurs d'onde a été possible, et a débloqué la situation. Pour les autres sursauts, de loin les plus nombreux, le mystère subsiste. C'est à eux que les observations présentées ci-dessous se sont attaquées.

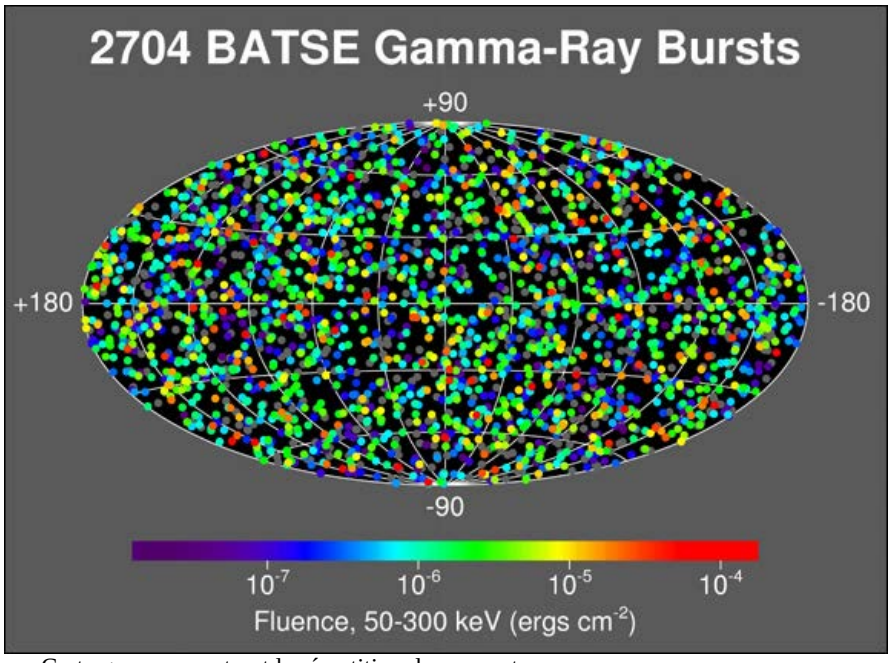
En 1976, le satellite européen *cosB* a fourni la première carte galactique en rayonnement gamma. Il a également établi un catalogue de sources, comprenant deux pulsars et un quasar à faible décalage spectral.

**Instrument BATSE**

Les sursauts gamma étudiés jusqu'ici sont associés à des restes de supernovæ, et le modèle théorique (SGR) implique la répétition des sursauts. Cette explication est-elle générale ? On nomme *GRB* (*Gamma Ray Burst*) un sursaut qui ne présente pas de répliques. La différence entre GRB et SGR est-elle réelle ? Considèrons un sursaut répétitif, comme SGR 1806-20, qui est relativement proche. En supposant qu'il soit beaucoup plus loin, son premier sursaut serait encore visible, mais les répétitions seraient bien trop faibles pour être détectées. Evidemment, la répétition observée n'est pas le critère pour distinguer entre les événements, et il restait du travail pour tout comprendre. On avait choisi les plus faciles à étudier ! Le profil temporel du sursaut devrait être un meilleur critère.

Les américains, qui n'avaient pas eu beaucoup de succès sur le plan observationel, ont voulu frapper un grand coup, et résoudre définitivement le problème… Ils ont enfin repris le principe des soviétiques, d'utiliser des instruments à réponse anisotrope (comme les *Konus*). Ils ont construit en 1991 le satellite *CGRO* (*Compton Gamma Ray Observatory*) spécialement destiné à l'étude des sursauts gamma, et comprenant plusieurs instruments. Tous les instruments avaient un pouvoir séparateur de l'ordre de plusieurs degrés, rendant illusoire toute identification de source. La masse de ce satellite atteignait 15.620 kg, excusez du peu… L'instrument qui nous intéresse particulièrement est *BATSE* (*Burst And Transient Source Experiment*). Il était 10 fois plus sensible que les instruments qui l'ont précédé.

Le satellite américain CGRO a échoué dans son but de résoudre les sursauts gamma, n'ayant rien apporté de nouveau dans leur explication. Toutefois, il a produit une carte du ciel, donnant la position approximative des 2.704 sursauts enregistrés, qui est d'un grand intérêt. La totalité des observations précédentes cumulait à peine 500 événements sur 20 ans.




Carte gamma montrant la répartition des sursauts image G. Fishman et al., BATSE, CGRO, NASA

Les couleurs des points sont des codes, correspondant au flux énergétique reçu = énergie totale pendant toute la durée du sursaut. Les sursauts longs et brillants sont en rouge, les faibles et courts en violet. Les points gris n'ont pu être mesurés. La taille des confettis sur la carte montre la faible précision de l'instrument, qui détermine les positions à quelques degrés près seulement. La répartition sur le ciel est pertinente, mais les positions inutilisables. Les observations de BATSE sont toutes comparables, puisqu'obtenues avec le même instrument, alors que les autres étaient acquises par une kyrielle d'instruments différents, induisant des erreurs dans la comparaison.

Cette carte est établie en coordonnées galactiques. Le centre de la Galaxie est donc au centre de l'image, et l'équateur galactique (le plan de la Galaxie) est la ligne centrale horizontale. Cette disposition permet de visualiser d'un coup d'œil le principal renseignement obtenu : il n'y a aucune concentration dans le plan galactique, mais bien une répartition aléatoire sur toute l'étendue du ciel. Si les sursauts sont produits par des restes de supernovæ, ils doivent être regroupés dans le plan de la Voie Lactée, puisque c'est là que se trouvent les étoiles pouvant leur donner naissance. Cette carte montre que ce n'est absolument pas le cas. Les sursauts proviennent de toutes les directions de l'espace, donc ils peuvent avoir leur origine dans des galaxies lointaines. Si on les voit de si loin, quelle est leur énergie ?

*Les sursauts gamma observés ne proviennent pas d'étoiles à neutrons, comme les études précédentes des SGR le donnaient à penser.*

Attention, cette répartition uniforme ne s'applique naturellement pas aux SGR, qui ne sont qu'un tout petit nombre, n'influencent pas les statistiques, et restent situés au voisinage du plan galactique.

BATSE a observé une moyenne de 0,8 sursaut par jour (2.704 sursauts en 9 ans). Puisque ces sursauts proviennent de l'Univers tout entier, ce sont des phénomènes rares ! **Brillants malgré l'éloignement et rares**, voici leurs caractéristiques essentielles.

Enfin, BATSE a classé les sursauts observés en deux catagories :

- **les courts**, dont la durée est comprise entre quelques millisecondes et quelques secondes (moyenne 0,3 s) ;
- **les longs**, dont la durée va de quelques secondes à quelques centaines de secondes.

L'homogénéité des sources autour de nous peut s'expliquer de trois façons différentes :

- soit les sources sont très proches, et entourent le système solaire ;
- soit elles constituent un halo autour de notre Galaxie, et sont donc relativement proches (moins de 300.000 AL) ;
- soit elles ont une origine lointaine, à des distances cosmologiques.

La première hypothèse est facilement éliminée, car des objets aussi énergétiques et si proches seraient forcément détectés par ailleurs, ce qui n'est pas le cas.

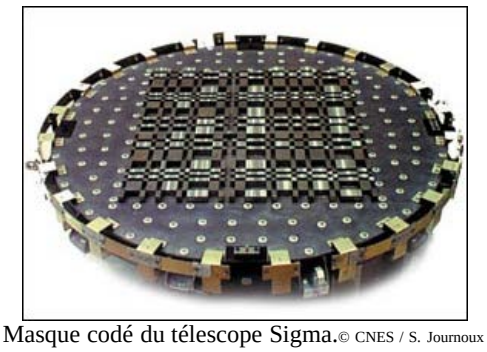
Dans les données de BATSE, les sursauts les plus faibles, qui pourraient être également les plus lointains, sont aussi les plus longs. Si cette propriété est réelle, et non due à un effet observationnel, elle pourrait indiquer une distance cosmologique. En effet, les sursauts les plus lointains sont donc animés de vitesses très importantes par rapport à la Terre, par l'effet de l'expansion de l'Univers. Et la Relativité nous dit que les durées mesurées augmentent avec la vitesse. **C'est donc un indice qui suggère une origine cosmologique**.

**Sigma et BeppoSAX**

Après l'échec américain pour expliquer les sursauts gamma, c'est un tout modeste satellite européen (coopération italo-hollandaise) qui a résolu le problème. Mais pour y parvenir, il a utilisé un principe qui avait été développé avant dans les rayons X.

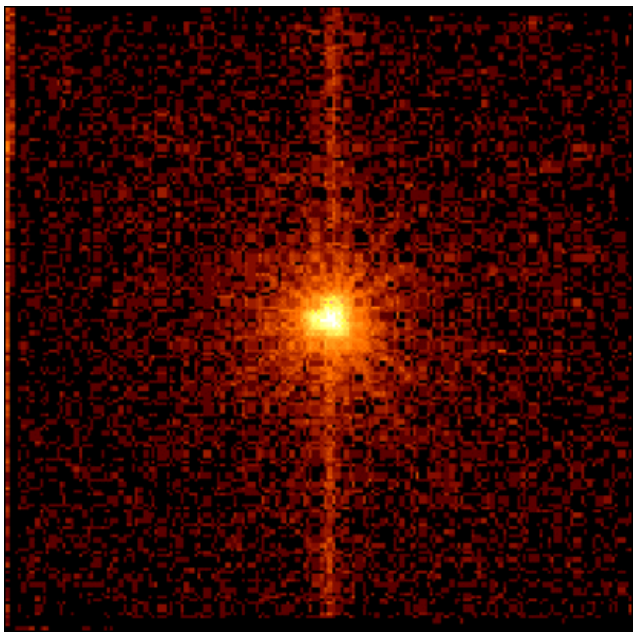
Quel est le problème ? Faire de l'optique en rayons X durs ou en gamma. Or ceci est impossible, puisque ces rayons pénètrent dans la matière. Il faut donc trouver un autre moyen de déterminer la direction précise d'une source. Le principe du masque codé a été appliqué en rayons X durs par les anglais, dans l'instrument XRT à bord de Spacelab en juillet 1985

Mais dans le domaine gamma, il a été mis en œuvre pour la première fois pas une équipe française (Jacques Paul), sur l'instrument **Sigma** (*Système d'Imagerie Gamma à Masque Aléatoire*). Remarquez que le sigle sonne bien, mais ne correspond pas à la réalité ! En effet, c'est un masque codé qui était utilisé sur Sigma et non un masque aléatoire… Cet instrument était dévolu à trouver la position précise d'une source gamma observée. Mais pour des raisons de poids en particulier, sa couverture sur le ciel était limitée à 0,5 % du ciel. Aussi la probabilité d'observer un sursaut gamma pendant la durée de vie du satellite était-elle très faible, et effectivement il n'en a observé aucun ! Sigma utilisait une caméra à scintigraphie, développée pour l'imagerie médicale. Ceci a singulièrement limité les coûts de production. Son pouvoir séparateur était de 15', et la précision de position d'une source était d'une minute seulement ! Donc quelques 100 fois mieux que CGRO.



Masque codé du télescope Sigma.© CNES / S. Journoux

Ce télescope a été envoyé à bord du satellite soviétique Granat (dédié aux rayons gamma) en 1990. Il a rapidement détecté une nouvelle source gamma proche du centre de notre Galaxie, et pu déterminer sa position à 27" d'arc près ! Cette excellente position a permi de l'associer à la source X IE 1740.7-2942 cataloguée par le satellite Einstein. Or le spectre de cette source X évoquait une étoile en orbite autour d'un trou noir, alimentant un disque d'accrétion. Grâce à cette excellente mesure de position, on a pu l'associer également avec une radio-source, observée au VLA, dont la structure était à peu près connue : l'image radio montre une source compacte, de laquelle partent deux jets opposés, terminés chacun par un lobe. Ainsi, on observe un objet qui présente la même structure qu'un quasar, mais qui se trouve dans notre Galaxie, à faible distance, et dont le centre est occupé par un trou noir de masse stellaire seulement. Ces ressemblances ont suggéré le nom de *microquasar*, qui a donc été donné à ce type d'objet.



Microquasar GRS 1758-258, XMM-Newton, photo Andrea Goldwurm

Le champ de cette image est de 11', autour du trou noir qui alimente le microquasar GRS 1758-258. La ligne verticale est un artefactdû à l'intensité de la source.

Plus un trou noir est massif, plus sa densité est faible. Ceci permet de comprendre que le disque d'accrétion (à son bord interne) autour d'un trou noir de masse stellaire est plus chaud que celui qui entoure un trou noir super massif, comme ceux présents au centre des quasars. C'est pourquoi les quasars émettent beaucoup de lumière dans le visible, et dans l'UV, alors que les microquasars émettent fortement dans des longueurs d'ondes bien plus courtes, caractéristiques de températures beaucoup plus élevées.

Après Sigma, le satellite italien SAX (*Satellite per l'Astronomia a raggi X*) était doté lui aussi d'un instrument à masque codé. Mais en plus, il emportait un instrument à large couverture (du même type que les premiers détecteurs installés sur les sondes interplanétaires), et un faisceau de caméras à champ étroit. Le but était de détecter un sursaut à l'aide de l'instrument à large couverture, qui donne une précision de quelques degrés. A partir de là, l'une des caméras à champ étroit doit observer le sursaut et préciser la position. Enfin, le masque codé donne la précision maximum. Tout ceci étant à bord du même satellite travaille en coordination, et donc trèsrapidement. Mais pas automatiquement. Lorsqu'un sursaut est observé par le détecteur à large couverture, le signal est envoyé au sol, où des astronomes l'analysent, et décident éventuellement de repositionner le télescope. Ceci prend du temps, et retarde l'étude du signal rémanent, mais bien moins que tout ce qui a été fait avant.

Le lancement de ce satellite a été retardé de 15 ans par l'explosion de la navette Challenger. Dès sa mise en orbite en 96, le satellite, développé par Livio Scarsi, a été renommé *BeppoSAX* en honneur de Giuseppe (diminutif *Beppo*) Occhialini, qui l'avait formé.

Le **28 février 1997**, un événement à été découvert dans les données transmises au sol. Leur analyse immédiate a montré un sursaut long de 80 secondes, d'intensité moyenne, dont la courbe de lumière était complexe. Mais l'une des caméras à grand champ avait aussi enregistré l'événement, ce qui a permi de construire une image du champ de l'objet, et d'en déduire une position de 3' quelques heures après le début du sursaut. Les caméras à champ étroit ont alors été pointées dans cette direction 8 heures exactement après le début. Une autre observation faite trois jours après à montré un rayonnement X, qui avait diminué d'intensité d'un facteur 20, et dont la position était déterminée avec une erreur de 50" seulement

De plus, les responsables du satellite ont immédiatement publié la position du nouveau sursaut, ce qui a incité Jan Van Paradijs à pointer le WHT (William Herschell Telescope, instrument de 4,2 m de diamètre), au cours de deux observations à une semaine d'intervalle. Sur la première photo, il y avait un objet visible, sur la seconde il avait disparu, définitivement. C'était la première fois qu'on observait la contre-partie visible d'un sursaut gamma. Mais, bien qu'associée au sursaut lui-même, elle n'était pas produite par le même mécanisme puisqu'elle ne brillait qu'assez longtemps après. On la nomme pour cela *émission rémanente*.

BeppoSAX a rapidement récidivé, et deux nouveaux sursauts ont été observés dans le visible également. Il a été possible, grâce aux plus grands télescopes actuels, de prendre un spectre de la contre-partie optique. Ces spectres ont montré à l'évidence que les sursauts gamma sont des objets cosmologiques, dont les distances se chiffrent en milliards d'années-lumière : le décalage spectral de GRB 971214 atteint 3,412 ! Il est donc à 11,9 milliards d'années-lumière.

Du coup, on pouvait détreminer l'énergie produite par ces phénomènes, et constater que c'était les explosions les plus violentes qu'on ait jamais observées. Il faut bien réaliser qu'on arrive à voir des éclairs qui ont été émis à l'autre bout de l'Univers observable  Les problèmes liés à l'observation des sursauts gamma étaient résolus, il restait à les expliquer !

**Modèle**

La luminosité de GRB 971214 vaut 1,22 $10^{47}$ Joules  Pour calculer cette valeur, on a supposé que le sursaut possédait la symétrie sphérique, c'est-à-dire qu'il émettait, dans toutes les directions, la même quantité d'énergie que vers nous. Si au contraire on suppose qu'il n'émet qu'un jet dans notre direction (par hasard), alors l'énergie émise est bien sûr considérablement diminuée. On peut estimer qu'elle serait 1.000 fois moindre. Mais même calculée ainsi, elle reste 1.000 à 10.000 fois plus importante que le plus puissant SGR connu. Le mécanisme qui explique les SGR ne peut donc pas convenir ici (ni par la répartition dans l'espace, ni par l'énergie). Les sursauts gammas sont donc d'une nature tout à fait différente.

Pour expliquer un tel débordement d'énergie, dans un temps si bref, on ne connait pas grand chose d'autre qu'un trou noir qui accrète de la matière en orbite autour de lui. Ce doit être le principe du moteur. La solution a été développée par Frédéric Daigne, dans sa thèse de Doctorat.

Un trou noir de masse stellaire (quelques masses solaires, formé à partir d'une étoile), entouré d'un disque de débris qui tourne en tombant, dégage une énergie qui est de l'ordre de 50 % de l'énergie de masse de cette matière ($E = m c^2$). L'énergie produite est donc $E = 10^{47}\ m$ Joules, où *m* est la masse accrétée en masses solaires. On voit qu'avec une masse solaire, on peut obtenir l'énergie nécessaire pour expliquer le phénomène. Cependant, ce n'est pas si simple.

Un trou noir n'est pas un objet rigide, sur lequel la matière en chute s'écraserait (comme sur une étoile à neutrons). En fait, un atome peut parfaitement traverser l'horizon sans rencontrer la moindre résistance, et donc sans dissiper d'énergie. Une fois la particule à l'intérieur de l'horizon, si elle dissipe son énergie, celle-ci restera confinée dans le trou noir, et n'apparaîtra nullement à l'extérieur. Elle est perdue. La question qui se pose est donc : la matière en chute sur le trou noir émettra-t-elle son énergie avant ou après la traversée de l'horizon ?

Frédéric Daigne a montré qu'elle pouvait être émise à l'extérieur, pour une fraction importante, à la condition que la matière forme un disque d'accrétion en rotation rapide ce qui est une condition raisonnable. En effet, accélérée par la contraction, en vertu de la conservation du moment angulaire, la matière tourne à un millier de tours/seconde ! Alors, la survie du disque est longue, elle dure plusieurs secondes ! Suffisamment pour créer les conditions du sursaut.

Lors de la contraction, le champ magnétique s'est également renforcé très fortement. Il entraîne une partie de la matière en chute sur le trou noir vers les pôles de rotation, et l'expulse en deux jets relativistes (vitesses proches de celle de la lumière).

A ce stade, il faut savoir d'où vient le trou noir dont on parle. La première origine est l'effondrement d'une étoile massive, lorsqu'elle n'a plus de carburant nucléaire. Nous verrons l'autre possibilité plus loin. Une étoile massive qui ne peut plus produire d'énergie est constituée d'un cœur massif, entouré d'une enveloppe assez massive, quoique très diminuée par un vent stellaire très violent qui en a expulsé une grande partie.

L'enveloppe est supportée par le cœur. Mais au moment de l'effondrement du cœur, qui se produit en une fraction de seconde, l'enveloppe se retrouve en suspension. Avec l'énorme gravité produite par le cœur effondré, elle va s'écrouler. L'étoile était en rotation, donc avec la contraction la rotation s'accélère. Mais elle avait une symétrie sphérique (sans doute un peu aplatie), qui n'a pas de raison de disparaître. Ceci signifie qu'il y a une matière dense au-dessus des pôles de l'étoile. Alors, les jets évoqués plus haut vont se heurter à cette matière, et produire une onde de choc ; ils ne pourront pas se frayer un passage vers l'extérieur, et il n'y aura pas de sursaut gamma à observer

Imaginons que l'étoile, avant son effondrement, tourne vite sur elle-même ; alors, elle aura une forme aplatie, et l'enveloppe sera fine au-dessus des pôles. Ceci suffit pour que les jets puissent la traverser et extraire l'énergie qu'ils emportent. Alors, des ondes de choc dans les jets libèrent de l'énergie, sous la forme de particules ultra-relativistes. Les photons gamma sont produits par les interactions entre ces particules et le milieu dans lequel elles baignent. Ce mécanisme explique bien les profils observés. Si l'observateur se trouve par hasard dans l'axe d'un jet, alors la vitesse d'approche produit un décalage vers le bleu, c'est-à-dire vers les grandes énergies, et décuple l'intensité du sursaut. Ceci permet d'expliquer la variété des observations.

Le modèle ainsi développé est nommé *modèle des chocs internes*, puisque les rayons gamma sont produits par des chocs dans les jets eux-même. Mais lorsque les jets atteignent le milieu interstellaire, ils sont animés de grandes vitesses encore. Et là se produit un nouveau choc. Le miracle est que ces chocs, qui se produisent avec un retard, expliquent très bien l'émission rémanente.

Enfin, il faut faire les comptes. Combien d'étoiles peuvent ainsi s'effondrer dans un temps donné, et produire un sursaut observable ? Puisque tout l'Univers observable est concerné, on évalue à un million le nombre d'effondrements d'étoile massives par jour ! Dans le modèle, seules les étoiles en rotation rapide pourraient être assez transparentes au niveau des pôles pour permettre les sursauts. On considère qu'une étoile sur 1.000 pourrait être dans ce cas. Il reste ainsi 1.000 sursauts produits par jour… Mais l'observation est très différente si on est aligné avec le jet ou pas. L'amplification résutant d'un bon alignement est telle, que seuls les sursauts qui se produisent dans la bonne direction seront observables. Alors, il faut calculer leur proportion. Un calcul simple de l'angle solide formé par les jets montre que, là encore, un sursaut sur mille pourrait être assez bien aligné pour être observé. Au bout du compte, on arrive à un ordre de grandeur de 1 sursaut par jour. Or CGRO a observé 2.704 sursauts en 9 ans = 3.280 jours, c'est-à-dire 0,8 sursauts par jour. C'est bien ce qu'on attendait.

Il nous reste à voir comment se comporte le modèle lorsque le trou noir se forme par coaslescence de deux étoiles à neutrons. Tournant l'une autour de l'autre, elles rayonnent des ondes gravitationnelles, et dissipent ainsi de l'énergie de rotation. Petit à petit, elles se rapprochent l'une de l'autre, tournent plus vite, et rayonnent davantage. Finalement, elles entrent fatalement en collision. Puisque chacune possède une masse supérieure à 1,4 masses solaires, la somme des deux dépasse les 2 à 3 masses solaires qui est la limite des étoiles à neutrons. L'astre résultant ne peut être qu'un trou noir. De plus, les simulations montrent que dans les dernières phases avant le choc, il y a formation d'un anneau de débris arrachés aux deux astres. On arrive alors à cette situation où un trou noir est entouré d'un disque d'accrétion, ses pôles étant libres. On est dans la bonne situation pour le modèle des chocs internes. La coalescence de deux étoiles à neutrons pourrait donc, à chaque fois, produire un sursaut gamma. Il ne reste que l'alignement avec les jets pour rendre l'observation possible.

Enfin, ces sursauts produiraient moins de rayons gamma, et seraient plus brefs que les autres. Il est alors tentant de croire que les sursauts brefs sont produits à partir de la coalescence, alors que les plus longs sont le résultat d'un effondrement. C'est en tout cas le paysage actuel.

**Nouvelles observations**

Après la définition du modèle des chocs internes, d'autres observations ont été faites, avec d'autres satellites. Elles ont confirmé le modèle. Citons simplement le satellite *Integral* (*INTErnational Gamma Ray Astrophysics Laboratory*), projet européen combinant un télescope gamma à masque codé, et un spectromètre destiné à mesurer précisément l'énergie des photons reçus. Un système d'alerte immédiate à permis à un petit télescope optique, *Tarot* (*Télescope à Action Rapide pour les Objets Transitoires*, 25 cm de diamètre), situé au sol, sur le plateau de Calern (près de Grasse), de réagir immédiatement. Il a observé le champ 19 secondes après le début du sursaut ! Le sursaut n'était pas encore terminé… Pas de chance, ce sursaut s'était produit derrière la Voie Lactée, empêchant de l'observer en optique. Mais la preuve était faite que l'on pouvait désormais étudier la lumière visible du sursaut lui-même.

Depuis, les américains ont construit et lancé le satellite Swift. Celui-ci a observé le sursaut gamma le plus lointain connu : GRB 050904 a été observé par Tarot sous la forme d'un astre de magnitude 18,5 encore visible dans son émission prompte. Son décalage spectral a été mesuré par le télescope Subaru : z = 6,295. L'étoile qui l'a produit s'est donc effondrée 900 millions d'années après le Big Bang.

Cette unique observation prouve que, moins d'un milliard d'années après ce début de l'Univers, il y avait déjà des étoiles massives qui s'effondraient. Donc que l'Univers n'était sans doute pas très différenrt de ce qu'il est aujourd'hui.

**Conclusion**

Il existe deux sortes de sursauts gamma :

- les sursauts répétitifs, dont la source est le réarrangement d'une magnétar :
  - rupture dans la croûte de fer ;
  - reconnexion magnétique dans l'atmosphère ;
- les sursauts non répétitifs, produits par la formation d'un trou noir :
  - par l'effondrement d'une étoile assez massive ;
  - par coalescence de deux étoiles à neutrons.

Pour vous souvenir : les sursauts COurts sont produits par COalescence, les longs par effondrement.

**Bibliographie**

*Explosions cosmiques*, Jacques Paul, éditions Ellipses, Paris 2007 ISBN 978-2-7298-3568-2

*L'Univers dans tous ses éclats*, Alain Mazure et Stéphane Basa, Quai des Sciences, éditions Dunod, Paris 2007

---=OO=---




## *Voie Lactée, galaxies*

**Historique**

Ce que nous voyons à l'œil nu :

- un ensemble d'étoiles, qui constituent la sphère des fixes des Anciens ;
- quelques petites taches floues, ressemblant à de minuscules nuages, nommées nébuleuses ;
- 5 planètes (Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne) ;
- le Soleil et la Lune ;
- et une grande écharpe lumineuse qui fait le tour du ciel, la *Voie Lactée*.

La question qui se pose maintenant est de déterminer la nature de la Voie Lactée. Son apparence laiteuse (d'où son nom) n'a pas vraiment trompé certains esprits, qui se sont demandé si elle ne serait pas due à l'accumulation d'un très grand nombre d'étoiles, très rapprochées, et qu'on ne pourrait pas distinguer individuellement. Malheureusement, ces personnes ne disposaient pas des instruments qui leur auraient permis de trancher.

Un autre problème est celui de la nature des petits nuages visibles dans le ciel. Certains ont une forme irrégulière, d'autres présentent une forme spirale. Là encore, la question s'est posée de savoir si c'étaient des nuages de gaz éclairés par les étoiles, ou bien des systèmes stellaires non résolus par les instruments de l'époque. Dans les années 20, ce problème a fait l'objet du *Grand Débat*.

Ces deux problèmes sont liés, mais nous allons d'abord considérer la Voie Lactée. C'est grâce à un nouvel instrument de sa construction que William Herschell, en 1786, a réussi à distinguer des étoiles dans la Voie Lactée, montrant qu'elle était constituée pour tout ou partie d'astres normaux, mais discernables avec des instruments puissants seulement. L'explication est que ces étoiles sont plus loin que celles qu'on distingue facilement.

Du coup, les nébuleuses spirales pourraient être de même nature : si les nébuleuses sont des nuages de gaz, elles peuvent être proches de nous, et appartenir à notre monde d'étoiles. Par contre, si elles sont constituées d'étoiles, elles sont forcément très loin puisqu'on ne pouvait pas les résoudre.

Cette cinquième partie est consacrée aux galaxies en général, et à la Voie Lactée en particulier, mais ce nom cache des réalités différentes.

La Voie Lactée a été nommée dans l'Antiquité, comme un objet bien identifié, distinct des étoiles, des planètes, des comètes. La légende veut que ce soient quelques gouttes du lait d'Héra qu'Hercule aurait laissé échapper.

Les étoiles qui font la beauté du ciel nocturne constituent -avec la Terre, la Lune, le Soleil, les planètes (les 5 visibles à l'œil nu), les comètes- l'Univers des premiers observateurs. Une observation un peu plus précise a montré qu'il existait aussi de petites taches floues, semblables à de minuscules nuages dans le ciel. On les a nommées nébuleuses.

Puis, on s'aperçut que la Voie Lactée était constituée d'innombrables étoiles, bien trop faibles et trop serrées pour être distinguées à l'œil nu, ou avec un petit instrument. Alors, les étoiles que l'on distingue ne sont que la partie toute proche de la Voie Lactée.

Puis on a compris que le Soleil est une étoile, tellement particulière parce qu'elle est extraordinairement plus proche que les autres. Le Soleil et ses planètes font donc partie de la Voie Lactée.

Sur cette lancée, les nébuleuses en font-elles partie aussi ? La question est plus difficile, leur nature ayant résisté plus longtemps à l'analyse. Et lorsqu'on a disposé des moyens techniques suffisants, on a vu qu'il y avait plusieurs sortes de nébuleuses : celles qui sont constituées de gaz, et celles qui sont formées d'étoiles. C'est la spectroscopie qui a permis de trancher.

Certaines petites taches floues sont bien rondes. Des télescopes plus puissants ont permis d'y voir des étoiles : ce sont les amas globulaires. Ils ont joué un rôle très important dans les découvertes futures. Mais ces ensembles stellaires sont relativement proches, et ne remettent pas en cause la notion d'Univers.

D'autres nébuleuses se sont avérées formées d'étoiles. Elles sont beaucoup plus lointaines que les étoiles les plus éloignées de notre Voie Lactée, dont elles ne font pas partie. Elles sont de même nature qu'elle. La Voie Lactée, avec tout l'environnement proche du Soleil, a donc perdu son statut d'Univers ! L'Univers est un ensemble de voies lactées, toutes plus ou moins semblables.

Il a fallu nommer ces nébuleuses particulières. La partie la plus spectaculaire de notre système étant la Voie Lactée, on a utilisé son nom grec : galaxias (du grec *galactos* et *axias*), pour nommer ces entités. La nôtre, la favorite, se nomme la Galaxie avec une majuscule, alors que les

autres ne sont que des galaxies plus ou moins anonymes.

Le nom de nébuleuse est maintenant réservé aux nuages de gaz.

Il va falloir maintenant étudier toutes ces galaxies.

Mais notre Galaxie est un ensemble encore plus complexe : certaines parties sont bien visibles -ce sont celles dont on vient de parler-, et d'autres au contraire bien cachées.

Ces dernières n'ont été découvertes (en partie ?) que récemment, soit par une analyse précise des anomalies d'observation des objets visibles, soit par l'utilisation de rayonnements auxquels nous ne sommes pas sensibles, et qui nécessitent des instruments nouveaux. On en distinguera deux parties : le milieu interstellaire, confiné dans la région des étoiles, dont la structure est complexe et l'analyse loin d'être achevée, dont les régions les plus denses sont les nébuleuses brillantes, les régions H II, les nuages froids -ou régions H I- incapables de briller, puis les nuages moléculaires abritant une chimie exubérante. L'autre est encore plus dilué, et s'étend encore plus loin. C'est le halo de notre Galaxie.

Allant toujours de l'avant, lorsqu'on a connu les galaxies, on a ouvert deux domaines de recherche :

- on a étudié les propriétés des galaxies ;
- on a cherché à savoir si elles se groupent, ou si elles sont toutes isolées.

Dans le premier domaine, après avoir étudié les objets, il nous faudra comprendre comment ils se sont regroupés, quelle est la forme de la Galaxie, ses dimensions, quelles sont les interactions entre ses éléments… Les radiotélescopes ont apporté une contribution décisive, avec l'étude des régions H I de notre Galaxie, et la découverte de toute une faune de galaxies étranges, dont les quasars sont les plus célèbres. Mais l'astronomie optique a été très active aussi, et la coopération entre les différentes branches de l'astronomie a permis de se faire une idée de ces objets extraordinaires. Après cette phase exubérante de découvertes, on a fini par unifier ces objets dans un modèle standard, qui permet de les expliquer assez bien tous. Certains de ces objets sont les plus lointains que l'on connaisse, et ils nous retracent le passé éloigné de notre Univers.

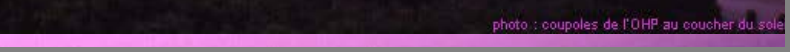
La mesure des vitesses des galaxies par rapport à la Terre a apporté une nouvelle surprise : elles s'éloignent toutes de nous, et d'autant plus vite qu'elles sont plus éloignées. Cette découverte a ouvert la voie à l'étude de l'Univers dans son ensemble ; la cosmologie. Les théories d'Einstein jouent ici le premier rôle. Mais les dernières années ont apporté leur lot de surprises, et tout n'est pas dit dans ce domaine, loin s'en faut…

Dans le second domaine de recherche, on a découvert une forte tendance des galaxies à se regrouper, ce sont les *amas de galaxies*. On a alors étudié la répartition spatiale des galaxies, et observé des amas d'amas, ou *superamas*. On a abouti à une représentation globale de l'Univers, où les galaxies forment une sorte de mousse de savon, dont elles sont les parois, englobant d'immenses zones apparemment vides.

Enfin, l'étude dynamique de la Galaxie va nous réserver une surprise : la masse des objets que nous voyons, réellement dans le visible ou par les rayonnements radio ou infra-rouge, ne suffit pas, et de très loin, à expliquer les mouvements observés. On est obligé d'admettre que la plus grande partie de la masse nous reste aujourd'hui totalement indétectable… A l'heure actuelle, de nombreuses explications ont été évoquées pour décrire cette matière, mais aucune n'a l'appui de l'expérience ou de l'observation. C'est l'un des domaines de l'astronomie de demain…

---=OO=---

# Le milieu interstellaire




## *Les nébuleuses*

**Plan**

Ce que nous voyons… et ce que nous ne voyons pas !
L'absorption interstellaire
Le milieu interstellaire
Les nébuleuses obscures
Les nébuleuses brillantes
par réflexion
par émission : régions H II
La polarisation
Les nébuleuses planétaires
Les nuages d'hydrogène HI
Les nuages moléculaires

Le milieu interstellaire est constitué de gaz (H et He) et de poussières. Il est extrêmement dilué. Il est très complexe : on y trouve un peu de tout…

Nous avons étudié les étoiles, qui sont des concentrations de matière. Les étoiles sont très éloignées les unes des autres. N'y a-t-il rien entre elles ?

Dès la fin du XVIII$^{e}$ siècle, les astronomes possesseurs des meilleurs instruments de l'époque ont pu distinguer des objets, d'allure non stellaire. Il s'agissait de petites taches floues, brillantes, ayant des dimensions et des formes variées. Evoquant à première vue de petits nuages, elles ont été nommées *nébuleuses*. Charles Messier, grand chasseur de comètes, en a dressé un catalogue, pour éviter de les confondre avec son gibier favori. Les objets y sont nommés par un M suivi du n° dans le catalogue. La nébuleuse d'Orion (M 42) est un bel exemple, de forme irrégulière. La nébuleuse d'Andromède (M 31) par contre montre une forme elliptique bien marquée. D'autres ont une magnifique forme spirale, et ont été nommées de ce fait *nébuleuses spirales*.

Après ces premières observations, les astronomes ont commencé à faire un classement de tous ces objets. Les choses ont évolué avec le perfectionnement des instruments, et la nature de ces objets a été comprise. Sous le terme nébuleuse avaient été regroupés des objets très différents, et la terminologie actuelle a changé. Le terme de nébuleuse est maintenant réservé aux objets formés de gaz et de poussières. Ce sont donc ceux-là qui font l'objet de ce chapitre. Les anciennes nébuleuses, spirales ou elliptiques, sont maintenant nommées galaxies. Elles seront étudiées par ailleurs.

Le terme *nébuleuse* reste utilisé pour le nuage de gaz et de poussière.

Lorsque du gaz et des poussières se trouvent dans l'espace, ils peuvent intercepter la lumière des étoiles situées derrière qui ne nous parviendra plus. On aura l'impression qu'il n'y a rien dans cette zone du ciel. Ce sont les nébuleuses sombres. Mais le gaz et les poussières peuvent aussi briller par un mécanisme quelconque. On aura alors une nébuleuse brillante.

La différence essentielle entre les nébuleuses obscures et brillantes est la présence éventuelle à leur proximité d'étoiles chaudes et brillantes pour les illuminer. S'il y a de telles étoiles, la nébuleuse réfléchit leur lumière et brille elle-même. Sinon, c'est une nébuleuse obscure.

Outre ces nébuleuses visibles, on a détecté par des moyens plus subtils de la matière répartie entre les étoiles. On appelle l'espace entre les étoiles, avec son contenu de matière, le *milieu interstellaire*.

## *L'absorption interstellaire*

**Mise en évidence**

Avant le XX$^{e}$ siècle, on croyait au vide interstellaire : entre les étoiles, il n'y avait rien. Le milieu interstellaire existe pourtant, il est constitué de matière de très faible densité, plus faible que celle du meilleur vide que l'on sait produire en laboratoire. *A priori* donc, il est invisible, et par

conséquent très difficile à détecter.

**1re méthode**

Une première indication, indirecte, a été obtenue par des **comptages d'étoiles**. A l'œil nu, on voit à peu près 6.000 étoiles dans l'ensemble de la voute céleste. Avec un instrument, selon son diamètre, on en verra davantage. On va supposer que les étoiles sont uniformément réparties, ce qui doit être assez proche de la réalité si on fait des comptages dans plusieurs directions du ciel. Dans cette hypothèse, plus on regarde loin, plus on voit d'étoiles. Et le nombre d'étoiles proches permet d'extrapoler au-delà : jusqu'à la magnitude 10, on devrait voir 1.500.000 étoiles.

La réalité est différente, on n'en voit seulement 320.000. Ce qui semble indiquer que nous sommes au centre d'une condensation particulière (pourquoi ?), ou alors que l'espace n'est pas totalement transparent. Qui plus est, le chiffre précédent est obtenu en lumière jaune. Mais en lumière bleue, ce sont à peine 170.000 étoiles qui répondent à l'appel. Cette différence en fonction de la couleur indique que **l'espace absorbe davantage le bleu que le jaune**. Nous préciserons plus loin une autre méthode statistique pour mettre ce fait en évidence, en traitant l'exctinction.

**2e méthode**

On a eu la preuve directe de l'existence d'un gaz interstellaire dès 1904, lorsque Hartman a observé spectroscopiquement δ Ori (l'un des trois rois, l'une des étoiles du baudrier). Il s'agit d'une étoile double orbitale, dont les deux composantes se déplacent périodiquement par rapport à la Terre. Dans le spectre, Hartman a observé les raies H et K du calcium ionisé des deux étoiles, qui se déplaçaient périodiquement les unes par rapport aux autres, puisque la vitesse des étoiles par rapport à la Terre varie au cours de leur mouvement orbital. Mais il a eu la surprise de voir en plus un autre système de raies spectrales qui, elles, ne se déplacaient pas. Elles étaient donc produites par des atomes se trouvant entre les deux étoiles et nous, et non liés aux étoiles. C'était la preuve qu'il existe des atomes entre les étoiles, dans le milieu interstellaire, qui n'était donc pas totalement vide.

25 ans plus tard, Struve a montré par une étude systématique d'étoiles de distances connues, que l'intensité de ces raies augmentait avec l'éloignement de l'étoile qui les mettait en évidence. Preuve que le nombre d'atomes absorbants était d'autant plus élevé qu'on observait plus loin. Cette observation prouvait donc que la matière était uniformément répartie dans l'espace, au moins à grande échelle.

Enfin, dans certains cas on observe non pas un système de raies fixes, mais plusieurs ! Ceci nous montre que **le gaz interstellaire**, responsable de ces raies, **n'est pas homogène**, mais bien plutôt regroupé en structures (nuages), animés de vitesses différentes par rapport à l'observateur. Chaque nuage, avec sa vitesse propre, donne un système de raies affecté du décalage spectral correspondant. Les nuages mis ainsi en évidence sont de faible densité, car leurs effets sont légers. Les nuages denses sont visibles directement, soit parce qu'ils sont brillants, telle la nébuleuse d'Orion, soit parce qu'ils sont sombres et très absorbants, tel le Sac à Charbon.

On a observé, outre les raies H et K du calcium ionisé, celles du calcium neutre, du sodium neutre, du fer, du titane… Le déplacement des raies insterstellaires montre des vitesses allant jusqu'à 20 km/s. Dans l'ultraviolet, on a détecté l'hydrogène par sa raie Lyman α (c'est évidemment l'élément le plus abondant), le carbone, l'azote, le silicium, le magnésium… Ce sont des raies de résonance, entre un niveau n et le fondamental. Ceci prouve que l'état normal des atomes est le niveau fondamental, donc que les collisions sont rares : **le milieu est très dilué**.

**3e méthode**

Si l'observation dans le visible a donné les premières indications, elle a ses limites, car les longueurs d'onde qu'elle montre correspondent à des énergies relativement importantes. Or le milieu auquel nous nous intéressons maintenant est froid, et ne peut rayonner dans ce domaine. C'est vers la radio-astronomie qu'il faut se tourner, car elle observe des ondes centimétriques et millimétriques, qui correspondent aux énergies disponibles.

La radioastronomie a tout d'abord montré que l'hydrogène était bien le constituant principal. Dans les nuages froids, ses atomes sont neutres, car l'énergie disponible n'est pas suffisante pour provoquer des transitions électroniques (saut sur un niveau d'énergie plus élevé, puis chute vers le niveau fondamental avec émission de lumière). La maigre énergie présente permet cependant la transition de spin de l'électron, qui est responsable de la raie à 21 cm de longueur d'onde. Il a été possible de cartographier ainsi toute la Galaxie, et en particulier d'en dessiner la structure, nous le verrons dans le prochain chapitre.

On a découvert dans les nuages interstellaires de nombreuses molécules, dont la plupart étaient inattendues ! Parmi les plus simples, on trouve le **radical OH**, qui ne peut exister sur Terre de manière stable. L'atome d'oxygène étant lié à un atome d'hydrogène n'est pas saturé, il lui faudrait un second atome d'hydrogène. Sur Terre, il y a tant d'atomes, qu'il n'éprouverait aucune difficulté à faire son marché pour s'en procurer un second. Il deviendrait alors une molécule d'eau. Mais dans les conditions de vide qui règnent au cœur de ces nuages, la probabilité de rencontrer un atome d'hydrogène est très faible, ce qui explique la stabilité de ce radical. Cette remarque est valable pour d'autres radicaux.

La molécule OH rayonne à 18 cm de longueur d'onde, $NH_3$ à 1,4 cm et CO à 2,6 cm.

On a trouvé d'autres radicaux, composés du carbone : CH, qui pourrait donner des hydrocarbures, et CN, base du cyanure. On a eu la surprise de trouver des molécules complexes, pensant que la chimie ne pouvait produire de réactions à si basse température (moins de 100 K). Et parmi ces molécules, certaines sont les briques de la chimie organique. Ceci a entraîné une révision des idées que l'on avait sur l'apparition de la vie (on a posé de nouvelles questions, rendant le problème peut-être plus difficile encore…).

Les éléments chimiques qui composent ces molécules sont : l'aluminium, le chlore, l'azote, le soufre, l'oxygène, le carbone, le fluor, le phosphore, le silicium, le potassium et le sodium.

On trouve des **molécules minérales simples**, comme le chlorure et le fluorure d'aluminium, le monoxyde de carbone, le chlorure de sodium ou de potassium, le dioxyde de soufre et le monoxyde d'azote. Sur Terre, certaines de ces molécules sont des polluants, rejetés par notre industrie.

On y trouve de **l'eau** ! Elle est composée de l'élément le plus abondant (l'hydrogène), et d'oxygène, élément synthétisé dans les premières pelures de l'oignon stellaire. La synthèse de l'oxygène ne nécessite pas des températures très élevée, elle se réalise dans des étoiles relativement

peu massives, donc abondantes. Il n'y a donc pas pénurie d'eau dans l'espace…

On trouve quantité de molécules plus ou moins rares sur Terre, car elles sont réactives, et ne subsistent guère dans notre environnement. Mais on a repéré aussi du **méthanol** (alcool méthilique) et de **l'éthanol** (alcool éthilique). Certains ne se sont pas privés de dire que la présence d'alcool dans l'espace était un facteur favorable à l'émergence de civilisations extraterrestres… et même de calculer le nombre astronomique ($10^{28}$) de bouteilles de vodka qu'on pourrait remplir avec !

Enfin, il y a de nombreux **composés carbonés et hydrogénés**, dont certains sont des constituants du pétrole. Et de nombreux **composés arômatiques**.

En résumé, l'espace contient de l'eau, de l'alcool, des arômes, du pétrole et des polluants. De quoi s'y sentir parfaitement chez nous !

Voici une petite liste de molécules qu'on trouve dans le milieu interstellaire !

### 4e méthode : extinction interstellaire

On a ensuite étudié le milieu interstellaire par une méthode photométrique. Il est constitué de gaz et de poussières (une poussière étant constituée d'un nombre d'atomes de quelques centaines à quelques millions).

En supposant que l'éclat apparent d'une étoile diminue en fonction de la distance, uniquement par dilution dans l'espace parfaitement transparent, on obtient la relation : $M - m = 5 - 5 \log d$. Il existe d'autre part une autre relation entre M, qui caractérise la puissance rayonnée par l'étoile, et sa température superficielle, qui détermine son spectre. L'analyse du spectre permet donc de remonter à la magnitude absolue. Il reste à mesurer m, et on peut calculer la distance d.

Il s'est alors passé un phénomène curieux. En calculant ainsi la distance des étoiles autour du Soleil, on s'aperçut qu'il y en a de moins en moins quand on s'éloigne. Ceci signifie que le Soleil est au centre d'une concentration d'étoiles ! Ce résultat est le même que celui de comptage des étoiles, mais avec une méthode plus fine.

Depuis Copernic, on se méfie de ce genre de conclusion. La Terre n'est au centre de rien du tout ! Ce phénomène serait donc une illusion, due à une erreur dans la mesure des distances. Ceci peut se comprendre si on admet que quelque chose obscurcit les étoiles avec la distance. Pour mesurer cet obscurcissement, on ajoute un terme dans la relation que nous avons utilisée pour calculer la distance, et on adapte ce terme pour que les comptages donnent la bonne réponse : les étoiles sont juste aussi nombreuses autour du Soleil que plus loin.

On introduit un terme correctif noté extinction(d) :

$$M - m = 5 - 5 \log d - \text{extinction}(d)$$

La fonction extinction(d) est définie pour que la densité d'étoiles soit indépendante de la distance. Ce terme est alors une mesure de l'extinction. Il représente une première tentative de mesure, et n'est valable qu'en moyenne. En supposant le milieu interstellaire homogène et isotrope (mêmes propriétés dans toutes les directions et à toutes les distances), $\text{extinction}(d) = a \times d$, on obtient pour le coefficient a la valeur moyenne :

$$M - m = 5 - 5 \log d - a\, d$$

a = 2 magnitudes par kilo parsec

Remarquez que nous sommes à quelques 10 kilo parsecs du centre de la Galaxie. L'extinction qu'on peut observer est donc de l'ordre de 20 magnitudes ! Autant dire que l'on ne voit rien, ce qui est bien le cas.

### 5e méthode

Une autre méthode a été développée par Trumpler, basée sur la même relation et sur la mesure des distances des étoiles, appliquée aux amas ouverts. Toutes les étoiles d'un même amas ouvert sont à peu près à la même distance, qui est la distance de l'amas. Mesurant la distance de l'amas par la relation habituelle $M - m = 5 - 5 \log d$, et son diamètre angulaire, on en déduit son diamètre réel en années-lumière. On s'aperçoit alors que les amas sont d'autant plus gros qu'ils sont plus lointains ! Là encore, on se refuse à une telle conclusion, et on remet en cause la méthode qui produit cet effet.

Trumpler a poussé son analyse jusqu'à déterminer l'absorption en fonction de la longueur d'onde. Il a obtenu le résultat important suivant :

l'absorption n'est pas la même pour des couleurs différentes, elle est plus importante dans le bleu que dans le rouge. Plus précisément, la variation observée est en $1/\lambda$.

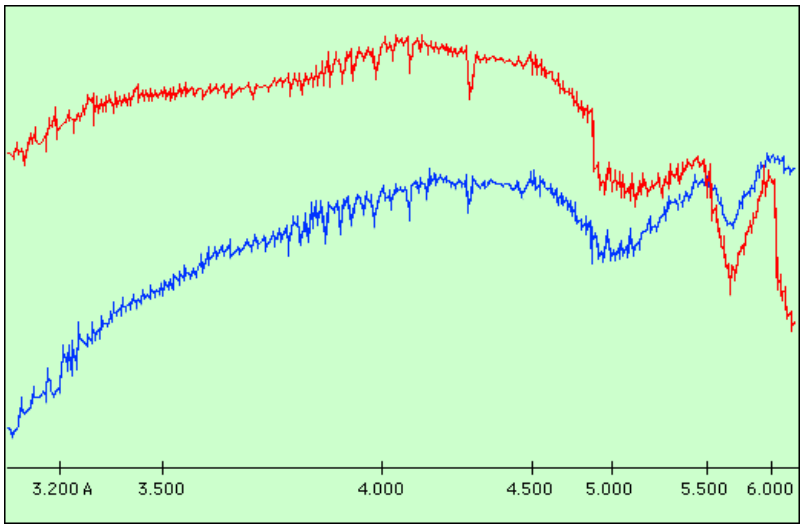
L'importance de ce résultat tient dans l'étude qui a été faite auparavant par des physiciens en laboratoire. Il s'agit des interactions entre la matière à faible densité et la lumière.

En fonction de cette observation, prenons $\lambda = 0{,}4$ µm (côté bleu du visible). $1/\lambda = 1/0{,}4 = 2{,}5$. Prenons maintenant $\lambda = 0{,}8$ µm, (côté rouge du visible) $1/\lambda = 1/0{,}8 = 1{,}25$. L'absorption dans le rouge est 1,25 par rapport à 2,5 dans le bleu, donc moitié moindre. On voit donc que lorsque la longueur d'onde passe de 0,4 à 0,8 µm, l'absorption diminue de moitié. Le bleu est 2 fois plus absorbé que le rouge (ce qui confirme les résultats mentionnés tout au début). Si on observe une lumière dont toutes les couleurs ont la même intensité, alors on verra le rouge presque aussi brillant que s'il n'y avait pas d'absorption, alors que le bleu sera très affaibli. L'impression sera de voir un objet rouge.

Cet effet a été parfaitement mis en évidence sur deux étoiles de même type spectral, β Cephei et 26 Cephei. Toutes deux sont des étoiles B1. Leurs spectres sont donc très semblables, avec les mêmes raies d'absoption (les conditions physiques sont les mêmes dans leurs atmosphères). Leurs spectres devraient donc se superposer. Ce n'est pas le cas. Le schéma ci-dessous montre les deux spectres pris par un photomètre. Pour

chaque longueur d'onde, on mesure précisément la quantité de lumière reçue. On distingue parfaitement les raies d'absoption dans les deux spectres, et on voit bien qu'elles sont semblables. Mais on remarque aussi que l'une des deux courbes est relativement plate (globalement) du côté bleu du spectre (à gauche), alors que l'autre descend très nettement. Cette dernière possède donc moins de bleu, et l'impression globale sera de voir une étoile plus rouge. On apelle ce phénomène le *rougissement interstellaire*. Mais attention, les explications qui précèdent doivent bien vous faire comprendre que le rougissement n'est pas dû à un excès de rouge mais à un déficit de bleu !

Dans le schéma, les deux courbes ont été placées de manière à égaliser approximativement les intensités du côté rouge (à droite). On voit nettement l'affaiblissement de la courbe bleue dans les courtes longueurs d'onde (bleu du spectre).




Spectres des étoiles β Cephei (en rouge) et 26 Cephei (en bleu)

L'importance de l'absorption interstellaire est considérable : à 3 kpcs seulement du Soleil, une étoile perd 3 × 2 magnitudes = 6 magnitudes. Si c'est une splendide étoile qui serait de magnitude 1 sans absorption, elle sera en réalité invisible à l'œil nu !

La valeur de 2 magnitudes par kiloparsec n'est qu'une moyenne, et les écarts à cette moyenne sont considérables : l'extinction n'est pas isotrope. Ainsi, dans la direction du centre de la Voie Lactée, il atteint 30 magnitudes, en seulement 8 à 9 kilo parsecs. Aucune étoile du centre galactique n'est visible, ni à l'œil nu ni même dans un grand télescope ! En regardant dans cette direction, on voit seulement les étoiles les plus proches du Soleil…

**Résumé de la détection**

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|
| comptage d'étoiles | systèmes de raies spectrales | raies radio de H neutre et autres molécules et radicaux | extinction interstellaire | amas ouverts |

**Origine de l'extinction**

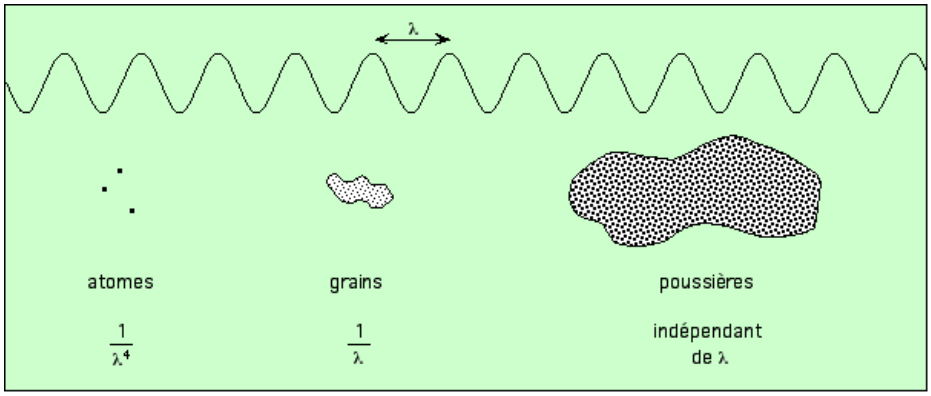
La matière peut se présenter sous diverses formes :

- atomes isolés ou molécules ;
- grains dont la taille est de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de nanomètres ;
- poussières beaucoup plus grosses, de quelques micromètres.

L'étude en laboratoire de ces différentes formes a montré que l'absorption n'était pas du tout la même dans les différents cas :

- lorsqu'il s'agit d'atomes isolés, on constate une diffusion qui se comporte selon la loi de Rayleigh, qui est un simple changement de direction de la lumière. L'absorption se comporte comme $1/\lambda^4$. Elle est peu efficace.
- lorsqu'il s'agit de grains, dont la taille est inférieure à la longueur d'onde, l'absorption est en $1/\lambda$, et elle est très efficace.
- et lorsque les grains sont nettement plus gros, l'absorption est neutre (indépendante de $\lambda$). Elle est importante.

Tout ceci est résumé sur le schéma ci-dessous :




Puisque Trumpler a montré que l'absorption intersidérale est en 1/λ, on en déduit immédiatement, par comparaison, que la matière interstellaire se présente (majoritairement) sous la forme de grains dont la taille est de l'ordre de la longueur d'onde de la lumière visible, c'est à dire de quelques centaines de nanomètres. Ces grains comportent donc quelques dizaines d'atomes tout au plus. On les appelle grains, ou poussières. Mais leur taille est plus proche de celle des particules qui composent la fumée.

Ainsi, une propriété de la lumière qui nous parvient des astres nous montre à la fois qu'il y a une absorption, donc de la matière entre les étoiles, et de plus sous quelle forme elle se présente.

Les poussières interstellaires obscurcissent de deux façons :

- par absorption : l'énergie reçue est absorbée, elle chauffe les grains, qui ensuite rayonnent en infrarouge ; c'est un rayonnement propre, thermique ;
- par diffusion : en changeant la direction de propagation de la lumière.

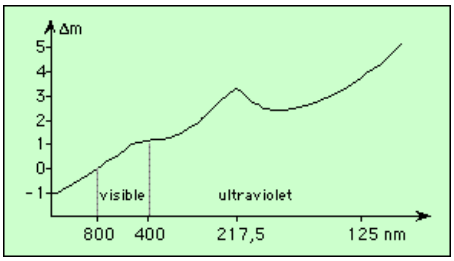
Il reste maintenant à savoir de quoi sont constitués les grains.

**Nature des grains**

La première idée qui est venue à l'esprit, concernant la composition des grains, a été de penser qu'ils étaient métalliques. Mais on s'est aperçu très vite que l'abondance des métaux était très insuffisante pour autoriser cette explication.

Le second modèle envisagé était fait de grains sphériques de glace d'eau, dont le rayon serait de 0,15 µm. Les abondances d'oxygène et d'hydrogène le permettent. Cette solution est restée satisfaisante tant qu'on s'est limité aux observations dans le visible, seul observable depuis le sol. Lorsque les moyens spatiaux ont été disponibles (fusées et satellites), on a commencé à observer dans l'ultraviolet.

Le modèle des grains de glace prévoyait un fort affaiblissement de l'absorption dans l'ultraviolet. On a observé exactement le contraire ! Par conséquent, le modèle ne convenait pas, et il fallait trouver quelque chose de plus complexe.




Le schéma ci-dessus montre l'extinction en fonction de la longueur d'onde. On y observe que l'absorption est d'autant plus forte que la longueur d'onde est plus courte (le bleu et l'ultraviolet plus absorbés que le rouge), et on y voit un **maximum secondaire à la longueur d'onde 217,5 nm**. Ce maximum doit être expliqué par le modèle.

On a noté de plus que ce maximum n'a pas une importance constante en fonction de la direction. Selon l'étoile observée, l'absorption dans cette gamme montre une belle bosse, ou bien une discrète proéminence. Dans certaines régions du ciel, il est très important, alors que dans d'autres il est beaucoup plus discret. L'abondance de l'élément qui en est responsable et donc assez variable.

Des mesures semblables à celles faites sur les grains de glace ont été répétées sur d'autres matériaux. Il est évident que ces expériences portent en priorité sur les corps les plus répandus dans l'Univers, hydrogène, hélium, carbone, azote, oxygène… Leurs résultats expliqueraient le maximum par une résonance électronique produite dans des grains de graphite.

On arrive alors à une situation où les observations nécessiteraient d'une part de la glace, d'autre part du graphite. Il semble donc que les grains ne soient pas de structure simple.

On a observé plus tard dans l'infrarouge, et mis en évidence une **absorption à 3,1 µm**. Ceci est caractéristique de la glace d'eau. Mais on a trouvé aussi une bande d'**absorption IR vers 10 µm**. Les expériences de labo expliquent cette bande par une autre résonance, due à la liaison Si-O entre le silicium et l'oxygène, dans des silicates. Elles permettent de plus de préciser que ces silicates sont amorphes, car les silicates cristallisés présentent des structures dans cette bande, structures non observées dans le milieu interstellaire.

La complexité des grains s'est donc encore accrue : ils contiennent de la glace d'eau, du graphite, et des silicates amorphes. La question est maintenant de savoir comment ces éléments sont regroupés, autrement dit de produire un modèle de grains interstellaires.

Y a-t-il des grains de glace, des grains de graphite et des grains de silicate ? Y a-t-il au contraire un seul type de grains, contenant le tout ? Des modèles doivent être produits, puis des expériences faites si possible pour les valider. Il n'est pas facile de produire de tels grains, car les conditions dans lesquelles ils se constituent dans l'espace ne peuvent être reproduites au laboratoire : les conditions de vide sont bien trop imparfaites.

Les modèles monocomposant ont été évoqués plus haut, ce sont eux qui ont permi de déterminer les constituants des grains. On a ensuite créé des modèles composites. La variation du maximum à 217,5 nm indique une variation des abondances. Les modèles composites doivent l'expliquer. Il y a deux façons de le faire : les grains peuvent intégrer ces différents éléments, ou bien ils peuvent être constitués de plusieurs grains plus petits accolés, chacun de composition simple.

L'absorption s'explique :

- dans le visible par des grains de silicate d'une taille de l'ordre de 0,1 μm ;
- dans l'infrarouge par de la glace d'eau et des silicates ;
- pour le maximum ultraviolet à 217,5 nm, par de petits grains de carbone, de quelques nanomètres ;
- enfin, dans l'ultraviolet encore, par des hydrocarbures aromatiques polycycliques.

Partant de grains de silicate entourés d'une carapace de matière organique et de graphite (1980), on y ajoute des grains de fer et des hydrocarbures. C'est le premier modèle proposé. Mais concuremment, on a imaginé une autre solution, dans laquelle les grains sont de composition simple, et s'agrègent. C'est au niveau d'un grain composite que les propriétés optiques se combinent.

A l'heure actuelle, il n'y a pas de consensus sur ce problème. Il faudra de nouvelles données expérimentales pour contraindre davantage les modèles, et imposer une solution plus précise. Mais les choses sont assez complexes, et il se peut qu'un seul modèle ne suffise pas. Les conditions de formation des grains sont assez différentes, selon qu'on se trouve proche de l'étoile ou plus éloigné (température), selon la composition de la matière qui va former les grains…

**Formation du milieu interstellaire**

Si on accepte la théorie du Big Bang, ce que nous ferons dans l'état actuel des connaissances cosmologiques, l'Univers s'est constitué à partir de la matière formée quelques minutes après l'instant 0. D'un état d'énergie pure, par dilatation et refroidissement, les atomes ont pu se former (hydrogène, hélium et lithium). La dilatation se poursuivant, les atomes se sont éloignés les uns des autres, et ont constitué un fond de gaz de l'Univers. Dans ce milieu se sont formées les galaxies, par condensation de certaines parties.

Une galaxie s'est formée à son tour par effondrement du nuage qui s'est fragmenté pour donner des étoiles. Il serait difficile d'admettre que tous les atomes ont participé à cet effondrement. Il est beaucoup plus naturel de penser qu'une partie seulement a donné les étoiles, et que les autres sont restés isolés. C'est le fond du milieu interstellaire.

Le résultat est un fond constitué d'atomes d'hydrogène, d'hélium et de lithium, dans lequel baignent des étoiles. Certaines étoiles étant très massives évoluent très vite, explosent en libérant dans le gaz ambiant les éléments lourds qu'elles ont synthétisés. Ceux-ci s'agglutinent pour former les grains.

Les fluctuations de densité initiales sont amplifiées par les ondes de compression des explosions d'étoiles. Elles provoquent la contraction de nouveaux nuages, et donc la formation d'étoiles. Parmi celles-ci, les plus massives évoluent et explosent très rapidement… Les explosions restituent au milieu interstellaire une partie du gaz que l'étoile lui avait emprunté.

**Densité**

Ce scénario montre que les propriétés locales du milieu interstellaire sont fortement dépendantes de l'histoire de sa formation. En particulier sa densité peut être très variable. Les nuages et nébuleuses sont des zones de densité supérieure. La forte densité provient souvent de l'onde de compression produite par l'explosion d'une supernova proche. En même temps, la supernova a produit des grains, et les a projetés dans le nuage qui se trouve ainsi enrichi.

Ces grains sont beaucoup moins abondants en masse que le gaz primordial. On estime leur masse à moins d'un centième de la masse du gaz.

La densité est très variable dans l'espace :

| | |
|---|---|
| hydrogène dans le milieu interstellaire | de l'ordre de 1 atome par $cm^3$ |
| nuages d'hydrogène atomique | de l'ordre de 10 atomes par $cm^3$ |
| nuages moléculaires | un millier d'atomes par $cm^3$ |
| nuages absorbants | jusqu'à un million d'atomes par $cm^3$ |
| *ultra-vide de laboratoire* | $10^6$ par $cm^3$ |
| *air ambient* | $2,7\ 10^{19}$ par $cm^3$ |

Les nuages sont de fortes condensations stables par leur autogravité.

Toutefois, il faut comprendre que tout cela est très ténu, de notre point de vue ! Le meilleur vide obtenu dans nos laboratoires, nommé *ultra-vide*, contient encore 1 million d'atomes par $cm^3$… Un nuage interstellaire très dense est donc plus dilué que ce vide-là !

Si on compare à l'air que nous respirons, l'abime est prodigieux : notre atmosphère contient $2,7\ 10^{19}$ molécules par $cm^3$, c'est-à-dire 27.000

milliards de fois plus qu'un $cm^3$ du plus dense des nuages…

Avancez-vous de 1 mètre… Vous venez de pousser un nuage absorbant de 27.000 $km^3$ (un cube de 27.000 km de côté). Il contient en effet le même nombre de particules que l'air que vous avez déplacé. Ou, si vous préférez, une colonne de gaz de 270 millions de km…

Bien sûr, si on considérait une telle matière sur une profondeur de quelques kilomètres, elle serait strictement indétectable. Un rayon lumineux pourrait parfaitement passer entre les atomes sans en être affecté. Mais les nuages s'étendent sur des distances qui se mesurent en années-lumière au minimum. Sur une telle profondeur, on comprend très bien qu'un rayon lumineux a peu de chances d'échapper à tous ces atomes, et doit être influencé par eux (absorption ou autre).

La densité des grains est beaucoup plus faible, de l'ordre de $10^{-13}$ par $cm^3$. Ceci représente 1 grain de poussière dans un cube de 200 mètres de côté ! Nul besoin de chiffon à poussière dans l'espace…

La difficulté de détecter le milieu interstellaire est liée à cette densité extrêmement faible. On conçoit bien que cette matière peut devenir visible si ses effet s'accumulent, si sa densité augmente. A une densité 1.000 à 10.000 fois supérieure, les effets deviennent très sensibles. On voit alors des nuages dont l'aspect peut être très variable, selon leur environnement : sombre, lumineux par réflexion, lumineux par phosphorescence…

Les dimensions et les masses de ces nuages peuvent être énormes.

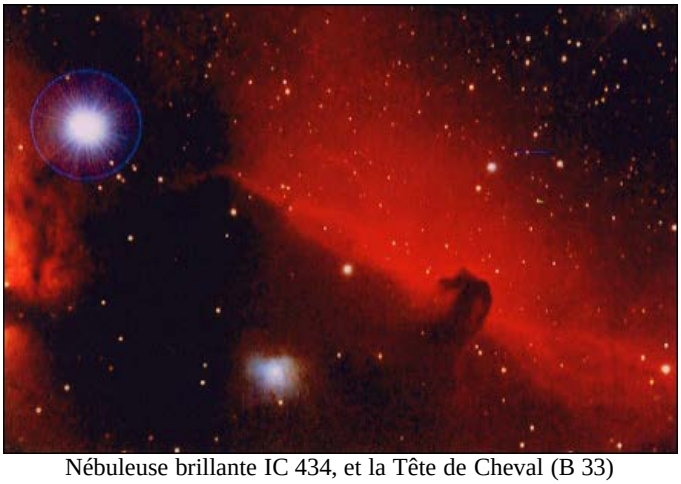
## *Les nébuleuses*

### Nébuleuses obscures

Les nébuleuses obscures sont les parties les plus denses du milieu interstellaire. Elles peuvent s'être formées à la suite d'une explosion proche. Elles possèdent les mêmes propriétés que le milieu lui-même. On les voit se dessiner en ombres chinoises devant des régions riches en étoiles. En l'absence de lumière derrière elles, elles sont difficilement détectables.

Beaucoup de nébuleuses obscures ont été étudiées par Barnard, qui en a dressé un catalogue. C'est pourquoi ces objets sont souvent nommés par un B suivi d'un numéro.

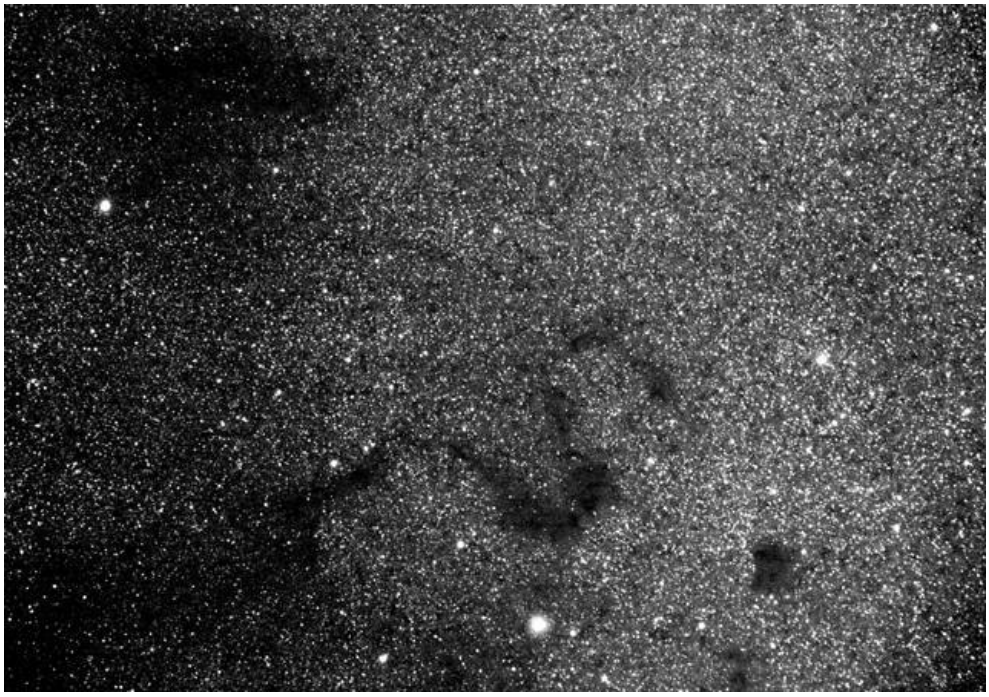
La plus belle nébuleuse sombre est sans doute la Tête de cheval, dont le nom est évident :



Nébuleuse brillante IC 434, et la Tête de Cheval (B 33)
Télescope C8 pose 1 h 10 mn photo J.P. Bousquet

Sur cette photo, on voit l'étoile ζ Ori, l'un des trois rois, ou l'une des étoiles du baudrier d'Orion. La nébuleuse brillante qui apparaît en rouge est IC 434. C'est une nébuleuse filamenteuse illuminée par des étoiles chaudes, et rayonnant en Hα (d'où la couleur). Devant elle se profile la nébuleuse obscure B 33 (Barnard). La partie noire est une immense nébuleuse obscure. Il s'agit d'un nuage de gaz très dense, et poussiéreux. Les quelques étoiles visibles dans cette nébuleuse se trouvent devant elle.

N'étant pas illuminées par des étoiles, ces régions sont assez froides.



Nébuleuse obscure B 72, Serpent de Barnard, lunette 155 mm pose 1 h 5 mn photo J.P. Bousquet

Cette nébuleuse se trouve dans la constellation d'Ophiucus. Le centre de la Galaxie est situé dans le Sagittaire, près du Scorpion et d'Ophiucus. cette nébuleuse se trouve donc dans l'une des parties les plus denses de la Voie Lactée. On voit le fourmillement d'étoiles qui l'entoure.

Dans l'hémisphère sud, le Sac à Charbon en est un autre bel exemple.

**Diagramme de Wolf d'une nébuleuse sombre**

Le diagramme de Wolf est l'application de la première méthode à l'étude des nébuleuses obscures. Il consiste à établir le nombre d'étoiles visibles en fonction de la magnitude, à l'intérieur de la nébuleuse sombre et dans une partie immédiatement adjacente. A côté de la nébuleuse, plus on pousse la magnitude, plus on voit d'étoiles. Mais dans la direction de la nébuleuse, il se produit la même chose jusqu'à ce qu'on atteigne les abords de la nébuleuse. A partir de là, on ne voit plus d'étoiles nouvelles. Ensuite, lorsqu'on arrive à traverser la nébuleuse, on recommence à compter de nouvelles étoiles. Le point de décrochement de la courbe indique la magnitude qui correspond au bord le plus proche de la nébuleuse, la largeur du décrochement indique sa profondeur.

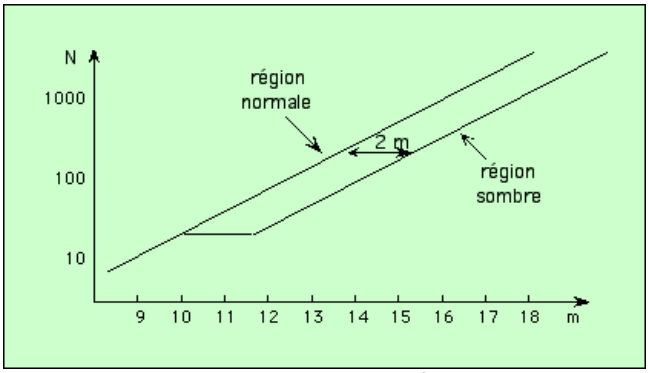



Diagramme de Wolf

## *Nébuleuses brillantes*

Une nébuleuse brillante est un nuage de gaz et de poussières qui brille par un mécanisme quelconque. Chaque mécanisme présente des caractéristiques particulières dans la lumière reçue. Leur analyse permet donc de déterminer la source de cette lumière, et par voie de conséquence les propriétés physiques du milieu concerné.

Une nébuleuse ne brille jamais par ses propres moyens, car elle ne peut pas produire elle-même l'énergie nécessaire. Cette énergie provient donc d'un objet émissif proche, en général une étoile chaude.

On distingue :

- les nébuleuses par réflexion, qui brillent en renvoyant la lumière d'une ou plusieurs étoiles en direction de la Terre ;
- les nébuleuses émissives qui produisent une lumière grâce à l'énergie reçue des étoiles.

Nébuleuse d'Orion 200.000 M

**Nébuleuses par réflexion**

Ce sont des nébuleuses proches d'étoiles brillantes, qui renvoient la lumière. Le mécanisme de réflexion est le même que celui qui produit le ciel bleu dans l'atmosphère terrestre. En effet, on montre que le bleu est beaucoup plus diffusé que le rouge, et par conséquent les rayons bleus du soleil sont beaucoup plus diffusés que ses rayons rouges. Le bleu est éparpillé dans tous les sens, et on le voit partout, alors que le rouge ne peut se voir que dans la direction du soleil.

Le principe étant le même, les nébuleuses par réflexion apparaissent donc bleues. Pour que la lumière diffusée soit suffisante, il faut que la nébuleuse soit très proche d'une étoile brillante, donc chaude et massive. Ce sont des étoiles de type spectraux O, B ou A. De telles étoiles ne vivent que peu de temps, et par conséquent celles que nous voyons sont jeunes. Alors, la nébuleuse qu'elles éclairent est souvent le reste du nuage qui leur a donné naissance.

C'est le cas en particulier pour les nébulosités qui entourent les Pléiades.

Mais on trouve une magnifique nébuleuse par réflexion au-dessus de la nébuleuse d'Orion. Il s'agit de NGC 1977, qui est illuminée par des étoiles chaudes visibles à l'intérieur. Remarquez sur cette photo la différence de couleur entre M 42 (nébuleuse d'Orion, en bas) qui est une immense région H II, et NGC 1977 en haut qui est une nébuleuse par réflexion :



Grande nébuleuse d'Orion M 42, et NGC 1977
lunette 155 mm, compositage de 2 photos de 7 mn 45 s photo J.P. Bousquet

Les nébuleuses par réflexion présentent un spectre continu, qui est le reflet de celui de l'étoile qu'elle réfléchissent.

**Les nuages ionisés : régions H II**

H II est la notation pour l'hydrogène ionisé (H I est l'hydrogène neutre).

Une *région H II* est un grand nuage d'hydrogène (principalement, avec 25 % d'hélium et des traces de tout le reste), dont la plupart des atomes sont ionisés. L'ionisation est produite par la proximité d'une étoile très chaude, de type spectral O, B ou A, qui émet beaucoup d'ultraviolet.

La plupart de ces étoiles font partie d'associations O ou B. Très massives, ces étoiles ont une durée de vie très brève, et donc doivent se renouveller souvent pour maintenir les nébuleuses observables. **Elles sont donc situées obligatoirement dans les régions de formation d'étoiles**, en particulier dans les bras spiraux. On trouve aussi de telles régions dans le bulbe des galaxies, mais avec des propriétés quelque peu différentes : l'ionisation doit y être produite partiellement par des chocs, car la matière est animée de grandes vitesses dans ces régions (vitesse

orbitale élevée autour du centre galactique).

Lorsqu'un atome est ionisé, il est très avide de retrouver un électron. Bien que le milieu soit de faible densité, il y a suffisament d'électrons libres (arrachés à des atomes d'hydrogène) pour que la recombinaison s'opère. Un photon est alors émis. Ce mécanisme produit un spectre de raies en émission, très différent d'un spectre stellaire, qui montre un fond continu avec des raies d'absorption.

Ce mécanisme est la fluorescence. C'est la transformation du rayonnement ultraviolet de l'étoile (qui ionise) en un rayonnement visible, par l'effet des cascades de niveaux.

Le rayonnement le plus important est celui de l'hydrogène. En effet, les protons arrivent à capturer des électrons, et la recombinaison donne des raies d'émission. Par le rayonnement UV des étoiles proches, un tel atome redevenu neutre sera assez rapidement ionisé à nouveau.

La série de Balmer dans les régions H II est très brillante. Elle est le résultat d'une cascade : l'électron est tout d'abord capturé à un niveau supérieur, duquel il tombe spontanément au niveau 2 en émettant une raie de Balmer. Il peut ensuite émettre la raie Lyman α en retombant au niveau fondamental. Bien que d'autres cascades soient possibles, et se réalisent effectivement, celle-ci est la plus abondante, et donc la raie Hα la plus brillante.

La raie Hα étant rouge, les régions H II se repèrent facilement dans le ciel à leur couleur rouge (qui est en fait bien difficile à percevoir…). Pour les détecter, on utilise un filtre rouge : les régions H II apparaissent très brillantes, alors que les autres restent sombres.

Dans les conditions de vide qui règnent à l'intérieur de ces nuages, un atome neutre reste dans cet état pendant quelques mois, avant qu'un photon provenant d'une étoile chaude voisine ne l'ionise. Il reste ensuite ionisé en moyenne pendant quelques centaines d'années !

Le plus bel exemple de région H II est la grande nébuleuse d'Orion, visible à l'œil nu. Cet immense nuage d'hydrogène contient une association OB, nommée *le Trapèze* à cause de sa forme.

La composition d'un nuage comprenant toujours un peu moins d'un quart d'hélium, la question que l'on peut se poser concerne le même mécanisme, mais sur l'hélium. La différence tient dans l'énergie d'ionisation supérieure de l'hélium : il faut 13,53 eV pour ioniser un atome d'hydrogène, mais 24,47 eV sont nécessaires pour un atome d'hélium. Il est donc évident que seule la partie du nuage la plus proche de l'étoile excitatrice pourra disposer de l'énergie nécessaire pour mettre en route ce mécanisme. Au centre de la nébuleuse, il y aura donc des raies d'émission de l'hélium He II et He III, et autour celles de l'hydrogène H II.

Mais ce n'est pas tout, car il y a d'autres éléments, bien que moins abondants. Des raies observées dans certains spectres ont même posé un difficile problème aux astronomes : elles ne correspondaient à aucun élément connu. Elles ont été attribuées à un nouvel élément, inconnu sur Terre (en répétant le scénario de l'hélium, découvert par ses raies dans l'atomsphère du Soleil, puis trouvé sur Terre peu après) et nommé de ce fait *nébulium*. Mais en 1927, Bowen a compris qu'il s'gissait de raies de l'oxygène et de l'azote, mais correspondant à des transitions qui ne peuvent pas se produire au laboratoire. Ce sont les raies interdites. Les plus courantes sont O II, O III et N II.

Seules les régions H II les plus proches sont accessibles par leurs raies visibles, à cause de l'extinction interstellaire. Pour les autres, il faut s'adresser à des rayonnements moins sensibles à cette absorption.

Dans le domaine radio, une raie importante se trouve à 5 GHz (télévision de 30 MHz à 3 GHz), correspondant à la transition entre les niveaux 110 et 109. L'analyse des vitesses radiales est possible sur cette raie. Et en utilisant un modèle plausible de la Galaxie, on peut en déduire la distance.

La phosphorescence n'est pas le seul mécanisme de rayonnement de ces nuages. Ils sont également observables dans d'autres gammes, principalement en radio. Il existe dans ce domaine deux types de rayonnements :

- rayonnement *free-free*, ou de freinage, ou *brehmsstrahlung* ;
- rayonnement *synchrotron*.

Ces deux rayonnements sont d'origine tout à fait différente, et de propriétés différentes aussi.

Les conditions pour le rayonnement free-free sont réalisées, puisque le milieu est ionisé. Au spectre visible de raies de la phosphorescence s'ajoute donc un faible fond continu radio.

Le rayonnement synchrotron demande la présence d'électrons relativistes, se déplaçant à des vitesses proches de celle de la lumière. Il leur faut donc une très grande énergie, et donc un mécanisme pour la leur communiquer. Il faut de plus un champ magnétique. Ce qui fait que l'observation d'un rayonnement synchrotron prouve l'existence d'un tel champ, et permet d'en définir l'intensité.

Le rayonnement global de ces nuages est la superposition des rayonnements précédents, et leur exploration nécessite une analyse fine pour faire la part des différentes sources. Cette étude permet de remonter à la température, à la densité et au degré d'ionisation des nuages.

Enfin, les régions H II émettent aussi un continu infrarouge : les poussières qui s'y trouvent sont chauffées par le rayonnement des étoiles excitatrices, et réémettent de l'infrarouge. Il s'agit du classique rayonnement de corps noir. La température des poussières est de l'ordre de 50 à 100 K.

**Formation**

Une région H II n'existe (en tant que telle) que par l'étoile qui l'excite. Sans elle, ce n'est qu'une nébuleuse brillante par réflexion ou sombre. Or l'étoile excitatrice est forcément une étoile chaude de type O ou B ; ces étoiles sont de très courte durée de vie, et donc les régions H II visibles sont jeunes. Elles s'illuminent à la naissance de l'étoile, qui se produit justement dans un nuage dense !

Le scenario est donc le suivant :

- un nuage dense se contracte localement, pour une raison quelconque (explosion d'une supernova proche par exemple) ;

- une étoile massive se forme et commence à rayonner ;
- le rayonnement ionise le gaz à proximité. Ce mécanisme est très efficace, et la longueur d'onde ionisante est absorbée en totalité sur une très faible profondeur. Mais une fois ionisé, le gaz devient transparent à cette radiation. L'allumage de la nébuleuse se propage donc ;
- la région H II prend donc une forme sphérique en expansion. On la nomme *sphère de Strömgren*. A mesure que le temps passe, quelques atomes se recombinent (capturent un électron en émettant une cascade de photons). Ces atomes redeviennent capable d'absorber le rayonnement. La région va donc vers un équilibre, et son expansion s'arrête là où le rayonnement devient trop faible à cause de l'absorption pour rester ionisant ;
- si l'étoile excitatrice est de type B0, la sphère de Strömgren atteint un diamètre de 150 AL, si elle est de type $A_0$, le rayon est réduit à 30 AL ;
- enfin, l'énergie communiquée par les photons est parfois supérieure à l'énergie d'ionisation. Dans ce cas, la partie strictement nécessaire à l'ionisation est absorbée, et le reste est transformé en énergie cinétique communiquée à l'atome. Ceci entraîne l'atome au loin de l'étoile. Par suite, la région H II se dilate lentement, jusqu'à se dissoudre dans l'espace en quelques millions d'années.

La masse des nuages ionisés est de l'ordre de 100.000 à 10 millions de masses solaires.

On trouve des régions H II dans les galaxies assez proches pour qu'elles y soient observables. Pour ces galaxies, dont on peut analyser précisément la structure à la fois optique et radio, on constate que les régions H II tracent parfaitement la structure spirale : elles s'accumulent le long des bras, et tout particulièrement du côté concave. Ceci s'explique par une onde de densité qui se propage et reforme constamment les bras. Nous verrons ceci plus en détail.

Il existe des régions H II extragalactiques, on les nommes à tort *régions H II géantes*, parce que les plus grandes sont seules observables.

L'analyse radio de ces nuages dans des galaxies extérieures, nécessite une grande finesse d'image, qui ne peut être obtenue que par interférométrie.

**La polarisation**

Un autre phénomène a été observé dans les propriétés de la lumière. Il s'agit de la polarisation. On peut observer la polarisation à l'aide d'un filtre polarisant couramment utilisé par les photographes. Si on regarde la surface d'un bassin, on voit des reflets du ciel, des arbres situés au-dessus, qui empêchent de voir correctement les poissons rouges. L'utilisation d'un filtre polarisant élimine ces reflets, et permet de voir la lumière provenant de l'intérieur de l'eau, montrant les poissons rouges sans reflets. Le même phénomène se produit si on regarde une personne à l'intérieur d'une voiture. Un filtre polarisant permet d'éliminer les reflets, et le cinéma en fait grand usage. Ce phénomène est la polarisation de la lumière.

La lumière dite naturelle, émise par les objets courants chauds, est une juxtaposition de milliards de contributions aléatoires des atomes. Chaque onde possède sa propre orientation dans l'espace : l'onde lumineuse, limitée à la composante électrique, est plane, et ce plan est orienté au hasard. Puisqu'il y a des milliards d'ondes, tous les plans existent et la lumière naturelle est un mélange.

La réflexion de la lumière naturelle sur une vitre ou la surface de l'eau favorise les ondes contenues dans certains plans, en affaiblissant les autres.

La lumière naturelle réfléchie (par une vitre, la surface de l'eau…) ne vibre pas dans n'importe quelle direction, mais dans une direction fixée par les lois de la réflection. Le filtre polarisant permet d'éliminer justement les vibrations contenues dans ce plan, donc les reflets.

Ces remarques concernaient l'usage d'un filtre, donc l'utilisation à notre profit de la polarisation. Il faut maintenant donner quelques explications sur le phénomène.

On sait que la lumière est une onde électromagnétique. On la représente souvent pour simplifier sous la forme d'une seule sinusoïde, alors qu'elle est composée de deux : le champ électrique et le champ magnétique. Chacun produit une onde, de même fréquence, mais leurs plans de vibrations sont perpendiculaires, et ils sont aussi perpendiculaires à la direction de propagation. L'œil est sensible au champ électrique, et c'est pourquoi on peut considérer cette seule vibration.

La lumière est constituée de milliards de photons, chacun ayant sa propre origine et sa propre histoire, qui lui ont donné un plan de vibration électrique particulier. Normalement, ces origines étant différentes (orientation quelconque de l'atome émetteur…), tous les photons ont des plans de vibration différents.

Si on place un analyseur (filtre polarisant) devant une telle lumière, on arête toutes les ondes, sauf celles qui sont dans le plan de l'analyseur. C'est-à-dire qu'on arrête pratiquement tout, et qu'on obtient presque de l'obscurité.

Supposons maintenant que par un phénomène quelconque, tous les photons aient le même plan de vibration. Comme notre œil est insensible au plan de vibration, il verra une lumière normale. Mais si on place un analyseur devant cette lumière, on obtiendra presque toujours de l'obscurité, sauf si le plan de l'analyseur correspond au plan de vibration de tous les photons. Dans ce dernier cas, tous les photons passent, et on verra la totalité de la lumière.

On peut imaginer que, dans une population de photons, une partie soit produite par un phénomène les plaçant tous dans le même plan, l'autre partie étant produite de manière normale, avec tous les plans représentés équitablement. On a donc, dans chaque plan, une petite quantité de lumière normale, sauf pour un plan particulier dans lequel s'ajoute la petite quantité de lumière normale qui est par hasard dans ce plan, et la totalité de la lumière produite par le phénomène particulier. Un analyseur montrera cela : en le faisant tourner autour de l'axe optique, il donnera un peu de lumière dans toutes les directions sauf une, et davantage dans cette dernière. On tirera de cette expérience deux renseignements :

- l'écart de luminosité entre le plan particulier et les autres donne le taux de polarisation, donc la proportion de la lumière qui a subit un phénomène particulier ;
- l'orientation de l'analyseur qui produit le maximum d'intensité donne une information sur l'origine de la lumière.

La diffusion de la lumière par des molécules de gaz favorise la vibration normale au plan contenant le rayon incident et le rayon réfléchi. La

polarisation est totale si ces deux rayons sont perpendiculaires. La lumière diffusée par le ciel bleu est donc polarisée, et la polarisation est totale dans la direction perpendiculaire à celle du soleil.

La polarisation peut être produite par un champ magnétique. Des champs magnétiques très forts sont produits par divers objets (étoiles magnétiques ou magnétars, quasars…). Ces champs magnétiques s'affaiblissent avec l'éloignement, mais ils sont de portée infinie, et additifs. Deux champs d'origines différentes se renforcent ou s'affaiblissent, selon leurs orientations. La présence d'objets magnétiques et les propriétés des champs permettent d'envisager l'existence d'un faible champ magnétique dans le milieu interstellaire.

Voyons maintenant comment un tel champ peut agir. Sur un objet de symétrie sphérique, qui a les mêmes propriétés dans toutes les directions de l'espace, il ne peut agir que globalement (en l'accélérant ou en le ralentissant). Un tel effet passe inaperçu. Mais sur un objet allongé, comme l'aiguille d'une boussole, il va produire une force et éventuellement le faire tourner de manière à l'aligner avec le champ. C'est ce que fait l'aiguille de la boussole dans le faible champ magnétique de la Terre.

Certains grains interstellaires contiennent peut-être des matériaux magnétiques, qui vont les transformer en aiguille de boussole. Mais ces grains doivent être en rotation autour d'un axe (tout tourne dans l'Univers). L'effet du champ magnétique est trop faible pour arrêter la rotation, mais il va l'influencer petit à petit en orientant l'axe de rotation le long du champ. Dans un tel milieu, les grains vont donc tous tourner autour d'un axe aligné sur le champ magnétique. L'interaction de ces grains avec la lumière des étoiles proches produit une polarisation. La proportion de lumière polarisée indique la quantité de grains présents sur son trajet.

**Résumé**

Les observations essentielles concernant le milieu interstellaire sont :

- dans le domaine visible, l'absorption inversement proportionnelle à la longueur d'onde (en $1/\lambda$) ;
- dans l'ultraviolet :
  - augmentation de l'absorption ;
  - le maximum secondaire à 217,5 nm ;
- dans l'infrarouge, la large bande d'absorption sans structure vers 10 $\mu$m.

**Nébuleuses planétaires**

On observe des nébuleuses de petite taille, et de forme particulière. Dans un petit instrument, elles montrent un tout petit disque, qui ressemble à une planète. D'où leur nom.

Il s'agit de l'enveloppe d'une étoile en fin de vie, qui a été éjectée à grande vitesse. Elle emporte de la matière de l'étoile enrichie en éléments lourds, en particulier de l'oxygène. Cet élément va donner des raies d'émission qui colorent la nébuleuse en vert. L'intense raie interdite [O III], à 500 nm, permet par sa couleur verte de distinguer les planétaires des petites régions H II.

| | **Nuage interstellaire typique** | **Nuages denses** |
|---|---|---|
| densité | 1 atomes / $cm^3$ | $10^6$ atomes / $cm^3$ |
| température | 100 K | 10 K |
| masse | 30.000 M | 1 M |

Les régions H II **les plus brillantes** montrent toutes un diamètre de l'ordre de 80 kpcs. Ce fait a une grande importance, car ces régions sont visibles de loin dans les autres galaxies. En supposant qu'elles vérifient la même propriété, on dispose là d'un indicateur de distance.

**Régions H I**

Les régions H I sont les nuages d'hydrogène trop éloignés des étoiles chaudes pour être ionisés. Elles sont contituées d'hydrogène neutre, l'électron se trouvant le plus souvent dans l'état fondamental.

L'énergie disponible étant insuffisante pour provoquer des transitions électroniques, le nuage ne brille pas par lui-même. Par contre, il peut être détecté par absorption devant une source lumineuse, étoile située derrière le nuage par exemple. Les atomes étant dans le niveau fondamental, ce sont les raies d'absorption entre ce niveau et un niveau supérieur qui sont possibles : c'est la série de Lyman, qui est située dans l'ultraviolet.

On peut donc détecter les régions H I situées devant une étoile assez chaude émettant de l'ultraviolet. Mais l'absorption interstellaire limite assez rapidement cette méthode, et seules les régions H I les plus proches dans l'entourage du Soleil sont accessibles.

Pour analyser ces régions, il fallait trouver un domaine spectral beaucoup moins sensible à l'extinction interstellaire. Et ce domaine doit être compatible avec le faible niveau d'énergie disponible dans ces nuages. La raie à 21 cm, due à la transition de spin, répond à ces critères.

| **nom** | **type** | **densité at./$cm^3$** | **température K** | **localisation** | **traceur** | **masse M** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| région H I | H atomique | 10 | | | raie à 21 cm | |
| région H II | H ionisé | | 10.000 | | raie H $\alpha$ [OIII] NII OII | 100.000 à 10.000.000 |
| | | | | | | |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| nuage moléculaire | H moléculaire | 1.000 | 5 | centre galactique | raie à 2,6 mm de CO | |

Les raies de [O III] sont mises entre crochets pour indiquer que ce sont des raies interdites : niveaux métastables de longue durée, qui n'ont pas le temps de se désexciter spontanément au laboratoire, à cause des chocs entre atomes. Ces raies sont tout à fait possibles dans le milieu dilué des nuages interstellaires, les collisions y étant rares.

**Les nuages moléculaires**

Les nuages moléculaires sont d'immenses régions contenant seulement quelques atomes d'hydrogène par $cm^3$, et loin des étoiles chaudes qui pourraient les réchauffer. Leur température est donc très basse, et les atomes d'hydrogène, dans leur errance, arrivent à se rencontrer. Alors, ils s'associent pour former une molécule. L'énergie de liaison des deux atomes dans une molécule d'hydrogène est de l'ordre de l'électron-volt, donc très faible, et rien ne l'apporte dans le nuage. Aussi les molécules y sont-elles stables.

Les nuages moléculaires sont très difficiles à mettre en évidence, parce qu'à de si basses températures, ils ne rayonnent pratiquement pas. Heureusement, on trouve dans ces nuages quelques molécules d'oxyde de carbone. Celles-ci possèdent une raie à 2,6 mm, et sont détectables. Mais en trouve-t-on ailleurs ?

Ces molécules sont fragiles, et une faible énergie peut avoir raison d'elles. Dans les nuages moléculaires, elle sont bien à l'abri, et peuvent perdurer. Mais dans un environnement plus chaud, elles sont détruites. C'est pourquoi elles caractérisent ces nuages moléculaires, et nous permettent d'en établir la cartographie.

C'est dans ces nuages que les nouvelles étoiles se forment.

---=OO=---

# Raie à 21 cm de l'hydrogène neutre




L'hydrogène neutre est froid, il ne reçoit ni énergie thermique (par chocs, parce que la densité est trop faible), ni énergie lumineuse (car il est trop éloigné de toute étoile chaude). Son électron reste donc sagement attaché au noyau, au niveau fondamental, aucune transition électronique ne peut se produire ; donc, aucune émission de lumière. Le nuage est donc invisible, tout au plus détectable, parfois, s'il est situé devant un ensemble d'étoiles riche, dans lequel il montre un trou (sac à charbon, nébuleuses obscures). Mais ce nuage émet cependant des ondes radio : c'est la célèbre raie à 21 cm de l'hydrogène neutre. Le mécanisme d'émission est évidemment un mécanisme de **très** faible énergie. Il s'agit d'une *transition entre les spins du noyau et de l'électron*.

Cette transition a été prédite en 1944 par van de Hulst, mais elle n'a été observée qu'à partir de 1951.

Le spin de l'électron est une propriété qui a été découverte lorsqu'on a essayé d'expliquer la structure en couches des électrons autour d'un noyau atomique. Cette structure a été mise en évidence de manière empirique par les chimistes, par l'examen des propriétés des éléments, selon leur position dans le tableau de Mendéléev. Autour d'un noyau atomique assez lourd, qui compte un nombre relativement important de protons, les électrons s'organisent en couches. La première, la plus proche du noyau et celle de moindre énergie, ne contient jamais plus de deux électrons (un seul pour l'hydrogène, puisqu'il n'a qu'un seul proton, et deux pour les autres éléments).

C'est pour cette raison que le tableau périodique de Mendéléev ne compte que deux éléments dans sa première ligne :

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| H | | | | | | | | | | | | | | | | He |
| Li | Be | | | | | | | | | | | B | C | N | O | F | Ne |
| Na | Mg | | | | | | | | | | | Al | Si | P | S | Cl | Ar |
| K | Ca | Sc | Ti | V | Cr | Mn | Fe | Co | Ni | Cu | Zn | Ga | Ge | As | Se | Br | Kr |
| Rb | Sr | Y | Zr | Nb | Mo | Tc | Ru | Rh | Pd | Ag | Cd | In | Sn | Sb | Te | I | Xe |
| Cs | Ba | La | Hf | Ta | W | Re | Os | Ir | Pt | Au | Hg | Tl | Pb | Bi | Po | At | Rn |
| Fr | Ra | Ac | | | | | | | | | | | | | | | |

Les seconde et troisième lignes contiennent pour leur part 8 éléments, ce qui s'explique d'une manière analogue, parce qu'il existe d'autres nombres quantitques, obéissant à des règles assez complexes, qui permettent à 8 électrons de cohabiter sur ces niveaux d'énergie.

Mais pourquoi cette première couche peut-elle contenir **deux** électrons ? Les électrons sont des fermions, qui obéissent au principe d'exclusion de Pauli. Etant sur la même orbite (on devrait dire *orbitale*, le mot orbite est classique, le mot orbitale plus flou est quantique) autour du noyau, ils ont la **même énergie**. Dans la théorie élémentaire, qui décrit l'électron avec le seul niveau d'énergie, ils sont donc dans le même état quantique, en violation du principe d'exclusion. L'idée qu'un électron puisse posséder un moment cinétique, lui aussi quantifié, donne un nouveau degré de liberté. Ainsi, si ce moment cinétique peut prendre deux valeurs distinctes (quantifiées) alors les deux électrons de la première couche auront la même énergie, mais des moments cinétiques différents, en accord avec le principe d'exclusion qui se trouve ainsi respecté.

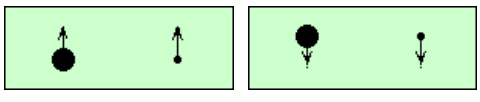
On a nommé *spin* ce moment cinétique. L'électron est maintenant décrit par **deux** nombres quantiques, le *niveau d'énergie* et le *spin*. C'est l'ensemble de ces deux nombres qui constitue son état quantique.

Par la suite, on a généralisé le spin aux autres particules. Ainsi, le proton possède lui aussi un spin, de mêmes valeurs.

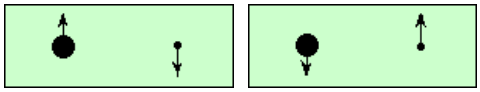
Dans la représentation élémentaire d'une particule (proton ou électron) par une petite bille, on peut supposer que la particule tourne autour d'un axe vertical, soit dans un sens, soit dans le sens inverse (ce n'est qu'une image). La vitesse de rotation est toujours la même. Il n'est donc pas nécessaire de l'indiquer, et seul le sens est significatif. On le notera symboliquement par une flèche tournée vers le haut ou vers le bas.

Les schémas ci-dessous donnent une idée des différents états possibles :

Etats parallèles



Etats antiparallèles



Par analogie avec la mécanique classique, le spin pourrait représenter un état de rotation de l'électron (d'où son nom). Mais dans les unités de la mécanique quantique, il s'exprime par 1/2 h, ou -1/2 h (h étant la constante de Planck). Si l'analogie était tout à fait valable, ce serait un entier (c'est pourquoi les schémas ci-dessus ne sont que des images). Il faut admettre que le spin n'a pas d'équivalent classique. On omet le h, et donc le spin vaut pour l'électron +1/2 ou -1/2.

Un atome d'hydrogène est constitué d'un proton et d'un électron. Chacun possède un spin. Les combinaisons possibles sont :

| état | proton | électron |
|---|---|---|
| parallèle | +1/2 | +1/2 |
| antiparallèle | +1/2 | -1/2 |
| antiparallèle | -1/2 | +1/2 |
| parallèle | -1/2 | -1/2 |

Les deux combinaisons (+1/2, +1/2) et (-1/2, -1/2) constituent un seul état, dans lequel les deux particules tournent dans le même sens, et les deux autres également, car les deux particules tournent dans des sens opposés.

C'est ce qui justifie les appellations d'états parallèle et antiparallèle. La différence d'énergie entre ces deux états de l'atome est très faible.

Un atome peut donc changer d'état s'il reçoit très peu d'énergie. Cette énergie peut provenir de légers chocs. Alors, le spin de l'électron change, et l'atome passe de l'état antiparallèle à l'état parallèle en absorbant cette énergie. Il repassera spontanément dans l'autre état, en émettant un photon dont l'énergie correspond à la différence d'énergie entre les deux états. Cette différence d'énergie étant très faible, le photon se trouve dans le domaine radio, sa longueur d'onde est de $\lambda$ = 21,105 cm correspondant à une fréquence de $\nu$ = 1.420,4056 MHz.

Mais la transition spontanée du niveau de plus grande énergie (état parallèle) vers celui de plus basse énergie (état antiparallèle) a une probabilité si faible, qu'elle ne se produira spontanément, pour un atome donné, qu'au bout de 1,1 millions d'années en moyenne ! Ce délai est tel que l'émission spontanée ne serait pas détectable malgré le nombre inimaginables d'atomes d'hydrogène qui peuplent ces nuages.

En fait, la densité est suffisante pour que chaque atome d'hydrogène subisse un choc assez proche pour provoquer l'émission tous les cent ans. C'est suffisant pour que les nuages d'hydrogène neutre soient visibles dans cette raie. Mais de plus, les chocs responsables de la désexcitation fournissent également assez d'énergie pour exciter l'atome, et le faire passer de l'état antiparallèle vers l'état parallèle, et garantir une nouvelle émission future.

Grâce à ce rayonnement, les nuages d'hydrogène neutre deviennent visibles. Or ils sont très importants, car ils nous permettent de tracer la structure de notre galaxie. On a en effet montré qu'ils se concentrent dans les bras spiraux. Une carte radio de cette raie à 21 cm dessine les bras de la Voie Lactée.

**Raie en absorption**

Nous avons traité la raie à 21 cm en émission, telle qu'elle est le plus souvent observée. Mais dans quelques cas, on la voit en absorption. Pour cela, il est nécessaire que le nuage soit situé sur la même ligne de vue qu'une source radio puissante, qui émette dans cette longueur d'onde. C'est le cas pour quelques nuages placés devant un quasar. Celui-ci émet fortement en radio, et le nuage peut absorber des photons à la bonne longueur d'onde.

Dans quelques cas, on parvient à observer la raie à la fois en émission et en absorption (grâce à un décalage spectral). On obtient alors la température du gaz, et sa densité qui peuvent être calculées.

---=OO=---




Plan

Ce que nous voyons… et ce que nous ne voyons pas !
Forme de la Galaxie
Position du centre
Le halo
Forme du disque
Répartition des étoiles
Où se trouve le Soleil ?
Le centre de la Galaxie
Trou noir central
Rotation
La couronne
Apex
Coordonnées galactiques
Formation de la Galaxie
Résumé

**Partie visible**

Nous allons considérer la Voie Lactée, sachant qu'elle est constituée principalement d'un ensemble d'étoiles, et qu'elle contient des objets tels que les amas ouverts et les nébuleuses gazeuses.

Etant à l'intérieur de notre Galaxie, nous ne pouvons en avoir une vision globale. Nous voyons dans la même direction des objets qui se trouvent en réalité à des distances très différentes. Sans la notion de distance, nous ne pourrions pas établir la forme de notre Galaxie.

Le problème se compare à l'établissement du plan d'une ville, qu'on devrait réaliser en restant sur le toit d'un immeuble. Voir le chapitre sur les distances.

Ces analogies nous font comprendre de quelle manière on a progressivement étendu notre vision de l'Univers. La méthode trigonométrique s'applique aux étoiles proches, dont on peut déterminer la distance, et mesurer certaines propriétés physiques analogues de la taille des fenêtres (par exemple la relation période-luminosité des céphéides). Plus loin, on étudiera ces propriétés, et on en déduira les distances. Plus loin encore, il faudra utiliser d'autres critères, plus globaux, comme la luminosité des amas globulaires ou leurs dimensions. Plus on s'éloigne, plus les critères utilisés sont indirects, plus la précision diminue. Le critère ultime actuel est de nature cosmologique, il s'appuie sur l'expansion de l'Univers.

**Forme de la Galaxie**

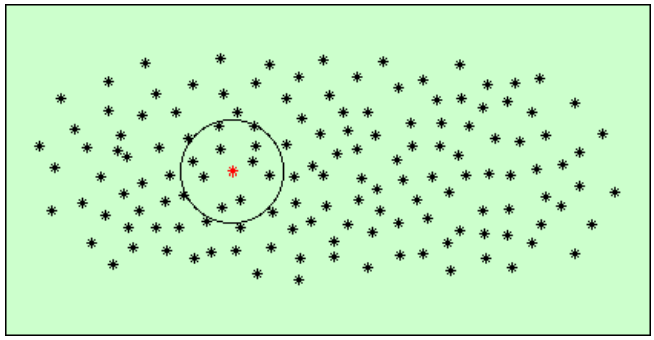
Les étoiles ne présentant, dans les meilleurs instruments, que des images ponctuelles, il a longtemps été impossible d'étudier autre chose que leurs positions, et de les compter. Cette activité a occupé l'Antiquité et le Moyen-Age, avant l'invention de la lunette, et nous a donné les premiers catalogues.

William Herschell, à la fin du XVIII$^{e}$ siècle, a constaté que les étoiles visibles à l'œil nu sont uniformément réparties sur le ciel. Ensuite, il a remarqué que celles qu'on voit au télescope, beaucoup plus nombreuses, ne le sont pas : leur nombre est nettement plus important près de la Voie Lactée que dans la direction perpendiculaire. Cette constatation est à la base de la première méthode d'analyse de la Voie Lactée.

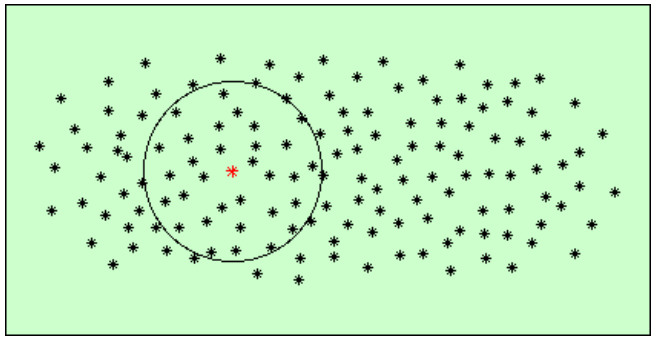
La méthode consistait à déterminer le nombre d'étoiles visibles dans un carré de 1° de côté, selon sa position sur le ciel. Dans toutes les directions, on trouvait à peu près le même nombre d'étoiles, montrant qu'elles étaient bien réparties autour de nous.

Certaines directions contenaient davantage d'étoiles faibles que d'autres. Les étoiles faibles étant statistiquement plus lointaines, il apparaissait que plus on s'éloignait de la Terre, plus les étoiles se concentraient dans une bande particulière. Cette bande correspondait à la Voie Lactée. C'est ainsi que peu à peu s'est dessinée une première ébauche de ce qu'était l'Univers (alors limité à la Voie Lactée), un ensemble d'étoiles aplati.

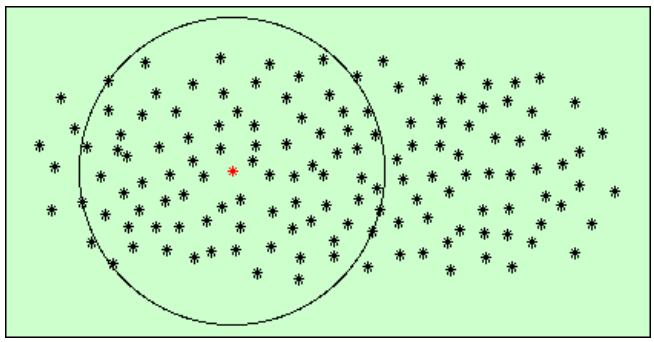
Ces dénombrements ont montré de plus que la Terre était au centre du système d'étoiles. En effet, les schéma ci-dessous expliquent que des instruments de portée limitée amènent nécessairement cette conclusion fausse.



Avec un instrument modeste, on compte autant d'étoiles dans toutes les directions. On a l'impression d'être au centre d'une sphère d'étoiles. Le cercle indique les étoiles visibles depuis la Terre, qui se trouve en son centre (le Soleil en rouge).

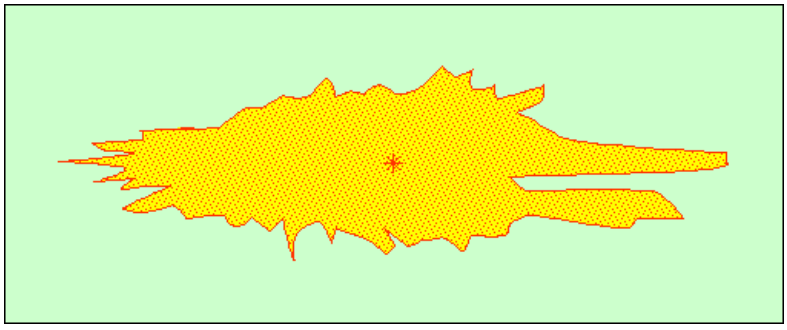


Avec un instrument plus puissant, mais dont la portée est inférieure à l'épaisseur de la bande, on arrive à la même conclusion. La sphère des étoiles visibles est simplement plus grande.



Avec un instrument suffisament puissant enfin, les bords de la bande sont atteints, et on constate que les étoiles ne sont pas groupée en une sphère, mais en une bande dont on mesure l'épaisseur. Dans l'autre direction, les bords ne sont toujours pas atteints, et l'impression de se trouver au centre subsiste. Le jour où on disposera enfin d'un instrument assez puissant pour dépasser les extrémités de la bande, on verra que le nombre d'étoiles, à partir d'une certaine magnitude, n'augmente plus. Cette magnitude limite permettra d'évaluer la taille de la Voie Lactée.

Comme résultat de son analyse, William Herschell a publié le schéma suivant :



Le Soleil est au centre, bien évidemment, et on voit déjà que les étoiles forment un système aplati. Mais si les limites en haut et en bas sont réelles (on avait atteint les dernières étoiles au-dessus et au-dessous du plan de la Voie Lactée), les bords droit et gauche du dessin marquent les limites instrumentales. Dans le plan de la Voie Lactée, l'absorption interstellaire est en grande partie responsable de cette limitation.

A cette époque déjà, l'idée que nous puissions être au centre de l'Univers était abandonnée, et même suspecte. Par conséquent, il devait y avoir une erreur dans la méthode. Cette erreur a été détectée, et elle s'explique aisément.

En examinant attentivement le ciel, on peut remarquer que la Voie Lactée est plus riche dans la direction du Sagittaire que dans la direction opposée. Bien que sa densité soit très irrégulière, elle diminue progressivement en moyenne lorsqu'on s'éloigne de cette direction vers son opposé. On peut donc envisager l'existence d'une disymétrie dans le système d'étoiles, et peut-être même envisager que le Soleil ne soit pas au

centre, si cette disymétrie n'est pas qu'apparente. Mais ceci est trop difficile à interpréter pour donner des certitudes.

**Position du centre**

Après les travaux de Herschell, Shapley a utilisé une technique assez différente pour étudier la Galaxie. Il a fait porter son analyse statistique sur des objets particuliers, les amas globulaires, qu'il a étudiés en détail entre 1915 et 1920.

| | |
|---|---|
| Première indication : | les amas globulaires ont été découverts dans leur grande majorité par William Herschell à la fin du XVIII$^{e}$ siècle, et leur nombre n'a que très peu progressé avec la mise en service de télescopes de plus en plus puissants. Un télescope de plus grand diamètre permet de voir des objets moins lumineux, donc plus lointains (s'il s'agit d'objets de même luminosité intrinsèque). Si on n'en voit pas de nouveaux, c'est qu'il n'en existe pas de plus lointains. Donc tous les amas globulaires sont situés dans une sphère autour du Soleil. Ils sont liés à la Galaxie, et ne s'étendent pas partout dans l'espace. |
| Deuxième indication : | les amas globulaires contiennent de nombreuses géantes rouges très lumineuses, mais qui n'apparaissent que de 10$^{e}$ magnitude au mieux. Ceci s'explique par des distances de plusieurs milliers d'années-lumière. |
| Troisième indication : | la répartition des amas n'est pas uniforme. Un tiers d'entre eux sont situés en direction du Sagittaire, et les autres se regroupent de part et d'autre de la Voie Lactée. Bien entendu, on n'en trouve pas dans le plan même de la Voie Lactée, car s'il y en a, les poussières les cachent à nos yeux puisqu'ils sont très loin. |

La direction des amas étant connue par l'observation directe, il reste à déterminer leur distance précise pour connaître leur position dans l'espace. C'est ce qu'a fait Shapley. Tout d'abord, il a remarqué que certains amas globulaires contiennent des variables à courte période de type RR Lyræ. On sait que ces étoiles obéissent à une relation période-luminosité. Donc la mesure de leur période donne immédiatement leur magnitude absolue, qu'on compare à leur magnitude apparente pour déterminer une bonne estimation de la distance. Mais cette méthode ne s'applique qu'aux amas contenant de telles étoiles visibles. Pour déterminer la distance des autres, Shapley a utilisé des propriétés plus globales. Dans les amas **de distance connue**, il a déterminé la magnitude absolue des 25 étoiles les plus brillantes. 25 est un nombre assez grand pour que cet échantillon soit comparable d'un amas à l'autre. Puisqu'on connait la distance de ces amas, la magnitude apparente des 25 étoiles les plus brillantes permet de calculer leur magnitude absolue. Shapley a trouvé qu'elle était de l'ordre de -1 à -1,5. En supposant que tous les amas aient des propriétés semblables, il suffit maintenant de mesurer la magnitude apparente des 25 étoiles les plus brillantes d'un amas particulier, de leur attribuer la magnitude absolue -1, et d'en déduire la distance.

Maintenant, les positions des amas globulaires sont connues par rapport au Soleil. Shapley s'apperçut alors que ces amas s'organisaient en une sphère autour d'un centre qui n'était pas le Soleil, mais qui se trouvait en direction du Sagittaire. Il en conclut que la Galaxie était contituée d'un système plat d'étoiles, entouré d'un halo sphérique d'amas globulaires, et que le centre commun était dans la constellation du Sagittaire. Les amas globulaires constituant une sphère, il est logique de penser que le système plat des étoiles serait un disque.

Cette vision a été confirmée par la suite.

**Le halo**

La Galaxie est entourée d'un halo, contenant les amas globulaires auxquels on doit ajouter des étoiles libres et de la matière interstellaire. Les étoiles y sont vieilles, atteignant peut-être 15 milliards d'années. Ce sont donc les premières étoiles formées dans la Galaxie. Leur métallicité est particulièrement faible, ce qui correspond à leur âge.

Les orbites de ces étoiles sont quelconques : non seulement elles sont parfois très excentriques, mais elles ne sont pas situées dans le plan général de la Voie Lactée. L'ensemble présente une symétrie sphérique, et s'étend à plus de 160.000 A.L., donc beaucoup plus loin que le disque (qui ne fait que 100.000 A.L. de diamètre).

La densité de la matière interstellaire dans le halo est très faible. Mais l'observation en raie à 21 cm a montré la présence de grands nuages d'hydrogène neutre, qui sont en chute vers le centre de la Galaxie. Un examen infrarouge de l'un de ces nuages y a détecté la présence d'un amas d'étoiles jeunes. Ce nuage est situé à 1.400 A.L. de la Terre, et à 300 A.L. au-dessus du plan galactique.

**Forme du disque**

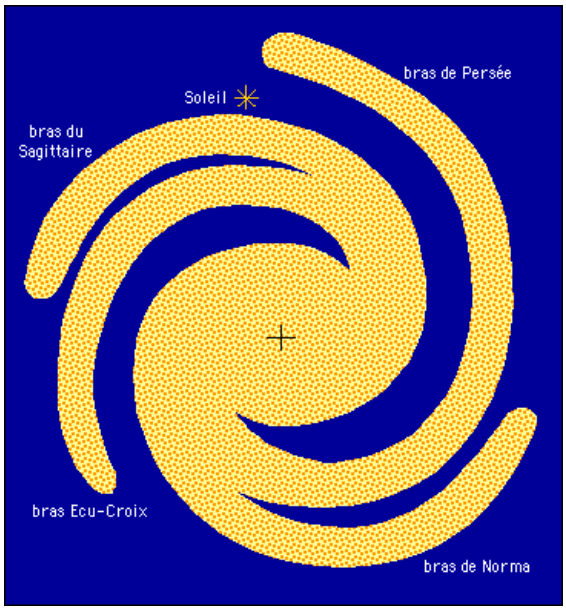
L'absorption interstellaire interdit de pousser plus loin l'analyse des étoiles dans le plan de la Galaxie. Il a donc fallu se tourner vers d'autres objets, les plus brillants possibles pour qu'ils soient visibles de loin. C'est la première approche qui a été utilisée après la phase historique de découverte. Elle consiste à cartographier les régions HII (hydrogène ionisé), qui brillent spécialement dans la raie Hα. Ce travail a été fait en 1958 par Jan Oort, qui a proposé la carte suivante (ici simplifiée) :



Cette carte montre bien des condensations des régions HII émettrices sous la forme de structures en arcs de cercle. La zone blanche en bas du dessin est inaccessible aux observations.

Les spires ainsi mises en évidence sont confirmées optiquement dans le voisinnage du Soleil. De plus, on constate que les étoiles jeunes et brillantes sont situées à l'intérieur des spires. Cette situation se retrouvera dans les autres galaxies, et s'expliquera en même temps que la présence des bras spiraux.

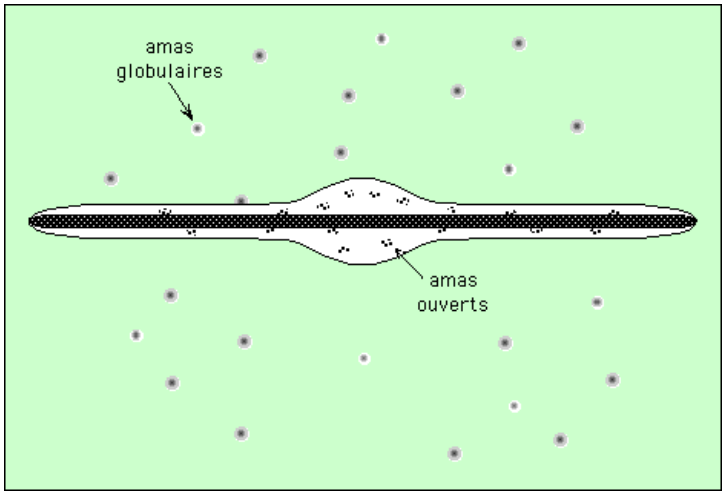
Si nous n'étudiions que la Voie Lactée, il nous serait impossible -au moins pour l'instant- de préciser davantage la structure. Mais nous verrons dans le chapitre suivant que l'ensemble des observations, en Hα et à 21 cm, permettent de ranger notre Galaxie dans les spirales de type Sb, peut-être même SBb.




On a individualisé 4 bras principaux, dont les noms apparaissent sur le schéma. Le Soleil se situe actuellement entre les bras du Sagittaire et de Persée. La Voie Lactée s'étend en fait plus loin, mais les parties externes sont moins bien connues. En plus grand détail, on voit aussi les bras de Carinæ (la Carène), et de Centaurus (le Centaure).

On peut cartographier de la même manière les régions HI, sombres optiquement. Certaines d'entre elles apparaissent comme des nuages sombres sur le fond des étoiles de la Voie Lactée. Elles sont forcément dans le disque d'étoiles, qui les rend visibles. Mais si de telles régions existent en dehors du disque, seule leur émission HI peut nous permettre de les détecter. Et on constate alors que ces régions sont aussi très concentrées dans le plan de la Galaxie. Mais un phénomène a été décelé : le disque d'hydrogène neutre est gauchi, comme un disque un peu relevé d'un côté et abaissé de l'autre. Ce gauchissement est produit par les perturbations qu'imposent les deux Nuages de Magellan.

Ces deux types d'observations montrent que le gaz et les poussières sont dans le plan du disque, plus fortement concentrés que les étoiles. Au point où nous en sommes, la Galaxie ressemble au dessin suivant :




La forme spirale de notre Galaxie a été déterminée par Yvon et Yvonne Georgelin de l'Observatoire de Marseille.

**Répartition des étoiles**

Les étoiles jeunes (âge inférieur à 100 millions d'années) sont très condensées dans le disque, dont elles ne s'éloignent pas à plus de 200 A.L. Elles sont très chaudes, affichant des types spectraux O ou B. Ce sont donc des étoiles massives et brillantes. On les trouve partout dans les bras spiraux, sans condensation particulière au centre de la Voie Lactée. Leur métallicité est supérieure à celle du Soleil (donc plus de 2 %), ce qui est normal étant donné leur jeune âge. Ce sont des étoiles de population I. Cette partie du disque contient aussi l'essentiel des régions H I. Il y a donc le gaz nécessaire à la formation d'étoiles.

Jusqu'à 1.000 A.L. de part et d'autre du plan du disque, on trouve des étoiles moins chaudes, plus vieilles, de types spectraux compris entre A et M. On y trouve également des restes de l'évolution des étoiles : nébuleuses planétaires, novæ, naines blanches, et des variables. Leur métallicité est comprise entre 1/3 et 1 par rapport à celle du Soleil. Elles sont en grand nombre vers le centre de la Galaxie. Leur âge est compris entre 5 et 10 milliards d'années.

Le bulbe contient de vieilles étoiles, de 10 à 15 milliards d'années, car il s'est formé en même temps que les amas globulaires. Sa forme presque sphérique le rappelle : le disque ne s'était pas encore aplati. Son rayon est de 2.600 A.L. à peu près. Les étoiles étant vieilles, il s'ensuit deux conséquences :

- leur métallicité est très faible, inférieure à 0,2 ;
- ce sont des étoiles de faible masse pour celles qui se trouvent encore sur la Séquence Principale ;
- les étoiles les plus massives ont quitté la Séquence Principale depuis longtemps, et il ne reste d'elles que des traces.

Dans le bulbe, la densité des étoiles est très variable. Elle est faible dans sa partie externe, de l'ordre de 0,1 étoile par année-lumière cube. La faible densité d'étoiles va de pair avec une absence quasi totale de gaz interstellaire. N'oublions pas que cette partie est traversée par les amas globulaires au cours de leur révolution dans la Galaxie. Si la densité y était plus élevée, ce transit ne se ferait pas si facilement. Par contre, la densité est très élevée près du centre galactique. Nous en verrons le détail plus loin.

Les étoiles se répartissent différemment selon leur âge : les jeunes près du plan du disque, les plus vieilles dans le bulbe et les amas globulaires, les autres dans toute l'épaisseur du disque.

| zone | épaisseur | population | types spectraux | âge | métallicité |
|---|---|---|---|---|---|
| disque interne | 200 A.L. | I | O B | < 100 millions d'années | entre 0,3 et 1 |
| disque externe | 1.000 A.L. | II | A à M | entre 5 et 10 milliards d'années | > 2 |
| bulbe | 2.600 A.L. | | | 10 à 15 milliards d'années | < 0,2 |
| halo, amas globulaires | | naines et sous-naines | | 10 à 15 milliards d'années | < 0,2 |

**Où se trouve le Soleil ?**

En regardant la Voie Lactée, on s'aperçoit très simplement qu'elle marque un grand cercle du ciel. Par conséquent, nous devons nous trouver non loin de son plan de symétrie. Tel est bien le cas, nous en sommes éloigné d'une trentaine d'années-lumière.

Une autre observation, pas très facile à faire dans nos régions relativement boréales, nous montre que la région du Sagittaire est plus belle que les autres. C'est bien dans cette direction que se trouve le centre de la Galaxie, mais cette apparence ne suffit pas à le prouver : la différence est trop ténue. Les études fines ont montré que le Soleil se trouve à quelques 28.000 A.L. du centre.

**Le centre de la Galaxie**

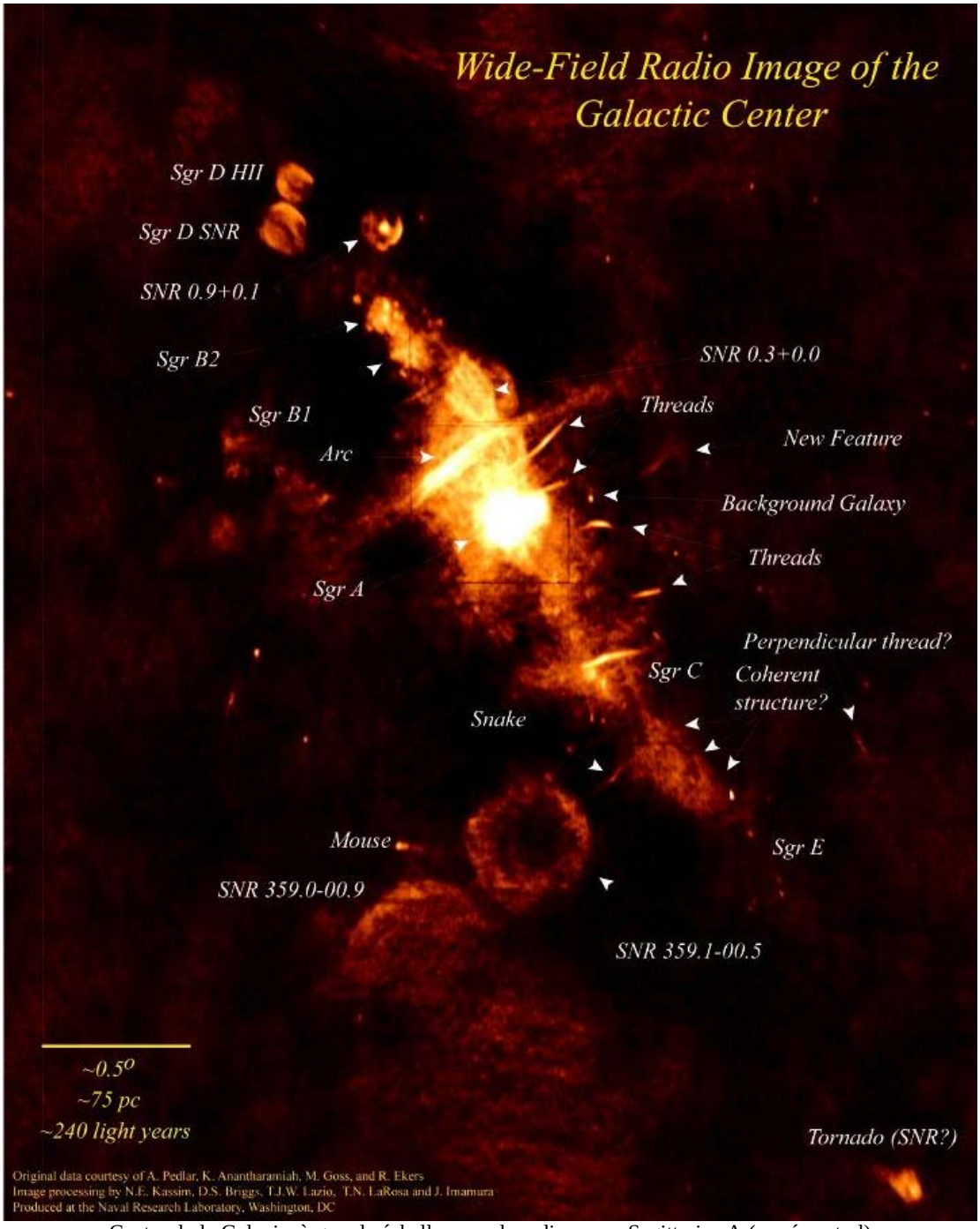
En l'absence d'absorption par les poussières interstellaires, le centre galactique nous apparaîtrait extrêmement brillant, ce devrait être un spectacle magnifique. Mais les gaz et poussières ne nous laissent que deviner sa magnificience : 1 photon sur mille milliards leur échappe et parvient jusqu'a nous. Sa position a été déterminée par une méthode optique indirecte, grâce aux amas globulaires, les télescopes optiques ne

permettant pas de la préciser.Mais d'autres longueurs d'onde traversent ce milieu : les ondes radio, qui parviennent jusqu'au sol, et les infrarouges, X durs et gamma, qui doivent être observés depuis l'espace.

Le centre de notre galaxie est très complexe. On note un pic étroit de densité d'étoiles au centre. Par contre, le disque de gaz montre un trou central de 3 kpc de rayon. Le bulbe de la Galaxie est barré. L'attraction non symétrique de la barre capture le gaz et le fait migrer vers le centre ; c'est ce mécanisme qui aurait formé ce trou.

Mais plus près du centre, on trouve du gaz dense. Il est sous forme d'hydrogène neutre à partir de 1,5 kpc puis moléculaire et concentré à l'intérieur d'une sphère de 300 pc de diamètre. La masse totale de ce nuage moléculaire est de $10^8$ M .

Ensuite, on a observé ces régions dans le domaine radio, accessible depuis le sol, et la structure trouvée s'est montrée fort complexe. Les radiotélescopes utilisés ont eu un pouvoir séparateur croissant avec le temps, donnant des détails de plus en plus fins. Les premières observations ont montré l'existence d'une radiosource très intense située à proximité du centre optique, mais pas confondue avec lui. Etant la première radiosource découverte dans le Sagittaire, elle est nommée *Sagittarius A*. Son allure générale est celle d'un bulbe en explosion.




Centre de la Galaxie, à grande échelle, avec la radiosource Sagittarius A (carré central)
image VLA à 90 cm de longueur d'onde

Plus tard, avec une meilleure définition, on a découvert que cette source est formée de trois parties :

- *Sagittarius A Ouest*
- *Sagittarius A Est*

*Sgr A**

**Sagittarius A Ouest** est nommée *Mini Spirale*, à cause de sa forme. C'est un nuage d'hydrogène moléculaire ionisé par les étoiles proches. Sa forme rappelle celle d'une galaxie spirale, avec plusieurs bras. Il tourne autour du centre de la Galaxie (Sgr A*), et peut lui fournir de la matière. Sgr A* se trouve près du centre.

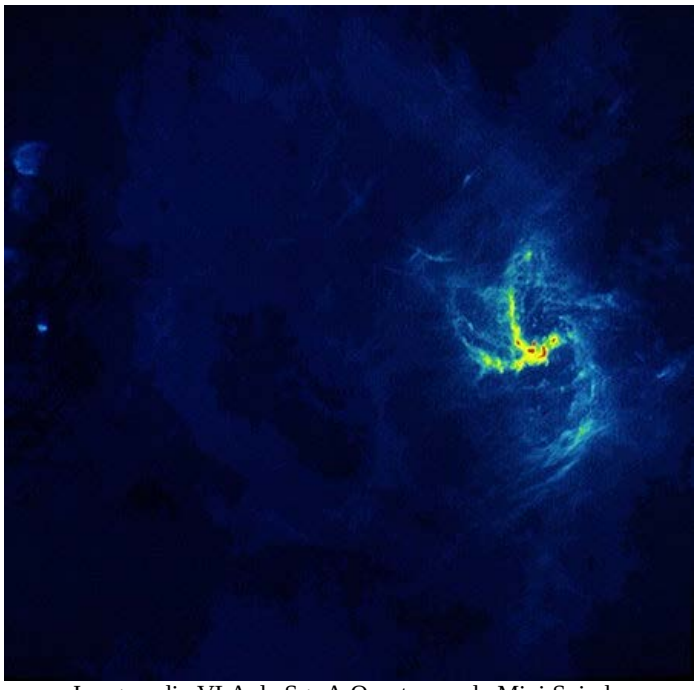
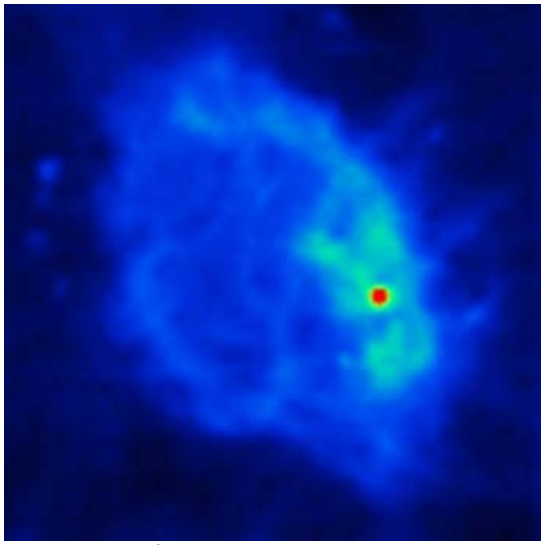


Image radio VLA de Sgr A Ouest, avec la Mini Spirale
Y. Farhad-Zadeh & M. Morris

Les couleurs indiquent l'intensité croissante, du bleu foncé, le moins intense, au bleu clair, puis au vert et enfin au rouge. Cette image a été obtenue au VLA (*Very Large Array*) à 6 cm de longueur d'onde.

**Sagittarius A Est** est un reste de supernova qui a explosé il y quelques dizaines de milliers d'années. L'importance de ce reste a fait évoquer des explosions quelque peu exotiques, comme la capture d'une étoile par un trou noir.



Sagittarius A Est à 20 cm de longueur d'onde, image VLA
image visualized by Raymond Plante, NCSA/Univ. of Illinois

Cette image en fausses couleurs montre le reste de supernova. Le point rouge correspond à la radiosource Sagittarius A*. De la matière du nuage pourrait bien tomber sur ce point.

**Sagittarius A*** a été nommée lorsque les possibilités instrumentales ont permi de la localiser : il s'agit d'une toute petite région à l'intersection des bras de la Mini Spirale. C'est une source radio très compacte et très intense.

Dans le centre de la Galaxie, à l'aide de télescopes équipées de caméras pour le proche infrarouge, on voit de très nombreuses étoiles. De plus, ces étoiles sont animées de mouvements très rapides, comme on peut le voir en prenant des photos au rythme d'une par an par exemple. Leur vitesse atteint les 1.500 km/s. De plus, les étoiles les plus rapides sont les plus proches du centre, et elles tournent autour de la radiosource Sagittarius A*.

La connaissance des vitesses de ces étoiles toutes proches de Sgr A* permet, par l'application des lois de Kepler, de calculer la masse centrale qui les attire. La loi de rotation devrait montrer qu'en approchant du centre, la masse diminue, puisque les étoiles plus proches du centre font seules sentir leur influence gravitationnelle. Or ce n'est pas le cas : la masse semble toujours la même, indiquant que **les masses des étoiles sont**

**négligeables devant la masse centrale** qui demeure invisible. Invisible, et très concentrée : des mesures en haute fréquence, faites par le VLA à 215 GHz, ont montré qu'elle ne dépassait pas (au moins à cette fréquence) une centaine de millions de kilomètres… Les dimensions de l'orbite de Vénus, donc le volume du système solaire interne.

La masse de l'objet central, déterminée par le mouvement des étoiles proches, est estimée actuellement à 2,6 millions de masses solaires. Une telle masse dans un si petit volume doit être sous la forme d'un trou noir.

Un autre argument permet d'associer précisément le centre de masse à la radiosource. Des mesures radio très précises faites au VLBI (*Very Long Baseline Interferometer*) ont mis en évidence le mouvement apparent de Sgr A*. Celui-ci est détecté sur des périodes aussi courtes que quelques semaines. En fait, ce mouvement n'est qu'apparent, et il est le reflet du mouvement de notre système solaire autour du centre de la Galaxie. Mais les étoiles qui l'entourent présentent, elles, des vitesses aléatoires de plusieurs centaines de km/s autour de ce centre. Puisque la radiosource n'est pas gravitationnellement perturbée par toutes ces étoiles, c'est que sa masse l'en protège. C'est donc bien en elle que siège le trou noir.

Les observations en radio par le VLBI devraient donner une excellente résolution du centre galactique, et indiquer quelles sont les dimensions de la radiosource Sgr A*. Malheureusement, dans cette direction on trouve beaucoup de gaz ionisé, dont l'action électromagnétique perturbe les ondes, et produit un flou dans les images. Cette perturbation est d'autant moins forte que la longueur d'onde est plus courte. Il s'ensuivit donc une course à la fréquence, dans l'espoir de déterminer le volume occupé par la radiosource. Les observations ont été faites à 5 GHz, puis à 43 GHz, et enfin à 215 GHz. Ces dernières ont donné la meilleure résolution, et ont permi de limiter la taille de la source à **une centaine de millions de km**.

## *Trou noir central*

En même temps, depuis 1992, une équipe allemande a pris des photos en infrarouge proche de la zone entourant Sgr A*. Les étoiles qui y sont visibles sont animées de très grandes vitesses, nous l'avons déjà vu. Par conséquent, leur mouvement propre est perceptible sur une courte période. L'une de ces étoiles, nommée très prosaïquement *S2*, a accompli depuis les trois quarts de son orbite autour du centre attractif. On a donc déterminé son orbite (demi grand-axe et période), et par suite la masse centrale.

Cette dernière est évaluée à 2,6 millions de masses solaires. Un film d'animation a été produit à partir des mesures ; on y voit parfaitement l'étoiles S2 parcourir son orbite :

video
réalisée par le Max Planck Institut

Une étude encore plus récente a consisté à analyser la Minispirale à l'aide du spectro-imageur infrarouge BEAR au CFHT (*Canada France Hawaï Telescope*). Un spectro-imageur est un instrument permettant d'une part d'obtenir une image à chaque longueur d'onde, et d'autre part d'obtenir un spectre de chaque point. Dans le cas de la Minispirale, les spectres ainsi obtenus ont permi de dresser une carte des vitesses du gaz. En de nombreux points de l'image, on trouve plusieurs raies spectrales identiques, décalées par effet Doppler. C'est donc qu'il y a plusieurs nuages sur la même ligne de visée, animés de vitesses différentes.

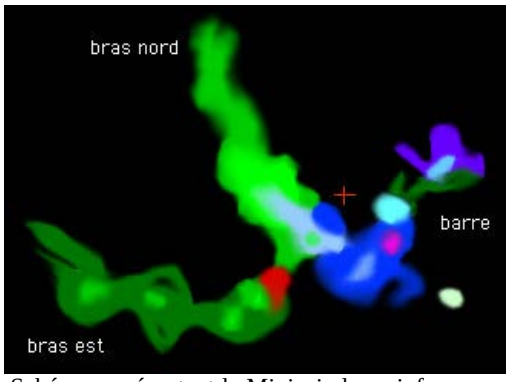
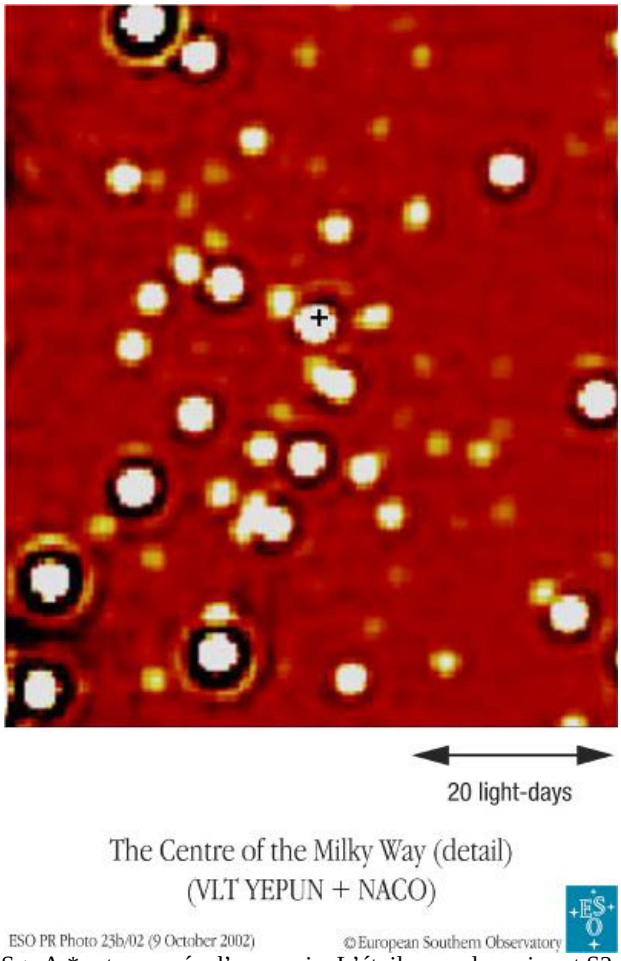


Schéma représentant la Minispirale en infrarouge

Cette image est en fausses couleurs : le rouge indique un éloignement de 350 km/s, et le bleu un rapprochement. Les couleurs sombres indiquent une faible vitesse, et les claires une grande vitesse.

Le télescope Yepun (l'un des trois -4- mousquetaires du VLT) équipé d'une caméra infrarouge, a photographié le centre de la Voie Lactée, plus précisément la zone où se trouve Sgr A* :




Sgr A * est marquée d'une croix. L'étoile sous la croix est S2.

Le centre de la Galaxie est rempli par des électrons relativistes, baignés dans un fort champ magnétique. Dans ces conditions, les électrons rayonnent fortement en ondes radio.

Qu'y a-t-il au centre même ? Aucun instrument actuel ne permet d'avoir une image assez fine pour le dire. Mais certaines considérations permettent de le définir assez précisément. Le satellite européen *XMM-Newton*, qui observe dans les rayons X comme son nom l'indique, a observé un éclair d'une durée de 1.000 secondes. La brièveté de cet éclair indique que la source est plus petite que 1.000 secondes-lumière, c'est à dire 300 millions de kilomètres. Une masse de 2,6 millions de masses solaires dans un si petit volume ne peut s'expliquer que par un objet extrêmement dense.

Les possibilités sont peu nombreuses :

- un trou noir ;
- un amas d'étoiles très massives, étoiles à neutrons. Mais un tel amas, à si petite distance, serait instable et s'effondrerait en trou noir !

La très faible activité du centre galactique nous montre qu'à l'heure actuelle le trou noir est à la diète !

## *Rotation*

Le problème de la rotation galactique est très complexe, il est facile de s'en convaincre.

Considérons d'abord que la Galaxie est constituée de quelque 150 milliards d'étoiles, chacune ayant sa masse et influençant gravitationnellement toutes les autres. Heureusement, il existe une rotation d'ensemble, qui met un peu d'ordre dans une possible cacophonie. Mais chaque étoile possède son mouvement particulier, et ce mouvement ne peut être aussi simple que celui d'une planète autour du Soleil.

D'autre part, nous sommes à l'intérieur de la Galaxie, et notre Soleil lui-même a son mouvement perturbé par ses voisines. Pour étudier le mouvement d'une étoile quelconque, il faut se placer dans un système de coordonnées qui ne dépende pas de ce mouvement du Soleil. Or la vitesse mesurée d'une étoile sera faussée par la vitesse du Soleil. Il faut donc bien connaître cette dernière, et la retrancher de toute mesure.

### LSR

Cette remarque a amené les astronomes à définir un repère local, qui ferait abstraction du mouvement du Soleil, et qui serait entraîné par la rotation d'ensemble. On a nommé *LSR* ce repère ; ce joli sigle signifie *Local Standard of Rest*, c'est-à-dire *standard local de repos*. C'est un

repère qui tourne autour du centre galactique à une vitesse et une distance qui sont les moyennes des vitesses et distances des étoiles proches. Dans ce repère, les étoiles voisines du Soleil sont donc statistiquement au repos (donc elles tournent autour du centre galactique à la vitesse moyenne de l'ensemble).

L'étude des vitesses est assez difficile mathématiquement, aussi nous verrons, ici, seulement les résultats. Ils posent un problème actuellement non résolu sur la constitution de notre Galaxie, et il se posera aussi pour les autres galaxies.

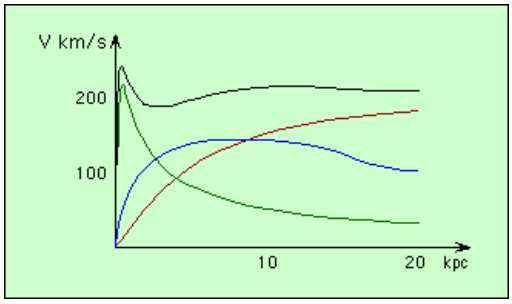
La Galaxie tourne dans son ensemble, mais pas à la manière d'un solide. Dans un solide, un disque de musique par exemple, le centre et le bord sont liés par des forces électriques entre les atomes, et leus positions relatives restent les mêmes au cours de la rotation. Si on trace un diamètre sur le disque, il ne se déformera pas en tournant, c'est bien évident. Mais si les atomes qui constituent un objet sont beaucoup moins liés, ils n'auront aucune raison de tourner de cette manière. Chacun effectuera son propre mouvement, et le mouvement d'ensemble sera une conséquence des interactions entre eux : lorsque deux atomes se heurtent, il y a transfert d'énergie de l'un à l'autre, et régularisation des orbites. Si on considère le Système Solaire comme un objet, on voit bien qu'il ne tourne pas comme un solide : Mercure va beaucoup plus vite que Pluton, en effectuant un tour complet en 88 jours contre 250 ans ! Les interactions entre Mercure et Pluton sont négligeables, et donc chaque planète effectue tout simplement son orbite képlérienne autour du Soleil. Pour Pluton, à une vitesse plus faible s'ajoute une orbite beaucoup plus grande à parcourir.

Dans la Galaxie, la densité d'étoiles est en général faible, et leurs interactions gravitationnelles négligeables. Par conséquent, en première approximation, chacune effectue autour du centre galactique sa propre révolution kléplérienne. Mais il n'en va pas de même au centre, où les étoiles sont beaucoup plus serrées. Les perturbations qu'elles s'imposent les unes aux autres impliquent une certaine rigidité du bulbe, et celui-ci tourne à la manière d'un solide : les parties centrales et extérieures du bulbe tournent autour du centre à la même vitesse. Il y a un autre argument qui joue dans ce sens, c'est que les distances des étoiles au centre de rotation sont relativement semblables, elles ne diffèrent que par le rayon du bulbe. Les périodes de révolution devraient être dans le même faible rapport.

On peut résumer ceci :

- le bulbe tourne à la manière d'un solide ;
- dans le reste de la Galaxie, la rotation est différentielle.

Connaissant la vitesse de rotation du Soleil autour du centre galactique, il est facile d'en déduire la masse attirante. Au niveau du Soleil, la vitesse orbitale est de 220 km/s.




La courbe **verte** montre la vitesse qu'aurait une étoile dans la Galaxie si seul le bulbe existait. A l'intérieur du bulbe, la vitesse augmente, car la masse des étoiles qui attirent augmente aussi (en s'éloignant du centre, de plus en plus d'étoiles se trouvent en dessous). Mais dès qu'on sort du bulbe, la masse attirante n'augmente plus, et l'effet de la distance croissante entraîne une décroissance forte de la vitesse.

La courbe **bleue** montre ce que seraient les vitesses si le bulbe n'existait pas, et si seul le disque attirait les étoiles. C'est la contribution gravitationnelle du disque.

La courbe **noire** tout en haut est la véritable courbe de rotation de la Galaxie. Elle montre les vitesses observées des étoiles, en fonction de leur distance au centre. Elle est donc la somme des diverses composantes, et devrait se déduire des deux courbes précédentes. On constate que ce n'est pas le cas : les deux courbes -verte et bleue- décroissent avec la distance, alors que la courbe noire reste stable. Pour expliquer cette différence, il faut envisager une contribution gravitationnelle nouvelle, produite par une composante invisible de la Galaxie.

Cette nouvelle composante est la couronne, extension du halo galactique.

**La couronne**

Cette enveloppe massive de la Galaxie est très mal connue, on ignore de quoi elle est faite. Les moyens d'observation classiques (optique, radio, IR) ne permettent pas de détecter ses composants. Il faut faire preuve d'imagination !

C'est un milieu très dilué, très étendu, de forme sphérique, enveloppant le disque.

Elle contient du gaz, qui atteint la température d'un million de degrés. Il s'agit donc d'un milieu assez semblable à la couronne solaire, d'où son nom.

On a envisagé, hypothèse la plus sage, que ce gaz était de la matière intergalactique capturée par la gravitation de la Voie Lactée. Mais on a pensé aussi à des possibilités plus exotiques, comprenant soit des objets condensés : naines brunes, grosses planètes formées loin de toute étoile, *machos* (*Massive Astrophysical Compact Halo Objets*), ou des particules élémentaires comme les *wimps* (*Weakly Interactive Massive Particles*).

Pour l'instant, on sait donc que cette couronne existe, mais on ignore sa composition. A suivre…

**Apex**

L'apex est le point du ciel vers lequel le Soleil se dirige, par son mouvement propre. On détecte ce mouvement en observant les mouvements des étoiles proches du Soleil. Toutes les étoiles voisines du Soleil, Soleil compris, se déplacent à la même vitesse d'ensemble par rapport à la Galaxie. Mais chacune a son mouvement propre. Il s'agit donc de déterminer une vitesse moyenne, et de calculer la vitesse du Soleil débarassée de cette vitesse d'ensemble.

Le résultat est que les étoiles vers lesquelles le Soleil se dirige semblent se rapprocher de nous, alors que les étoiles situées à l'opposé semblent s'éloigner. Cette analyse a montré que l'apex se trouve dans la constellation d'Hercule. Ses coordonnées équatoriales sont $\alpha$ = 18 h 00 mn $\delta$ = +30°, et ses coordonnées galactiques l = 56°, b = +23°. La vitesse propre du Soleil est de 19,7 km/s.

**Coordonnées galactiques**

Pour l'étude de la Voie Lactée, les coordonnées équatoriales ne sont pas adaptées, puisqu'elles dépendent de la position de la Terre. Le plan naturel est celui du disque galactique. Il a été facilement déterminé.

Il a été plus difficile de préciser la direction du centre galactique. Ce fut fait avec une précision suffisante en 1959, et le système de coordonnées galactique a été adopté par l'UAI. Le centre galactique correspond aux coordonnées équatoriales 2000 $\alpha$ = 17 h 45,7 mn, $\delta$ = -29° 0' (c'est la direction du Sagittaire).

Les coordonnées galactiques sont la longitude et la latitude galactique. Le centre de ce système est placé sur le Soleil. La longitude 0 est la direction de centre galactique vu du Soleil. La longitude croît dans le sens inverse des aiguilles d'une montre (dans le sens trigonométrique). La latitude galactique est positive du côté nord de la sphère céleste.

**Formation de la Galaxie**

Notre Galaxie a du se former de la même manière que toutes les autres, par effondrement d'un immense nuage de gaz et de poussières. La contraction doit se faire en 200 millions d'années. Elle entraîne une compression, et par suite la formation des étoiles.

**Résumé**

La Galaxie est une spirale de type Sb, contenant quelques 150 milliards d'étoiles. Elle est de type trailing (elle tourne en enroulant les bras).

Le centre galactique se trouve dans le Sagittaire, l'anticentre dans le Taureau.

La Voie lactée est un disque aplati d'étoiles, de 100.000 A.L. de diamètre, et de 6.000 A.L. d'épaisseur, entouré d'un halo sphérique d'étoiles de plus de 100.000 A.L.. Au centre se trouve le bulbe, où la densité d'étoiles est plus grande, et qui mesure 9.000 A.L. de rayon à peu près.

Le Soleil se trouve presque dans le plan de symétrie de la Voie Lactée, à 26.000 A.L. du centre. Sa vitesse de rotation autour du centre galactique est de 220 km/s. Il met environ 200 millions d'années pour faire un tour complet.

La masse est supérieure à 150 milliards de M .

La Galaxie est constituée de 90 % d'étoiles en masse et de 10 % de gaz.

La densité au centre est de 0,1 M / $AL^3$. Près du Soleil, elle n'est plus que de 0,003 M / $AL^3$.

Son disque contient aussi une grande quantité de nuages de gaz et de poussières, qui apparaissent en sombre ou brillent soit par réflexion soit par fluorescence. La température de ces nuages va de 10 K pour les nuages moléculaires, à 100 K pour les nuages d'hydrogène neutre (régions HI) et 10.000 K pour les nauges d'hydrogène ionisé (régions HII).

La densité du milieu interstellaire, en dehors des nuages, est de 1 atome par $cm^3$.

Le disque est entouré d'un halo contenant les amas globulaires (147), dont la masse est évaluée jusqu'à 1.000 milliards de masses solaires !

La vitesse de rotation ne diminue pas vers l'extérieur, comme le voudrait la loi de Newton, indiquant que la masse réelle est bien supérieure à la masse observée (étoiles + gaz).

---=OO=---

# Rayons cosmiques



Les rayons cosmiques ne sont pas des rayons (ondes électromagnétiques), mais des flots de particules arrivant de l'espace, parfois à très grande vitesse.

Un laboratoire a été installé dans le massif du Mont-Blanc au début du XX$^{e}$ siècle, afin d'étudier ces particules. Il est situé sur l'arête ouest de l'aiguille du Midi, laquelle est accessible par un téléphérique. Du coup, les petits aiguilles qui hérissent cette arête ont pris le nom de "cosmiques".



Aiguille du Midi - la flèche indique l'observatoire des cosmiques photo J. Gispert

Les particules du rayonnement cosmique sont des protons, ou des particules alpha, et quelques électrons. Elles arrivent à des vitesses relativistes, et frappent les atomes de l'atmosphère terrestre. La violence des chocs entraîne des réactions au cours desquelles une gerbe de particules secondaires est créée. Cette gerbe peut soit parvenir au sol, soit être absorbée par l'atmosphère, soit enfin produire d'autres réactions, qui donneront naissance à des particules tertiaires. Ainsi, l'arrivée d'une particule dans la haute atmosphère se traduit au sol par une gerbe de particules contenue dans une surface elliptique.

Les rayons cosmiques constituent un merveilleux laboratoire pour les physiciens des particules. En effet, certaines sont animées de vitesses qu'on ne peut encore atteindre dans les accélérateurs de particules.

**Nature des rayons cosmiques**

Ce très mauvais terme ne s'applique pas à un rayonnement, mais à un flot de particules constitué essentiellement de noyaux atomiques et d'électrons. On le conserve pour des raisons purement historiques. Les électrons ne participent que pour 1 % à peu près.

Ces particules circulent dans l'espace à des vitesses relativistes, mais les physiciens ont l'habitude de traduire ces vitesses en énergie cinétique. Les particules des rayons cosmiques atteignent parfois des énergies de $10^{20}$ eV.

| eV se lit "électron-volt" |
| --- |
| C'est l'énergie que l'on transmet à un électron lorsqu'on l'accélère dans un champ électrique de 1 volt, sur une distance de 1 mètre |

Si ce nombre ne vous dit absolument rien, il suffira de le comparer à la masse au repos d'un proton pour éclairer un peu la situation. La masse au repos du proton vaut 938,27 MeV. Divisons l'énergie de la particule par cette valeur :

$10^{20}$ eV / 938,27 $10^{6}$ eV = $10^{20}$ eV / 9,3827 $10^{8}$ eV = 1 / 9,3827 $10^{12}$ = 0,1065791297 $10^{12}$ = 106,5791297 $10^{9}$

**Conclusion :** l'énergie transportée par cette particule correspond à la masse de 106 milliards de protons...

En unités plus anciennes, cette énergie se chiffre à 16 joules. C'est suffisant pour soulever une brique de plusieurs centimètres ! Une brique soulevée par un proton...

Les rayons cosmiques ne sont pas rares, on observe une particule par 1.000 m$^{3}$.

**Coupure GZK**

Lorsqu'un proton se déplace à grande vitesse dans l'espace rempli par les photons du fond cosmologique à 2,7 K, si son énergie est suffisante, il interagit avec un photon, et produit une paire pion-antipion. L'énergie de masse de ces deux particules est prélévée sur l'énergie cinétique du proton, qui est donc ralenti d'autant. Or l'énergie de masse de la paire de particules est de $10^{19}$ GeV. Les protons d'énergie supérieure vont donc perdre l'excédent, jusqu'à ce que leur énergie soit en-dessous de cette limite.

Cette énergie limite est donc l'énergie maximale qu'un proton peut posséder s'il a voyagé dans l'Univers baigné du fond diffus cosmologique. Ayant été imaginée théoriquement par Greisen, Zatsepine et Kouzmine, on la nomme coupure GZK.

Mais le problème est que l'on a observé des protons cosmiques d'énergie supérieure à $3\ 10^{20}$ eV. Où est l'erreur ? Si c'est la coupure GZK qui est fausse, alors la Relativité Restreinte trouve une faille, car elle est à la base de la théorie. Mais une explication moins coûteuse est envisageable : si le proton n'a parcouru qu'une petite distance dans l'espace, il n'a pas eu le temps d'interagir avec le fond cosmologique, et son énergie s'explique. L'existence de proton à si haute énergie est encore un problème non résolu.

**Origine**

C'est un problème qui se pose depuis longtemps. Les rayons cosmiques semblent provenir de toutes les directions de l'espace, ne privilégiant donc aucune source particulière. D'autre part, l'énergie de ces particules appelle une explication quand au mécanisme accélérateur.

On a supposé qu'ils provenaient de l'extérieur de notre Galaxie, sans pouvoir le démontrer. Mais des observations récentes ont prouvé le contraire.

Lorsque des particules douées d'une telle énergie parcourent le milieu interstellaire, il se produit des collisions avec le gaz, et l'énergie échangée dans ces chocs se manifeste par des rayons gamma d'une centaine de MeV. Si les rayons cosmiques baignent l'Univers, il doit y en avoir autant dans les autres galaxies, et ils doivent interagir avec leur milieu interstellaire. La proportion de rayons gamma produits doit être la même. Or des mesures faites dans le Petit Nuage de Magellan ont montré 5 fois moins de rayons gamma que ce qu'on attendrait. Ceci doit suffire pour exclure cette hypothèse.

Donc, les rayons cosmiques sont produits dans notre Galaxie. Il reste à savoir où et par quel(s) mécanisme(s).

**Production des rayons cosmiques**

La très grande diversité des énergies observées est une indication qu'il n'existe pas un mécanisme unique de production des rayons cosmiques. Certains trouvent leur origine tout près de nous.

Toutes les étoiles, au cours de leur vie, perdent de la masse par vent stellaire. Dans la phase géante rouge tout particulièrement, cette déperdition est très importante. Mais sur la Séquence Principale, le vent stellaire est déjà conséquent.

Pour le Soleil, la perte de masse est de $10^{-13}$ M par an. Le vent solaire est un flux de particules (protons et particules alpha = noyaux d'hélium) très chaudes, qui constitue un plasma. Le nombre de particules émises est fonction du cycle de 11 ans. Au niveau de la Terre, où on peut les observer, on détecte 5 atomes par $cm^3$ pendant les périodes calmes, et 10 fois plus en période d'activité. Les vitesses d'éjection sont dans la même proportion entre 500 et 5.000 km/s, et la température est au minimum de 100.000 K.

Le Soleil étant tout proche, on peut observer son fonctionnement dans le détail. Ainsi, des satellites ont mesuré pendant de longues périodes le champ magnétique produit. Les lignes de champ, qui s'éloignent perpendiculairement à la surface du Soleil, sont entraînées par la rotation du Soleil. Mais elles sont piégées par les particules chargées du vent solaire, et le résultat de ces interactions donne des lignes en spirale. Le champ magnétique du Soleil atteint à peine 10 μgauss, toujours au voisinage de la Terre.

Le vent solaire est animé de vitesses suffisantes pour s'échapper à l'attraction de notre étoile. Il est logique de penser qu'à une certaine distance, il va rencontrer le milieu interstellaire. Ce dernier étant au repos par rapport au Soleil, les particules du vent solaire produisent une onde de choc, qu'on peut considérer comme la limite du système solaire. Les deux sondes Voyager, qui ont quitté la Terre en 1977 et visité les planètes géantes, ont ensuite continué leur route vers les étoiles. Actuellement, Voyager 2 émet toujours, et se trouve à plus de 13 milliards de km de la Terre. On pense qu'il approche de cette frontière du système solaire, qu'on appelle héliopause.

L'espace autour du Soleil, jusqu'à cette limite, est la *cavité solaire*. Nous sommes à l'intérieur, et protégés des influences extérieures par le champ magnétique du Soleil et le flot de particules du vent solaire.

Les particules du vent solaire qui approchent de la Terre sont piégées dans le champ magnétique de la Terre. Celui-ci les écarte de nous, ce qui est une excellente chose pour la vie ! La Terre étant en première approximation un dipôle magnétique, les particules chargées sont guidées vers les pôles magnétiques (le pôle nord se trouvant au nord du Canada). Les interactions entre ces particules rapides et les atomes de la haute atmosphère terrestre donnent les aurores polaires. Les particules qui arrivent à plus basse latitude doivent lutter contre le champ magnétique pour atteindre la haute atmosphère et produire des aurores, qui sont de ce fait d'autant plus rares que la latitude est plus basse.

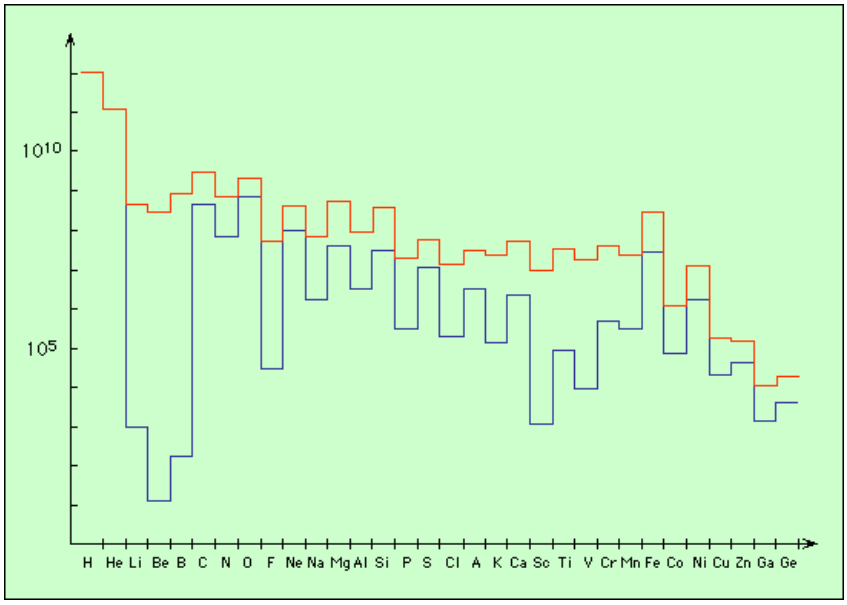
Mais les rayons cosmiques ont d'autres provenances. Beaucoup viennent de l'extérieur du système solaire, et se dirigent donc grossièrement vers le Soleil. Pour parvenir jusqu'à la Terre, ils se heurtent au vent solaire qui progresse en sens inverse. Supposons que le flux de particules extérieures soit constant. Le vent solaire étant fortement modulé par l'activité solaire dans le cycle de 11 ans, lui offre une résitance très variable. De ce fait, même les particules extérieures subissent une modulation rythmée par l'activité solaire. Les particules extérieures qui atteignent la Terre directement ont une énergie supérieure à 1 GeV/nucléon (chaque nucléon possède au moins une énergie de 1 GeV). D'autres, moins énergétiques, subissent des collisions aves les particules de vent solaire, et sont diffusées. A chaque choc, elles changent de direction et perdent de l'énergie. Très peu de particules d'énergie inférieure à 100 MeV/nucléon arrivent jusqu'à nous.

La variation périodique du flux de rayons cosmiques en fonction de l'activité solaire est nommée *modulation solaire*.

L'activité solaire est faite du cycle de 11 ans, auquel s'ajoutent de nombreuses variations rapides, telles les éruptions solaires. Au cours d'une éruption, un flux très intense de particules est émis en très peu de temps. Lorsqu'il atteint la Terre, il produit de belles aurores, et perturbe les communications radioélectriques. Ces particules sontituent le rayonnement cosmique solaire.

**Rayons cosmiques galactiques**

Les particules provenant de l'extérieur doivent avoir une grande énergie pour parvenir jusqu'à nous, au moins 1 Gev/nucléon. D'autre part, si une particule est dotée d'une énergire trop grande, le champ magnétique général de la Galaxie ne suffirait pas pour la piéger, et elle pourrait provenir de plus loin. Pour concilier tout cela, on considère que les atomes dont l'énergie est comprise entre 1 et $10^6$ GeV/nucléon sont les cosntituants du rayonnement cosmique galactique.




Ce schéma montre les abondances des éléments de l'hydrogène jusqu'au germanium. La courbe bleue correspond aux abondances moyennes dans la Galaxie, alors que la courbe rouge montre les abondances dans les rayons cosmiques galactiques. Dans les parties où la seule courbe rouge est visible, elles sont parfaitement superposées.

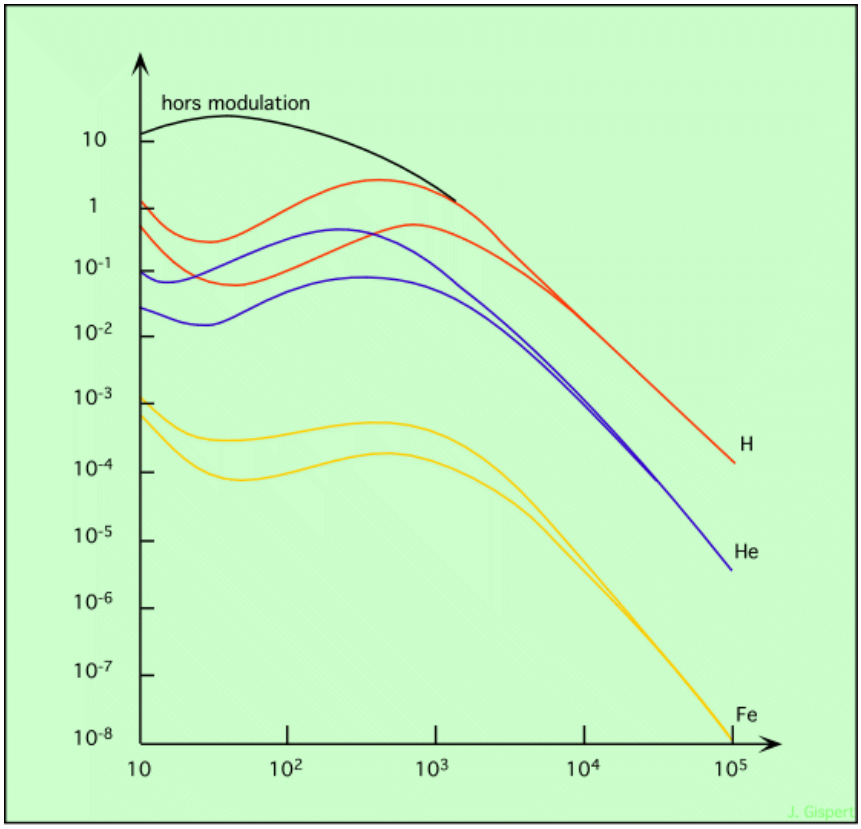
La première chose à voir sur ces courbes est que les deux montent ou descendent sur les mêmes éléments. Par exemple, en passant du silicium (Si) au phosphore (P), les deux courbes descendent ; puis en passant à l'élément suivant, le soufre (S), elles remontent toutes les deux. Ce comportement d'ensemble s'explique par des propriétés très semblables.

Les deux courbes se superposent, indiquant une abondance identique, pour l'hydrogène et l'hélium ; tous les autres éléments sont surabondants dans les rayons cosmiques. Ceci n'est que la partie la plus apparente d'un phénomène plus général :

> L'abondance des éléments dans les rayons cosmiques diminue quand l'énergie nécessaire pour ioniser cet élément augmente

Il semble donc qu'un élément participe d'autant plus volontiers aux rayons cosmiques qu'il est ionisé, donc présente une charge électrique. Si on met en parallèle cette remarque et la vitesse des particules, on arrive à l'idée que les rayons cosmiques pourraient être des atomes ionisés accélérés grâce à leur charge électrique. Bien sûr, pour que ceci soit possible, il faut que les atomes soient isolés, donc ne fassent pas partie d'un grain interstellaire. Or le fer, en particulier, s'attache très facilement aux grains, et seule une petite proportion inférieure à 1 % est sous forme d'atomes libres. On ne devrait pas en trouver dans les rayons cosmiques. Seulement, les grains sont parfois chargés électriquement, par perte d'électrons. Il sont eux aussi accélérés par les champs magnétiques. Bien sûr, avec leur grande masse, l'accélération est beaucoup moins efficace que pour les atomes, mais tout de même, les grains finissent par acquérir une grande vitesse. Avec cette vitesse, un choc avec un atome lui fait perdre des atomes de surface, par un phénomène d'érosion. Les atomes arrachés sont alors accélérés à leur tour, et participent aux rayons cosmiques.

Mais on y remarque aussi des abondances plus élevées en général, mais tout particulièrement pour certains éléments dont les plus légers lithium, bérylium et bore. Leurs abondances sont de 1 à 10 millions de fois plus élevées dans les rayons cosmiques que dans la Galaxie dans son ensemble. On sait que ces éléments, en particulier le lithium, sont très fragiles, et détruits dès qu'ils se trouvent mélangés à la matière d'une étoile : à une température de 10 millions de degrés, facilement atteinte au cœur d'une étoile, il est totalement détruit en quelques millions d'années. Ces trois éléments sont les seuls à être détruits et non produits dans les étoiles. La matière éjectée dans l'espace par l'explosion de l'étoile en fin de vie n'en contient plus. La petite proportion des éléments légers, présente dans la composition initiale de l'Univers, disparaît progressivement au cours de l'évolution. La très forte abondance de ces éléments dans les rayons cosmiques implique un mécanisme de formation : les réactions de spallation. Lorsqu'un atome de carbone, d'azote ou d'oxygène, est heurté par un proton ou une particule alpha du rayonnement cosmique, il est cassé et les atomes légers Li, Be et B sont des débris. Ces collisions sont suffisament fréquentes pour justifier l'abondance très élevée des trois éléments en question.



Modulation solaire

Les courbes représentées sur ce schéma indiquent les abondances des rayons cosmiques, en fonction de l'énergie des particules.

Les courbes en rouge donnent l'abondance des protons (noyaux d'hydrogène), celles en bleu correspondent à l'hélium, et celles en jaune au fer. On remarque tout de suite que les deux courbes de la même couleur se confondent vers les hautes énergies, et divergent vers les basses. Dans les basses énergies, les courbes se dédoublent non pas parce qu'il y a simultanément deux valeurs différentes des abondances, mais les courbes basses indiquent les abondances mesurées pendant un minimum d'activité solaire, alors que les plus hautes correspondent aux périodes d'activité. Les courbes sont dédoublées dans la gamme d'énergie où la modulation solaire agit.

Enfin, la partie de courbe en noir en haut du schéma est un résultat théorique, appuyé sur deux études différentes. Il indique ce que serait l'abondance des protons s'il n'y avait pas la modulation solaire, ou si vous préférez ce qu'elle doit être en dehors de la cavité solaire.

**Accélération des ions**

Les explosions de supernovæ fournissent l'énergie nécessaire pour accélérer les rayons cosmiques. Cependant, les rayons cosmiques ne sont pas simplement les particules éjectées à grande vitesse, car leur composition n'est pas la même. Ce sont les ondes de choc produites par les explosions qui fournissent l'énergie à des atomes déjà présents. Une façon de le vérifier est de faire le bilan énergétique : l'énergie dégagée dans les explosions de supernovæ est 10 fois plus grande que celle des rayons cosmiques.

L'accélération par des ondes de choc est loin d'être triviale. Il n'est pas possible de simplifier le problème pour en obtenir un traitement simple, car alors il n'y a pas d'accélération du tout. Il faut vraiment prendre en compte une situation proche de la réalité, dans laquelle le champ magnétique est très irrégulier et variable. Alors, on montre que les particules peuvent être accélérées fortement et, de plus, on vérifie que cette accélération ne dépend pas des conditions initiales des particules : quelles que soient leurs vitesses initiales et leur distribution dans l'espace, le résultat est le même. Ceci signifie que les irrégularités du champ ont fait perdre aux particules toute mémoire de leurs origines. Un peu comme si on vous bande les yeux, et on vous fait tourner sur vous-même quelques secondes : vous ne saurez plus du tout dans quelle direction vous regardiez avant.

Cette approche théorique reste toutefois limitée par la très grande complexité du milieu, et la variabilité des champs. Il y a un champ de fond, mais le flux de particules chargées apporte une composante qui perturbe. Autrement dit, les particules sont perturbées par le champ magnétique, et modifient le champ... Une autre approche consiste à calculer par ordinateur l'évolution du phénomène. Elle permet de supprimer certaines approximations faites par l'approche théorique, en particulier de tenir compte des particules de plus basse énergie.

La méthode numérique a montré que la zone de choc n'était pas une discontinuité (passage brusque d'une valeur à une autre très différente), mais une variation progressive des paramètres du gaz. Cette zone s'étend sur une profondeur de l'ordre du parsec.

D'autre part, elle a prouvé que les noyaux plus lourds sont accélérés plus efficacement que les protons et, surtout, que les électrons sont très peu sensibles à l'accélération. Ceci pourrait bien expliquer la faible proportion d'électrons dans les rayons cosmiques (< 1 %).

Si on extrapole, on pense que les poussières seront très bien accélérées aussi. Or les matériaux non volatils sont collés aux poussières, et se trouvent pourtant dans les rayons cosmiques. Si les poussières sont accélérées, et si elles subissent de violents chocs avec des ions, les éléments volatils qu'elles transportent peuvent être arrachés et se retrouver libres dans le rayonnement cosmique. Ce problème serait ainsi résolu.

**Observation**

Les rayons cosmiques ont été découverts grâce à un simple électroscope à feuilles d'or. Ces appareils se déchargent lentement au cours du temps, sans cause apparente. Après avoir envisagé toutes les causes possibles, il restait une décharge inexplicable.

De multiples expériences en divers endroits de la Terre, à différentes altitudes, nortamment en ballon, ont montré que le phénomène est variable avec l'altitude.

Finalement, la création de la chambre à brouillard a permi de visualiser des traces de particules électrisées, qui sont responsable de la décharge de l'électroscope. L'examen approfondi de ces traces a même entraîné la découverte d'une nouvelle particule élémentaire !

---=OO=---




Les Univers-Iles
Types de galaxies
Age des galaxies
Galaxies elliptiques
Galaxies spirales
Le bulbe
Le disque
Galaxies lenticulaires
Galaxies irrégulières
Explication des spectres
Masse
Les spirales stochastiques, ou filamenteuses
Stabilité des galaxies spirales
Cinématique
Rotation d'une spirale
Orbites des étoiles
Résonances de Lindblad
Ondes de densité
Galaxies barrées
Galaxies en interaction
Galaxies à coquilles
Marées galactiques
Les satellites de la Voie Lactée
Formation

**Les Univers-Iles**

La nature des objets qu'on a appelés *nébuleuses* a été longtemps débattue. Certains penchaient pour y voir des nuages de gaz, d'autres envisageaient que ce soient des assemblées d'étoiles. Les moyens d'observation ne permettaient pas de trancher, car ils ne pouvaient résoudre les étoiles éventuelles.

Emmanuel Kant, vers 1750, pensait que certaines étaient des groupements d'étoiles. C'est William Herschel, à l'aide de son grand télescope, qui parvint à résoudre les amas globulaires et certaines nébuleuses. La balance semblait pencher dans ce sens.

Mais d'autres nébuleuses, analysées par spectroscopie, étaient manifestement des nuages de gaz. La question a été définitivement tranchée en 1924 après la mise en service du télescope de 2,54 m du Mont Wilson.

*Univers-îles* est le joli nom donné par Humboldt vers 1850, à ces nébuleuses résolues. Avant, on considérait que l'ensemble des étoiles et des nébuleuses qu'on voyait, constituait l'Univers. Si certaines nébuleuses sont en fait d'autres grands rassemblements d'étoiles, c'est qu'il y a plusieurs univers de même type. D'où le nom. L'Univers devient maintenant l'ensemble des univers-îles.

Le nom univers-îles a été considéré trop long par la suite. On a tiré un nom plus court du nom grec de la Voie Lactée : *galaxias* a donné galaxie. Ces objets ont donc eu trois noms successifs : nébuleuses, univers-îles, enfin galaxies. Ce troisième nom restera sans doute définitif.

A l'heure actuelle, on appelle Galaxie, avec une majuscule, celle dans laquelle nous nous trouvons. Le nom de Voie Lactée est normalement réservé à la bande lumineuse d'étoiles. La Galaxie contient la Voie Lactée.

En provençal, la Voie Lactée se nomme *lou camin de San Jacque*, parce que vue de Provence, sa direction approximative nord-est, sud-ouest indique celle de Saint Jacques de Compostelle.

Trois galaxies sont visibles à l'œil nu : les 2 nuages de Magellan, satellites de la nôtre dans l'hémisphère sud, et la galaxie d'Andromède dans l'hémisphère nord. Cette dernière a été découverte en 1612 par Simon Marius, et elle se trouve à 2,2 millions d'années-lumière seulement de nous !

Dans son catalogue de 1784, Charles Messier décrit 103 objets dont une cinquantaine de galaxies (qu'il ne pouvait différencier des nébuleuses). Le New General Catalog NGC établi par S.L.E. Dreyer en 1890, comporte 7.840 objets, incluant ceux de Messier. La désignation de Messier comporte la lettre M suivie d'un numéro, celle du NGC comprend les trois lettres du catalogue, suivies également d'un numéro. Bien que plus récent et beaucoup plus complet, le catalogue NGC n'a pas supplanté le catalogue de Messier, toujours en usage. Les galaxies décrites par Messier ont donc deux désignations usuelles différentes. Par exemple, la galaxie d'Andromède est désignée M 31, ou NGC 224.

**Types de galaxies**

On distingue trois types morphologiques : les **spirales**, les **elliptiques** et les **irrégulières**. Ce classement est basé sur l'aspect visuel des galaxies, et n'implique pas *a priori* une corrélation avec l'évolution des galaxies. Cependant, ce lien a été établi au début par erreur et par Hubble, créateur de cette classification (*diapason de Hubble*).

Les spirales sont notées S, avec les sous-types a, b ou c. Elles sont caractérisées par de magnifiques bras spiraux, ressemblant un peu à certains feux d'artifice tournants. Elles possèdent un noyau normalement elliptique, mais certaines (près des deux tiers) présentent une barre d'étoiles qui allonge le noyau. Les bras spiraux partent alors des extrémités de la barre.

Les elliptiques sont de forme ellipsoïdale très régulière, partant de la forme sphérique. Leur luminosité décroît rapidement du centre vers la

périphérie.

Les galaxies cD (*cluster Dominant*) sont des elliptiques supergéantes, atteignant 10.000 milliards de masses solaires (presque 100 fois notre Galaxie).

| | **masse typique** *en masses solaires* | **luminosité** *luminosité solaire* | **gaz %** | **proportion** |
|---|---|---|---|---|
| **Spirales** | 100 milliards | | abondant | 70 % |
| **Elliptiques** | de 1 million à 10.000 milliards | | traces | 25 % |
| **Irrégulières** | quelques milliards | | | 5 % |

Il n'y a pas de solution de continuité entre ces différents types. C'est cette remarque qui a entraîné l'interprétation évolutive par Hubble. Il n'en est rien.

Les elliptiques sont plus lumineuses que les spirales. Ce sont aussi les plus massives. Elles ont peu ou pas de gaz, et sont constituées d'étoiles vieilles et d'amas globulaires.

**Age des galaxies**

Toutes les galaxies ont approximativement le même âge : $10^{10}$ années. Elles se sont formées rapidement après le Big Bang, ce qui leur confère un âge équivalent.

**Galaxies elliptiques**

Les galaxies elliptiques sont des systèmes de vieilles étoiles rouges. Elles se sont formées il y a longtemps, et ont perdu tout leur gaz. Il ne peut donc plus y avoir de formation d'étoiles, et par conséquent on ne peut y observer des étoiles bleues jeunes, celles-ci ayant une durée de vie bien trop brève pour être encore présentes.

On a longtemps cru que la forme aplatie des elliptiques était due à leur rotation : comme Jupiter, elles devaient s'aplatir en fonction de leur vitesse de rotation. Or les mesures de cette vitesse ont montré qu'elle était bien trop faible pour expliquer l'aplatissement. Il a donc fallu trouver un autre mécanisme pour justifier cette forme. L'explication qui semble la bonne est qu'une galaxie elliptique se comporte un peu comme un essaim d'abeille : elle est composée d'un très grand nombre d'individus, chacun ayant son comportement particulier. Les étoiles circulent autour du centre galactique sur des orbites absolument quelconques. Les collisions sont très rares, le système est donc stable. L'ensemble d'orbites aléatoires implique cette forme elliptique. On dit qu'elles sont stabilisées par la pression, parce qu'on peut modéliser statistiquement l'ensemble comme un gaz autogravitant. Les interactions gravitationnelles globales sont assimilables à une pression gazeuse. Un résultat tout récent (2012) a été publié concernant la stabilité des galaxies.

Les elliptiques se caractérisent par :

- orbites des étoiles quelconques (excentriques, et d'orientations quelconques) ;
- spectre de type G (500 à 600 nanomètres, dans le jaune) ;
- pas de gaz ni de poussières.

Le noyau d'une elliptique est en général plus rouge que les parties extérieures. Ceci peut paraître paradoxal, car si une formation d'étoiles avait lieu, elle ne pourrait se produire qu'à partir du gaz rejeté par les explosions de vieilles étoiles. Ce gaz recyclé devrait se trouver près du centre, puisque c'est là que se trouve la plus grande densité d'étoiles, et de loin. Ce raisonnement prévoirait donc un noyau plus bleu, contrairement à l'observation.

L'explication réside dans un autre phénomène : la couleur d'une population d'étoiles, à un âge donné, dépend aussi de la métallicité. Plus une étoile contient d'éléments lourds, plus elle est bleue. Les elliptiques présentent une métallicité plus forte dans les parties extérieures.

Les galaxies elliptiques sont notée E, et sont différenciées par un sous-type numérique, indiquant le degré d'aplatissement : les E0 sont sphériques, les E7 sont les plus aplaties. Cette numérotation pourrait être empirique, mais ce n'est pas le cas. Le chiffre possède une interprétation précise, qui donne une information sur la galaxie.

Une galaxie elliptique est un ellipsoïde (volume en forme d'ellipse) ; un exemple courant d'ellipsoïde est un ballon de rugby. Mais ce n'est pas le bon modèle.

Considérons plutôt une sphère et aplatissons-la. Nous obtenons un volume qui rappelle plus ou moins une vessie de glace, ou une soucoupe volante… Vu de dessus, la sphère montre un cercle, mais vue par la tranche elle montre une ellipse. Elle possède donc deux axes, que nous noterons a (le plus grand) et b. Alors, on définit l'aplatissement comme le rapport (a - b) / a. Si a = b, ce rapport vaut 0, et l'ellipsoïde n'est pas aplati du tout, c'est une sphère. Si b = 0, le rapport vaut 1, et la sphère est totalement aplatie. Donc ce rapport est compris entre 0 et 1, et l'aplatissement est d'autant plus grand qu'il est plus proche de 1.

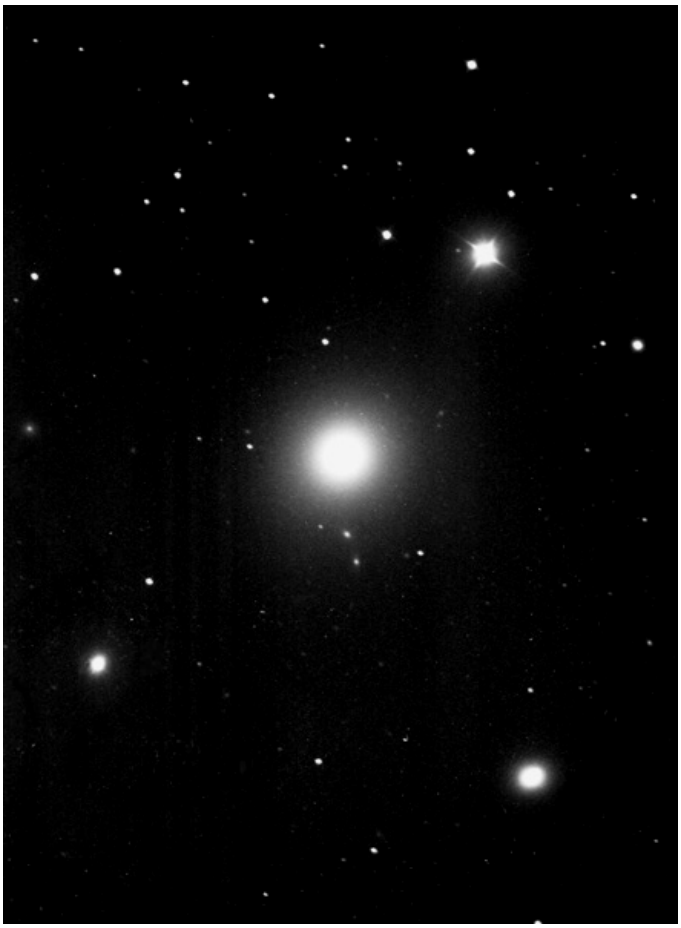
Notons que c'est toujours un nombre inférieur à 1. Mais si nous le multiplions par 10, nous obtenons un nombre entre 0 et 10. C'est ce dernier, réduit à sa partie entière, qui est utilisé comme indice. Ainsi, E3 signifie que pour cette galaxie l'aplatissement vaut 3 / 10 = 0,3. Donc (a - b) / a = 0,3. Par suite a - b = 0,3 a et a - 0,3 a = b. Donc, b = 0,7 a. Le plus petit axe de la galaxie vaut 0,7 fois le plus grand. Elle est moyennement aplatie.

Maintenant, qu'observons-nous ? Il y a des milliards de galaxies dans le ciel, dont une bonne partie sont elliptiques. Statistiquement, elles doivent se présenter sous tous les angles possibles. Donc un bon nombre d'entre elles doivent être vues exactement par la tranche. Celles-là nous

montrent donc leur aplatissement réel. Or les observations ne montrent pas de galaxies dont l'aplatissement soit supérieur à 0,7. Par suite, les galaxies E7 sont toutes vues par la tranche.

Il s'ensuit que la nomenclature des galaxies elliptiques ne nous présente que les numéros de E0 à E7.

Les galaxies elliptiques ne présentent pas de structure. Leur luminosité décroît régulièrement depuis le centre vers les bords, et très rapidement.



M 87 (NGC 4486), Elliptique, dans la Vierge
Télescope 1,06 m pose de 20 mn
NGC 4486A au sud-est et NGC 4478 au sud-ouest photo J.P. Bousquet

**Galaxies spirales**

Les galaxies spirales sont des galaxies-disque, d'épaisseur très faible par rapport à leur diamètre. Elles contiennent un *bulbe* central, forte concentration d'étoiles de forme ellipsoïdale. Le reste est le disque, dans lequel on distingue nettement des *bras spiraux*. Les bras sont bien plus lumineux que le reste du disque.

La classification des galaxies spirales comporte deux branches : les *normales* et les *barrées*. Les normales sont notée *S*, les barrée *SB*.

Ensuite, une lettre minuscule -a, b ou c- donne une indication sur la forme de la galaxie. De a vers c :

- le bulbe devient de plus en plus petit par rapport au disque ;
- les bras spiraux se développent ;
- la densité de poussière et de gaz augmente ; et donc aussi les régions HII et les étoiles jeunes et brillantes.

| | **noyau** | **bras** |
|---|---|---|
| **Sa ou SBa** | gros | fins |
| **Sb ou SBb** | moyen | moyens |
| **Sc ou SBc** | petit | puissants |

Gérard De Vaucouleur a étendu la classification des galaxies. Il a ajouté les types Sd et Sm. Le type Sd extrapole le type Sc, mais le type Sm (SBm) est le type des galaxies magellaniques, c'est-à-dire ressemblant aux Nuages de Magellan.

Les types Sa et Sb sont dits "précoces" et les autres "tardifs". Cette mauvaise appellation, toujours utilisée, vient d'une interprétation hâtive de la séquence Sa à Sc en terme d'évolution. Nous verrons plus loin qu'il n'en est rien.

Les étoiles qui constituent les galaxies spirales ont des propriétés particulières :

- leurs orbites sont circulaires et dans un même plan ;

- le type spectral global est le type F (avec des raies d'émission de Balmer en plus, provenant des régions HII ; 450 nm dans le bleu) ;
- leurs disque possède beaucoup de gaz et de poussières.

**Le bulbe**

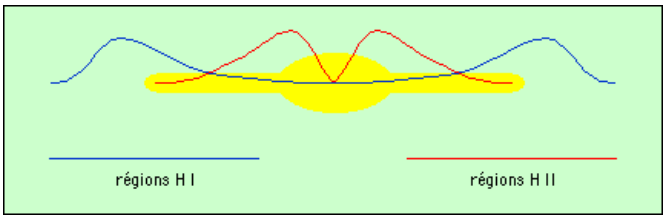
Le centre des galaxies spirales est occupé par un bulbe constitué d'étoiles beaucoup plus rapprochées les unes des autres que dans le disque. L'aspect de ce bulbe rappelle la forme d'une galaxie elliptique. De plus, la décroissance de brillance du centre au bord, et la couleur globale, sont semblables à celles des elliptiques.

Mais là s'arrête la ressemblance, et les bulbes de spirales ne sont pas des elliptiques qui auraient acquis des bras… En effet :

- les elliptiques tournent très lentement sur elle-même, alors que les bulbes de spirales sont animés de grandes vitesses ;
- dans le détail, la décroissance de luminosité sur le petit axe n'obéit pas à la même loi ;
- les bulbes sont plus étendus, à luminosité égale ; c'est-à-dire que la brillance par unité de surface est plus faible ;
- les bulbes sont plus aplatis que les elliptiques.

**Le disque**

Dans les galaxies spirales, le gaz se réparti d'une façon très particulière. Les différents types de nuages occupent dans l'espace des niches préférentielles. Le schéma ci-dessous montre, sur le profil d'un galaxie spirale optique, les courbes d'abondance des différents nuages.




On voit que les régions H II (H ionisé) sont groupées près du centre galactique. Par contre, l'hydrogène neutre (région H I) s'étend beaucoup plus loin du centre, les nuages qu'ils constituent ayant leur densité maximum en-dehors de la galaxie optique. Ceci est un argument qui montre que les galaxies s'étendent réellement beaucoup plus loin que ce que le disque d'étoiles laisse penser.

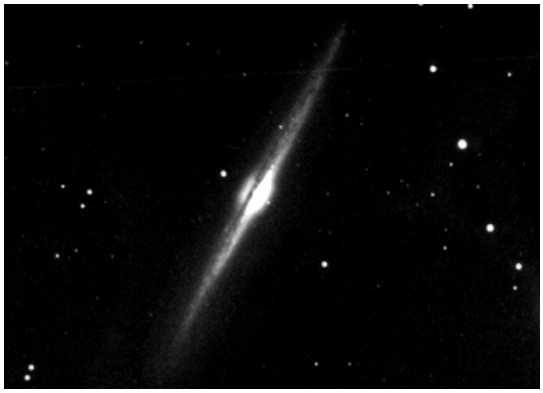
Cette différence de répartition s'explique bien : près du centre galactique, et jusque dans les bras spiraux, il y a beaucoup d'étoiles chaudes pour ioniser l'hydrogène. La proportion de ces nuages qui sont ionisés est donc plus forte.

Dans l'épaisseur, le gaz est très concentré dans le plan de symétrie, à moins de 50 pc de celui-ci.



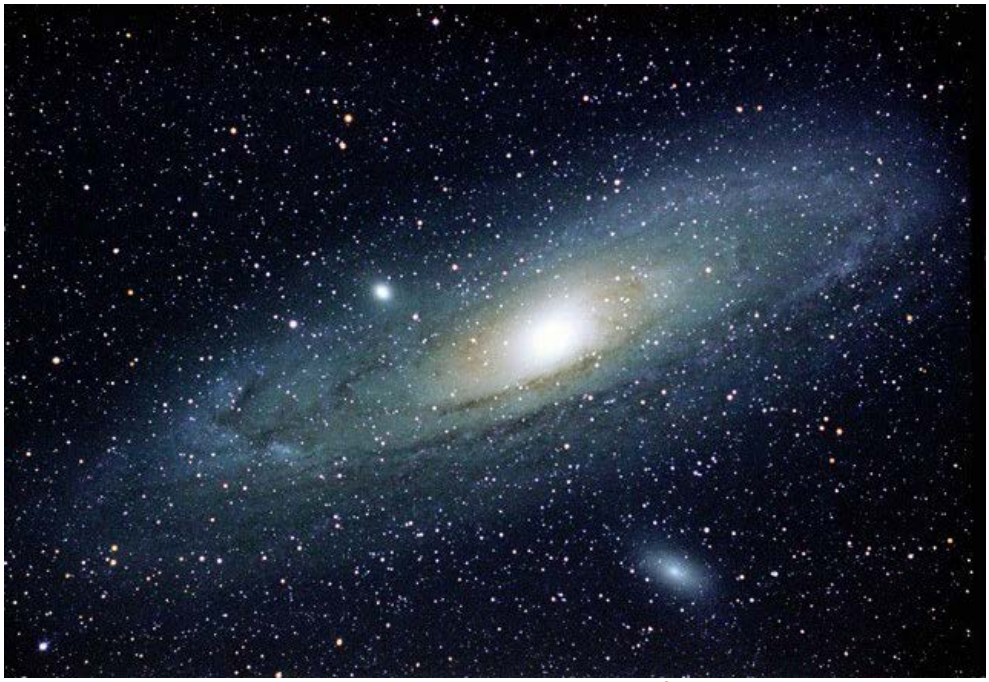
Galaxie spirale M 104, le Sombrero dans la Vierge
type Sa, à 50 millions d'AL, mv 8, dimensions 9' × 4'
Newton 106 cm pose 15 mn photo J.P. Bousquet

Cette très belle photo montre les caractéristiques des galaxies de type Sa : le noyau est très important, et le disque de poussières concentré dans le plan est très absorbant. Bien sûr, cette galaxie est vue pratiquement par la tranche, et les spires ne sont pas visibles. Elles sont d'ailleurs peu marquées dans ces galaxies-là. On sait que c'est une galaxie spirale par l'importance et l'aplatissement de son noyau, par la présence du disque, et par les poussières situées dans le plan de symétrie (les elliptiques n'ont pas de disque ; les lenticulaires en ont un, mais pas de poussières).



NGC 4565 spirale SA dans Coma, tel. C8 photo Jean-Pierre Bousquet
1 pose de 65 mn Var alt. 700 m

Cette photo montre une galaxie avec un noyau moins important, et un disque plus étendu. La bande de gaz dans le plan de symétrie est parfaitement visible.



M 31 (NGC 224) galaxie spirale type Sb, dans Andromède Photo Jean-Pierre Bousquet
Distance 2,2 millions d'AL magnitudes 3.4 Dimensions 178' × 63'
lunette 155 mm, 1 pose de 60 mn Hautes Alpes alt. 2.000 m

La classique galaxie d'Andromède, visible à l'œil nu sous la forme d'une petite tache.



M 101 (NGC 5457) Ursa Major
type Sc, mv 7,9, dimension 22,0'
Lunette 155 mm, pose de 80 mn photo J.P. Bousquet

Contrairement à la précédente, cette galaxie montre des spires bien développées. On remarquera que le noyau est relativement plus petit que dans M104. Les spires se rattachent au centre de la galaxie. Il n'y a pas de barre. Les bras spiraux ne sont pas de densité constante, mais montrent bien des parties très brillantes, et d'autres presque sombres. Elle est située à 27 millions d'années-lumière. Elle est vue pratiquement de face.



NGC 6946 (Arp 29), dans le Cygne, à 20 millions d'AL, type SAB
télescope 120 mm, pose de 300 s avec ST7E, photo J.F. Colliac

Cette belle galaxie montre un petit noyau, très légèrement barrée (c'est ce qui lui vaut le sous-type AB). Les bras sont très développés et multiples. A cette distance, une supernova a été observée.



M 109 (NGC 3992), type SBc, dans la Grande Ourse (l'étoile en haut à droite est γ UMa, Phekda) Photo Jean-Pierre Bousquet
Lunette 155 mm, pose de 98 mn
distance 55 millions d'AL, mv 9,8 (mag) dimension 7' × 4' découverte par Pierre Méchain en 1781, vitesse de récession 1.142 km/sec



NGC 253 spirale de type SAB dans Sculptor Photo Jean-Pierre Bousquet
lunette de 155 mm 1 pose de 40 mn Hautes Alpes alt. 2.900 m

Spirale filamenteuse, dans laquelle les bras ne sont pas complets, mais seulement suggérés par des fragments plus ou moins consécutifs.

**Galaxies lenticulaires**

Ces galaxies sont intermédiaires entre les spirales et les elliptiques. Elles sont classées S0, et ne montrent pas de bras, bien que leurs autres caractéristiques soient celles de spirales : elles sont en forme de disque, et montrent un bulbe central, toutefois plus important que celui d'une vraie spirale.

Les galaxies lenticulaires SO font la transition entre les elliptiques et les spirales. Elles ont un gros bulbe, mais aussi un disque. Par contre, aucune trace de bras spiraux. Le disque les distingue des elliptiques, mais l'absence de bras ne permet pas d'en faire des spirales.

**Galaxies irrégulières**

Ce sont les galaxies les moins évoluées. On le détermine par l'analyse de leur couleur : elles apparaissent bleues, ce qui montre qu'elles sont constituées d'étoiles jeunes. Pour former de nouvelles étoiles, il faut qu'elles contiennent du gaz. C'est effectivement le cas, elles en contiennent beaucoup.



Le Grand Nuage de Magellan, dans la Dorade, à 179.000 AL, mv 0,1, dimension 650' × 550'
Téléobjectif Olympus 200 mm f/4, 2 × 10 min photo J.F Colliac

Le Grand Nuage est l'une des deux petites galaxies irrégulières satellites de la Voie Lactée. L'absence de structure apparente sur cette photo justifie bien l'appellation irrégulière attachée à ce type de galaxies. Le Grand Nuage est situé à 179.000 AL de nous, et il s'étend sur 3° sur le ciel, soit 9.500 AL ou 2,8 kpc. Sa masse est de l'ordre de 10 milliards de masses solaires.

On voit sur la photo la nébuleuse de la Tarentule, de couleur rose, qui est une région H II géante. On y a observé en 1987 la Supernova SN 1987A.

Le GNM a été découvert par Magellan en 1519, mais il était cité par Al Sufi dès 964.

**Explication des spectres**

Les étoiles bleues sont massives et possèdent une luminosité très forte. Ce sont elles qui dominent dans la luminosité globale des galaxies spirales, et donnent leur couleur bleue. Or ce sont des étoiles à durée de vie très courte. Donc, dans les spirales, elle viennent tout juste de se former à partir du gaz et des poussières. L'absence de ceux-ci dans les elliptiques interdit la formation d'étoiles. Seules les étoiles à longue durée de vie, de types G, K ou M, sont encore présentes dans ces elliptiques.

| | **orbites des étoiles** | | **matière interstellaire** | **lumière** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | excentricité | inclinaison | | spectre moyen | raies | couleur |
| **spirales** | 0 | 0 | abondante | F - G | Balmer en émission régions HII | blanc-bleu |
| **elliptiques** | souvent forte | quelconque | absente | G - K | | jaune-orangée |
| **irrégulières** | | | présente | F - G | | blanc-bleu |

La Voie Lactée fait partie de l'Amas Local, qui comprend plus de 25 galaxies réparties dans un volume de 4 millions d'AL de diamètre. On y distingue 13 elliptiques, 4 irrégulières, et 3 spirales. Les deux plus importantes sont notre Voie Lactée et la Grande Galaxie d'Andromède.

Andromède se rapproche de nous et entrera en collision avec la Voie Lactée dans 10 milliards d'années.

L'amas de la Vierge, situé à 60 millions d'années-lumière, contient 2.500 galaxies. Son diamètre est de 10 millions d'années-lumière. Plus un amas est riche, plus la concentration centrale augmente. Il y a souvent une galaxie supergéante de type cD au centre.

**Masse**

Les étoiles qui composent une galaxie sont de divers types spectraux. Or à chaque type spectral correspond une température de surface déterminée, et par conséquent une masse donnée. Si on considère le voisinage du Soleil, la répartition des types spectraux (pourcentage d'étoiles de chaque type), donne une relation entre la masse et la luminosité globale de toutes ces étoiles. Les étoiles de faible masse sont nombreuses et

peu brillantes, les étoiles massives et très brillantes sont rares. La moyenne pondérée de la luminosité fait que la masse de l'ensemble de ces étoiles, mesurée en masses solaires, vaut 4 fois leur luminosité intégrée, mesurée en luminosités solaires. On a donc, au voisinage du Soleil, la relation :

$$M = 4\,L$$

Cette relation est évidement statistique, et ne s'applique pas à une étoile particulière.

En supposant, ce qui semble tout à fait justifié, que les populations stellaires soient de nature semblable dans les autres galaxies, alors cette relation s'y applique aussi.

Par suite, la mesure de la luminosité d'une galaxie nous donne immédiatement une estimation de la masse cumulée de toutes ses étoiles. C'est par cette méthode que l'on obtient les masses de toutes les galaxies (bien que le facteur 4 soit approximatif).

Les lentilles gravitationnelles donnent par ailleurs une autre façon d'évaluer les masses des galaxies dans les amas. Les masses obtenues sont en accord global avec cette formule, et permettent de la préciser.

## *La structure*

### Les spirales stochastiques, ou filamenteuses

Certaines galaxies ont un aspect global de galaxie spirale, mais un examen attentif montre qu'il n'existe pas de bras bien constitués. La galaxie présente seulement des portions de bras dont la longueur ne dépasse pas une petite fraction de tour. Il n'y a pas de structure d'ensemble, mais de petites sous-structures aléatoires, c'est de là que vient le nom de ces galaxies.



NGC 2841 Photo Kitt Peak National Observatory

La galaxie NGC 2841 est le prototype de ces galaxies stochastiques. Sur cette photo, on distingue parfaitement les grumeaux de gaz et d'étoiles qui figurent de faux bras spiraux. L'étoile brillante située dans la galaxie en haut à gauche est la supernova SN 1999by de type Ia.

Comment interpréter cet aspect ? L'absence de structure d'ensemble ne permet pas d'envisager un mécanisme global, mais au contraire un mécanisme local se produisant aléatoirement de-ci de-là dans la galaxie. Si on considère tout simplement qu'une étoile s'allume en un point particulier, que le rayonnement intense de cette étoile entraîne l'effondrement de nuages voisins et par suite l'allumage d'autres étoiles, on obtient un groupe (amas) de nouvelles étoiles assez voisines, de forme sphérique. Toutes ces étoiles n'étant pas à la même distance du centre galactique, ne tourneront pas autour à la même vitesse. Aussi, les plus proches du centre vont prendre de l'avance, tandis que les plus lointaines prendront du retard. Le groupe d'étoiles va s'effilocher, et produire un arc d'étoiles.

L'effilochement ne se produit pas au hasard. Les étoiles les plus proches de centre galactique allant plus vite, la partie **avant** du fragment de bras est **plus proche** du centre. Ceci donne donc bien un arc de spirale, et non un arc de cercle.

Si la galaxie contient beaucoup de gaz, ce phénomène pourra se produire en de nombreux points, donnant des morceaux de bras. L'aspect global sera bien celui d'une galaxie spirale, mais avec des morceaux de bras sans continuité.

Formation aléatoire de groupes et effilochement

*Cette animation permet de créer une galaxie à un instant donné : toutes les étoiles qui la composent sont créées ensemble, elles ont toutes le même âge. Au cours du viellissement, les étoiles deviennent des géantes rouges et ne sont pas renouvellées. Ainsi, la galaxie s'enroule sur elle-même, et la magnifique structure pseudo-spirale disparaît. S'il en était ainsi, on n'observerait qu'un tout petit nombre de galaxies filamenteuses, puisque leur durée de vie serait très brève.*
*Dans une galaxie réelle, de nouveaux amas d'étoiles sont créés tant qu'il reste du gaz. C'est ce qui assure la pérennité de la structure.*

Il existe des évidences observationnelles pour conforter ce modèle :

- chaque fragment de bras a une courte durée de vie, ce qui est en accord avec leur formation puisque ce sont des amas récents d'étoiles chaudes ;
- les observations photométriques montrent une uniformité dans le rouge, pour la population des étoiles vieilles. Si on considère les étoiles dont l'âge dépasse celui des bras, on ne voit aucune structure spirale, ce qui confirme l'absence de structure globale.

Ces structures n'ont donc pas de stabilité. L'aspect global se maintient dans le temps par disparition et formation de fragments de bras.

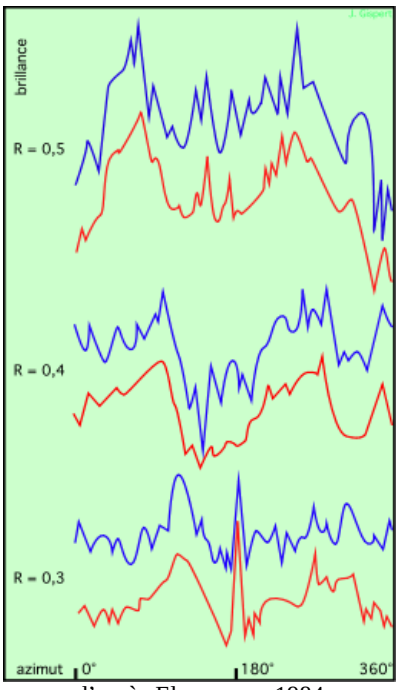
**Stabilité des galaxies spirales**

Le problème de la stabilité des galaxies spirales est resté longtemps sans solution. La rotation étant différentielle, comme nous l'avons vu pour notre propre Galaxie, les étoiles proches du centre font un tour complet en quelques millions d'années, alors que celles situées à la distance du Soleil mettent 220 millions d'années pour un tour. Dans de telles conditions, les bras spiraux devraient s'enrouler autour du centre galactique en un temps très court, correspondant à quelques tours, de l'ordre du milliard d'années.

Or les galaxies spirales sont très nombreuses dans le ciel ; si leur durée de vie (sous cette forme) était très brève, on devrait en observer beaucoup moins. Il est bien évident que leur durée de vie est beaucoup plus longue que le temps d'enroulement. Ceci montre clairement que les bras spiraux ne sont pas, contrairement aux apparences, des concentrations de matière liées, plus ou moins rigides. Il faut considérer qu'une étoile donnée peut faire partie d'un bras spiral pendant un certain temps, puis en sortir, entrer éventuellement dans un autre… C'est le cas du Soleil.

Une autre donnée observationnelle consiste à mesurer la brillance de surface d'une galaxie. On choisit une distance au centre, et on mesure la brillance en tournant autour (à distance constante). La mesure coupe ainsi les bras spiraux, et y fait apparaître une surbrillance. Dans le schéma ci-dessous, on voit nettement, dans la courbe bleu tout en haut, les pics correspondant aux deux bras spiraux. Cette mesure a été faite dans le bleu, et concerne donc les étoiles chaudes et jeunes.

On refait la même mesure dans le rouge, pour prendre en compte les étoiles vieilles. La seconde courbe ressemble beaucoup à la première, ce qui montre clairement que les bras spiraux existent également pour les étoiles vieilles, et ce sont les mêmes !



d'après Elmegreen, 1984

Les deux autres couples de courbes sont mesurées à R = 0,4 et à R = 0,3 par rapport au centre. Près du centre, la structure spirale est moins évidente, comme on le voit sur les photos habituelles.

Ces courbes montrent également que des étoiles existent entre les bras. Elles sont simplement moins nombreuses et moins lumineuses.

Une autre donnée observationnelle est la forte concentration d'étoiles massives bleues dans les bras, et leur rareté en dehors. Ces étoiles ont une vie courte, et leur luminosité est très importante. Leur faible durée de vie devrait les rendre rares dans les bras, et c'est le contraire qu'on observe.

Cet ensemble de faits doit s'expliquer par le mécanisme de formation et d'évolution des galaxies spirales.

**Cinématique**

Le problème est difficile, mais nous allons l'aborder par un côté pratique, et nous allons construire une galaxie spirale !

Considérons pour cela un centre massif, autour duquel tournent de nombreuses étoiles. Celles-ci seront sur des orbites elliptiques, à l'instar des planètes autour du Soleil.

Si les orbites ont leurs grands axes alignés, les écarts entre étoiles sont à peu près constants. L'excentricité assez forte donne l'impression d'une barre d'étoiles.

Si les grands axes ne sont pas alignés, mais tournent en fonction de la distance, on peut observer que les orbites successives s'approchent l'une de l'autre en certains points. A ces endroits, il y aura donc davantage d'étoiles qu'aux endroits où les orbites s'éloignent l'une de l'autre. Cette plus grande proximité se traduit par une densité d'étoiles supérieure. C'est l'origine des bras spiraux.

On peut constater qu'une étoile donnée entre dans un bras spiral, y reste assez longtemps car son orbite est tangente au bras, puis en sort pour entrer dans le prochain bras un peu plus loin (si sa durée de vie le lui permet).

Deux sens sont possibles pour les orbites. Dans un sens, les étoiles entrent dans un bras spiral par sa partie concave, dans l'autre elles entrent par la partie convexe. Le premier est dit *structure traînante*, le second *structure précédente.*

Dans les parties où les orbites se rapprochent, la densité d'étoiles est plus importante. Lorsque la galaxie tourne, cette zone de surdensité se déplace à la vitesse de la galaxie : c'est l'excès d'étoiles qui trace la structure spirale.

**Attention**, cette animation montre une approche cinématique du problème, en ce sens que les étoiles sont traitées comme des points sans masse. Donc, il n'y a pas d'influence entre elles, et les zones de surdensité ne modifient pas le potentiel, donc n'influencent pas le mouvement des autres. Dans la réalité, lorsqu'il y a une surdensité, il y a forcément une modification du potentiel, qui va retentir sur le mouvement des étoiles. L'analyse de ces interactions est indispensable pour étudier la stabilité des spirales.

**Rotation d'une spirale**

L'observation (des vitesses) montre que les orbites des étoiles dans une spirale sont très proches de cercles. Nous verrons dans le paragraphe suivant des précisions à ce sujet. Mais pour l'instant, en supposant les orbites circulaires, on peut se demander quelle est la vitesse d'une étoile en fonction de sa distance au centre de la galaxie. En effet, la masse attirante est celle qui est située plus près du centre que l'étoile considérée. Lorsqu'on arrive au bord externe du disque, la masse reste donc constante, c'est la masse totale du disque (bulbe compris). Quelle est l'influence de cette stabilisation sur la vitesse des étoiles ?

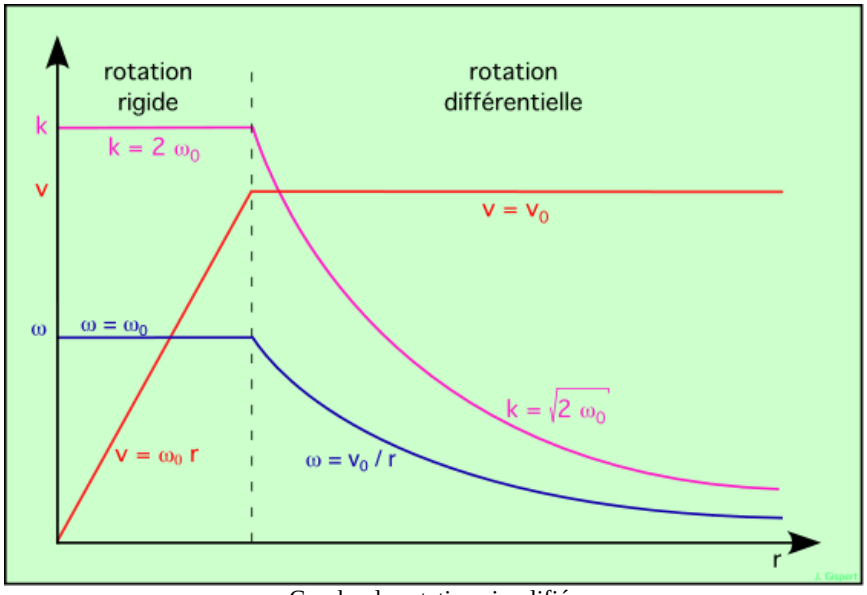
Notons d'abord que la vitesse v d'une étoile sur une orbite circulaire, décrite d'un mouvement uniforme (notre hypothèse), s'exprime par la formule très simple

$$v = \omega\, r$$

où r est la distance de l'étoile au centre de la galaxie, et ω sa vitesse angulaire. L'uniformité du mouvement signifie que ω ne dépend pas du temps. Mais ω dépend naturellement de r. La première étude à faire est de déterminer la variation de ω en fonction de r : la courbe qui représente cette fonction se nomme *courbe de rotation* de la galaxie, et son importance cosmologique est de premier plan.

En première approximation, une galaxie se divise en deux parties sur le plan dynamique :

- la région centrale, qui tourne en bloc, *à la manière d'un solide* (on dit aussi *rotation rigide*) : toutes les étoiles ont la même valeur de ω ; donc, dans cette région, ω est une véritable constante, qui ne dépend ni du temps ni de r ;
- la région périphérique, dans laquelle la vitesse est constante : $v = v_e = \omega\, r = cste \quad \omega = v_e / r$.



Courbe de rotation simplifiée

Ce graphique cumule trois courbes différentes :

- en rouge, la courbe de rotation elle-même, qui montre que la vitesse d'une étoile est proportionnelle à la distance dans la région centrale (région de rotation rigide), et constante dans la partie périphérique, où la rotation est différentielle ;
- en bleu, la valeur de ω, vitesse angulaire de rotation. Celle-ci est constante dans la région centrale (toutes les étoiles font le tour dans le même temps, comme les points d'un disque sur un pick-up), et décroissante en 1 / r dans la partie périphérique, selon la loi harmonique de Kepler ;
- en fushia, les valeurs d'un paramètre théorique important, nommé k. Ce paramètre défini le comportement d'une étoile particulière, ainsi que les comportements d'ensemble de larges zones.

Cette courbe de rotation est simplifiée, mais réaliste en ce sens que les courbes réelles présentent, comme celle-ci, une stabilisation des vitesses dans la partie extérieure de la galaxie, alors qu'on s'attendrait à la voir descendre. En effet, les étoiles sont bien plus nombreuses dans la région centrale, où l'essentiel de la masse de la galaxie se trouve concentrée. Ainsi, les étoiles suffisament lointaines sont toutes attirées par une masse du même ordre, quelle que soit leur distance au centre. Et par suite, elles devraient suivre les lois de Kepler, les plus éloignées étant animées de vitesses moindres. Ce paradoxe a déjà été constaté par Zwicky pour la Voie Lactée. Les étoiles éloignées tournent donc plus vite que ce que la mécanique explique !…

**Orbites des étoiles**

Comment se comportent-elles vraiment ?

On peut montrer mécaniquement que le potentiel gravitationnel de la galaxie, dans lequel baignent les étoiles, est d'autant plus lisse (présente d'autant moins d'irrégularités), que le nombre d'étoiles est plus grand ! Paradoxalement donc, un grand nombre d'étoiles favorise une grande régularité des orbites, l'influence des étoiles proches étant négligeable devant l'addition des forces produites par les nombreuses autres. Ainsi, un amas globulaire doit être moins stable qu'une grande galaxie, les collisions doivent y être plus fréquentes.

Considérons une étoile qui tourne sur une orbite circulaire, à distance constante du centre. La force que subit une étoile est la même sur toute l'étendue de son orbite. Donc, le potentiel gravitationnel de la galaxie est symétrique autour de son axe. De même, la galaxie est symétrique par rapport à son plan, le potentiel prend donc des valeurs opposées identiques de part et d'autre de ce plan.

Les étoiles tournant sur des orbites grossièrement circulaires, on peut considérer des perturbations d'une telle orbite, et calculer les écarts à celle-ci. La théorie montre que les orbites sont alors plus complexes, et produisent, dans le référentiel tournant avec la galaxie, des boucles dans le plan de la galaxie. A la manière des épicycles de l'Antiquité, l'étoile effectue des boucles autour de la position qu'elle occuperait si l'orbite était strictement circulaire. Les épicycles sont des ellipses, dont l'excentricité est liée à la valeur de k (paramètre vu sur la courbe de rotation). L'étoile tourne dans le sens direct sur le cercle, et dans le sens rétrograde sur l'épicycle. Pendant ce temps, elle effectue aussi un mouvement périodique de part et d'autre du plan de la galaxie.

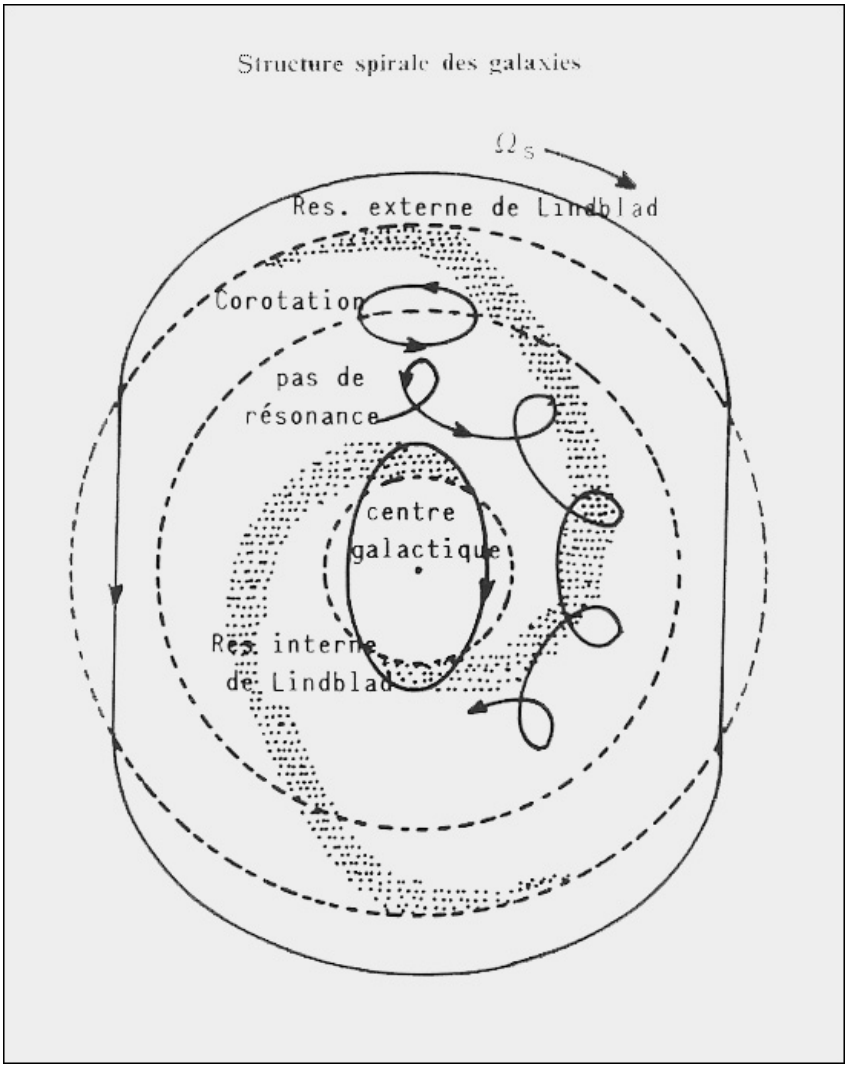
Les orbites des étoiles, dans le potentiel gravitationel d'une galaxie spirale, ne sont pas des ellipses, mais des épicycles (ellipses agrémentées de boucles). Lorsque la valeur de k divise exactement la période de rotation de l'étoile, l'orbite se referme sur elle-même : elle est fermée. Le nombre de boucles est k / ω.

**Résonances de Lindblad**

Si le potentiel gravitationel est perturbé par un phénomène quelconque (barre, compagnon en interaction…), la perturbation va introduire une vitesse de rotation spéciale, que nous nommerons $\omega_p$. Cette rotation joue un grand rôle, car elle va produire des phénomènes de résonance avec les étoiles. Les résonances se produisent lorsque les boucles se referment sur elle-même après un tour complet (puisque les étoiles vont repasser au même endroit par rapport au potentiel, ce qui va amplifier les effets).

La perturbation définit la vitesse de rotation de la spirale, qui tourne en bloc (rotation rigide virtuelle, puisqu'il ne s'agit pas d'un vrai mouvement de matière). Il y a trois zones où ceci se produit :

- la zone de corotation ; la vitesse des étoiles est égale à la vitesse de la perturbation ; si on tourne entraîné par la perturbation, on voit les étoiles effectuer de simples boucles fermées ;
- les deux zones où les étoiles tournent plus ou moins rapidement que la perturbation, mais sur des trajectoires qui comportent un **nombre entier de boucles**. Les plus simples sont la *résonance interne* et la *résonance externe de Lindblad* (le suédois Bertil Lindblad les a découvertes).

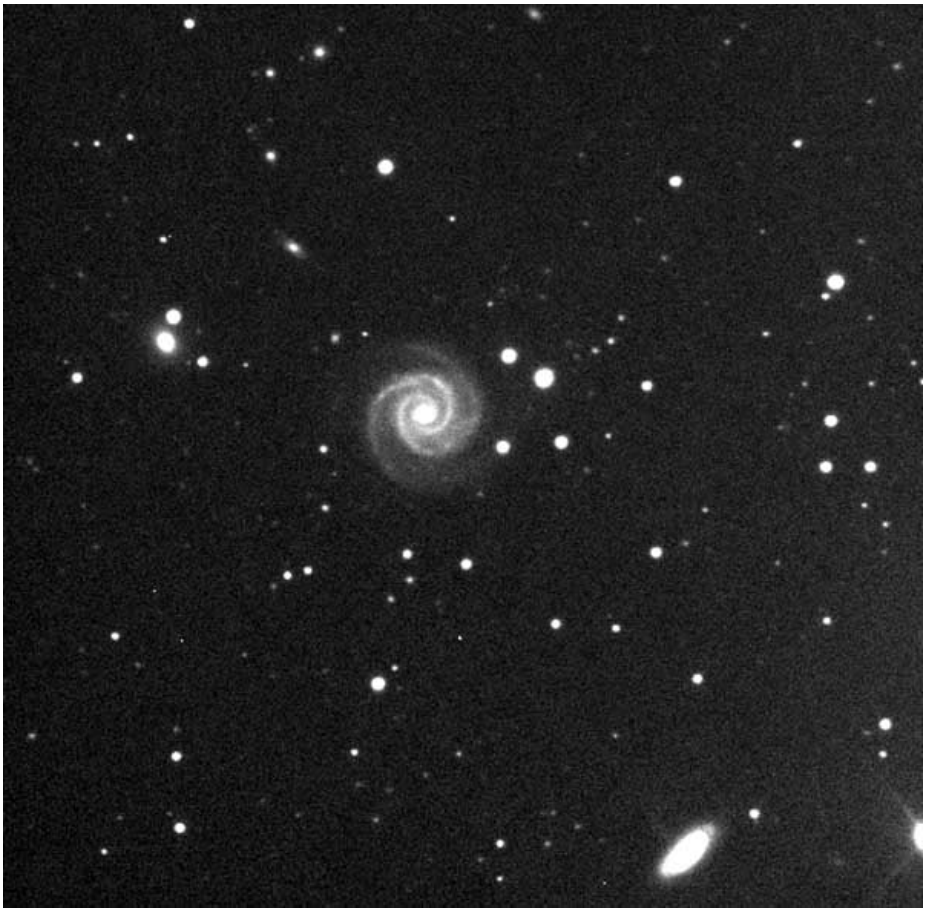



origine : Galaxies et Cosmologie, F. Combes, P. Boissé, A. Mazure, A. Blanchard

Les résonances sont des zones où les orbites sont périodiques dans un référentiel tournant. Les orbites se referment sur elle-mêmes, après un nombre entier de boucles. Lorsqu'il y a une seule boucle, la combinaison des deux mouvements donne tout simplement une ellipse.

La configuration dans laquelle il n'y a que deux boucles est la plus probable, car elle correspond à un minimum d'énergie. Or c'est elle qui donne une spirale à deux bras, forme la plus répandue.

De nombreuses galaxies montrent une structure très régulière à deux bras. Un bel exemple en est la galaxie Arp 1, ou NGC 2857



Arp1, Grasslands Observatory

**Ondes de densité**

La théorie des ondes de densité est récente, elle a été développée entre 1964 et 1970, à partir d'une idée de Lindblad, par Lin et Shu. Dérivée de la théorie cinématique vue plus haut, elle prend en compte les interactions gravitationnelles entre étoiles. La grande question qui se pose est celle de la nature des ondes de densité. Sont-elles stationnaires ?

Si oui, alors la structure de la galaxie est stable. Mais nous allons voir que les choses ne sont pas si simples.

En fait, la structure spirale n'est pas si stable que cela. Les ondes qui la produisent subissent divers phénomènes qui les amplifient ou les éliminent.

La première constatation, d'après les simulations numériques, est que l'onde spirale s'amplifie (amplification du swing). Entre la résonnance interne de Lindblad et la corotation, les ondes se réfléchissent. Pourquoi ? C'est difficile à expliquer, mais le changement de vitesse de l'onde en s'approchant de la corotation est la cause de la réflexion. Alors, l'onde repart vers le noyau, et va se réfléchir à nouveau sur la RIL. L'interférence entre les différentes réflexions de l'onde produit son amplification.

Malheureusement, cette amplification n'a qu'une durée limitée : au bout de quelques rotations, elle est devenue inexistante, par dissipation de l'énergie de l'onde. Alors, la structure spirale disparait… contrairement à ce que l'observation nous montre. D'où vient ce paradoxe ? Du fait qu'au cours de sa vie, une spirale doit être réactivée successivement par plusieurs excitateurs, provoquant chacun une nouvelle onde spirale.

En fait, une onde spirale est assez naturelle, et sa production aisée. Mais elle n'est stable que sur une période de l'ordre du milliard d'années, trop courte pour expliquer l'abondance et la pérennité des spirales. Donc, depuis l'origine, une spirale a dû être réactivée plusieurs fois. La fréquence des passages proches de galaxies suffit à l'expliquer.

Y a-t-il des observations pour étayer cette vision ? La réponse est affirmative : les plus belles galaxies spirales sont en interactions avec une autre galaxie, comme par exemple la galaxie des Chiens de Chasse :



M 51 et NGC 5195, galaxie des Chiens de Chasse
télescope Mayall (4 m) Kitt Peak 4-meter 1975 photo AURA/NOAO/NSF

Mais la présence d'une barre entretient aussi l'onde spirale…

Finalement, au cours de sa vie, une spirale pourrait nous apparaître comme telle pendant certaines périodes, où l'onde est excitée, puis comme une spirale filamenteuse lorsqu'elle s'éteint. Plus tard, une nouvelle perturbation réactive la structure spirale d'onde de densité… Ce cycle peut s'étaler sur la durée écoulée depuis le Big Bang.

Les mécanismes qui peuvent produire des ondes spirales sont l'interaction avec un compagnon, et la présence d'une barre.

**Galaxies barrées**

Deux tiers des spirales sont barrées (1/3 fortement de type SB, 1/3 faiblement de type SAB). C'est le gaz froid (à très faible dispersion de vitesse) qui permet de tracer efficacement les barres faibles.

Dans les spirales barrées, les bras partent des extrémités de la barre. La barre est constituée d'étoiles vieilles, et sa couleur dominante est rouge. Sa luminosité est assez lisse, sans variations brutales. La brillance de surface est pratiquement constante selon leur grand axe.

La barre tournant, le côté devant (leading) produit une onde de compression, et des étoiles s'y allument. Aux extrémités de la barre aussi il y a formation d'étoiles.

Le potentiel gravitationel des galaxies barrées est plus complexe que celui des autres (il n'est pas axisymérique). Aussi leur dynamique est nettement plus difficile à appréhender aussi. Néanmoins, des simulations numériques permettent de vérifier que les modèles produits actuellement donnent des structures assez proches de celles observées.

La barre est constituée d'étoiles vieilles, et sa couleur est rouge. Par contre, il y a formation d'étoiles aux extrémités de la barre, et bien sûr dans les bras spiraux.

La barre présente aussi une brillance de surface pratiquement identique en tous points de son grand axe, ce qui la distingue fortement d'une galaxie elliptique à laquelle les autres critères la font ressembler.

Enfin, la barre est elle aussi une onde de densité ! Elle est le résultat des interférences entre diverses formes d'onde (leading et trailing) près du centre de la galaxie. Cette théorie implique que la barre ne doit pas dépasser la corotation, car les ondes s'y réfléchiraient. Les bras spiraux prennent d'ailleurs naissance aux extrémités de la barre.

**Galaxies en interaction**

Les galaxies sont proches les unes des autres. Pour justifier cela, considérons les étoiles à l'intérieur d'une galaxie. La distance entre deux étoiles est de l'ordre de quelques parsecs, alors que le diamètre d'une étoile est de l'ordre de quelques millions de kilomètres. Le rapport distance / diamètre est donc de l'ordre de $10^{14} / 10^{6} = 10^{8}$. Les galaxies ont un diamètre de l'ordre de 100.000 AL, et sont éloignées de quelques millions d'AL. Le rapport de leur distance à leur diamètre est donc seulement de l'ordre de 100. Un million de fois moins que pour les étoiles.

On comprendra facilement dans ces conditions, que si les collisions d'étoiles sont pratiquement impossibles, les collisions de galaxies au contraire sont fréquentes. Des recherches récentes, qui se poursuivent activement, ont donné de très bons résultats sur l'évolution des galaxies, en fonction de leurs interactions.

L'étude des interactions a été débutée par le suédois Erik Holmberg en 1940. Ce précurseur avait déjà prévu les marées produites par une galaxie sur une autre, et même simulé ces phénomènes sur des calculateurs analogiques (les ordinateurs numériques n'existant pas encore).

Mais ce beau travail n'a pas été suivi, au contraire l'idée a été abandonnée, et les structures linéaires que l'on observe parfois entre deux galaxies ont été expliquées par des champs magnétiques. On a bien montré depuis que ces champs n'ont pas l'intensité suffisante pour produire de tels effets, et l'explication de Holmberg a été reprise et développée aves les moyens de la simulation informatique.

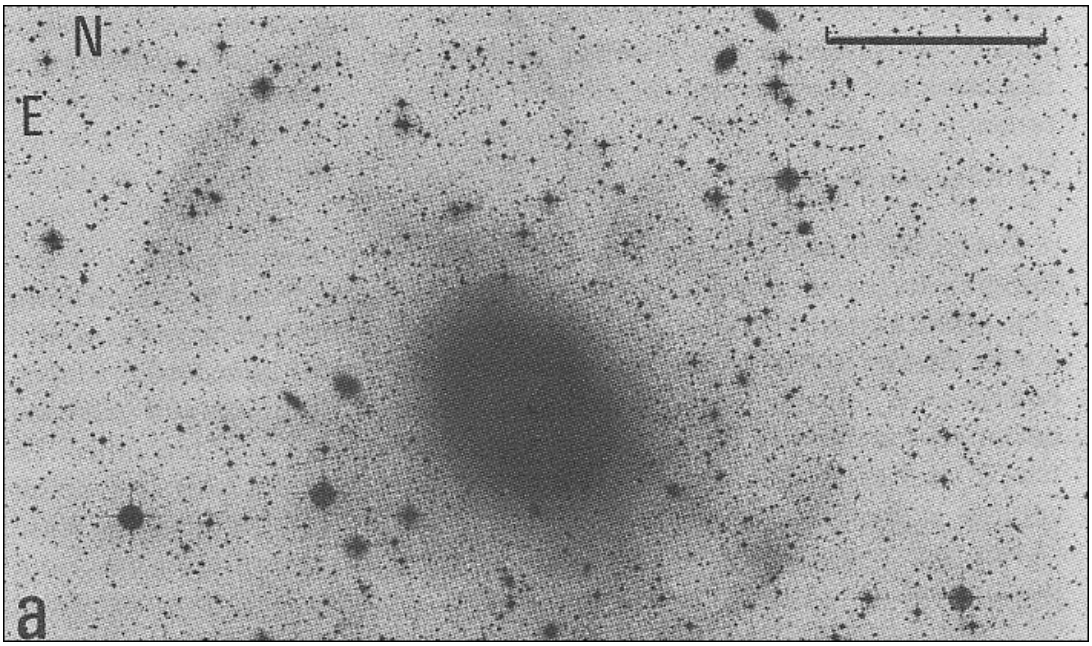
Le rejet des idées de Holmberg est justifié par l'analogie entre les galaxies et les mers terrestres. Cette analogie semblait interdire la formation de filaments de matière. Mais c'était l'analogie qui n'était pas justifiée ! En effet, les marées que nous considérons sur Terre se produisent sur de la matière condensée, dont les particules constituantes sont fortement liées (dans un solide ou un liquide). Il n'en est pas de même dans les galaxies, où les interactions entre étoiles sont très faibles ; les étoiles ne sont sensibles qu'au potentiel moyen créé par l'ensemble des étoiles et non individuellement. Une galaxie tient en équilibre par autogravitation bien sûr, mais elle n'a pas de cohésion : aucune autre force ne lie les étoiles. Une perturbation même assez faible est plus forte que la liaison entre les étoiles.

En 1961, Pfleiderer et Siedentopf ont fait des simulations, et montré que les filaments étaients formés par la gravité lors d'interactions. Mais eux non plus n'ont pas été suivis, et leur travail est resté lettre morte. Il a fallu attendre 1972 pour que le travail des frères Toomre, de même nature et aboutissant aux même résultats, soit enfin considéré et entraîne l'adhésion de la communauté.

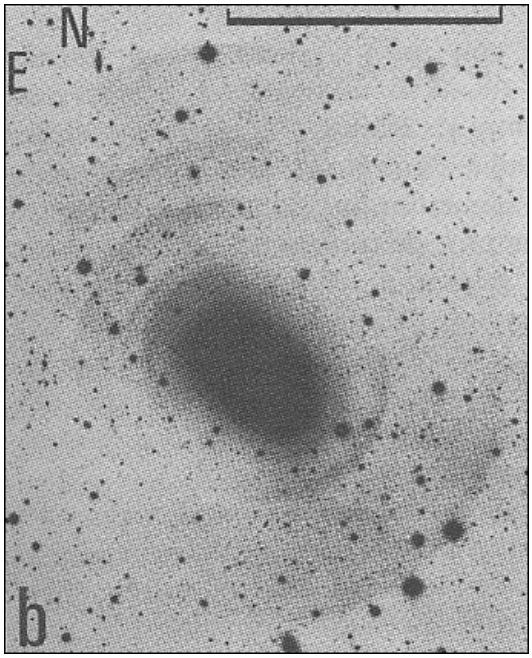
La première forme d'interaction que nous allons considérer est la présence de coquilles autour de nombreuses galaxies elliptiques.

**Galaxies à coquilles**

Ce sont des galaxies elliptiques, entourées de coquilles formées d'étoiles. Ces coquilles sont très ténues, et peu lumineuses. Il a été difficile de les mettre en évidence.




NGC 3923 par Marlin et Carter 1983
L'échelle représente 10'




NGC 3923 par Marlin et Carter 1983
L'échelle représente 5' on distingue nettement 5 coquilles

Sur les originaux des photos reproduites ci-dessus, on peut compter jusqu'à 26 coquilles emboîtées. Elles sont invisibles sur des photos brutes, et n'apparaissent que grâce à des techniques de traitement par masque flou, qui expliquent la mauvaise qualité visuelle des photos. Ces méthodes permettent d'augmenter le contraste de ces faibles objets.

Remarquez que le bord extérieur de chaque coquille est assez net, tandis que vers l'intérieur elles se diluent progressivement. Ce phénomène s'expliquera bien ci-dessous.

Dans les galaxies elliptiques du champ, on compte 40 % de galaxies à coquilles. Bien sûr, étant donné les difficultés de mise en évidence, ce nombre est une limite inférieure.

Illusion des coquilles

L'explication qui est actuellement donnée pour la formation des coquilles tient dans l'interaction d'une elliptique, généralement massive, avec une petite spirale qui la percute. En tombant sur l'elliptique, la spirale éclate, et ses étoiles se mettent à osciller autour du centre de l'elliptique, sur des trajectoires quasiment linéaires.

Lorsqu'une de ces étoiles passe au centre de l'elliptique, sa vitesse est maximale. Par contre, lorsqu'elle arrive à sa plus grande élongation (à droite ou à gauche), sa vitesse est nulle. Donc, l'étoile reste bien plus longtemps dans ces positions extrêmes, que devant l'elliptique. Ce qui fait qu'à tout instant, on en voit davantage dans ces positions, et par suite la brillance y est plus élevée.

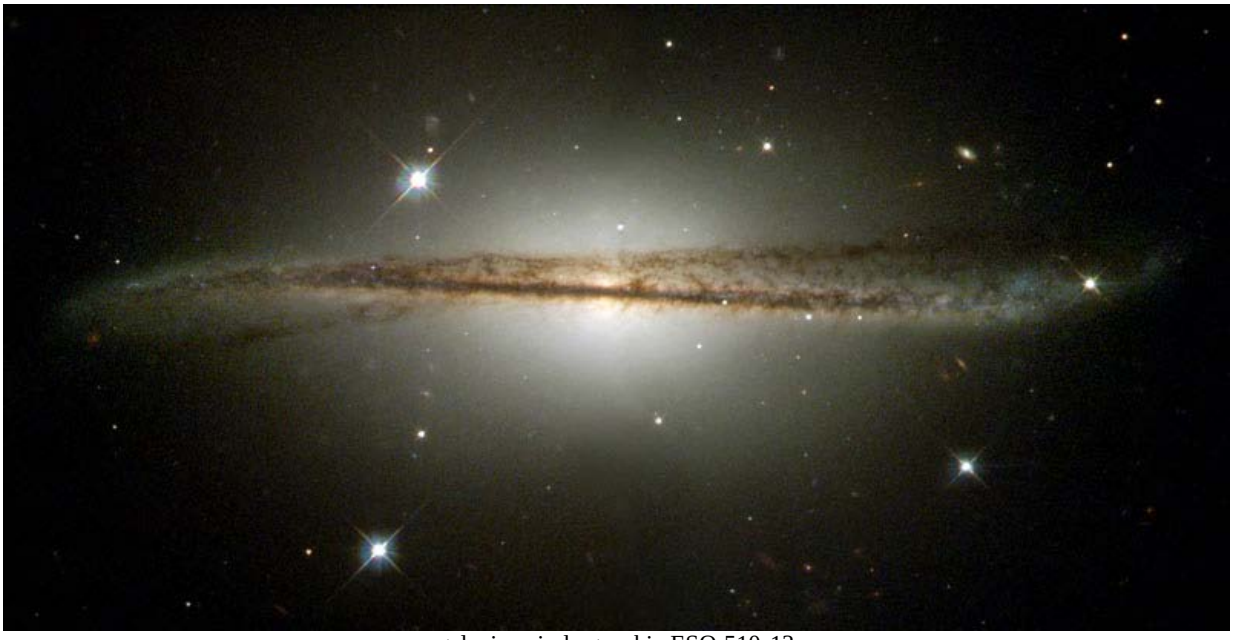
C'est cette différence de brillance qui permet de distinguer les coquilles, et qui leur donne leur aspect.

**Marées galactiques**

Les forces de marées sont des forces gravitationnelles différentielles : les points les plus proches du corps perturbateur subissent une influence plus élevé que les plus lointains. De ce fait, il se produit une force de distortion entre les éléments du corps perturbé. Sur Terre, cette distotion produit les deux bourelets de marée, et explique la périodicité des marées de 12 heures au lieu des 24 heures intuitives (marée haute quand la Lune passe au-dessus de nos têtes…).

La première remarque que nous ferons est qu'à grande distance, la force de marée est faible. Mais un calcul assez simple montre que sa forme produit le potentiel nécessaire à la formation d'une barre ! Cette barre est analogue aux bourelets maritimes sur Terre.

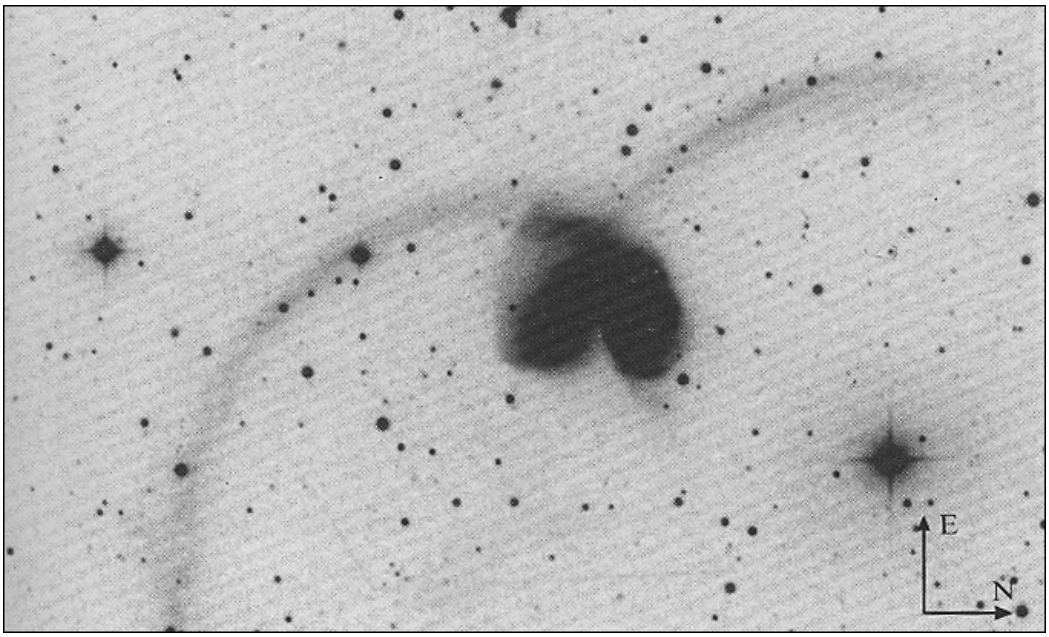
Si le compagnon perturbateur n'est pas dans le plan de la galaxie perturbée, on montre aussi que la marée provoque le gauchissement du plan de la galaxie influencée : le disque se tord en deux points diamétralement opposés, au-dessus du plan moyen d'un côté, en-dessous de l'autre côté.



galaxie spirale gauchie ESO 510-13
Hubble Heritage Team (STScI/AURA), C. Conselice (U. Wisconsin/STScI) et al., NASA

Dans les modèles de simulation, on néglige l'autogravitation entre les étoiles d'une galaxie. Cette approximation se justifie assez bien. Mais elle se justifie encore mieux pour le gaz, moins sensible à l'autogravitation d'une part, et plus sensible aux perturbations du fait de sa basse température (faible dispersion des vitesses).

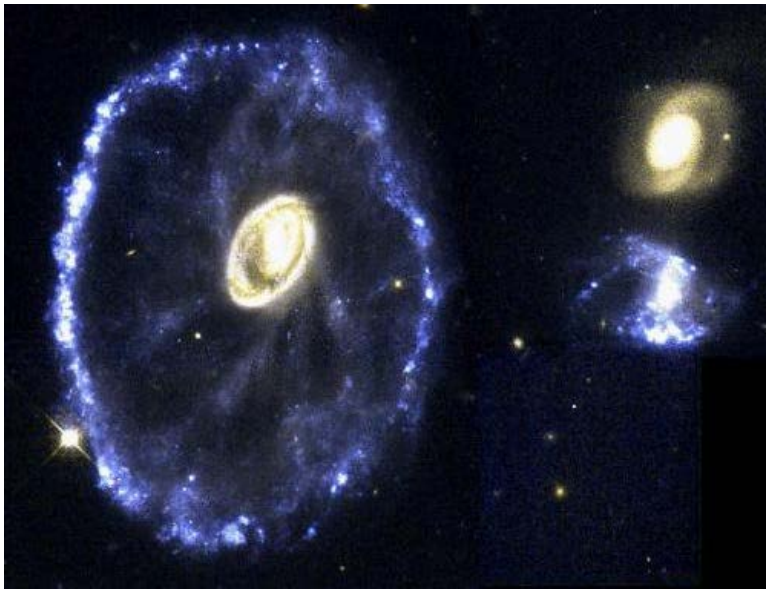
Les simulations représentent très bien la galaxie M 51 des Chiens de Chasse. Elles reproduisent le pont entre les deux galaxies, et le contre-bras de l'autre côté. De plus, elles expliquent que le pont reliant les deux protagonistes se diluera rapidement, ses étoiles s'agglomérant à l'une ou l'autre des galaxies. Par contre, le contre-bras a une durée de vie beaucoup plus longue, de l'ordre du milliard d'années, et disparaîtra par dilution de ses étoiles dans le milieu intergalactique.




NGC 4038-4039 Les Antennes

Les simulations des frères Toomre, effectuées à partir de deux disques inclinés l'un par rapport à l'autre, et qui subissent une collision, reproduisent très fidèlement ce que montre cette photo.

Les interactions expliquent aussi les spirales à 4 bras. Et encore les anneaux, comme ceux qu'on voit par exemple dans la Roue de Charrette. Dans ce dernier cas, la galaxie impacteuse a percuté le centre de la cible. L'onde de choc est alors une onde radiale, qui provoque une onde de densité en anneau.



galaxie de la Roue de Charrette photo Kirk Borne (STScI), NASA

Pour terminer à propos des interactions, il faut considérer la possibilité que deux galaxies fusionnent au terme de la rencontre. Lors de la rencontre, des phénomènes dynamiques complexes produisent un freinage des étoiles. Le protentiel gravitationnel de chaque galaxie est remplacé par un potentiel résultant des deux systèmes stellaires. Dans ces conditions, les vitesses des étoiles sont fortement perturbées, et la fusion peut avoir lieu.

Les simulations montrent que la fusion de deux galaxies spirales donne une galaxie elliptique.

Alors que les étoiles des deux galaxies se croisent sans se heurter (mais en étant fortement perturbées), les masses gazeuses ont un sort totalement différent. Les distances entre atomes étant assez faibles, il y aura de nombreuses collisions, ce qui produit une onde de choc. La compression qui s'ensuit va donner naissance à de nombreuses étoiles à la surface de contact. Les nuages de gaz restant rebondissent l'un sur l'autre, et sont expulsés.

Ce mécanisme pourrait expliquer la formation des galaxies elliptiques à la suite de collisions de spirales. Il explique à la fois la forme obtenue et l'absence de gaz que l'on constate.

Les coquilles s'expliquent également par ces interactions entre deux galaxies. La présence de nombreuses galaxies à coquilles (20 % du total) indiquerait donc un fort taux de collisions : toutes les collisions ne donnent pas de coquille, aussi il en faut beaucoup pour expliquer les 20 % observés.

Les études sur l'évolution des résidus de collisions, et sur leur durée de vie, comparées au pourcentage de tels restes observé, donnent à penser que 10 à 20 % des galaxies auraient fusionné depuis les débuts de l'Univers. Les grandes galaxies auraient subi 3 fusions depuis l'origine.

Cette convergence de faits ne doit pas faire oublier des arguments contraires à cette explication :

- les elliptiques ont plus d'amas globulaires que la somme des spirales qui les auraient produites ;
- les spirales sont peu concentrées, et les elliptiques fortement. Comment la collision a-t-elle pu produire cette concentration ?
- les elliptiques naines ont très peu d'étoiles, bien moins qu'une seule galaxie spirale. Elles auraient du se former autrement…

Mais ces arguments eux-même doivent être discutés. Le dernier en particulier pourrait être contourné si on considère des fusions de petites galaxies. Le mécanisme de formation des elliptiques pourrait être plus progressif, et faire intervenir un plus grand nombre de petites galaxies. Les simulations récentes montrent même que des amas globulaires peuvent se former lors d'une interaction entre deux galaxies.

Enfin, un argument contraire de Alar Toomre est très intéressant : si les elliptiques ne se forment pas de cette façon, puisqu'il y a de nombreuses interractions dont on observe les traces, que sont les objets résultant de ces chocs ? Où sont-ils ? Ils devraient constituer 15 % des galaxies observables au moins. Et leur masse ne leur permet pas de passer inaperçus !

**Les satellites de la Voie Lactée**

La Voie Lactée est une galaxie importante, dont la masse suffit pour attirer de nombreuses galaxies proches. Elle possède ainsi deux satellites, le Grand et le Petit Nuage de Magellan. Il s'agit de deux galaxies irrégulières.

Grand Nuage : mv = 0,3. Constellations de la Dorade et de la Table (Doradus, Mensa). Distance entre 200.000 et 250.000 AL.

Petit Nuage : mv = 2,4. Constellation du Toucan. Distance entre 200.000 et 250.000 AL.

Le Petit Nuage de Magellan est de faible masse, et il semble qu'il soit en train de se disloquer après avoir subi un choc avec la Voie Lactée il y a 200 millions d'années.

**Formation**

La formation d'une galaxie est un grand mystère. Elles se sont très certainement formées peu de temps après le Big Bang, mais comment ?

La durée de l’effondrement initial d’une galaxie est de l’ordre d’un milliard d’année.

Est-ce qu’il s’est formé des elliptiques et des spirales ? Les premières ne peuvent se former qu’à partir d’un nuage d’hydrogène non encore effondré, pour expliquer leur forme en ellipsoïde. Par contre, les spirales étant des disques, ne se sont formées qu’après effondrement et aplatissement du nuage. Comment justifier de deux modes de formation distincts et simultanés (dans les mêmes conditions) ?

Les photos d’amateurs de cette page sont l’œuvre de :

Jean-Pierre Bousquet  Jean-François Colliac

---=OO=---



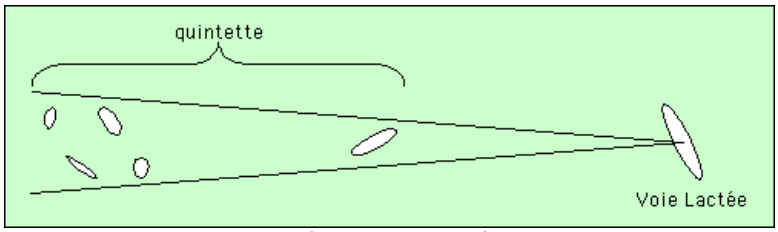

**Découverte**

En étudiant les amas de galaxies, on embrasse des étendues immenses, typiques de la cosmologie. Or cette dernière est basée sur le principe d'homogénéité de l'Univers. Mais cette homgénéité n'est pas encore atteinte à l'échelle des amas.

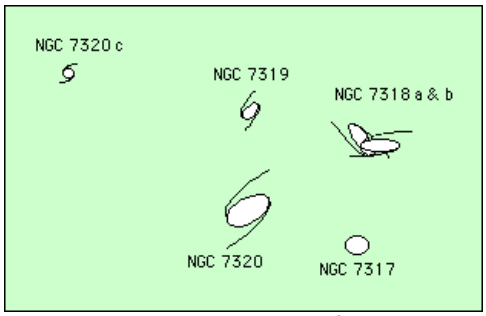
Les anciennes observations télescopiques ont montré que les galaxies ont tendance à se regrouper dans le ciel. Ces ensembles ont pris le nom d'*amas de galaxies*, ou de *groupe* pour les plus petits.

Ils pourraient résulter soit d'illusions dues à la perspective, soit d'accumulations réelles. Ils pourraient être stables ou très éphémères.

- On élimine les illusions en vérifiant que toutes les galaxies d'un amas supposé sont à la même distance de nous ; si c'est le cas, les galaxies sont effectivement proches les unes des autres ; On a ainsi résolu le problème du *quintette de Stéphan* (270 millions d'AL) : l'une des galaxies est plus proche que les autres, elle n'est là que par effet de perspective, alors que les 4 autres sont liées gravitationnellement.



Quintette de Stephan (Arp 319), découvert en 1877 à Marseille, par Edouard Stephan



NGC 7320 est au premier plan, à z = 0,0025
alors que pour les 4 autres 0,019 < z < 0,022



photo NASA/ESA

- La stabilité résulte de vitesses relatives faibles. Si c'est le cas, la gravité des galaxies les tient proches : elles sont liées.

On a donc une définition simple (simpliste, nous le verrons plus loin) des amas de galaxies :

**Les amas de galaxies sont des associations liées par la gravité**

Cette définition indique leur propriété physique essentielle. Elle n'est en rien une recette pour les observer, et dans ce but il faut trouver un moyen de distinguer les membres d'un amas parmi les galaxies du fond du ciel.

L'exemple du quintette de Stéphan est caractéristique : une observation de son aspect sur la sphère céleste nous montre 5 galaxies associées. Mais l'une d'elles ne fait pas partie de l'amas. La mesure de la distance est le seul critère fiable pour déterminer si un groupe observé est bien lié. Or cette mesure est très difficile, même à l'heure actuelle. Il a fallu attendre la méthode de Miss Henrietta Leavitt (céphéides) pour déterminer assez précisément la distance d'une étoile. Il est assez facile de vérifier qu'une étoile (céphéide) appartient à une galaxie, et donc d'associer la distance de l'étoile à toute la galaxie hôte. Ceci est dû au fait que les distances entre étoiles dans une galaxie sont petites devant les distances entre galaxies (1 AL contre $10^6$ AL). On ne peut pas associer à tort une étoile à une galaxie plus proche ou plus lointaine.

Pour les galaxies dans les amas, le problème est très différent : une galaxie d'aspect semblable peut être à une distance à peu près quelconque, et peut très bien être associée à tort à un autre amas.

Pour les amas lointains ($z \geq 1$ correspond à des amas bien lointains déjà), le diamètre angulaire des galaxies ne diminue pas avec la distance croissante (voir distance angulaire). Des galaxies d'aspect très semblable peuvent être à des distances très différentes. Seule la mesure des paramètres physiques de ces galaxies peut déterminer si elle appartiennent vraiment à un amas.

#### Caractérisation d'Abell

Abell a défini un amas comme une association d'au moins 50 membres, dans un domaine de 2 magnitudes à partir de la 3$^e$ plus brillante, et à l'intérieur d'un cercle de l'ordre de 2 Mpc. Il a identifié ainsi 2.712 amas de galaxies.

La contrainte de 2 magnitudes se justifie pour assurer que les galaxies sélectionnées soient à une distance semblable, en supposant qu'elles ont toutes le même éclat, à 2 magnitudes près. Bien sûr ce critère permet de **sélectionner les galaxies candidates**, mais la mesure précise de la distance est indispensable pour confirmer l'appartenance à l'amas.

#### Caractérisation de Zwicky

Zwicky a utilisé des critères différents : la limite d'un amas est définie par le contour où la densité des galaxies de l'amas est deux fois supérieure à celle des galaxies du fond. Il utilise un intervalle de 3 magnitudes, à partir de la plus brillante.

Ces deux définitions différentes montrent la difficulté de distinguer les amas parmi les galaxies du fond.

Les amas de galaxies sont minuscules !

Cette affirmation est bien sûr une boutade, puisque leurs dimensions se chiffrent en dizaines de millions d'années-lumière. Mais elle a un sens relatif cependant :

| |
|---|
| la taille type d'une galaxie est de l'ordre de 100.000 AL, et la distance type entre galaxies de 1.000.000 AL. A peine dix fois plus. En ce sens donc, les amas sont des groupes très compacts. |

Comparons avec les planètes dans le système solaire : la taille type est de 50.000 km, et leur distance de 100.000.000 de km. Un rapport de 2.000. Si on considère les étoiles dans une galaxie, le résultat est encore plus impressionant : taille 1 million de km, distance $10^8$ millions de km, rapport 100.000.000

| objet typique | dans | taille typique | espacement typique | espacement/taille |
|---|---|---|---|---|
| planète | système solaire | 50.000 km | 100 millions de km | 2.000 |
| galaxie | amas | 100.000 AL | 1.000.000 AL | 10 |
| étoile | galaxie | 1 million de km | 10 AL | 100.000.000. |

Une galaxie est un ensemble d'étoiles extrêmement dilué. Par contre, un amas de galaxies est très concentré. Par rapport à la taille de leurs constituants, les amas de galaxies sont de loin les objets les plus petits !

## *Les différentes structures*

#### Le Groupe Local

Notre propre Galaxie fait partie d'un petit amas, qu'on nomme tout simplement le Groupe Local. Il comprend à peu près 25 membres, mais il est possible que quelques autres nous aient échappé, parce que situés de notre point de vue derrière le centre de la Voie Lactée (on y a récemment découvert une galaxie naine). Les membres principaux sont la *Voie Lactée*, la galaxie d'*Andromède* (M 31) et la galaxie *M 33 du Triangle*. Notre Galaxie possède plusieurs satellites, petites galaxies irrégulières dont les deux nuages de Magellan sont les plus importantes.

Les principales galaxies du Groupe Local sont les suivantes :

| galaxie | type | diamètre en kpc | distance en kpc | magnitude absolue | magnitude apparente | vitesse en km/s | masse en M |
|---|---|---|---|---|---|---|---|

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Voie Lactée | Sb | 30 | | *-20* | | | $15\ 10^{10}$ |
| Grand Nuage * | Ir | 7 | 53 | -18,5 | 0,1 | +270 | $1\ 10^{10}$ |
| Petit Nuage * | Ir | 3 | 60 | -16,8 | 2,4 | +170 | $2\ 10^{9}$ |
| M 31 Andromède | Sb | 50 | 690 | -21,1 | 3,5 | -275 | $30\ 10^{10}$ |
| M 32 Andromède ** | E2 | 1 | 660 | -16,4 | 8,2 | -210 | $3\ 10^{9}$ |
| NGC 205 Andromède ** | E5 | 2 | 640 | -16,4 | 8,2 | -240 | $1\ 10^{10}$ |
| M 33 Triangle | Sc | 8 | 690 | -18,9 | 5,7 | -190 | $1\ 10^{10}$ |
| Sculptor | E | 1 | 85 | -11,7 | 7 | | $3\ 10^{6}$ |
| Fornax | E | 2 | 170 | -13,6 | 7 | +40 | $2\ 10^{7}$ |
| NGC 6822 Sagittaire | Ir | 2 | 470 | -15,7 | 8,6 | -40 | $4\ 10^{8}$ |
| NGC 147 Cassiopée | E5 | 1 | 660 | -14,9 | 9,6 | -250 | $1\ 10^{9}$ |
| NGC 185 Cassiopée | E5 | 1 | 660 | -15,2 | 9,4 | -300 | $1\ 10^{9}$ |
| IC 1613 Cetus | Ir I | 1 | 740 | -14,8 | 9,6 | -240 | $3\ 10^{8}$ |
| Leo I | E4 | 1 | 230 | -11,0 | | | $3\ 10^{6}$ |
| Leo II | E1 | 0,5 | 230 | -9,4 | | | $1\ 10^{6}$ |
| UMi | E naine | 0,3 | 67 | -8,8 | | | $1\ 10^{5}$ |
| Draco | E naine | 0,3 | 67 | -8,6 | | | $1\ 10^{5}$ |

* satellite de la Voie Lactée
** satellite de M 31

On trouve 10 elliptiques (dont deux naines), 4 irrégulières, et 3 spirales.

Le diamètre du Groupe Local est de l'ordre de 2 Mpc (c'est l'ordre de grandeur défini par Zwicky). Ce nombre est à comparer au diamètre de la Voie Lactée : 30 kpc. Pour se représenter le Groupe Local, comparons-le au système solaire : imaginons que la Voie Lactée soit de la taille du Soleil ; alors tout le Groupe Local serait contenu à l'intérieur de l'orbite de Mercure !

Cette remarque nous montre que le Groupe Local est bien plus compact que ne l'est le système solaire.

Une bande de gaz relie le pôle sud de notre Galaxie aux deux Nuages de Magellan, montrant qu'elles sont en interaction. Cette bande se nomme le *courant magellanique*. Le Petit Nuage est très riche en gaz, il en contient 20 % en masse.

M 31 (Andromède) est l'objet le plus lointain visible à l'œil nu. M 32 est en interaction avec M 31, comme les Nuages avec notre Galaxie.

Andromède se rapproche et entrera en collision avec la Voie Lactée dans 10 milliards d'années.

**L'amas de la Vierge**

Il s'étend sur les constellations de la Vierge naturellement, mais aussi des Chiens de Chasse et de la Grande Ourse. C'est dire qu'il se trouve proche du pôle galactique, et par conséquent l'extinction par la Voie Lactée est minimale. C'est un amas important, qui regroupe plus de 2.500 galaxies. Son diamètre est de 10 millions d'années-lumière. Il est situé vers 18 Mpc (55 millions d'AL).

Il est constitué d'un amas principal important, et de petites condensations. L'objet principal est à 16 Mpc de nous, et ses vitesses de récession vont de 500 à 2.500 km/s. En son centre se trouve la galaxie géante M 87, qui est de type cD.

Le Groupe Local est en chute vers l'amas de la Vierge, à une vitesse de l'ordre de 500 km $s^{-1}$. Le destin probable de notre Galaxie est sans doute de s'engloutir dans cet objet géant. Toutefois, il se passera bien d'autres choses d'ici là.

Grâce à cette chute, il est possible de calculer la masse de l'amas de la Vierge. Ensuite, en mesurant la luminosité de l'amas, on peut calculer le rapport M/L, et on trouve qu'il est compris entre 100 et 300. Ceci indique que l'amas doit contenir beaucoup de gaz et de matière noire.

Plus un amas est riche, plus la concentration centrale augmente. Il y a souvent une galaxie supergéante de type cD au centre.

**L'amas de Coma**

C'est un amas sphérique compact de 6 Mpc de diamètre, situé à 60 Mpc, et contenant 654 galaxies en-dessous de mv = 16,5. Il nous fuit en moyenne à 7.300 km/s, son décalage spectral étant z = 0,024.

On note une forte concentration au centre, où les galaxies sont de type E ou S0 (spirales presque elliptiques). Autour des deux galaxies centrales, les petites se groupent, attendant sans doute d'être avalées… En rayons X, on détecte une quantité importante de gaz intergalactique regroupé au centre. De plus, une vingtaine de galaxies centrales présentent une forte émission radio.

**Superamas Local**

Il a été découvert dans les années 50. Il est centré sur Virgo, contient le Groupe Local, et comprend une cinquantaine de groupes de galaxies. Son diamètre est de l'ordre de 16 Mpc. Pour le découvrir, on a utilisé la détermination des vitesses, déterminées par décalage spectral. Par rapport au mouvement global d'expansion de l'Univers, on constate que l'amas de la Vierge s'éloigne moins vite que l'expansion, alors que les amas opposés s'éloignent plus vite. C'est ainsi qu'on a mis en évidence le mouvement propre de notre Groupe Local en direction de la Vierge à 500 km/s.

On observe entre l'amas de Coma et Abell 1367 un pont de gaz qui rayonne dans le domaine radio par l'effet synchrotron. Ce gaz est canalisé par le champ magnétique intergalactique, responsable aussi du rayonnement.

**Le Grand Attracteur**

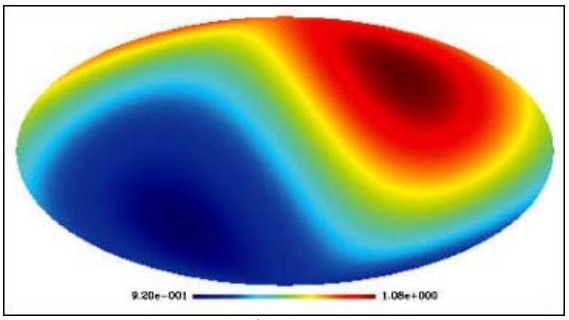
La Voie Lactée se dirige vers le centre du Groupe Local à 40 km/s. Le Groupe Local se rapproche de l'amas de la Vierge à 600 km/s.

Mais on a détecté encore un mouvement d'ensemble du Groupe Local et de la Vierge (par rapport à l'expansion générale), en direction des amas de l'Hydre et du Centaure.

La composition de ces diverses vitesses donne une résultante, montrant que tout cet ensemble se dirige vers un point qui doit nous attirer gravitationnellement. On a nommé *Grand Attracteur* cette région du ciel. Malheureusement, il se trouve en direction du Centaure, derrière notre propre Galaxie, à peu près dans son plan. On ne peut donc pas le visualiser correctement. Toutefois, dans cette direction se trouve l'amas Abell 3627, très riche, dont la masse est de l'ordre de $5\ 10^{15}$ masses solaires. Il contient beaucoup de gaz chaud, émettant un fort rayonnement X. Il fait sentir son influence gravitationnelle jusqu'à 200 Mpc !

Le Grand Attracteur a été découvert par Sandra Faber et son équipe, nommée *les sept samouraï*.

Une preuve directe de l'existence du Grand Attracteur a été donnée par le satellite cosmologique WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe). Les données brutes montrent des variations de température du rayonnement de fond cosmologique, c'est-à-dire de longueur d'onde, en fonction de la position sur le ciel. Pour interpréter ces données, il faut utiliser un modèle et faire des corrections. Après un lissage statistique simple, indépendant de tout modèle cosmologique, on voit apparaître une différence très nette entre deux hémisphères : les températures dans une direction sont systématiquement plus élevées que dans la direction opposée.



données WMAP

Il s'agit d'une interprétation bipolaire du fond de rayonnement. Il est difficile de croire que cet effet soit réel. Par contre, si on considère que notre observatoire terrestre est entraîné par un mouvement dans une certaine direction, il est évident que nous allons dans la direction où le rayonnement semble plus chaud. En effet, en s'approchant d'une source, on décale la lumière qu'elle émet vers le bleu, donc vers le plus chaud. Attention, les couleurs de cette carte ne correspondent PAS à celle d'un spectre, et le côté le plus chaud est le rouge !

Cette analyse dipolaire des données de WMAP met donc en évidence un mouvement de la Terre, et la direction qu'elle indique est celle du Grand Attracteur.

**Le Grand Mur**

Il n'est pas possible de déterminer les décalages de toutes les galaxies, tout au moins jusqu'à une distance beaucoup plus grande que la taille des structures étudiées. On est alors réduit à échantilloner le ciel, pour limiter le nombre d'objets à mesurer. Un nombre raisonnable d'objets peut être choisi soit en largeur, soit en profondeur. Dans le premier cas, on échantillonera une large région du ciel, mais jusqu'à une magnitude limitée (qui correspond à peu près à une profondeur limitée) ; dans le second, on conservera une grande profondeur, mais dans un champ angulaire étroit. Les résultats à grande échelle sont connus par ce genre de moyens, et ont donc une certaine valeur statistique.

En 1981, on a découvert une zone du ciel où la densité de galaxies est nettement inférieure à la densité moyenne. Le déficit atteint les 20 %, et cette région mesure 60 Mpc. Par contre, entre les Poissons et Persée, on observe une chaîne de galaxies qui produit une surdensité.

L'influence gravitationnelle sur l'amas de Coma produit une dispersion des vitesses de 1.000 km/s.

Le *Grand Mur* est constitué de galaxies dont la vitesse est comprise entre 7.500 et 10.000 km/s. Il est situé entre 8 h et 17 h d'ascension droite. Il s'étale sur une profondeur de 5 Mpc, et contient 5 fois plus de galaxies que la moyenne.

Il apparaît au bout du compte que les très grandes structures sont plutôt allongées, et qu'elles séparent des espaces vides, d'une taille comparables à celle des superamas.

L'aspect général est celui d'un réseau de filaments, qui se rejoignent aux amas, et qui englobent des bulles vides. La dimension caractéristique des structures va de 20 kpc à 100 Mpc.

**Un nouveau grand mur**

Un récent recensement dans l'hémisphère galactique sud a montré l'existence d'une structure semblable au Grand Mur, qui se situe à z = 0,1. On y voit aussi des amas et des régions vides, ce qui donne une allure identique à celle de l'hémisphère nord.

On note de plus un effet déjà mis en évidence auparavant, mais mieux marqué : 40 % des galaxies de cet échantillon présentent des raies spectrales en émission, et d'autant plus qu'elles sont plus loin. Ces raies sont des marqueurs du taux de formation stellaire dans les galaxies. Les galaxies les plus jeunes (les plus lointaines), forment davantage d'étoiles.

**Recensement des galaxies**

A la magnitude 21, on compte les galaxies, sur les plaques des grands Schmidt, par dizaines de millions !

Après le travail de pionier fait par Abell, Zwicky et quelques autres, on a construit des machines à mesurer les clichés, qui sont capables de faire la distinction entre une galaxie et une étoile avec un taux d'erreur très faible. Une extrapolation des comptages automatiques laisse penser qu'on pourrait distinguer plus de 100 milliards de galaxies sur le ciel entier...

La recherche des amas est relativement facile dans notre voisinage, c'est-à dire à moins de z = 1. Au-delà, il devient très difficile de distinguer la surdensité de l'amas par rapport au fond du ciel.

Une fois les amas délimités, il faut déterminer la distance de chacune des galaxies candidates pour confirmer son appartenance.

**Mesure des distances**

La distance des galaxies proches a pu être mesurée en analysant les propriétés des étoiles brillantes et particulières qu'elles contiennent. Les plus utilisées sont d'abord les Céphéides, supergéantes très brillantes, visibles de loin, et dont la période permet de retrouver la luminosité, donc la magnitude absolue. En mesurant leur magnitude apparente, il est facile de calculer leur distance. C'est celle de la galaxie à laquelle elles appartiennent. Les RR Lyræ sont d'autres étoiles variables dont la magnitude absolue est la même pour toutes, donc on en déduit encore la distance. Ces étoiles sont moins lumineuses que les Céphéides, donc ne permettent pas d'aller aussi loin.

Le second type d'indicateur est donné par les supernovæ. Là encore, on connaît bien les propriétés physiques de ces objets, et leur observation permet de déterminer la magnitude absolue, d'où la distance.

Tous ces indicateurs ne suffisent pas pour déterminer de très grandes distances, mais ils ont permis d'étalonner l'Univers proche. Vesto Slipher en 1913, a découvert le décalage spectral vers le rouge de toutes les nébuleuses (galaxies non encore résolues en étoiles). A la suite de ses travaux, Hubble et Humason ont établi une relation entre le décalage vers le rouge et la distance. Cette relation, supposée valable plus loin, permet de déterminer la distance de tout objet dont on peut mesurer le décalage spectral. Il suffit donc que l'objet soit assez lumineux pour en prendre un spectre.

On avait déterminé en 1996 les décalages spectraux de 100.000 galaxies. Actuellement, on connaît z pour toutes les galaxies jusqu'à la magnitude 15,5. Il serait tentant de penser qu'on connaît donc les distances de ces objets. Pourtant, comme toute mesure, la constante de proportionnalité entre le décalage et la distance n'est connue qu'avec une certaine précision. Et dans ce cas précis, on pourrait parler d'imprécision. En effet, elle n'est déterminée qu'à un facteur deux près. Ce qui fait que toutes les distances obtenues à partir de la loi de Hubble sont entachées d'une erreur importante, et sont donc susceptibles d'être modifiées à chaque révision de $H_0$.

Pour éviter d'écrire des valeurs soumises à révision, on écrit :

$$H_0 = 100\ h\ km\ s^{-1}\ Mpc^{-1}$$

D'après la loi de Hubble $v = H_0\ d$, on obtient $d = v / H_0$ et par suite : $d = v / 100\ h$

Pour $v = 1.000\ km\ s^{-1}$ par exemple, $d = 1.000 / 100\ h = 10 / h =$ **$10\ h^{-1}$ Mpc**

La valeur de $H_0$ probable est de l'ordre de $75\ km\ s^{-1}\ Mpc^{-1}$, donc h = 0,75 (actuellement).
Si on révise $H_0$, la valeur de h changera, mais la formule donnant d restera la même d = **$10\ h^{-1}$ Mpc**.

Sans cet artifice, on écrirait $d = v / H_0 = 1.000\ km\ s^{-1} / (75\ km\ s^{-1}\ Mpc^{-1}) = 13,3$ Mpc. Si on faisait un tableau de telles valeurs, il faudrait toutes les changer en cas de modification (probable) de $H_0$.

En fonction du décalage spectral, la distance s'exprime facilement :

**D = 4000 z MPc** valable pour z < 0,1
Votre navigateur ne semble pas capable d'afficher une applet Java.
Le résultat est en Méga Parsecs (formule non relativiste)

**Dynamique des amas**

La dynamique des amas est très importante : pour déterminer leur stabilité, mais aussi pour déterminer leur masse. On sait que pour les galaxies, la masse visible (celle des étoiles), est très loin en dessous de la masse réelle, dont on détermine une valeur par la dynamique. C'est donc encore par la dynamique qu'on va déterminer la masse des amas de galaxies.

**Dimensions des amas**

La taille des amas est typiquement de quelques Méga Parsecs, allant jusqu'à la dizaine.

**Quelques amas remarquables**

L'amas le plus riche connu est Abell 665, qui contient un millier de galaxies !

Le plus lointain qu'on puisse déterminer est à z = 0,2.

Au-delà de z = 0,5 il est très difficile de déterminer le type des galaxies, car leur dimension typique est vue sous un angle inférieur à la seconde d'arc.

**Ségrégation morphologique**

On a constaté que les galaxies ne se répartissent pas au hasard à l'intérieur des amas : les elliptiques sont de préférence au centre, et les spirales à la périphérie.

Ceci s'explique de deux façons différentes :

- la fusion de deux spirales produit une elliptique ;
- la présence de gaz chaud au centre de l'amas chasse le gaz des galaxies présentes, modifiant les propriétés gravitationnelles.

**Orientation des amas**

Une autre surprise attendait les astronomes. Les amas de galaxies sont sphéroïdaux, et possèdent un axe plus grand que les autres. Or cet axe est souvent orienté vers l'amas le plus proche ! Ceci s'explique difficilement par une influence de l'un sur l'autre, et on doit invoquer la survivance d'une situation initiale. On pense donc que des structures approximativement linéaires ont dû exister et produire les amas dans cette orientation.

**Masse des amas**

C'est le problème central. De la masse dépendent la plupart des propriétés.

> Première méthode : On peut la déduire de façon évidente. On compte le nombre de galaxies de l'amas, on multiplie par le nombre moyen d'étoiles par galaxie, et on multiplie encore par la masse moyenne d'une étoile. On ne risque pas d'obtenir la valeur exacte, mais on espère un ordre de grandeur acceptable. D'autant plus qu'il est possible d'affiner la méthode, en distinguant selon les types de galaxies : spirales, elliptiques, irrégulières, et d'estimer le nombre d'étoiles de chacune par rapport à sa luminosité globale.
>
> On obtient ainsi la masse de la partie visible de l'amas, constituée d'étoiles. Or les amas contiennent aussi du gaz, dont la masse se mesure par rapport à sa brillance en X, puisque c'est ainsi qu'on l'a découvert.
>
> Deuxième méthode : L'hypothèse de l'équilibre des amas nous procure une méthode de principe différent. Dans un amas riche, on peut observer les galaxies périphériques qui sont en orbite autour de la quasi totalité de la masse de l'amas. Si on est capable de déterminer cette orbite, on en déduira la masse centrale, celle de l'amas. Or il est possible de déterminer la vitesse radiale de ces galaxies par rapport à nous, et en le faisant pour un grand nombre d'entre elles, on en déduit l'orbite. On obtient ainsi la masse dynamique.

Dès 1933, Zwicky a découvert que les masses obtenues par ces deux types de méthodes sont en désaccord. Les écarts sont très supérieurs aux erreurs de mesure, et le résultat est tout à fait fiable. Zwicky a évalué le rapport entre la masse dynamique et la masse visible à 400 ! Ceci signifie que la masse réelle d'un amas de galaxies est 400 fois plus élevée que ce que les étoiles permettent de penser. Et l'ordre de grandeur de ce rapport a été confirmé par la suite.

C'est l'un des grands problèmes de l'astrophysique actuelle, de comprendre la nature de cette masse invisible.

> Troisième méthode : On dispose à l'heure actuelle d'une autre méthode pour peser les amas. Elle consiste à mesurer l'effet de lentille gravitationnelle produit par l'amas sur une galaxie d'arrière plan. Cette méthode est indépendante de l'équilibre, et donne des résultats du même ordre.

En Cosmologie, ce problème est très important, car la masse manquante augmente la gravité, et tend à ralentir l'expansion de l'Univers. Si cette masse est très importante, elle pourrait arrêter l'expansion, qui se changerait en contraction. Mais d'autres observations (qu'on verra par ailleurs) viennent compliquer la situation !

Dans l'amas de Coma, la masse lumineuse (étoiles et gaz) atteint tout juste 10 % de la masse totale dynamique. Dans l'amas de Persée, c'est encore pire, puisque le taux descend à 5 %.

**Carte d'identité**

De toutes ces études, on peut tirer la physionomie moyenne d'un amas

| | **groupe** | **amas standard** | **amas riche** |
|---|---|---|---|
| nombre de galaxies | 10 | 500 | 3.000 |
| vitesses km/s | 150 | 700 | 1.500 |
| luminosité X entre 2 et 10 keV | $10^{43}$ ergs | $2\ 10^{44}$ ergs | $5\ 10^{45}$ ergs |

| | | | |
|---|---|---|---|
| température des gaz | 2 keV | 5 keV | 15 keV |
| masse totale | $10^{13}$ M | 3 $10^{14}$ M | 5 $10^{15}$ M |

La répartition de la masse selon les composantes de l'amas est la suivante :

| **composante** | **masse en % de la masse totale** |
|---|---|
| masse des galaxies | moins de 5 % |
| masse du gaz | 15 % |
| masse invisible | 80 % |

Le nom *amas de galaxies* semble maintenant curieux, puisque les galaxies sont le constituant minoritaire dans l'ensemble. Il ne s'explique que pour des raisons historiques.

**Les catalogues**

Le premier d'entre eux est le catalogue d'Abell, réalisé en 1958, et comprenant 2.712 amas. Il a été étendu au ciel austral en 1989, et a regroupé 4.073 amas. Il a été construit par analyse visuelle des plaques du Schmidt du Mt Palomar, et du UK (United Kingdom) Schmidt télescope. Il est limité à un décalage vers le rouge de 0,3 mais il couvre tout le ciel sauf le plan de la galaxie.

Actuellement, il existe des méthodes de recherche automatique sur les plaques, qui ne sont pas sensibles aux erreurs humaines. Mais les objets trouvés sont des candidats, qui doivent être confirmés par des méthodes d'analyse directe. Et on se heurte alors à une masse de données bien trop importante pour être traitée en totalité. Il faut sélectionner, et ceci ne se fait pas sans erreurs.

Un catalogue établit selon ce principe, et indiquant les décalages, contient 360 amas jusqu'à un décalage de z = 0,16. Il permet de se faire une idée de la répartition spatiale des amas.

On peut faire une étude plus profonde, mais on se heurte à un problème : les amas sont noyés dans les galaxies de fond dès qu'on arrive vers z = 1. Quelques essais ont été faits à l'aide de CCD. Les mesures ne peuvent être faites que sur des amas proches (z < 0,5) en se limitant à des temps de pose raisonnables avec les télescopes courants (4 m).

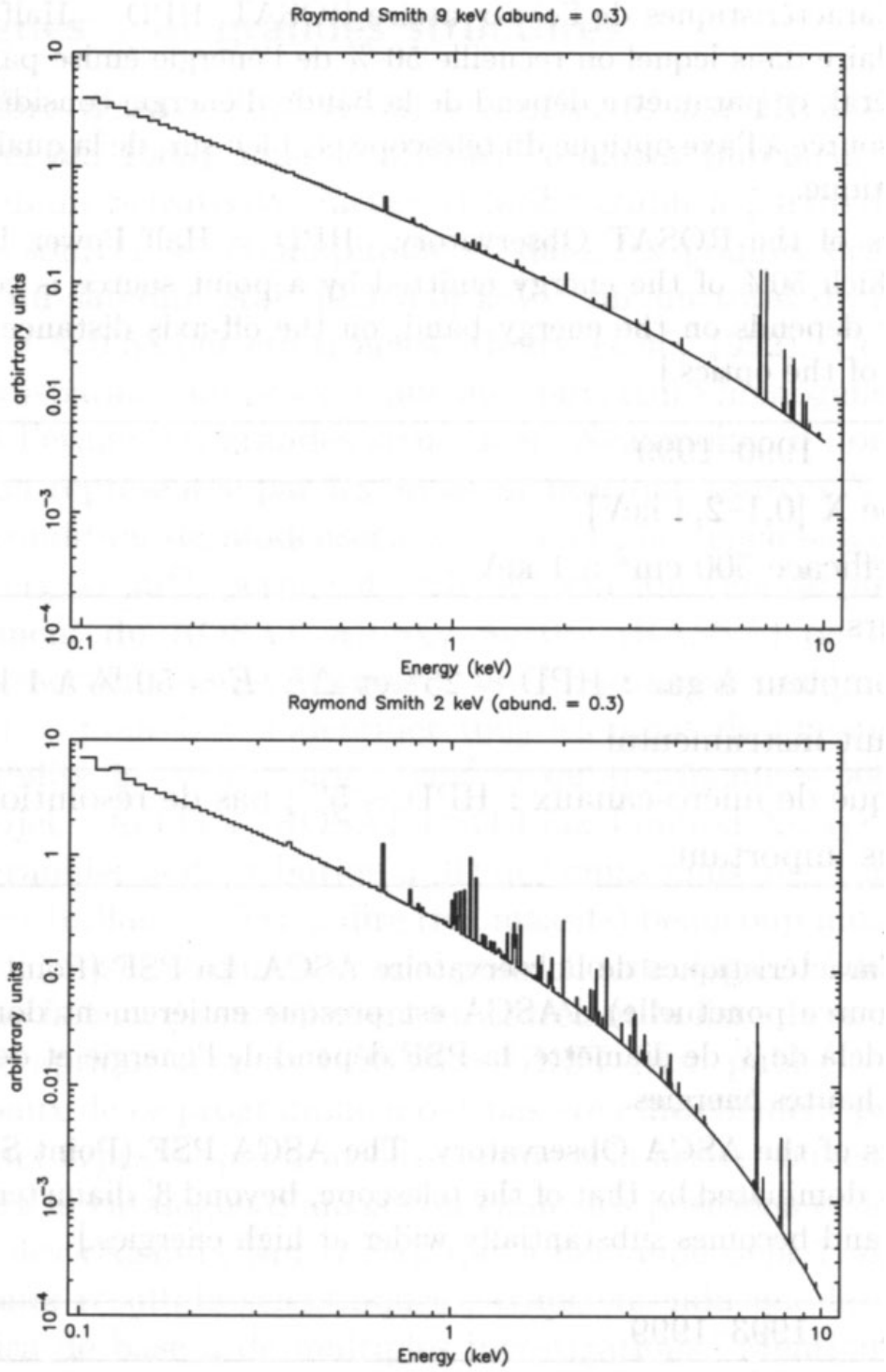
La solution pour distinguer les amas lointains semble bien être une observation en rayons X.

**Le gaz intergalactique**

Des observations récentes ont montré que les amas de galaxies émettent un rayonnement X, produit par un gaz diffus à très haute température (plusieurs dizaines de millions de degrés) piégé par la gravité de l'amas. Les rayons X étant absorbés par notre atmosphère, c'est le satellite Uhuru qui a découvert cette propriété en 1970.

Ce gaz est à très faible densité, et donc l'absorption qu'il produit n'est pas détectable dans le visible. Sa température étant par ailleurs très élevée, son rayonnement optique est très faible, il ne peut donc pas être détecté avec les télescopes optiques. Il n'est pas étonnant qu'il n'ait pas été découvert plus tôt.

Le gaz intergalactique a une densité moyenne de 1 atome par litre, et une température de $10^7$ K. Il est optiquement mince (la lumière le traverse sans être notablement aborbée). Ce gaz est composé d'hydrogène et d'hélium en proportions cosmiques (1/4 d'hélium en masse), et il est totalement ionisé par la très forte température. Il ne contient que des traces des autres éléments. L'émission lumineuse se fait par rayonnement de freinage (nommé *free-free*, ou *bremsstrahlung*) entre électrons et protons. C'est une émission continue.




d'après M. Pierre, *le point sur les amas de galaxies*

Lorsqu'un électron est suffisamment freiné, il peut être capturé par un noyau, en émettant une raie de recombinaison. Ceci se produit surtout avec les noyaux lourds, dont le potentiel électrostatique est plus important. Par conséquent, l'intensité de ces raies dépend de la métallicité du gaz de l'amas. Les raies les plus fréquentes sont celles du fer fortement ionisé : Fe XXIII, Fe XXIV et Fe XXV.

En astronomie X, la longueur d'onde du rayonnement est exprimée en énergie ! Donc en kilo-électrons-volts ou keV.

| |
|---|
| les photons visibles violets ont une énergie de 3 eV<br>les rayons X vont de 100 eV à 100 keV<br>les rayons $\gamma$ sont au-delà de 100 keV, et même jusqu'à 100 MeV (quasar) |

Ainsi, un amas de galaxies est un ensemble de galaxies, liées gravitationnellement, et baignant dans un gaz à très haute température. Ceci modifie la définition historique donnée plus haut.

Le gaz est très utile pour définir les propriétés des amas :

- les galaxies sont en petit nombre, et éloignées les unes des autres, alors que le gaz est constitué d'un nombre extrêmement élevé d'atomes, proches les uns des autres. Le gaz suit donc de plus près le potentiel gravitationnel (il permet de tracer plus finement la distribution de matière).
- dans le domaine X, si on s'en tient à une sensibilité raisonnable, et à une résolution proche de 15", on ne voit que deux types de sources

très distinctes : les quasars ponctuels, et les amas étendus, et ceci jusqu'à un décalage (donc une distance) z = 1 à 2.

Dans la bande d'énergie de 0,3 à 3,5 keV, les amas représentent 13 % de l'ensemble des sources X. On dispose d'un échantillon de 93 amas (jusqu'à z = 0,58) observés par *EMSS* (*Einstein Medium Sensitivity Survey* ; un *survey* est une recherche systématique) qui permet également de calculer la fonction de luminosité des amas. Ces échantillons sont *serendipitous* ! Autrement dit, découverts au hasard, sur des clichés pris pour une autre recherche.

Un survey X de l'hémisphère austral est en cours. Les premiers résultats contredisent une valeur trouvée à partir du catalogue Abell (dans le visible). Le résultat déduit du catalogue Abell est probablement entaché d'une erreur de sélection non contrôlée.

L'étude du gaz a été faite par les satellites Einstein, Ginga et Rosat. Ce dernier a obtenue une cartographie X du centre d'un amas.

Lors de la formation des galaxies d'un amas, le gaz résiduel, non utilisé pour former les galaxies, a dû tomber vers le centre, où le potentiel gravitationnel était le plus fort. Dans sa chute, sa température a augmenté par compression, et on calcule qu'il doit ainsi atteindre les 100 millions de degrés (il suffit de supposer que le gaz est en chute libre vers le centre, et connaissant la distance de chute, on déduit l'énergie gravitationelle libérée). Ceci est tout à fait compatible avec les observations X, qui justifient des températures de cet ordre.

Le gaz de l'amas de Persée dissipe une énergie de $4\ 10^{44}$ ergs $s^{-1}$, soit 100 milliards de luminosités solaires !

Le mouvement des galaxies autour du centre de l'amas, dans ce milieu gazeux, est freiné. Les galaxies les plus massives sont les plus sensibles à cet effet, et progressivement elles migrent vers le centre. En se regroupant ainsi, elles sont amenées à fusionner.

La température très élevée du gaz produit des réactions nucléaires, et la création de métaux lourds. C'est ce qui explique l'observation des raies du fer fortement ionisé (car le fer est présent, et à très haute température).

**Les courants de refroidissement**

La densité du gaz au centre des amas est assez élevée pour produire un refroidissement. Les chocs entre atomes sont assez fréquents, ils transfèrent de l'énergie de l'un à l'autre, et cette énergie est parfois utilisée pour changer le niveau électronique. Il s'ensuit une émission de photon, qui est capable de traverser le gaz sans interaction (la densité est assez faible pour que le gaz soit optiquement mince), emportant l'énergie à l'extérieur. Ce mécanisme produit un refroidissement du gaz.

Il s'ensuit une différence de température entre diverses zones du gaz, et cela produit un courant de matière vers le centre (la pression ne contrebalançant pas la gravité). On peut alors se demander ce que va devenir ce gaz, à force de s'accumuler. On envisage la *catastrophe du refroidissement* (*cooling catastrophe*). Une idée pour l'éviter serait que le gaz, en augmentant sa densité, forme des étoiles. Et en effet, on a certains indices de présence d'étoiles chaudes dans ces régions.

Toutefois, il existe une variante, dans laquelle le gaz serait un milieu multi-phases : une enveloppe de température moyenne à l'échelle de l'amas, contenant des condensations plus froides en s'approchant du centre. Ces modèles représentent la tendance actuelle…

L'interaction gravitationnelle dans les amas, qui produit leur confinement, les maintient en équilibre. Cet équilibre est-il stable ? Autrement dit, les amas ne sont-ils ni en contraction ni en expansion ? La question n'est pas totalement tranchée. En considérant l'âge de l'Univers, et le mode de formation des amas de galaxies, on peut montrer théoriquement que pour la masse des amas, l'équilibre doit être tout juste atteint maintenant. Il est en effet d'autant plus difficile et plus long à atteindre que la masse considérée est plus grande. Nous ne sommes donc pas sûrs que les amas soient en équilibre gravitationnel, mais ils n'en sont certainement pas très éloignés. C'est pour cette raison qu'on les a supposés en équilibre plus haut, et qu'on continuera de le faire. Les éventuelles structures à plus grande échelle (superamas) ne seraient pas encore relaxées (en équilibre). Par conséquent :

**Les amas de galaxies sont les objets en équilibre les plus massifs de l'Univers.**

Cette notion d'équilibre n'est pas simple. Elle se dédouble, car les deux composantes sont de nature différente :

- les galaxies sont en équilibre dynamique par leur gravitation.
- le gaz est en équilibre hydrostatique.

Ceci ignore la stabilité de la matière noire. Mais on ne peut rien dire encore à ce sujet, puisque celle-ci est toujours inconnue…

**Métallicité du gaz intra-amas**

La métallicté mesurée est comprise entre 0,3 et 0,5 fois la métallicité solaire. Si le gaz était primordial, sa métallicité devrait être nulle. Il faut donc croire qu'il y a des échanges entre le gaz primordial (une partie du gaz intra-amas), et les galaxies dont les étoiles augmentent la métallicité.

A partir des donnée du satellite GINGA, on a trouvé que la masse de fer présente dans ce gaz est directement corrélée à la luminosité des elliptiques et des lenticulaires de l'amas. Le rapport $M_{gaz}$ / $M_{étoiles}$ augmente avec la richesse des amas. Et enfin, le fer peut y atteindre 3 pour mille de la masse des étoiles. Pour expliquer ces faits, on invoque les supernovæ.

Par la suite, bien d'autres éléments chimiques ont été mesurés. En particulier l'oxygène, produit dans les SNII et non les SNI, elimine ces dernières comme candidates.

**Fond diffus X**

Les premières observations en X montrent un fond diffus, mais leur résolution est limitée. Avec les progrès, des sources isolées ont été détectées dans ce fond. Elles sont produites par des amas de galaxies (6 % des sources), et par des AGN pour la plupart du reste. Les AGN montrent une évolution en X pour z < 2, et pourraient expliquer tout ce fond, par des sources lointaines non résolues. Certaines d'entre elles pourraient être

des quasars à z > 5

**Radio**

Enfin, on observe évidemment les amas de galaxies en radio. Ce qui révèle ceertaines surprises. Par exemple, dans certains cas on note une corrélation entre X et radio : les images dans ces deux domaines se superposent (M87). Dans d'autres cas, elles s'opposent (NGC 1275) ! Ces galaxies présentent des jets, et qui interagissent avec le gaz. Dans le cas de NGC 1275, les jets auraient poussé le plasma émetteur ; dans le cas de M87, l'émission X serait thermique, produite par un gaz qui se refroidit émission synchrotron des particules relativistes du jet dans le champ magnétique.

L'étude de ce milieu lointain est difficile, et requiers un grand pouvoir séparateur, que nos instruments n'atteignent pas encore. De nombreux mécanismes entrent en jeu, et il faudra faire la part de chacun. Et en plus, la généralité n'est faite que de l'accumulation de cas particuliers…

Le rayonnement radio des amas se scinde en raie à 21 cm (transition hyperfine de l'hydrogène), et rayonnement synchrotron.

**Des curiosités**

Pour rendre l'étude plus difficile, on a trouvé un amas noir  C'est-à-dire invisible, si ce n'est une galaxie ordinaire. Mais l'amas se trahit par une luminosité X très importante de $8\ 10^{44}$ erg $s^{-1}$. Pour agrémenter la chose, la métallicité est 1,7 fois la métallicité solaire, ce qui n'existe nulle part ailleurs ! Il est situé à z = 1.

La température du gaz produisant le rayonnement X des amas est comprise entre 0,5 et 10 keV. Mais il existe un amas, à z = 0,3, dont la température atteint 17 keV. Les modèles CDM (Cold Dark Matter) ne peuvent expliquer un tel objet…

**Structure des amas**

Pour les amas les plus proches dont le décalage spectral z est inférieur à 0,5 il est possible de déterminer le type des galaxies constituantes. Mais au-delà, un objet de l'ordre de quelques kpc n'est plus séparable.

Pour les amas plus proches que z = 0,5 donc, on observe que les galaxies proches du centre sont plus souvent elliptiques, alors que les extérieures sont préférentiellement spirales. On explique ce fait par rapprochement avec les simulations de collisions entre galaxies. Lors d'une collision de deux spirales, les groupes d'étoiles s'interpénètrent sans dommages, alors que les gaz interstellaires subissent un choc, qui produit des effondrements gravitationnels et provoque une flambée de formation d'étoiles. Le résultat est un appauvrissement en gaz, et la constitution d'une galaxie plus massive.

Dans le centre d'un amas, la densité d'objets est beaucoup plus grande, ce qui entraîne une probabilité de collisions plus importante. N'ayant pratiquement plus de gaz, les galaxies centrales ne peuvent plus développer de bras spiraux, et deviennent elliptiques. Dans de nombreux cas, les amas montrent en leur centre une elliptique géante, de type cD : cluster dominant. Par leur gravité, et par le freinage, ces galaxies centrales ont tendance à canibaliser leur voisines les plus proches.

Un effet supplémentaire renforce le précédent : l'émission X du gaz intergalactique, plus intense vers le centre, chasse le gaz des galaxies proches. Par ce mécanisme, il est possible que les spirales proches du centre soient progressivement privées de leur gaz, et deviennent elliptiques.

Enfin, on remarque que les amas, rarement sphériques, orientent leur grand axe vers leur voisin le plus proche. Un tel alignement serait un souvenir de la formation de ces structures, et indiquerait que les amas se sont formés par fragmentation de structures plus grandes.

Mais d'autre part, les galaxies lointaines présentent des caractéristiques semblables aux galaxies proches, donc des états d'évolution semblables, alors que leur âge est très différent. De même, si on considère uniquement des galaxies de même z, donc du même âge, on s'aperçoit qu'elles présentent tous les stages d'évolution. Ceci favoriserait au contraire une formation par accrétion. Affaire à suivre…

**Superamas**

Une fois les amas connus, ainsi que leurs distances (leurs vitesses de récession), on s'est aperçu que certaines vitesses étaient privilégiées. Si on rassemble les amas ayant approximativement la même vitesse, on arrive à définir les superamas, dont les dimensions atteignent 200 Mpcs.

Ayant rassemblé les amas en superamas, on constate la présence de vides immenses. Les galaxies se rassemblent à la limite de ces vides : les amas forment des filaments, des sortes de murs, qui cloisonnent de vastes zones vides. L'aspect général est semblable à une mousse de savon.

**Stabilité des amas**

La masse visible de l'amas de Coma est seulement les 90 % de la masse dynamique, et celle de l'amas de Persée atteint les 95 %. Ce dernier est sous forme de chaîne atteignant 750 kiloparsecs.

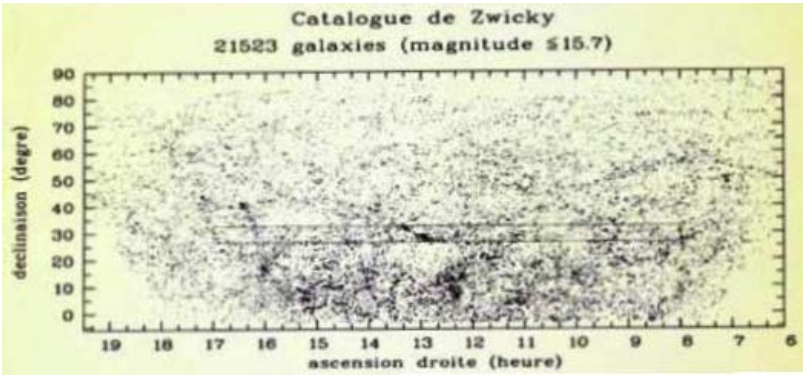
On observe dans l'amas d'Hercule Abell 2151 de nombreuses sous-structures. Enfin, Abell 2152 est probablement en cours de fusion avec le précédent.

**Equilibre hydrostatique**

Les images fines du satellite Rosat ont montré la complexité du milieu intra-amas. Si les amas étaient vraiment en équilibre (relaxés), ces structures auraient disparu, comme les différences de température disparaissent dans une pièce fermée et bien isolée. Par exemple, l'amas de Coma montre une émission X importante jusqu'à une distance d'un degré du centre.

**Distribution des amas**

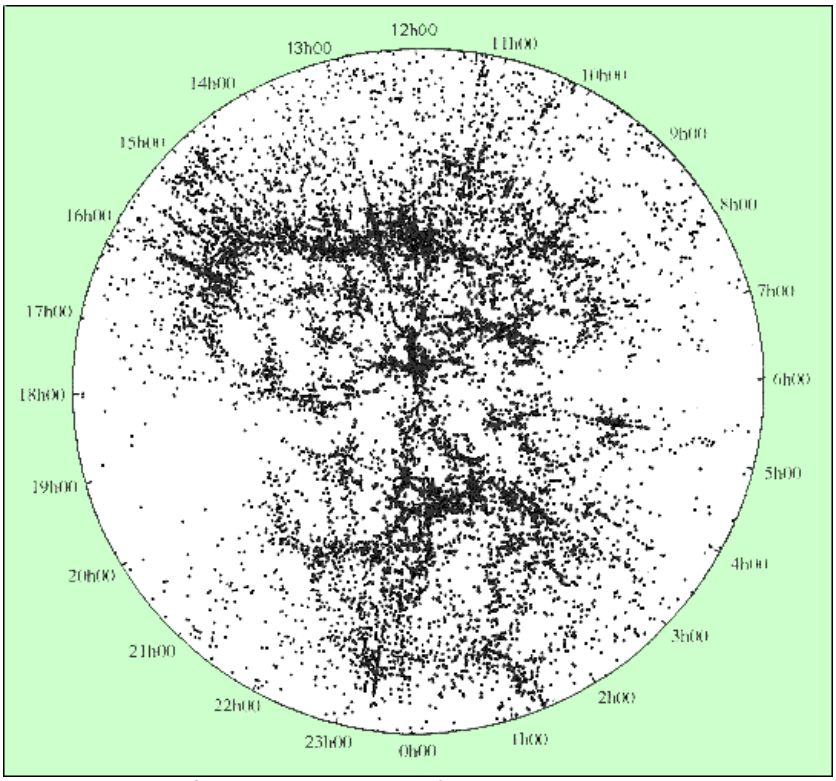
En 1965, Fritz Zwicky a établi un catalogue de galaxies, jusqu'à la magnitude 15,5. Sa traduction graphique montre la rép rtition des galaxies en fonction des deux coordonnées équatoriales :




répartition de Zwicky de 1965

Le schéma de Zwicky montre la répartitiondes galaxies dans le ciel, mais sans la profondeur. En chaque point, toutes les galaxies visibles, quelles que soient leurs distances, s'accumulent. Il donne donc une première idée, mais faussée par la perspective.

Depuis 1986, la structure de l'Univers à grande échelle montre des filaments (constitués d'amas de galaxies) et de vides. Cette configuration a été déterminée sur une étude jusqu'à z = 0,03, c'est-à-dire jusqu'à $d = c\ z / H_0 = 300.000 \times 0,03 / 72 = 123$ Mpc (400 millions d'années-lumière), donc beaucoup plus que la taille des amas et superamas. Cette structure fait penser à une éponge.



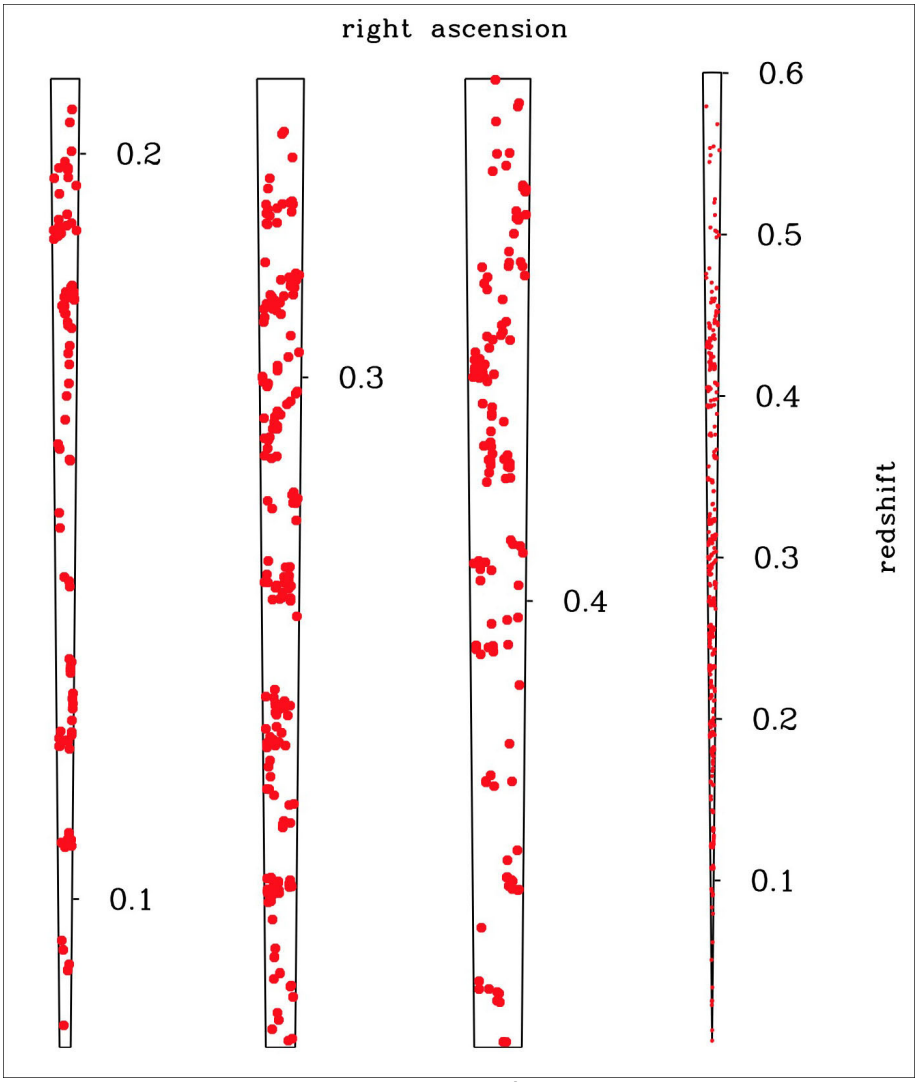

d'après le sondage du Center for Astrophysics, Harvard

Le premier graphique de ce type (graphique en cône) a été produit par de Lapparent, Geller & Huchra (1986) ApJL 302, L1.

On ne peut savoir actuellement s'il existe des échelles supérieures, des amas de superamas… Si c'était le cas, l'Univers posséderait une nature fractale, étant semblable à lui-même aux différentes échelles.

Des études indiquent une périodicité de l'ordre de 100 $h^{-1}$ mégaparsecs (de l'ordre de 140 Mpc).

En tous cas, il n'y a pas de faits observationels montrant du gaz autour des superamas, ni de filaments entre les amas. Ces observations seront difficiles, même avec les instruments de la prochaine génération.




ESO-Sculptor Faint Galaxy Survey, Valérie de Lapparent et col., 2013

Ce sondage concerne une toute petite partie du ciel, mais il atteint z = 0,6. Il couvre une zone de 1,53° en ascension droite, × 0,24° en déclinaison, ce qui fait une surface de 0,37 $deg^2$.

De nombreux amas présentent une structure, en X comme en optique.

Les simulations montrent que l'on peut avoir confiance dans la masse calculée à partir des observations X à 15 % près, dans les amas assez réguliers.

La distribution des galaxies à grande échelle (100 Mpc) est isotrope à un facteur 2 près. Il en est de même des quasars et des radiosources lointaines. La loi de Hubble est indépendante de la direction d'observation.

De même, le fond de rayonnement cosmologique est très isotrope, à $10^{-5}$ près. Le fond diffus X présente aussi cette isotropie (il provient sans doute de l'intégration des rayonnements des quasars lointains).

L'acceptation de cette isotropie constitue le Principe Cosmologique, base du Modèle Standard d'Univers.

Mais à plus petite échelle, l'isotropie n'est plus de mise. Les galaxies ont tendance à se regrouper.

Zwicky a étudié la répartition sur le ciel de ces groupes de galaxies, et a montré que ce ne sont pas des fluctuations aléatoires d'une répartition par ailleurs uniforme. Plus précisément, il a montré qu'il existe de réelles condensations de galaxies dans les amas de Comas (36.000), de Pégase (9.000) et de Corona Borealis (76.000).

L'amas de Coma compte plus de 800 galaxies

Dans le Bouvier, un trou de 1 million de pc cubes est vide !

**Evolution**

Etudier l'évolution des amas de galaxies est un problème difficile, mais quelques données permettent toutefois de l'aborder.

Tout d'abord, on constate que les populations de galaxies du champ, et des amas riches; ne sont pas les mêmes ! Dans le champ, on observe 70 % de spirales, alors que dans les amas riches il y a 90 % d'elliptiques (ou lenticulaires), pratiquement dépourvues de gaz.

Cette différence s'explique-t-elle par une formation différente selon l'environnement, ou par une évolution liée à lui ? Le débat n'est pas encore vraiment tranché. Dans un amas, les collisions entre galaxies sont fréquentes, et transforment des spirales riches en gaz en elliptiques pauvres.

Ceci pourrait expliquer la différence.

D'autre part, les amas contiennent beaucoup de gaz chaud, visible en rayons X, et les galaxies se déplacent sous l'effet de la gravité, dans ce milieu. Une spirale reçoit donc ce gaz comme un vent relatif (celui qu'on perçoit à bicyclette dans un air calme), et le gaz de la spirale est entraîné par ce vent relatif. Si la spirale sort d'une région dense de gaz intergalactique, elle y aura laissé une partie de son propre gaz. Ceci constitue un effet d'évolution important de la galaxie, en la privant de formation d'étoiles.

Les galaxies évoluent donc bien plus vite dans les amas que dans le champ.

Les amas observés à z = 0,25 (4 milliards d'années en arrière), montre un excès de galaxies bleues, donc contenant des étoiles jeunes, et par conséquent à fort taux de formation. Mais on y voit aussi davantage de spirales qu'aujourd'hui (10 % seulement à l'heure actuelle).

**Bibliographie sommaire**


| | | |
|---|---|---|
| Astronomie, introduction | Agnès Acker | Masson 1992 |
| Galaxies et cosmologie | Françoise Combes, Patrick Boissé, Alain Mazure, Alain Blanchard | CNRS Editions, 1991 |
| Les galaxies et la structure de l'Univers | Dominique Proust, Christian Vanderriest | Seuil, 1997 |
| Astronomie et Astrophysique | Marc Séguin, Benoît Villeneuve | Masson, 1995 |
| Le point sur les amas de galaxies | Marguerite Pierre | Annales de Physique, EDP, 2000 |


---=OO=---




L'apparition de nouveaux instruments d'observation dans divers domaines du spectre électromagnétique a entraîné des découvertes. A chaque domaine spectral correspond un type de galaxies étranges. Ces galaxies ont été désignées d'après le nom de leur découvreur : Seyfert, Markarian… ou d'après leurs propriétés : galaxies à grumeaux, à flambée d'étoiles, à noyau actif (AGN)…

La diversité est-elle due aux méthodes d'analyse ? Est-elle réelle ? Cache-t-elle une unité ?

La distinction entre ces types étant due au domaine d'observation, et ces domaines étant purement instrumentaux (le domaine électromagnétique est unique), la recherche d'une unification est légitime.

Le paradigme des galaxies à noyau actif tente d'expliquer de manière synthétique ces différents aspects. Les galaxies à noyau actif seront, au bout de l'analyse :

**celles dont le spectre est très particulier**,
inexplicable par une superposition de spectres stellaires et nébulaires.

Elles contiennent donc quelque chose qui émet de la lumière (pas forcément visible) selon des principes physiques différents à découvrir.

On regroupe tous les types de galaxies à noyau actif sous le sigle *AGN, Active Galactic Nuclei = Noyaux Actifs de Galaxies*.

**Domaine visible : galaxies à grumeaux et galaxies à flambée d'étoiles**

Dans toute galaxie contenant encore du gaz, donc assez jeune, il y a des régions HII où des étoiles se forment actuellement. Mais certaines en contiennent beaucoup, et présentent des régions HII géantes, avec formation en leur sein de nombreuses étoiles nouvelles. Vues de loin, ces régions HII brillantes se présentent comme de petites taches qui parsèment la structure de la galaxie. Pour cette raison, on les appelle *galaxies à grumeaux*.

Ce ne sont pas les seules possibles. D'autres présentent cette formation d'étoiles uniquement dans leur noyau. Les étoiles se forment dans de grand nuages (galaxies jeunes peut-être). Dès qu'une étoile y est formée, elle passe par sa phase T Tauri au cours de laquelle elle souffle un très violent vent stellaire, qui va pousser le reste du nuage et le disperser dans l'espace. Il ne peut plus se former d'autres étoiles, puisque le nuage est détruit. Bien sûr, il ira se reformer un peu plus loin, mais ceci prend du temps, et limite la fréquence de formation. Dans les *galaxies à flambée d'étoiles* (*starburst galaxies*), le taux de formation des étoiles est plus rapide, suffisament pour que de nombreux astres soient condensés avant que les vents stellaires aient dispersé le reste du nuage.

Dans les galaxies à flambée d'étoiles, les raies d''émission sont produites par la photoionisation des étoiles OB (massives). Leur luminosité peut atteindre $10^{44}$ ergs/s. De plus, la formation d'étoiles y étant très rapide, il reste beaucoup de poussières, non encore détruites ou condensées en planètes. Cette poussière est chauffée par le rayonnement des étoiles, et brille en infrarouge lointain. Ce sont les galaxies *FIR* (pour ***F**ar **I**nfra **R**ed*).

La grande efficacité de formation stellaire doit s'expliquer. Des modèles théoriques faisant intervenir des interactions entre deux galaxies ont été développés depuis dix à quinze ans. Ils montrent que lors du choc de deux galaxies, les systèmes stellaires passent à côté l'un de l'autre, sans grandes perturbations (ceci est dû à la très grande distance qui sépare les étoiles), alors que les gaz des deux galaxies se heurtent, créant des ondes de choc tout à fait capables de provoquer l'effondrement des nuages et la constitution quasi simultanée d'étoiles. Les observations corroborent ce principe théorique.

**Domaine visible, IR et X : galaxies de Seyfert**

Elles ont été découvertes en 1943 par l'allemand Karl Seyfert. Il a observé des galaxies **spirales** particulières, dont le noyau est beaucoup plus brillant et compact que le noyau d'une galaxie normale, semblable à une étoile (ponctuel) sur des photos à courte pose (si on allonge la pose, les régions autour du noyau apparaissent, et montrent alors une tache).

Il a aussi observé des **raies d'émission très intenses et très larges** dans le noyau, provenant d'un milieu gazeux ionisé. La largeur des raies est beaucoup plus grande pour l'hydrogène que pour les autres éléments. Elle s'explique par une grande dispersion des vitesses pour les différentes régions émissives. Ces raies sont probablement produites par du gaz tournant à grande vitesse très près du noyau, ou pour certaines projeté à grande vitesse. Ce sont les raies **permises** qui sont les plus larges.

Le continu du spectre montre une composante non thermique, plus intense dans l'ultraviolet.

On a très rapidement distingué deux sous-types de galaxies de Seyfert, d'après leurs spectres :

- celles de type 1, dont **les raies permises sont très larges** (hydrogène par exemple), et les raies interdites de largeur modérée (en particulier l'oxygène ionisé O III). Cette grande largeur des raies permises correspond à des vitesses allant jusqu'à 10.000 km/s.
- celles de type 2 montrent toutes leurs raies assez étroites. Les vitesses correspondantes ne dépassent pas 1.000 km/s. Elles se distinguent donc principalement des galaxies "normales" par les propriétés de leur noyau.

Les raies larges sont permises, les raies étroites interdites. La distinction entre permises et interdites tient dans les conditions physiques du milieu émetteur : pour que des raies interdites puissent se produire, il faut que la densité soit très faible. Elles sont donc émises par des régions différentes : on nomme *BLR* (*Broad Line Region*) la zone où se produisent les raies permises, et *NLR* (*Narrow Line Region*) celles où apparaissent les raies interdites.

La NLR est de faible densité, mais pourtant on n'y observe pas le doublet [OIII] λ4959, 5007 (longueurs d'onde des deux raies du doublet en nanomètres) qui se produit lorsque la densité est inférieure à $10^{-8}$ $cm^{-3}$. C'est donc que la densité est supérieure à cette valeur. Mais par ailleurs, on observe la raie semi-interdite CIII] 1909, qui ne peut se produire que si la densité est inférieure à $10^{-10}$ $cm^{-3}$. Par conséquent, la densité est comprise entre ces deux valeurs : $10^{-8}$ $cm^{-3} < n_e < 10^{-10}$ $cm^{-3}$ (Il s'agit de densité électronique).

Les raies permises sont probablement émises par du gaz dense près du noyau, et les raies interdites par du gaz moins dense plus lointain. On pense que dans les galaxies de Seyfert 2 le gaz est absent ou obscurci.

Entre les types 1 et 2, on trouve des intermédiaires, dont les raies montrent deux composantes : un pic central étroit, et des ailes plus ou moins larges. Ces galaxies sont numérotées par un nombre décimal selon la largeur des ailes, tel que 1,4.

Leur luminosité est comprise entre $10^{36}$ et $10^{38}$ W. C'est l'ordre de grandeur de la galaxie entière. Des variations de brillance sont communes. L'énergie que dégagent leurs noyaux est du même ordre de grandeur que celle produite par tout le reste de la galaxie.

Pratiquement toutes les galaxies de Seyfert connues sont des spirales, à l'exception de quelques unes du type II.

Les galaxies de Seyfert sont très nombreuses (celles qui possèdent un noyau de Seyfert). On en recense 5 % de la population générale. En dehors du spectre visible, les galaxies de Seyfert montrent aussi une activité :

- infrarouge pour les deux types ; ceci traduit probablement une grande abondance d'étoiles jeunes entourées de poussières dans leur noyau ;
- émission X intense pour les Seyfert 1

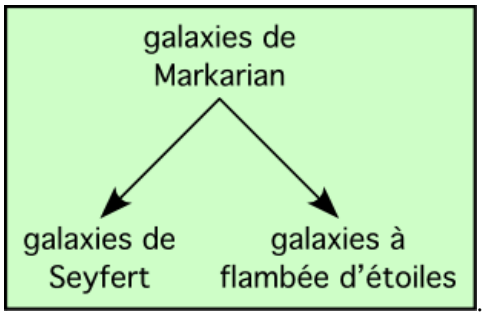
Les galaxies de Seyfert sont d'intenses sources infrarouges.

Les vraies galaxies de Seyfert sont de mauvais émetteurs radio. Mais il existe des radiogalaxies qui présentent un spectre optique très semblable à ceux des galaxies de Seyfert. En général, les émissions radio intenses sont liées au type 2.

**Domaine UV : galaxies de Markarian**

Découvertes par Benyamin Markarian à l'observatoire de Byurakan en Arménie, dans les années 70, ce sont simplement des galaxies qui présentent de très intenses raies d'émission en ultraviolet. Cette classe n'est pas homogène, car les raies d'émission en UV peuvent avoir plusieurs causes. Elles représentent une façon de filtrer observationnellement les galaxies.

Sur le plan physique, les galaxies de Markarian sont soit des galaxies de Seyfert, soit des galaxies à flambée d'étoiles



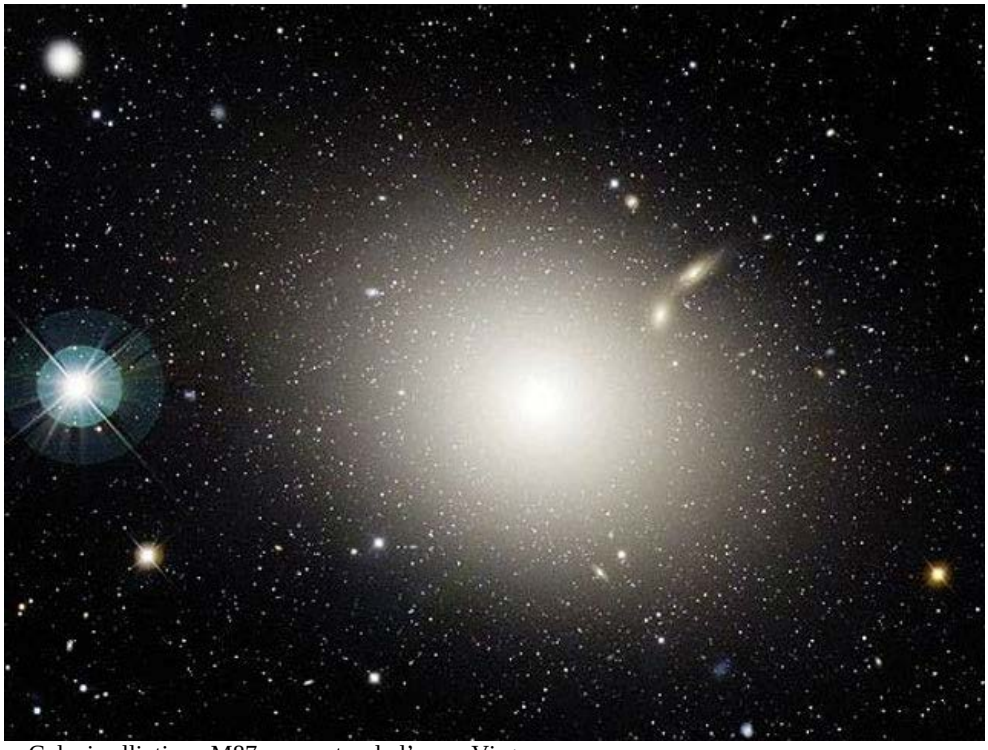

Le classement des galaxies actives a été fait de manière non rationnelle, principalement parce que certaines ont été découvertes récemment, et n'ont pas été étudiées en détails.

**Domaine radio : radiogalaxies**

La première radiogalaxie découverte est Cygnus A (3C405). C'est aussi la plus puissante. C'est une galaxie cD de décalage spectral z = 0,057. Ses raies d'émission sont très semblables à celles des galaxies de Seyfert.

Les radiogalaxies, comme leur nom l'indique, émettent une très grande puissance dans le domaine radio. Elles ne présentent pas, par contre, de noyau visible bien différencié : ce sont, dans le domaine visible, des galaxies ordinaires. Les radiogalaxies sont des galaxies émettant une forte puissance dans le domaine radio, jusqu'à 1.000 fois plus que dans le domaine visible.

Nous allons voir maintenant les émissions radio. Avant cela, voici une photo de M87 qui va servir d'exemple :

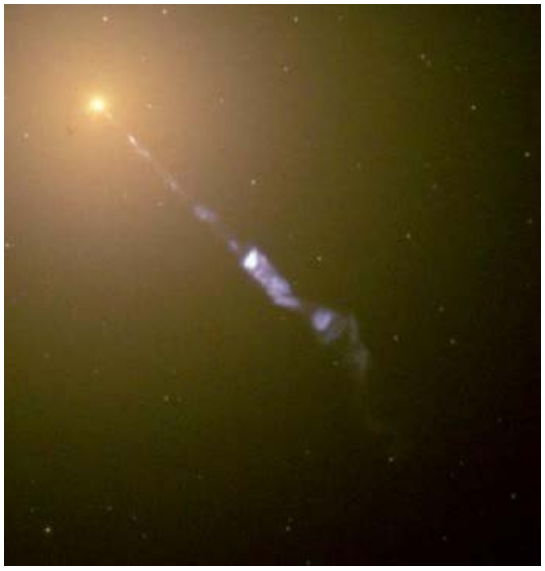


Galaxie elliptique M87, au centre de l'amas Virgo photo Canada-France-Hawaii Telescope, J.-C. Cuillandre (CFHT), Coelum

Cette magnifique galaxie elliptique montre **un excès d'amas globulaires**. Les amas globulaires sont visibles sur la photo, ce sont les minuscules taches, comme de gros points, qui entourent l'ellipsoïde d'étoiles. Cet excès trouve une explication dans l'évolution des galaxies.

Lorsque la définition des images radio s'est améliorée, on a distingué que l'émission radio se divise en trois composantes :

- deux lobes, qui sont localisés de part et d'autre de la galaxie visible ; ils se trouvent à grande distance de la galaxie, atteignant plusieurs mégaparsecs (1.000 fois la taille de la galaxie) ;
- le noyau radio, qui coïncide avec la galaxie visible ;
- entre la galaxie et les lobes, on distingue deux jets très fins de matière émissive, qui les relient.



M 87 galaxie elliptique géante photo NASA

Le lobe de M 87 (amas de la Vierge) est relativement proche de la galaxie, il ne s'en éloigne que de quelques kiloparsecs.

Ceci donne à penser que les deux lobes sont constitués de matière qui a été éjectée par la galaxie, il y a assez longtemps pour qu'ils aient pu s'en éloigner autant. Plus précisément, les lobes doivent constituer un jet de matière qui s'échappe de la galaxie à grande vitesse (il faudra savoir pourquoi…), et qui vient frapper le milieu intergalactique. Si on souffle de la fumée de cigarette en un jet étroit, ce jet se maintient sur quelques centimètres, puis s'étale en un petit nuage au contact de l'air immobile. Il doit se passer la même chose pour les radiogalaxies. Nous l'expliquerons plus loin.

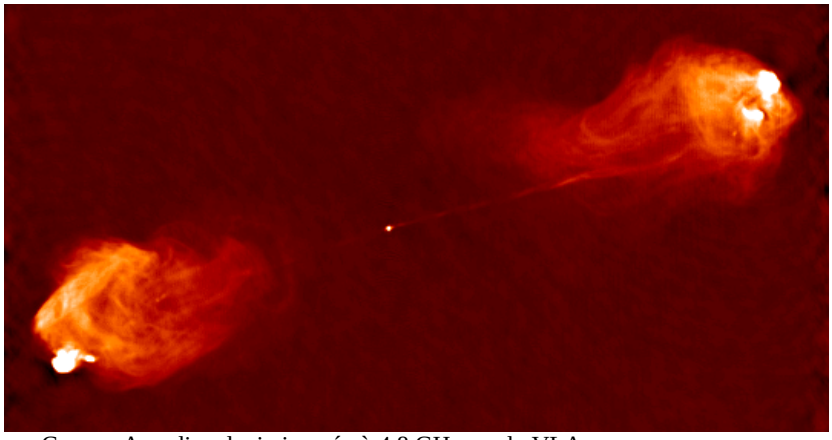
L'émission radio est non thermique, de type synchrotron, produite donc par des particules chargées (électrons spiralant dans un champ magnétique). Leur luminosité radio est de l'ordre de $10^{33}$ à $10^{38}$ W, donc elle peut égaler la luminosité totale d'une galaxie normale. L'explication n'est pas aisée, car elle doit indiquer d'où viennent les électrons et le champ magnétique, et quelle est la source d'énergie des électrons.

La structure des sources radio a été étudiée dès que les interféromètres ont atteint le même pouvoir séparateur qu'en optique. L'élément essentiel dans une radiogalaxie est la structure bilobée : deux régions émissives très grandes, situées de part et d'autre de la galaxie optique. Ces lobes sont parfois situés jusqu'à 6 Mpc de la galaxie (presque 10 fois la distance de la Voie Lactée à Andromède). A l'opposé, la radiogalaxie ayant

les lobes les plus proches est M87 (elliptique géante, située dans l'amas de la Vierge, l'une des galaxies les plus massives 4.000 milliards de masses solaires, c'est la radio-source Virgo A) : ils ne sont éloignés que de quelques kpc.

La double structure des radiogalaxies est produite par de la matière éjectée du noyau. Mais les électrons dans les lobes ne peuvent provenir du centre, car ils auraient perdu leur énergie depuis longtemps… Donc, les électrons doivent être continuellement accélérés à l'intérieur des régions émissives. D'ailleurs, à l'intérieur des lobes on trouve des régions quasiment ponctuelles. Elles sont le plus souvent symétriques par rapport au noyau, et semblent être des éjections du noyau.

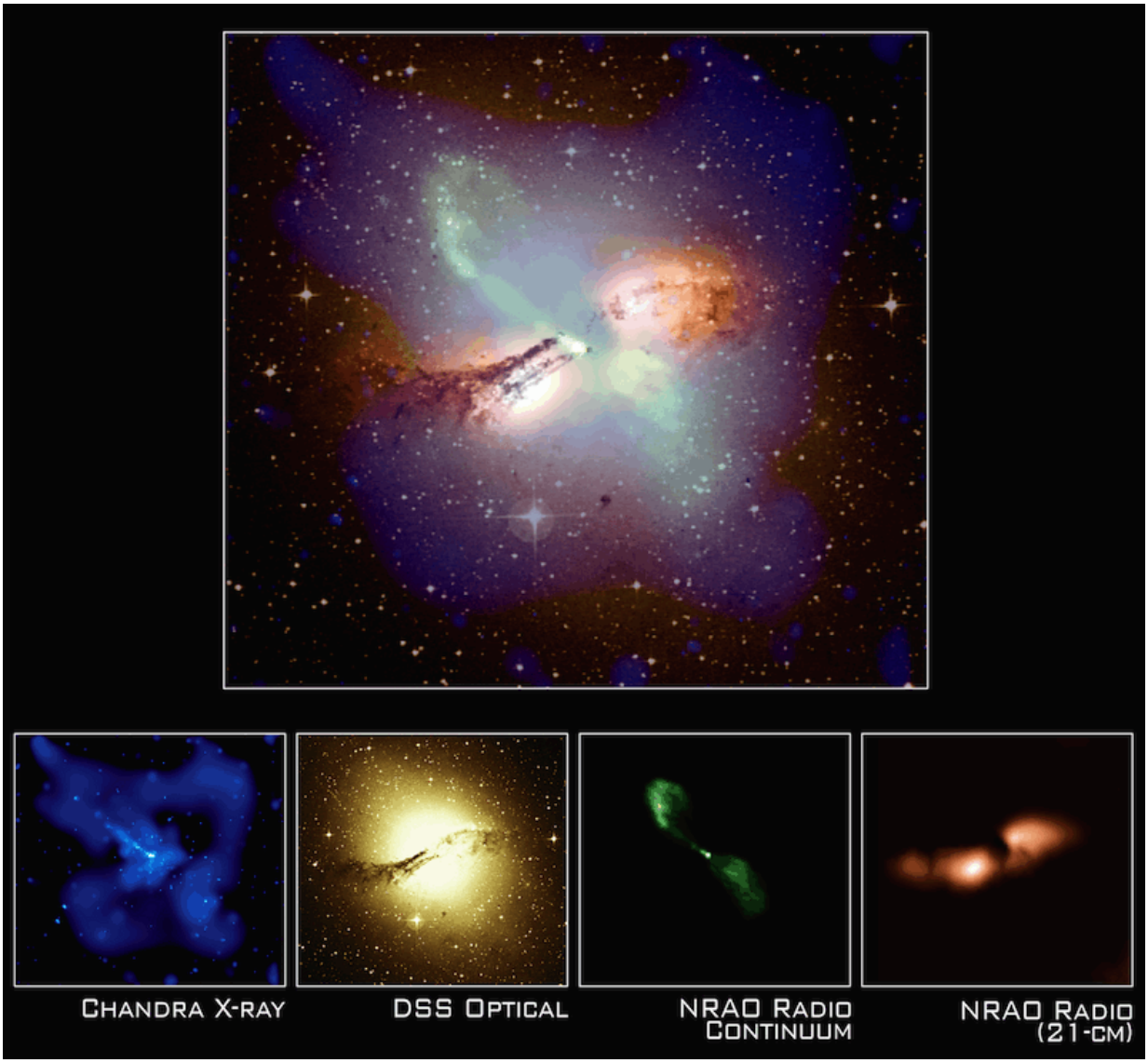
Cygnus A est également nommée 3C 405. C'est une des plus brillantes radiogalaxies, si brillante qu'elle a été découverte par Grote Reber en 1939, à l'aide du premier radiotélescope qu'il avait construit dans son jardin. La galaxie est le petit point central de la photo. L'image montre une vaste zone autour d'elle, qui représente en radio les deux jets émis par la galaxie, et qui se terminent en vastes lobes. Les partie blanches dans ces lobes sont les points chauds, endroits de plus forte émission. L'émission y est si intense parce qu'elle est produite par l'onde de choc des jets sur le milieu interstellaire.



Cygnus A, radiogalaxie imagée à 4.8 GHz par le VLA VLA map courtesy of C. Carilli

Des *radiogalaxies à queue* (comme de vulgaires pianos…) existent aussi. Leur émission radio provient essentiellement d'un des côtés de la galaxie, formant une queue incurvée dont la longueur atteint parfois plusieurs dizaines de fois la taille de la galaxie. Les plus beaux exemples sont NGC 1265 dans l'amas de Persée et 3C129 en orbite autour d'un compagnon. La queue serait la trace laissée par la galaxie dans l'espace.

Un autre trait important des radiogalaxies est la présence de jets, lignes étroites d'émission radio issues généralement du noyau et s'étendant loin de la galaxie. Le jet le plus connu est celui de M87, qui émet aussi bien en optique que dans les rayons X. Le jet optique est entouré par une radio source. Une radio source semblable est observée de l'autre côté de la galaxie, où aucun jet optique n'est apparent. La radiogalaxie la plus proche est Centaurus A, qui présente elle aussi un jet.




Les observations par VLBI (Very Large Base Interferometry) de ces jets ont parfois montré des **vitesses superluminiques** (voir plus loin).

> Deux classes **naturelles** de galaxies actives sont les **galaxies de Seyfert**, et les **radiogalaxies**.
> Les Seyfert sont spirales, les radiogalaxies elliptiques.
> Certains astronomes pensent que les galaxies de Seyfert sont une phase active des galaxies spirales, et les radiogalaxies une phase active des galaxies elliptiques.

**Les quasars**

On a observé des radio-sources, et souhaité déterminer à quel objet visible elles étaient associées. Mais le faible pouvoir séparateur des instruments radio donnait une position trop imprécise pour qu'un seul objet visible soit dans la direction. L'association n'était donc pas possible en général. 3C48 (source n° 48 du 3ème catalogue radio de Cambridge) avait déjà été associée à un objet optique, d'aspect stellaire, dont un spectre avait été pris, et montrait des caractères très curieux.

Les quasars ont été découverts en 1962 par Hazard. En effet, l'astronome Cyril Hazard a réussi à déterminer précisément la position d'une radio-source, 3C273, grâce au radiotélescope de Parkes de 64 mètres de diamètre. Ce diamètre est insuffisant pour obtenir une bonne précision, et Hazard a profité d'une série d'occultations du quasar par la lune, qui se produisent tous les 200 ans. La position de la lune étant connue avec une excellente précision, l'instant de disparition du quasar derrière la lune donne donc la position précise du quasar, permettant de l'associer à un objet optique particulier.

Ce résultat a été obtenu à la suite d'une recherche systématique, non par hasard !. Dès que l'objet visible associé a été connu, on en a pris un spectre, qui est apparu extraordinaire : aucune des raies d'absorption qui s'y trouvaient ne correspondait à un élément chimique connu ! Il existait donc une nouvelle classe d'objets célestes. On a appellé ces objets *Quasi Stellar Radio Source*, en abrégé *Quasar*.

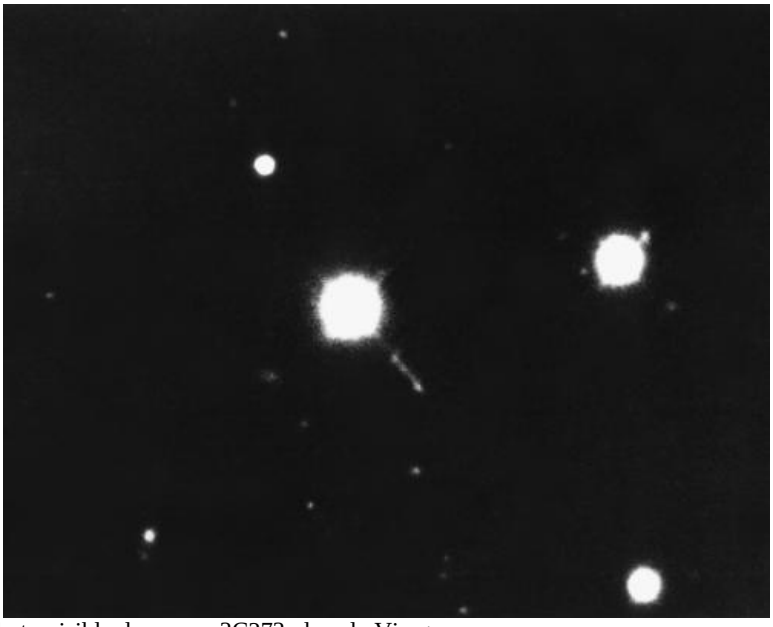


Photo visible du quasar 3C273, dans la Vierge KPNO 4-meter Mayall telescope, NOAO:AURA:NSF

Les spectres de ces objets :

- présentent des raies en **émission** (alors qu'une étoile normale montre essentiellement des raies en absorption),
- et ces raies ne correspondent à rien !

Les raies ne correspondaient à aucun élément connu sur Terre. Les quasars étaient-ils formés d'éléments inconnus ? Difficile à croire, à première vue, d'ailleurs le tableau périodique des éléments de Mendéléev est plein. L'explication a été fournie par Marteen Schmidt en 1963, qui a montré que les raies observées correspondaient à celles de l'hydrogène, à condition de décaler l'ensemble du spectre. Toutes les raies avaient glissé vers la partie rouge du spectre, en préservant leur intervalle (c'est ce qui a permis de les reconnaître). Pour le premier quasar étudié 3C273, il fallait admettre un décalage de 0,158 vers le rouge. On a appelé ce phénomène le *décalage spectral*, et on le note z.

Le décalage spectral est par définition :

$$z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0$$

$$z = \lambda / \lambda_0 - \lambda_0 / \lambda_0 = \lambda / \lambda_0 - 1$$

d'où : $\lambda / \lambda_0 = 1 + z$

Le débat a fait rage pour savoir quelle était la cause de ce décalage. En effet, il n'existe pas une explication, mais plusieurs, et leurs implications sont extrêmement différentes. Ces explications sont les suivantes :

- décalage par effet Doppler ;
- décalage gravitationnel.

Dans le premier cas, les quasars sont à des distances cosmologiques (énormes), et produisent donc une énergie inimaginable ; dans le second ils sont proches mais pour expliquer le décalage, il faut invoquer une gravité tout aussi incroyable.

Un des arguments en faveur de la première hypothèse est :

> Lorsque deux quasars sont en perspective, celui qui a le décalage spectral le plus faible produit des raies d'absorption dans le spectre du second, jamais l'inverse. Si le décalage était d'origine gravitationnelle, il y en aurait autant de forte gravité devant que derrière…

Si on interprète ce décalage par un effet Doppler (ce qui n'est nullement évident *a priori*), on en déduit que le quasar présente une grande vitesse par rapport à nous, et donc se trouve très loin (effet de l'expansion de l'Univers).

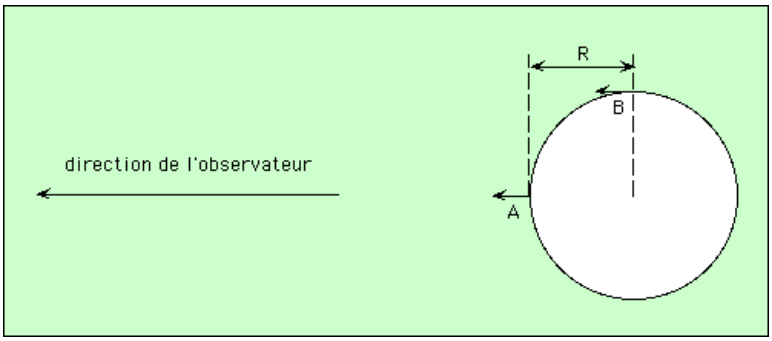
Les quasars apparaissent ponctuels dans le domaine optique, mais des observations plus fines ont permi de les localiser souvent à l'intérieur de galaxies faibles plus ou moins normales. Ainsi, ce sont simplement les noyaux très actifs de ces galaxies. Et ils sont souvent associés à d'autres galaxies et amas de galaxies, dont on peut évaluer la distance.

Aujourd'hui, le problème est donc résolu, les quasars sont bien des objets cosmologiques. Il faudra donc expliquer la quantité énorme d'énergie qu'ils produisent : la valeur typique de cette énergie se situe dans l'intervalle $10^{38}$ à $10^{41}$ W.

**Dimension**

Une autre propriété extrêmement importante des quasars est leur **variabilité**. Leur luminosité peut varier très rapidement, en quelques jours ou moins. Par conséquent, la zone émissive ne peut pas excéder quelques jours lumière, de l'ordre de 100 UA (c'est deux fois la distance de Neptune au Soleil, donc c'est de l'ordre de la taille du système solaire). Remarquez que cette méthode de détermination de la taille est **indépendante de la distance** à laquelle on se trouve du quasar : qu'il soit proche ou lointain, le décalage temporel reste le même.

Imaginons un objet sphérique, dont la luminosité varie brusquement à l'instant t = 0. Tous les rayons émis par cet objet changent d'intensité au même moment (t = 0), mais la distance qu'ils ont à parcourir pour atteindre l'observateur (nous) est différente selon leur position par rapport à la Terre :




Si le centre du quasar est à la distance d de la Terre, le point A en est éloigné de d - R, le point B étant à la distance d. Donc, la lumière émise en A nous parviendra au bout du temps t tel que ct = d - R, et la lumière émise en B parviendra au bout du temps t + $\tau$ tel que c (t + $\tau$) = d.

On en déduit que ct + c $\tau$ = d  ct = d - c $\tau$

On a maintenant deux expressions de ct. En les égalant, il vient :

d - R = d - c $\tau$, d'où :

$$R = c \tau$$

On peut mesurer le temps $\tau$, et on a donc une mesure de R.

Explication de la taille des quasars

Sur cette animation, nous avons à droite un quasar représenté en rouge. La lumière qu'il émet est constante, mais si vous cliquez sur le bouton "éclair", le quasar émettra un éclair jaune. A cet instant, de la lumière partira de tous les points de sa surface visible vers la Terre, et celle-ci voyagera à vitesse constante vers nous (la vitesse de la lumière). Nous ne considérons ici que les seuls rayons qui viennent en direction de la Terre. Ils sont représentés par le demi-cercle jaune qui se propage dans notre direction. Ils vont tous dans la même direction, mais partent de points diversement éloignés de nous. Lorsque cette lumière atteint un écran, c'est le rayon le plus proche de la Terre qui arrive le premier.

A gauche est représenté l'écran, sur lequel on voit l'image du quasar projetée par un télescope. Au centre, le même écran est représenté de profil, face au quasar.

L'éclair ne nous parvient pas d'un seul coup : le centre du quasar est plus proche de nous que ses bords, donc, la lumière émise au centre a moins de chemin à parcourir, et nous parviendra en premier.

L'image du quasar est en permanence rouge, mais lorsque l'éclair nous parvient, de la lumière jaune s'y mêle. Cette lumière jaune se montre tout d'abord au centre, puis elle se propage vers l'extérieur de l'image. On mesure le temps pendant lequel l'éclair est visible.

Si nous observons qu'un objet varie de luminosité en un mois, cela signifie qu'au bout d'un mois, tous les rayons qu'il a émis au moment du changement nous sont parvenus, quelle que soit leur distance. Donc, son rayon est inférieur à la distance que la lumière peut parcourir en un mois, c'est-à-dire à un mois-lumière.

Si un objet varie en quelques heures, c'est que son rayon est inférieur à quelques heures-lumière, ce qui correspond à la taille du système solaire. C'est justement le cas de certains quasars, dont le rayonnement radio varie à cette échelle de temps.

Seule une petite partie des quasars rayonne en radio, bien que ce soit dans ce domaine de longueurs d'ondes qu'ils aient été découverts.

La plupart des quasars radio sont des sources ponctuelles, bien que quelques uns aient une structure bilobée semblable à celle des radiogalaxies. Les images X des quasars montrent aussi un aspect ponctuel. Par conséquent, l'émission de l'énergie est vraiment concentrée.

Dans le visible, les spectres des quasars sont dominés par des raies spectrales dont les longueurs d'onde au repos se situent dans l'ultraviolet (le

décalage les a faites glisser de l'UV au visible). Le record actuel de décalage est de 6,3… La lumière a été émise lorsque l'Univers n'avait que le dizième de son âge actuel.

La grande distance à laquelle on place les quasars implique une luminosité extrêmement importante. La valeur typique se situe dans l'intervalle $10^{38}$ à $10^{41}$ W.

Les quasars présentent souvent des raies d'émission et d'absorption dans leurs spectres. Les raies d'émission sont très larges, et sont probablement produites par le quasar lui-même. Les raies d'absorption sont des raies étroites serrées les unes contre les autres, produites par des nuages d'hydrogène situés dans le trajet des rayons jusqu'à nous. On appelle ces complexes de raies la *forêt Lyman alpha*. Les nuages d'hydrogène qui les produisent ont une densité de surface comprise entre $10^{12}$ et $10^{17}$ atomes $cm^{-2}$. Mais il existe des nuages plus denses, qui constituent ce que l'on appelle les *systèmes Lyman limit* (*LLSs*), et dont la densité est supérieure à 1,6 $10^{17}$ atomes $cm^{-2}$ ; pour les plus proches d'entre eux, à z < 1, on pense que ce sont les halos de galaxies. Enfin, il y a encore mieux, ce sont les *Systèmes Lorentziens* (*DLAs*), qui dépassent 2 $10^{20}$ atomes $cm^{-2}$. Ils ont été interprétés comme les précurseurs des galaxies spirales, mais on imagine aujourd'hui que ce soient des galaxies naines, qui vont participer à l'effondrement hiérarchique des structures. Ces systèmes de raies nous donnent des indications sur la formation des galaxies.

Une note discordante : Halton Arp a observé des systèmes de raies aberrants. Il en a déduit que le décalage n'était pas dû à l'expansion de l'Univers, mais à un processus inconnu. Il reste pour l'instant assez isolé dans cette position.

Le décalage par effet Doppler implique de grandes vitesses de ces objets par rapport à la Terre, et puisque ces vitesses sont proportionelles à la distance, celles-ci sont très grandes aussi.

En première approximation, v = c z (valable pour z < 0,1 car pour z > 1, v > c ! ). La mesure de z donne donc v.

Si vous voulez la formule relativiste, c'est :

$$z = \frac{1 + \frac{v}{c}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1$$

La relation $v = H_0\ d$ (loi de Hubble) permet alors de calculer la distance (toujours pour v petite devant c). Pour z < 0,1 donc, $v = c\ z = d / H_0$. D'où $d = c\ z / H_0$.

Pour 3C273 v = 300.000 × 0,158 = 47.400 km/s

Prenant $H_0$ = 70 km $s^{-1}$ $Mpc^{-1}$ on obtient $d = v / H_0$ = 47.400 / 70 = 677 Mpc

d = 677 × 3,26 = 2,2 milliards d'années-lumière.

Pour 3C48, le décalage spectral est z = 0,367, la distance atteint 5 milliards d'années-lumière.

Depuis, on a découvert des quasars bien plus lointains. Ce sont les objets les plus lumineux de l'Univers. Le quasar le plus lointain connu semble être SDSS J1148+5251, à z = 6,41 ou approximativement 13 milliards d'années-lumière.

En fait, le décalage ne s'explique pas par les deux possibilités envisagées au début. Il n'est ni gravitationnel, ni produit par effet Doppler. Les galaxies ne se fuient pas, elles sont immobiles (aux mouvement propres près), dans un espace en expansion. Entre le moment d'émission d'un rayonnement, et l'instant de sa réception, l'espace dans lequel se déplacent les ondes s'est dilaté, et donc la longueur d'onde a augmenté. C'est ce qu'ont parfaitement compris Georges Lemaitre et Alexandre Friedman.

**QSO**

Après avoir découvert les quasars par leur émission radio, on a observé leur contrepartie optique, et compris qu'elle est très brillante. On a donc cherché des objets visibles ayant les mêmes propriétés spectrales que les quasars. Les objets ainsi trouvé sont les *QSO* (*Quasi Stellar Objects*). La plupart ne présentent pas d'émission radio. Ils se caractérisent par :

li>un excès de bleu du spectre ;
- une image quasi-stellaire et une forte luminosité ;
- des raies en émission, larges et fortement décalées vers le rouge ;
- une certaine variabilité.

La distinction entre QSO et quasars est bien mince, elle est observationnelle, et la confusion entre les deux souvent faite.

Plus de 8.000 quasars (ou QSO) sont recensés, mais ils ne sont pas répartis uniformément en décalage spectral. Une quarantaine d'entre eux ont un décalage z > 4, et pour la plupart z < 3,5. Ceci signifie que les quasars ont eu leur heure de gloire à l'époque qui correspond à peu près à Z = 3.

**OVV et Lacertides**

*OVV* (*Optically Violently Variable Quasars*) et *BL Lac* (*Lacertides*) sont regroupés sous le terme de *Blazars* (le nom vient de **BL La**c, et de la

terminaison de qua**sar**).

Ils présentent un continuum non thermique allant du domaine radio au domaine optique-UV, et même jusqu'aux rayons X. Ils sont rapidement variables en optique, leur lumière est fortement polarisée et cette polarisation est variable, et leur spectre radio est plat. Les blazars sont parmi les objets les plus actifs de l'Univers.

Les BL Lac sont des noyaux actifs (NAG) sans raies d'émission, et leur décalage spectral ne dépasse pas 0,1. Par contre, les OVV présentent de fortes et larges raies d'émission.

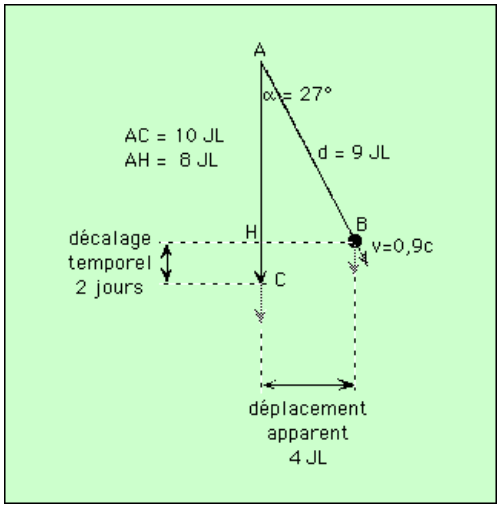
**LINERS**

Les *Liners* (***L**ow **I**nisation **N**uclear **E**mission **R**egion*) sont des galaxies dont le noyau présente une faibe luminosité, et des raies d'émission. On y trouve les raies [OI] et [OIII], qui ont des intensités comparables. Ce sont les NAG les moins puissants.

**Vitesses superluminiques**

Un argument contre l'interprétation cosmologique des quasars a été assez difficile à combattre. Il s'agit d'un effet de perspective, qu'on a observé au centre des quasars 3C273 et 3C120.

On observe des objets dont le déplacement *apparent* est plus rapide que la lumière, si on considère que la distance de ces objets est cosmologique. Mais même dans ce cas, la Relativité n'est pas en défaut, voici l'explication du phénomène : Considérons un objet qui se déplace de A vers B à une vitesse proche de celle de la lumière : 0,9 c. La Terre est supposée en bas du dessin. JL signifie jour-lumière, c'est la distance parcourue par la lumière en 1 jour (1/365$^{e}$ de l'année-lumière).




A l'instant 0 : au point A, l'objet émet un rayon lumineux en direction de la Terre (vers le bas). Ce rayon voyage à la vitesse c. Au même instant, l'objet quitte A en direction de B à la vitesse v = 0,9 c.

10 jours plus tard : l'objet arrive au point B, et le rayon émis en A arrive au point C. L'objet émet un second rayon lumineux en direction de la Terre. Les 2 rayons voyagent à la vitesse c. La figure est faite à l'échelle. On voit que le déplacement apparent de l'objet sur le ciel est plus grand que le décalage temporel. Ce qui semble indiquer une vitesse supérieure à celle de la lumière.

En 10 jours, l'objet a parcouru la distance AB = v t = 0,9 c × 10 = 9 JL. Il s'est rapproché de l'observateur de AH = AB cos α = 9 × 0,888 = 8 JL. Le rayon émis en A est parvenu en C, il s'est rapproché de l'observateur de AC = c t = 10 JL. A cet instant, deux rayons se rapprochent donc de la Terre, le premier étant plus proche de HC = AC - AH = 10 - 8 = 2 JL. Donc le second rayon a un retard de 2 jours sur le premier.

On observera par conséquent l'objet en A (ou H), puis deux jours plus tard on le verra en B. Or la distance entre H et B est HB = AB sin α = 9 × 0,454 = 4,08 JL. Il semblera donc qu'en deux jours l'objet ait parcouru 4 jours-lumière, donc soit animé d'une vitesse double de celle de la lumière !

Pourtant, si on considère les 2 rayons au temps t = 10 jours, le premier n'a que 2 jours d'avance sur le second. L'objet est parti depuis 10 jours et a eu le temps, à une vitesse inférieure à celle de la lumière, de se déplacer apparament de 4 jours-lumière sur la sphère céleste.

On arrive à ce paradoxe parce que, intuitivement, on raisonne comme si l'objet était toujours à la même distance de nous. Si sa vitesse était faible, ce serait une bonne approximation, mais quand on approche la vitesse de la lumière, l'intuition est prise en défaut.

**Durée de vie des quasars**

On a deux façons de l'estimer. La première se base sur la similitude entre les quasars et les galaxies radio. Les mêmes propriétés optiques indiquent des objets de même nature. Or les galaxies radio possèdent deux lobes très lumineux (en ondes radio), qui sont très éloignés du centre de la galaxie. Leur distance atteint des centaines de milliers d'AL. Pour que de la matière accélérée puisse franchir de telles distances, à une vitesse de quelques milliers de km/s au plus, il faut quelques dizaines de millions d'années. Donc ces galaxies radio ont au moins cet âge, et par conséquent les quasars aussi.

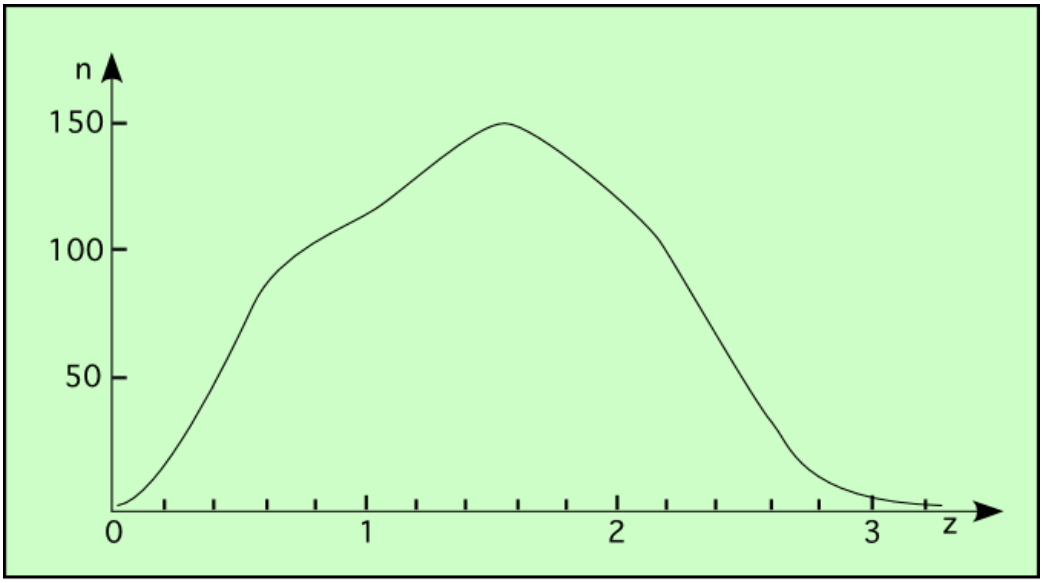
L'autre façon de déterminer l'âge d'un quasar consiste tout simplement à les compter. Imaginez une assemblée de personnes dans la nuit. Chacune tient en main un flash, capable d'émettre un éclair très bref. Vous faites une photo instantanée du paysage. Il y a très peu de chances

qu'un flash soit visible sur la photo ! Pour cela, il faut que par hasard il ait été allumé exactement au moment de la prise de vue.

Si maintenant vous remplacez les flashs par des lampes de poche, alors vous en verrez un grand nombre sur la photo, car la durée de vie de la pile est très longue. Lorsque vous prenez la photo, toutes les lampes sont encore allumées.

Par conséquent, si on observe beaucoup de quasar dans le ciel, c'est que leur durée de vie est grande, sinon ils se seraient éteints sans attendre notre observation. Cette méthode de comptage, bien évidemment affinée, indique une durée de vie des quasars de l'ordre de $10^8$ ans.

Ce qui signifie qu'ils doivent émettre un rayonnement d'intensité comparable depuis au moins quelques dizaines de millions d'années. On en déduit la puissance totale émise par un quasar.




Le schéma ci-dessus montre le nombre de quasars observés en fonction du décalage spectral. On y voit nettement un maximum, preuve que les quasars ont eu leur heure de gloire aux alentours de z = 1,6. Il y a donc eu une période où les quasars se formaient, puis leur évolution les a fait disparaître (en tant que quasars).

L'intérêt cosmologique des quasars sera abordé par ailleurs.

Les quasars sont presque tous très éloignés de nous, donc très vieux. On n'observe pas de quasars dans notre environnement proche, ce qui signifie qu'ils ont vécu il y a longtemps.

**Noyaux actifs de galaxies**

Les noyaux actifs de galaxies sont les parties centrales particulièrement brillantes de certaines galaxies. Ils sont caractérisés par :

- luminosité atteignant jusqu'à 10.000 fois celle d'une galaxie typique dans son ensemble ;
- volume faible, beaucoup plus petit qu'un parsec cube ;
- très large spectre : luminosité pratiquement constante sur une étendue de 13 ordres de grandeur en fréquence (i.e. de 1 à 10.000.000.000.000) ;
- raies d'émission dont le flux cumulé atteint jusqu'à plusieurs dizaines de % par rapport au flux continu ;
- vitesses déduites de la longueur d'onde des raies spectrales, par effet Doppler, atteignant 10.000 km/s ;
- vitesses **apparentes** des composantes radio pouvant atteindre 10 fois la vitesse de la lumière ;
- évolution à l'échelle cosmologique. Les plus brillants AGN sont 100 fois plus nombreux au décalage spectral z = 2,5 qu'à z = 0.

Les noyaux actifs de galaxies comprennent des objets ayant des propriétés semblables à celles des quasars, mais 100 fois moins énergétiques.

Ils émettent leur énergie en bande large, c'est-à-dire sur une grande partie du spectre électromagnétique, allant des grande ondes (fréquence 100 MHz), jusqu'aux rayons X. En X, la luminosité est aussi importante que dans le visible. C'est dans le domaine des rayons gamma que la luminosité baisse lentement.

Ces caractéristiques ont permi de classer les NAG en fonction de leur proprités spectrales, et aussi de la nature du rayonnement, thermique ou non.

**Emission X**

La première source X détectée est *Sco X-1* qui se trouve; comme son nom l'indique, dans le Scorpion. Mais depuis, l'observatoire spatial Einstein a montré que tous les NAG sont de puissants émeteurs X.

**Galaxies passives**

Une *galaxie passive* est naturellement une galaxie qui ne présente pas de noyau actif. Mais c'est difficile à définer ! En effet, il suffirait qu'une galaxie conteinnent en son centre une cinquantaine de systèmes binaires X de faible masse, pour produire une émission de $10^{40}$ ergs/s. Par conséquent, les galaxies qui montrent une émission centrale inférieure à cette valeur sont dénommées passives.

Nous verrons plus loin que ces galaxies contiennent très probablement un trou noir massif en leur centre, mais que ce trou noir n'accrète pas de matière, et ne produit donc pas d'énergie.

**Classification**

Les galaxies ayant un noyau actif représentent de 1 à 3 % de la population totale (ayant donc un noyau dont la lumière ne s'explique pas par celle des étoiles et des nébuleuses).

L'énergie émise va de $10^{41}$ à $10^{48}$ ergs/s, soit 7 ordres de grandeur. Le plus brillant est donc $10^7$ fois (10 millions de fois) plus intense que le plus faible.

| luminosité ergs/s | source thermique (raies d'émission) | source de jets non thermique) |
|---|---|---|
| $10^{48}$<br>$4 \times 10^{45}$ | QSO (> 5.000) | quasars<br>sources radio FRII<br>lacertides |
| $10^{45}$<br>$10^{41}$ | galaxies de Seyfert (>1.000)<br>type 1<br>type 2<br>LINERS | radiogalaxies FRI |
| $10^{40}$ | Galaxies | passives |

**Les sources thermiques**

Elles regroupent les NAG suivants : galaxies de Seyfert, QSO, Liners, galaxies à flambée d'étoiles.

Dans tous ces objets, le rauyonnement est dû à une forme ou une autre de rayonnement thermique, donc au bout du compte à un rayonnement de corps noir.

- Les poussières apportent leur contribution dans l'infrarouge lointain (et même millimétrique), soit froides (autour de 23 K), soit chaudes (autour de 180 K).
- Dans l'infrarouge proche, ce sont les étoiles froides qui prédominent (vers 4.000 K) ;
- dans le domaine radio, on note un rayonnement synchrotron (non thermique donc) avec un spectre en loi de puissance ;
- au-delà de 100 µm, il y a une coupure nette, qui est associée à l'absorption free-free (bremstrhalung)

Le continuum qui va de l'infrarouge lointain à l'ultraviolet est attribué à une superposition d'émission par les poussières froides et chaudes, jusqu'à 1.500 K. A celà s'ajoute une composant stellaire, et une autre dans l'uultraviolet, non stellaire. Cet ensemble justifie l'apellation de sources thermiques.

**Les sources non thermiques**

Ce sont les *blazars*. Ce sont de forts émetteurs radio (contrairement aux QSO et galaxies de Seyfert). Leur spectre est plat depuis l'infrarouge lointain jusqu'à l'ultraviolet. Cette caractéristique implique une origine non thermique (un spectre thermique est en forme de cloche).

Les balzars sont :

- continuum IR-UV plat ;
- polarisation importante (supérieure à 3 %) dans le domaine optique ;
- variations rapides (au plus quelques jours) dans le domaine optique ;
- le continuum radio est fort et variable.

Les lacertides et les OVV en font partie. Les lacertides ont des raies d''mission faibles. Les raies d'émission des OVV sont semblables à celles des objets qui n'émettent pas en radio.

Les sources thermiques sont associées essentiellement à des galaxies spirales, et les sources avec jet à des galaxies elliptiques. Les elliptiques renferment beaucoup moins de gaz que les spirales, mais elles contiennent des anneaux des poussières, comme Cen A et Cyg A.

**Modèle de quasar**

En physique, le principe du rasoir d'Ockham consiste à couper toute hypothèse non indispensable. Ou, plus simplement, à rechercher l'explication la plus simple pour toute chose (celle qui nécessite le moins d'hypothèses). C'est ainsi que le mouvement elliptique de Kepler est conceptuellement beaucoup plus simple que les épicycles de Ptolémée.

- Guillaume d'Ockham, moine franciscain et philosophe, a énoncé son principe en 1319 sous la forme :
  "*Une pluralité ne doit pas être posée sans nécessité*".
- Le mot "*rasoir*" a été introduit plus tard par Etienne de Condillac en 1746.
- Ernst Mach a écrit plus tard :
  "*Les savants doivent utiliser les concepts les plus simples pour parvenir à leurs résultats et exclure tout ce qui ne peut être perçu par les sens*".

- Enfin, Umberto Eco fait dire à Guillaume de Baskerville, personnage de son film "*le nom de la rose*" :
  "*Il ne faut pas multiplier les explications et les causes sans qu'on en ait une stricte nécessité*".
- Antoine de Saint Exupéry a écrit (Terre des Hommes, 1938) :
  "*Dans quelque domaine que ce soit, la perfection est atteinte non pas lorsqu'il n'y a plus rien à ajouter, mais lorsqu'il n'y a plus rien à enlever*".

Si on considère les noyaux actifs de galaxies, on constate observationnellement une grande diversité. Sans autre considération, il faudrait alors rechercher autant de modèles différents. Mais il est préférable de rechercher quelles sont, au-delà des diversités, les ressemblances entre ces différents objets. C'est ce qu'ont fait les chercheurs qui se sont penchés sur ce problème.

Considérons d'abord ce que pourrait être un modèle de quasar. Il doit s'appuyer essentiellement sur trois arguments :

- la puissance émise est de l'ordre de $10^{40}$ W ;
- le rayonnement est non thermique ;
- on observe des jets de gaz émis à très grande vitesse ;
- la durée de vie est de l'ordre de quelques millions d'années ;
- le temps de variabilité descend jusqu'à quelques heures.

Un modèle ne peut être accepté que s'il explique, par un mécanisme unique, ces caractéristiques essentielles.

Le paradigme essentiel est la présence au centre de toute galaxie (active) d'un objet compact. Cet objet devrait être un trou noir de masse comprise entre $10^7$ et $10^9$ M . L'énergie produite est due à l'accrétion de matière en provenance d'un anneau tournant autour du trou noir. C'est donc de l'énergie gravitationnelle. Le disque peut aussi produire un jet, dans lequel une partie de l'énergie est convertie en mouvement perpendiculaire le long de l'axe de rotation.

Comment détermine-t-on la masse du trou noir ? En considérant la limite d'Eddigton en première approximation. Cette limite est l'énergie maximale que peut rayonner un astre sans s'évaporer. En effet, selon sa masse, il possède une certaine gravité, capable de retenir les gaz. Mais si ceux-ci sont chauffés par une énergie très grande, ils peuvent acquérir une vitesse supérieure à la vitesse de libération, et l'astre s'évapore dans l'espace. Alors la masse diminue… et dans le cas d'une étoile ceci entraîne une diminution de la production d'énergie. En appliquant ce principe à un astre massif (trou noir entouré d'un disque d'accrétion) si l'énergie dissipée est trop grande (supérieure à la limte d'Eddigton), le disque va être dispersé dans l'espace, et le quasar va s'éteindre. Puisque ce n'est pas le cas, on est assuré d'être en-dessous de la limite, ce qui fixe une borne. En fait, on doit être à la limite, car la baisse d'énergie permettrait une nouvelle chute de matière, qui la relancerait. On arrive donc à un équilibre autour de cette limite.

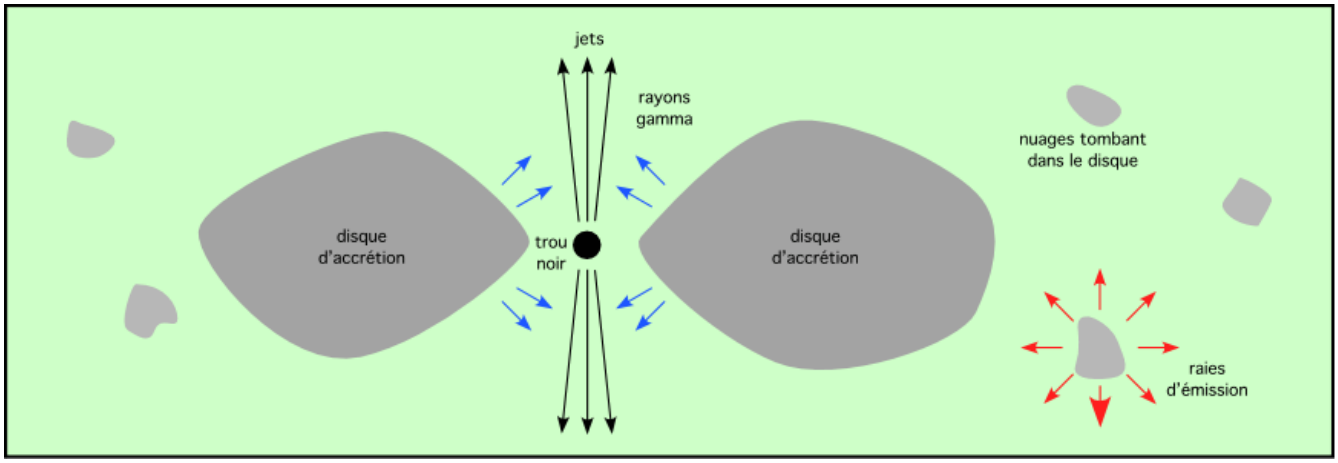
La luminosité d'un noyau actif de galaxie se trouvant comprise entre 100 et 1.000.000 de milliards de luminosités solaires, on en déduit que la masse du trou noir central doit être comprise entre un million et 10 milliards de masses solaires… Les trous noirs les plus massifs donnant lieu évidemment au quasars, objets les plus prodigues.

Les noyaux actifs de galaxie sont ainsi semblables au centre de la Voie Lactée, bien que les masses mises en jeu soient très différentes.

Pour une luminosité de $10^{12}$ L , le trou noir central d'une galaxie de Seyfert doit avaler 1 M par an ! Mais un quasar en consomme jusqu'à 100 M .

Le premier paramètre de ce modèle est la luminosité totale. Ainsi, l'unique différence entre une galaxie de Syfert 1 et un quasar inactif en radio est leur différence de luminosité. Un second paramètre est la luminosité radio, qui peut être reliée à la force du jet. Sur la base de leur luminosité radio, on peut relier les galaxies de Seyfert et les quasars inactifs en radio d'une part, et les radiogalaxies et les quasars radio d'autre part.

Le troisième paramètre important du modèle unifié est l'angle sous lequel on voit le noyau. Si le disque est vu par la tranche, le noyau est obscurci par les poussières. Ceci pourrait expliquer les différences entre les galaxies de Seyfert 1 et 2 : dans celles de type 2, nous ne voyons pas les raies d'émission larges formées près du trou noir, mais seulement les raies étroites provenant du disque.




De même, une galaxie qui ressemble à une source radio double quand elle est vue par la tranche, ressemblerait à un quasar si elle était vue de face. Dans ce dernier cas, il est possible que le jet soit dirigé exactement vers la Terre. Il apparaîtra alors comme un blazar, objet présentant de rapides et violentes variations de brillance et de polarisation, et de très faibles ou pas de raies d'émission. Si le jet est presque relativiste, sa vitesse tangentielle peut sembler superluminique.

Une prévision du modèle unifié est qu'on doit trouver un grand nombre de quasars dont le noyau est obscurci par le disque comme dans les galaxies de Seyfert 2. On a en effet trouvé des candidats de ce genre.

**Théorie des disques d'accrétion**

La Relativité Générale en est à la base. En effet, on considère un trou noir massif (ou supermassif, quelques millions à quelques milliards de masses solaires), et les effets gravitationnels ne peuvent pas être approchés par la gravité de Newton. On considère la formation des disques, leur effondrement, et les mécanismes qui mènent à leur émission.

En cours d'écriture !!

**Propriétés du trou noir central**

Un trou noir est entièrement décrit par trois paramètres : sa masse M, son moment cinétique J, et sa charge électrique Q. Etant donné que la matière constituant les objets qui peuvent donner naissance à un trou noir est toujours électriquement neutre, on doit avoir en général Q = 0.

Il reste cependant une propriété essentielle, c'est la rotation. La forte concentration de matière dans un trou noir oblige a utiliser la Relativité Générale pour décrire son environnement. Lorsque la rotation est lente, le trou noir est parfaitement sphérique. Mais lorsqu'elle est rapide, il se produit, juste à l'extérieur de l'horizon, une zone aplatie nommée *ergosphère*.

**Mécanisme de Blandford-Znajek**

Bien que globalement neutre, comme les autres astres, un trou noir possède aussi un champ magnétique, et s'entoure d'une magnétosphère. Les champs magnétiques qui s'y développent relient l'horizon aux régions lointaines, où le champ s'annule. Les lignes de champ peuvent canaliser des particules chargées, comme dans d'autres environnements, et priduire des courants électriques. Par ce biais, le trou noir peut perdre une partie de son énergie de rotation.

Le calcul montre que l'énergie ainsi libérée est tout à fait suffisante pour expliquer le rayonnement des radio-galaxies. Alors, il semble que les radiogalaxies contiennent des trous noirs en rotation rapide, alors que les objets silencieux en radio ne contiendraient que des trous noirs en rotation lente. Si ceci est confirmé, alors ces différents objets auraient une histoire d'accrétion différente.

**Résumé**

Les définitions de ces types de galaxies s'adressent à des longueurs d'onde différentes : visible pour les Seyfert, radio pour les radiogalaxies, ultraviolet pour les Markarian.

Que se passe-t-il si on observe une radiogalaxie en UV, ou une Seyfert en radio ?

Ces longueurs d'onde différentes proviennent de phénomènes physiques d'énergies différentes. Mais qui peuvent coexister dans un même objet. La distinction entre ces différents types de galaxies est donc d'origine observationnelle, pas forcément physique. Elle ne traduit peut-être pas la réalité globale, mais seulement des caractères partiels.

Il y a continuité entre les galaxies de Seyfert I et les quasars. La magnitude absolue de 23 donne une limite entre les deux types d'objets : plus brillant, il s'agit d'un quasar, moins brillant, c'est une galaxie de Seyfert I.

On a observé un phénomène subtil dans le décompte des quasars : une périodicité dans les redshifts. Ceci pourrait signifier qu'il y ait eu plusieurs époques d'activation des quasars. Ce genre d'observation demande confirmation.

---=OO=---




Le dogme d'immuabilité des cieux ayant été abandonné, il est naturel de penser que les galaxies doivent évoluer. Et par suite même, se former. Le problème de leur passé et de leur futur s'est rapidement posé, mais les moyens pour décrire cette évolution sont bien difficiles à apréhender. Aujourd'hui encore, les connaissances concernant la vie des galaxies sont encore fragmentaires. Cependant, de grandes lignes se dessinent et permettent de brosser un premier panorama des objets qui peuplent l'Univers.

**Formation des galaxies**

Au début de l'Univers, la température est extrêmement élevée, et décroît rapidement avec l'expansion. La matière est totalement ionisée, et les particules chargées (protons et électrons) intéragissent en permanence avec les photons. Les échanges d'énergie entre photons et particules chargées empêchent celles-ci de s'effondrer sous l'effet de leur gravité pour former des structures.

380.000 ans plus tard, la température est tombée à 3.000 K. Dans cette relative douceur, les électrons se combinent aux protons pour former des atomes neutres d'hydrogène. Ce phénomène est la *recombinaison* (terme bien mal choisi puisque ces particules n'avaient jamais été combinées avant…). Les atomes neutres n'intéragissent presque plus avec les photons, et ceux-ci peuvent alors suivre une trajectoire en ligne droite, sans être perturbés. La matière (atomes) et le rayonnement (photons), sont maintenant découplés, et vont vivre une vie indépendante.

Les atomes sont maintenant soumis à la gravité, sans les perturbations des photons. Là où la densité est un peu plus grande, la gravité est un peu plus forte, et attire des particules nouvelles. Celles-ci augmentent la masse, donc aussi la gravité, ce qui fait que le grumeau devient de plus en plus attractif, et doit grossir avec le temps.

Ces grumeaux sont-ils les ancêtres des grandes structures (galaxies ou amas de galaxies) ? Il est logique de répondre par l'affirmative. Cependant, on a trouvé une difficulté dans cette filiation. L'effondrement gravitationnel a commencé, nous l'avons vu, au moment de la recombinaison. A quelle époque cela s'est-il produit ?

Une façon simple de le déterminer consiste tout simplement à associer le rayonnement qui a été émis à 3.000 K à l'époque, avec celui que nous reçevons de nos jours à 3 K. Le rayonnement libéré par les atomes devenus neutres a pu parcourir librement l'espace depuis, et doit donc nous parvenir maintenant. Ce doit être un rayonnement de corps noir, qui s'est produit lorsque l'Univers était bien plus chaud et dense qu'aujourd'hui. Depuis, l'expansion a étiré toutes les distances, et en particulier les longueurs d'onde. Par conséquent, un rayonnement de longueur d'onde $\lambda$ lors de l'émission, doit nous arriver avec une longueur d'onde plus grande, puisque l'Univers est en expansion, et doit donc nous paraître bien plus froid. La température est proportionnelle à la longueur d'onde, donc une température 1.000 fois plus faible (3 K par rapport à 3.000 K) correspond à une longueur d'onde agrandie 1.000 fois ($T = (1 + z)\ T_0$, $T_0$ étant la température du rayonnement aujourd'hui). Par conséquent, le décalage spectral z, au moment de la recombinaison, est de l'ordre de $z = 1.000$.

Ce rayonnement a été observé depuis assez longtemps et sa température mesurée avec de plus en plus de précision par trois satellites successifs : COBE, WMAP, Planck. Les trois ont donné la même image, mais de plus en plus fine. Les fluctuations de température sont de l'ordre du 100.000$^{e}$. Agrandies 1.000 fois, elles devraient être de l'ordre du 100$^{e}$ aujourd'hui. Or les grandes structures de l'Univers aujourd'hui sont cent fois plus grandes. Une telle erreur est significative, il est difficile de l'ignorer.

**Problème et solution**

Le problème vient de la date de début de l'effondrement : au moment de la recombinaison ($z = 1.000$), il est trop tard… Si l'effondrement avait commencé plus tôt, le problème ne se poserait pas. Si ça ne s'est pas passé, c'est parce que les photons l'ont interdit. Alors, les astrophysiciens ont trouvé une parade : il existe une matière massive, mais non sensible à l'interaction électromagnétique. Celle-ci a pu très bien commencer à former des grumeaux bien avant la recombinaison. Et au moment de celle-ci, les atomes libérés du rayonnement ont été attirés par les grumeaux déjà formés, et les structures telles que nous les observons ont pu se constituer.

Cette matière hypothétique est la matière noire. Son existence et ses propriétés sont déduites de ce problème qu'on ne sait pas résoudre autrement. On ne l'a jamais observée.

Quand commence-t-elle à s'effondrer ? Les photons ont de l'énergie qui se communique par interaction aux particules, et les empêche de se condenser. D'après l'équivalence masse-énergie ($E = m\ c^2$), on peut aussi exprimer la matière en termes d'énergie, et la comparer au rayonnement. Au début, l'énergie des photons l'emporte largement sur celle des particules. Mais les choses changent : avec l'expansion, les particules (matière et photons) se diluent dans l'espace et leur densité diminue comme $1 / R^3$ (quand les dimensions sont multipliées par 2, le volume est multiplié par 8). Mais pour les photons, lorsque la dimension double, la longueur d'onde double aussi, et l'énergie du photon est divisée par 2. Cette énergie diminue donc comme $1 / R$ pour chaque photon. Donc, la densité d'énergie des photons diminue comme $1 / R^3 \times 1 / R = 1 / R^4$.

La densité d'énergie des photons diminuant plus vite que celle de la matière, quelle que soit sa domination initiale, elle deviendra minoritaire au bout d'un certain temps. Pour cela, on parle *d'ère du rayonnement* au début, puis *d'ère de la matière* ensuite. Cette transition se produit lorsque

le décalage spectral était 10 à 100 fois plus grand qu'à la recombinaison, donc compris entre 10.000 et 100.000 ; l'ère du rayonnement a été brève.

Lorsque la matière prend le dessus, elle commence à s'agglutiner (à condition de ne pas ressentir l'interaction électromagnétique). Les grumeaux qu'elle forme alors seront les germes des grandes structures : la matière baryonique, libérée des photons après la recombinaison, tombera sur eux.

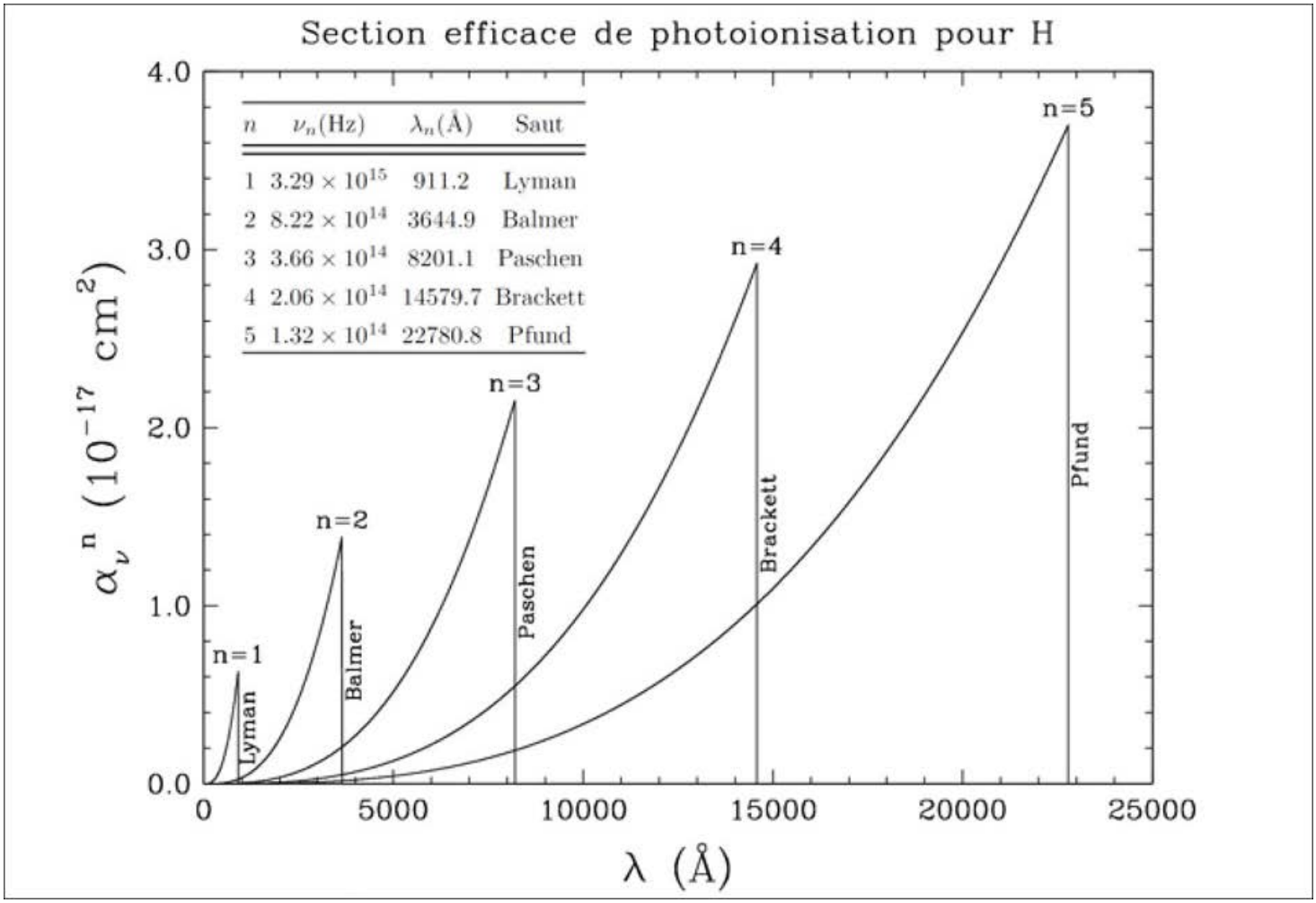
**Observations**

L'observation des galaxies dans leur jeune âge est difficile, parce qu'on en reçoit très peu de lumière, et parce que celle-ci est fortement décalée vers le rouge : il faut les chercher à grand z.

La mesure du décalage vers le rouge est délicate. Pour les galaxies très lointaines, il n'est pas possible de détecter des raies spectrales, il n'est pas possible de prendre un spectre. Alors, il faut trouver d'autres moyens. La grande distance de ces objets, inconvénient majeur pour leur étude, se tourne en avantage. A cause de l'éloignement, la lumière qui nous en parvient a parcouru une très grande distance dans l'Univers, et a rencontré beaucoup d'atomes d'hydrogène. L'absorption a fait son œuvre.

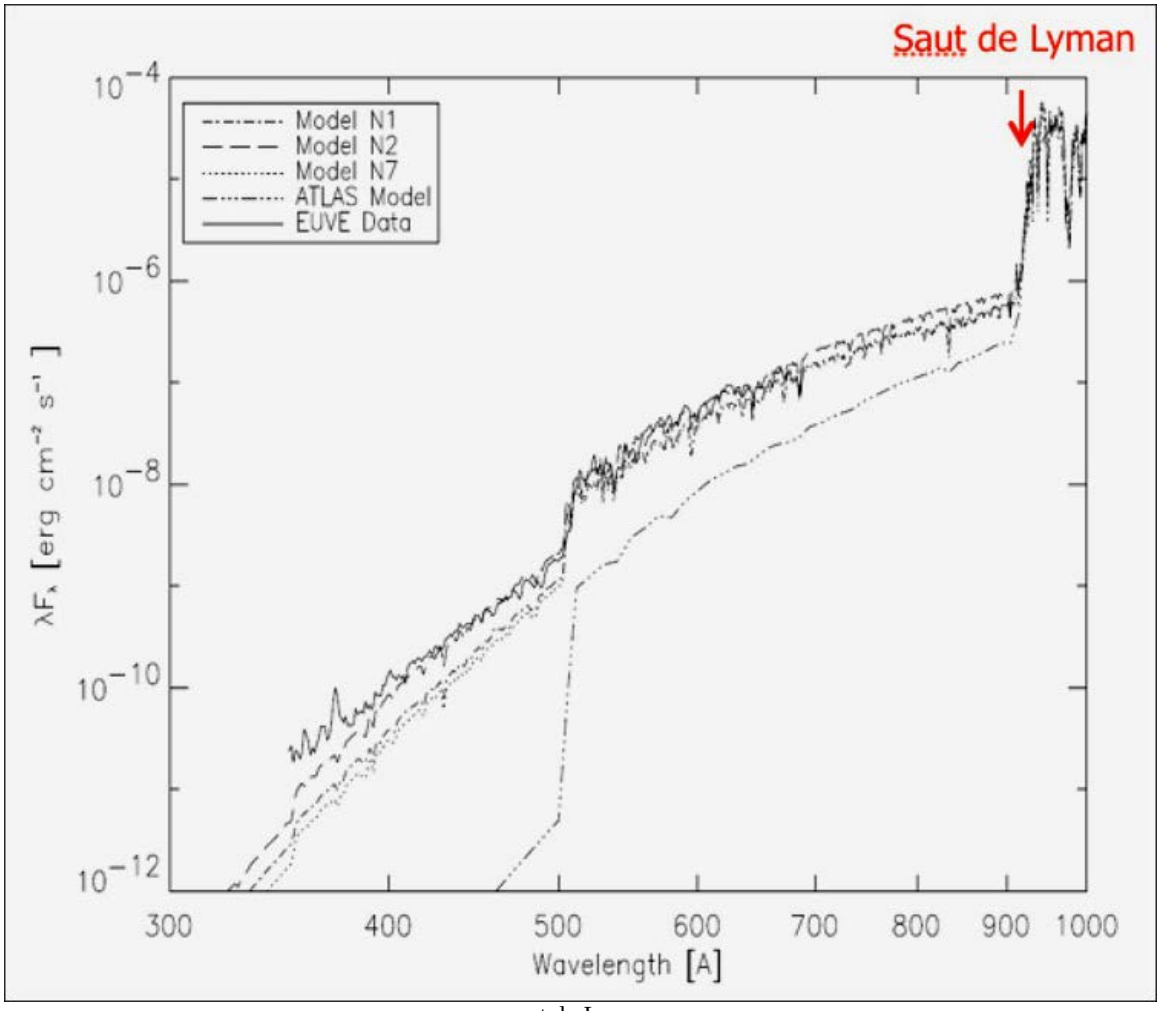
L'ionisation de l'atome d'hydrogène depuis son niveau fondamental nécessite une longueur d'onde plus courte que 911,2 Å.
En-dessous de cette valeur, l'efficacité (section efficace, capacité d'absorption) augmente.
Mais à 911,2 Å elle tombe à 0 et y reste au-dessus.

Le schéma ci-dessous montre la chute brutale de la section efficace à 911,2 Å :




section efficace de photoionisation

Il s'ensuit que les photons de longueur d'onde inférieure à 911,2 Å sont éliminés, et laissent un manque dans le spectre. L'intensité du spectre monte donc brutalement à cette longueur d'onde, c'est le *saut de Lyman* :



saut de Lyman

Si l'émetteur est proche, on observe le saut de Lyman à cette longueur d'onde. S'il est lointain, le saut est décalé vers le rouge, on l'observe dans le visible ou même l'infrarouge. Son observation permet de déterminer le décalage vers le rouge. Il existe d'autres sauts qui permettent de déterminer ou de confirmer ce décalage.

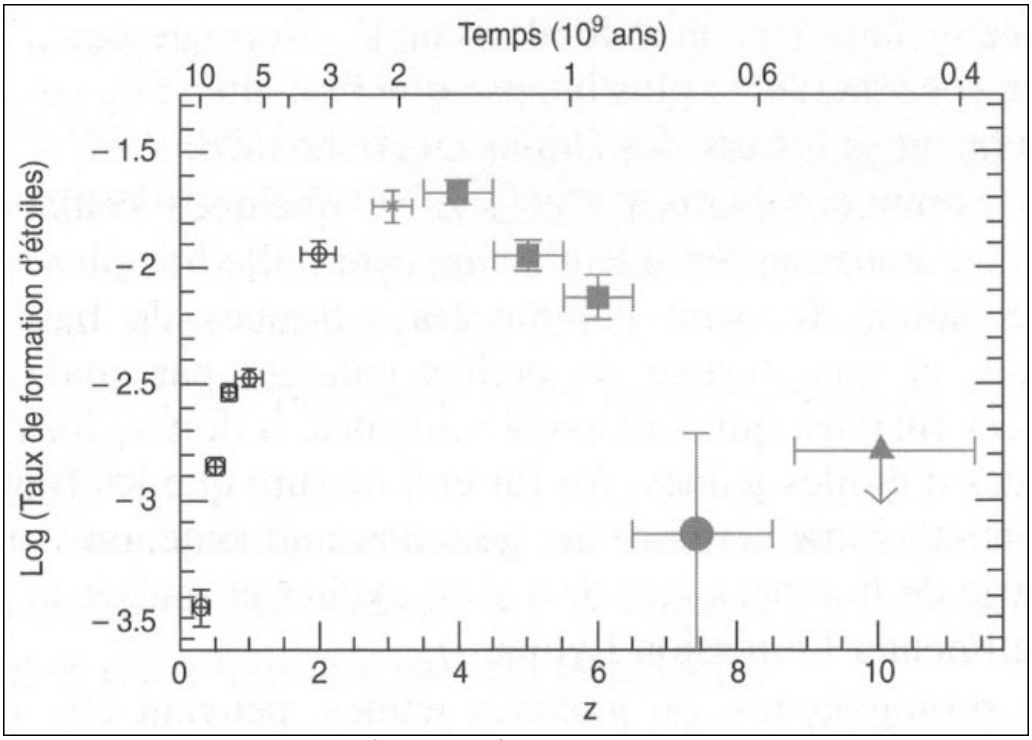
**Les galaxies évoluent**

Il est logique de penser que les galaxies évoluent. D'ailleurs, notre Voie Lactée, au taux de formation actuel, n'aurait pas eu le temps de se former. Donc le taux de formation d'étoiles y a été plus évolué dans le passé.

Mais rien ne vaut une preuve observationnelle. Et on l'obtient en considérant la couleur globale des galaxies.

**Effet Butcher-Oemler**

En observant des galaxies de plus en plus lointaines, on a déterminé une proportion de galaxies bleues beaucoup plus grande dans les amas lointains que dans les amas proches (évidemment après correction du décalage spectral !). Cette différence est nommée *effet Butcher-Oemler*. Ceci s'explique très simplement : dans leur jeunesse, les galaxies contenaient beaucoup de gaz, et formaient de nombreuses étoiles. Parmi celles-ci, les bleues, massives et chaudes, sont prépondérantes et donnent la coloration globale. Plus tard, la formation s'est ralentie, et les étoiles vieilles deviennent prépondérantes avec leur lumière rouge. Mais ceci n'est pas si simple. On a pu déterminer le taux de formation d'étoiles, dans une galaxie typique, en fonction du temps. Ce taux est loin d'être constant :




taux de formation d'étoiles Bowens et Illingworth, 2006

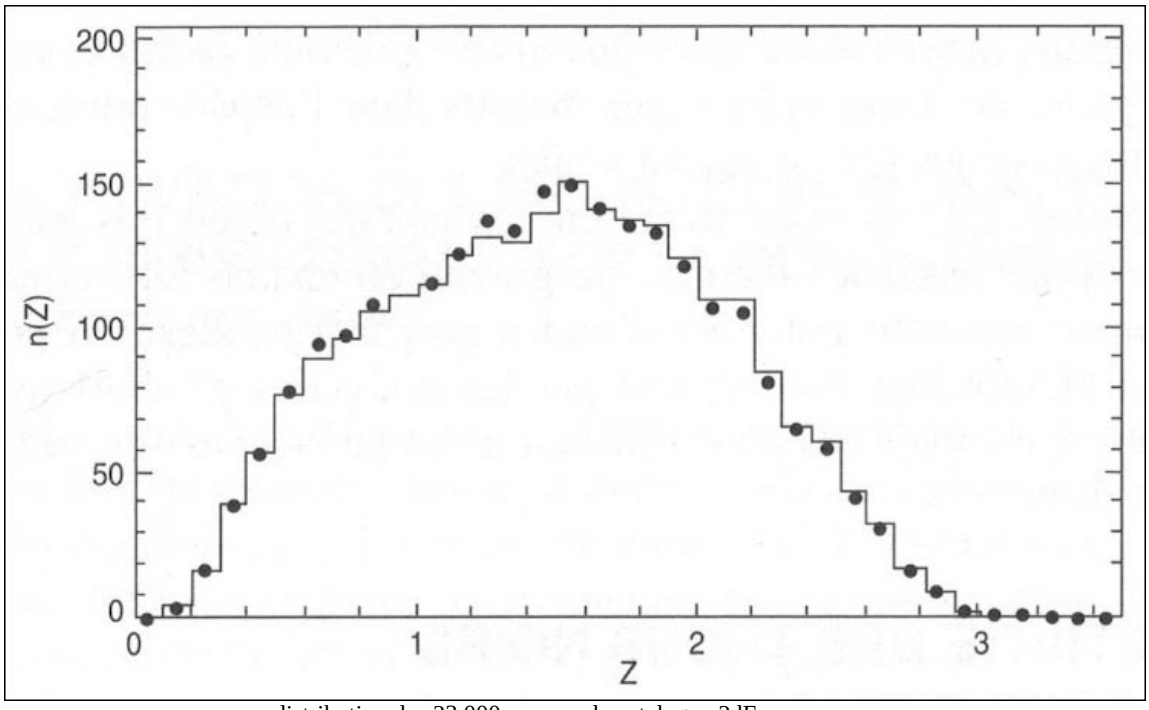
Ce diagramme est connu sous le nom de celui qui l'a proposé : diagramme de Madau (Madau et al. 1996, MNRAS 283, 1388). La formation d'étoiles a eu son heure de gloire vers z = 4, où elle présente un maximum. On peut être surpris par ce maximum, qui n'est pas au début ! En effet, le raisonnement qu'on a fait plus haut consistait à dire que la quantité de gaz disponible ne pouvait que diminuer, par sa conversion progressive en étoiles.

Ce schéma montre que la formation n'était guère plus élevée qu'aujourd'hui pour de grands z. Il faut en conclure que la quantité de gaz disponible a évolué avec le temps. On conçoit un apport de gaz progressif en provenance de l'espace intergalactique, dans les amas. Des nuages de gaz tombent sur les galaxies, et relancent la formation d'étoiles. Cette relance a été maximale vers z = 4.

Si les galaxies étaient isolées, le gaz décroîtrait exponentiellement sur 3 milliards d'années. Il faut donc qu'il y ait un apport de gaz. D'autre part, la métallicité augmente moins que si la galaxie était isolée. Par conséquent, on doit envisager un apport de gaz frais plus ou moins régulier au cours du temps.

**Les NAGs**

Comme la formation d'étoiles, le phénomène d'activité des noyaux a eu son heure de gloire il y a longtemps. Produite par le trou noir central qui accrète du gaz (ou des étoiles), l'activité a besoin de matière abondante à proximité. Aujourd'hui, il ne reste que les galaxies de Seyfert, possédant un petit trou noir central.




distribution des 23.000 quasars du catalogue 2dF Croom et al. 2004

Ce schéma montre que les quasars étaient très actifs pour z autour de 1,6. Ce qui correspond à 4 milliards d'années après le Big Bang.

**Galaxies naines**

Depuis quelques années, on à découvert des galaxies naines autour de la Voie Lactée. La surprise est qu'elles se trouvent toutes dans un même plan, quasiment perpendiculaire au plan de la Voie Lactée. Les habitudes de pensée newtonniennes nous font imaginer une répartition pratiquement sphérique. Et maintenant, les simulations numériques incluant la matière noire montrent de nombreuses condensations de matière noire (des grumeaux), qui attirent la matière baryonique et lui permettent de s'effondrer en étoiles et galaxies naines. Mais leur distribution est sphérique.

Les modèles de matière noire ne prédisent donc pas ce qu'on observe, ce qui amène certains à en nier l'existence : il faudrait trouver autre chose pour résoudre les problèmes. Mais c'est sans compter sur l'imagination des autres théoriciens. En fait, les simulations montrent que la matière noire forme, au cours du temps, des filaments qui se croisent. Aux croisements, se trouve une forte condensation, donc une gravité plus importante. C'est là que se forment les structures, les amas de galaxies. Dans les filaments, la gravité est plus faible, et les objets capables de s'effondrer sont moins massifs. Ce sont les galaxies naines. Cette solution prévoit donc qu'elles sont naturellement alignées le long des filaments. Si on considère que la Voie Lactée est presque perpendiculaire au filament, on conçoit que les galaxies naines aient cette répartition.

Les observations, comparées aux simulations, montrent un autre problème : dans la matière noire, des milliers de grumeaux se forment, qui devraient accréter autant de galaxies naines. Or autour de la Voie Lactée, on compte quelques dizaines de galaxies naines&hellp; Pourquoi si peu ? Première idée, bien sûr, parce que la matière noire n'existe pas. Mais ses tenants ont une parade. Les grumeaux ne sont pas assez massifs pour former tous des galaxies naines assez brillantes pour être observables. Ce sont des grumeaux noirs, et ils ne seront jamais observables en lumière visible.

Il se peut aussi que les grumeaux les moins massifs ne forment que des galaxies naines faibles, non détectables aujourd'hui. Les nouveaux télescopes de la classe des 40 m, en construction, nous les feront découvrir. Pour l'instant, nous ne savons pas si elles attendent d'être découvertes, ou si elles n'existent pas.

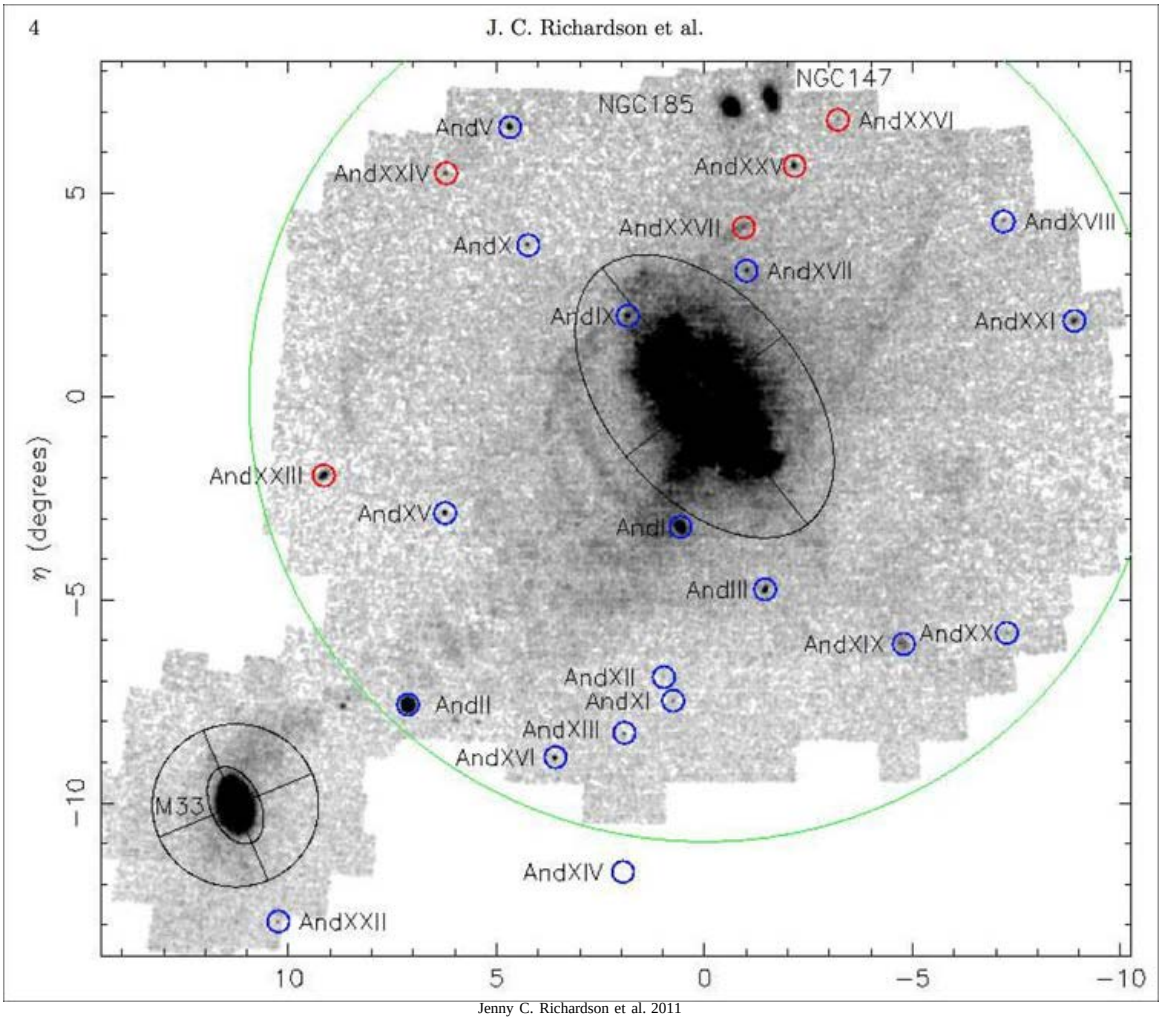
Ces idées sont rassurantes, elles sauvent la matière noire !

Notre voisine Andromède possède aussi des galaxies naines, qui tournent aussi dans un plan, encore plus mince que celles de chez nous. Elles s'étendent sur plus d'un million d'années lumière, avec une épaisseur de seulement 40.000 AL. Les meilleurs simulations de matière noire n'expliquent pas cette répartition. Par contre, les mouvements de ces galaxies naines seraient parfaitement expliqués si elles provenaient de la capture d'une grande galaxie, dont elles seraient les débris. La direction de chute de cette galaxie donnerait alors tout naturellement le plan dans lequel se déplacent les débris.

Qu'on envisage l'existence de la matière noire ou pas, il y a des problèmes dans les modèles. Et les idées pour sauver ces modèles ne manquent pas. Le seul ennui est qu'aucune de ces idées n'est vérifiable actuellement.

Andromède est une grande galaxie, et sa proximité permet une étude fine. En particulier, on s'est intéressé aux galaxies naines qui gravitent autour, et qui ont produit à tout le moins une surprise. Les dernières ont été découvertes récemment (2013), et ont conforté l'idée que l'on avait depuis quelques années. On a détermiuné les paramètres cinétiques de 15 galaxies naines qui orbitent autour d'Andromède, dans un même plan. De plus, 13 d'entre elles tournent dans le même sens. Il est très difficile d'envisager une telle répartition due au hasard. Il est donc nécessaire de trouver une explication.

Pour répondre à cette question, on remarque d'abord que la Voie Lactée n'est qu'à 1 degré du plan orbital de ces galaxies. La tentation d'envisager une collision passée entre ces deux objets est donc forte. Mais il y a un problème. En effet, les galaxies naines qui se sont formées par effondrement contiennent de la matière noire, qui a provoqué leur formation. Alors que les galaxies naines débris de collisions, nommées *naines de marées*, n'en contiennent pas, ou très peu. Or les naines qui entourent Andomède en contiennent beaucoup. Ce qui amène à chercher une autre explication.



Jenny C. Richardson et al. 2011

Le grand cercle vert indique les limites de l'observation, son rayon est de 150 kpc. Les taches cerclées de bleu sont les galaxies naines satellites déjà connues. Celles cerclées de rouge ont été découvertes grâce à cette observation (*PAndAS, Pan-Andromeda Archaeological Survey*). PAndAS a été mené par la caméra Megacam, au CFHT (Canada-France-Hawai Telescope).

Les galaxies naines apparaissent comme des sur-densités d'étoiles géantes rouges, à faible métallicité. En effet, à la distance d'Andromède, le télescope ne permet pas de détecter les étoiles de la séquence principale ; ceci est donc la limite de l'observation. La spectroscopie est encore plus limitée bien sûr, et ne permet d'observer que les plus brillantes de ces géantes.

Parmi les galaxies naines d'Andromède, And XXVII est une exception : elle fait partie d'un flot d'étoiles semblables (visible sur l'image), et l'ensemble pourrait être les débris d'une interaction de marées avec M31. D'autres flots sont bien visibles, qui entourent la galaxie. Ces flots d'étoiles provienent très certainement de reste de galaxies accrétée par Andromède. Il y a aussi d'autres structures visibles formées d'étoiles. Et enfin, des groupes d'étoiles semblant provenir de M33 (en bas à gauche).

Cette image montre une densité surfacique de galaxies naines à peu près constante jusqu'aux limites de 150 kpc, ce qui correspond à une décroissance radiale en 1 / r (r étant la distance au centre de M31). Ce résultat est en conflit, au moins apparent, avec les simulations cosmologiques.

Toutes ces structures, habituellement invisibles, témoignent d'un passé tumultueux de notre voisine. D'ailleurs, les populations d'étoiles d'Andromède sont très différentes selon la région, témoignant d'origines différentes.

**L'évolution des grandes structures**

Les grandes structures évoluent sans que les galaxies qui en font partie ne fusionnent. Ce sont en fait les halos de matière noire qui fusionnent.

On envisage plusieurs modèles, selon la qualité envisagée pour la matière noire. La différence tient dans la vitesse des particules au moment où elles se sont découplées des photons.

**modèle *HDM* (*Hot Dark Matter*)**

La matière noire chaude est constituée de particules possédant une vitesse relativiste au moment où elles se sont découplées des photons. Ses propriétés sont :

- la matière noire est constituée de particules ayant une vitesse peu inférieure à c ;
- les fluctuations de densité à petite échelle disparaissent ;
- les simulations numériques montrent la formation de structures de masse ≫ masse des galaxies individuelles ;
- ces structures se fragmentent ensuite pour créer des galaxies de masse typique $10^{11}$ M ;

ce modèle est appelé *top-down* (les plus grands d'abord).

Problèmes :

- les observations semblent indiquer que les petites structures se sont formées avant les grandes ;
- les structures à très grande échelle prédites semblent différentes de ce qu'on observe.

Il est évident que les neutrinos sont des particules de matière noire chaude ! Lors de leur découplage d'avec les photons, ils étaient raltivistes, et le sont restés. Du fait de leur très faible taux d'interaction avec la matière ordinaire, ils ont un libre parcours moyen presque aussi grand que l'horizon (qui est limité par la distance parcourue par les photons). De ce fait, ils exercent une faible pression sur un volume de l'ordre de celui de l'Univers observable.

Mais les neutrinos connus ont une masse bien trop faible pour constituer la totalité de la matière noire.

**modèle *CDM* (*Cold Dark Matter*)**

C'est le modèle de la matière noire froide. Les particules de matière noire sont lentes (devant la vitesse de la lumière) lorsqu'elles se découplent des photons.

Ces particules ont un libre parcours moyen bien plus petit que celui des particules chaudes, et donc leurs interactions avec la matière portent sur des distances bien plus faibles. Et les structures qui se forment les premières sont plus petites que dans l'autre modèle. Par conséquent, les grandes structures se forment ici plus tard, par acrrétion des petites déjà formées. Ce modèle est donc *bottom-up*, ou *hiérarchique*.

Les galaxies se forment par fusion de galaxies naines, qui eeles-mêmes se forment par effondrement gravitationnel.

Ce scénario a été envisagé dès les années 70, lorsqu'on a découvert les premières galaxies naines en orbite autour de la Voie Lactée. Proches, soumises à une gavité intense, elles subissent des forces de marées très vives, qui les perturbent. De plus, leur orbite les amène à passer dans le plan du disque, où elles subissent une friction importante et donc un freinage. Toutes ces perturbations peuvent les détruire, et laisser derrière elles une traînée d'étoiles, un peu comme une comète se désagrège et abandonne sur son orbite les poussières et gaz qui la constituaient.

Des deux modèles, c'est celui qui représente le mieux les observations, et donc celui qui est privilégié à l'heure actuelle.

- difficulté : il faut inclure les effets de la formation d'étoiles dans les simulations numériques ;
- les petites structures se forment les premières ;
- la formation des galaxies elliptiques par fusion s'explique bien ;
- la formation des spirales pose problème : on forme des spirales de $10^6$ M mais pas plus ;
- une possibilité : on obtient des galaxies elliptiques de $10^{10\text{-}12}$ M qui peuvent accréter de la matière du milieu environnant ; si cette matière possède un moment angulaire suffisant elle peut former un disque ;
- en faveur de cette idée : bulbes des spirales et elliptiques ont des propriétés semblables.

**Scénario de formation**

Le premier scénario invoqué pour la formation des galaxies spirales est l'effondrement d'un grand nuage de gaz et poussières qui s'aplatit en tournant, et forme le bulbe en son centre, et les étoiles du disque plus loin. Ce scénario, nommé *effondrement monolithique*, est battu en brèche aujourd'hui. L'effondrement est suffisamment lent pour que des étoiles se forment avant qu'il ne se termine. Le système des premières étoiles est donc épais, c'est un sphéroïde. On pense maintenant que le bulbe se forme ainsi.

Par contre, le disque se construit petit à petit, par apport de gaz qui va former de nouvelles étoiles. Cette variante du scénario est nécessitée par l'observation du taux de formation d'étoiles, dont la maximum n'est pas au début, impliquant cet apport progressif.

Les étoiles les plus éloignées du plan du disque, sont donc celles qui se sont formées pendant son effondrement, donc tout au début. Par conséquent, les plus vieilles. Or on observe justement que les étoiles sont d'autant plus vieilles qu'elles sont plus éloignées du plan. Ce scénario semble donc représenter correctement la formation des galaxies spirales.

Une autre observation est importante, concernant notre Voie Lactée. Le halo d'étoiles qui entoure le disque est plus petit que le disque lui-même. Ceci indique que le nuage qui a formé notre Galaxie à son début était de la taille du halo, et non du disque actuel. Celui-ci s'est donc formé après.

L'effondrement monolithique n'est donc pas le modèle qui convient pour la formation des spirales. Celles-ci se sont formées par l'effondrement d'un nuage de masse moyenne, qui a donné le bulbe et une petite partie du disque. Ensuite, l'accrétion de nuages de gaz provenant du milieu intergalactique a alimenté le disque, et produit le taux de formation stellaire maximum qu'on observe vers z = 4. Mais l'effondrement monolithique convient bien pour expliquer l'existence de galaxies elliptiques très tôt après le Big Bang, puisque l'observation de celles-ci à grand décalage vers le rouge montre qu'elles sont déjà formées, et évoluées. Il est donc probable que des mécanismes différents aient coexisté, et que les choses ne soient pas aussi simple qu'on le souhaiterait !

Pour la formation des grandes structures (amas de galaxies), le scénario hiérarchique est actuellement privilégié.

**Autres propriétés**

Les bébés-galaxies sont le plus souvent des flambées d'étoiles encore enfouies dans leur cocon de gaz et de poussières. Leur rayonnement ne sort que dans l'infrarouge, et le décalage spectral l'amène dans le millimétrique. En microondes, les galaxies lointaines sont plus brillantes que les proches (en apparence).

Les premiers objets qui s'effondrent ont une masse de 1.000 masses solaires. Ils s'agglutinent pour former de petites galaxies. Leur décalage et entre z = 2 et z = 10.

**Effet Sachs-Wolfe intégré**

La proportion de matière noire dans les mas de galaxies est estimée à 6 fois celle de matière baryonique. Le modèle CDM reproduit le mieux les observations. De plus, on a observé un effet en 2005 en corrélant les cartes de WMAP et de celles du Sloan Digital Sky Survey (SDSS). Cet effet est un bleuissement des photons qui traversent une grande structure, comme un amas de galaxies massif.

Cet amas (500 millions d'années-lumière) produit un puits de potentiel important, dans lequel les photons se font piéger. Ils tombent donc dans ce puits, et perdent de l'énergie potentielle. Si c'étaient des particules de matière, ils gagneraient de l'énergie cinétique, donc de la vitesse. Mais ce n'est pas possible pour des photons, qui voyagent déjà à leur vitesse limite. Il faut donc que cette énergie potentielle soit transformée autrement. La seule possibilité est de modifier l'énergie du photon c'est-à-dire sa longueur d'onde (E = ℎ ν). Ainsi, le photon qui tmobe dans le puits de potentiel de l'amas doit bleuir. Mais l'amas n'est pas un trou noir, et le photon en ressortira. Pour cela, il va regagner l'énergie potentielle qu'il avait perdue à l'entrée, et par conséquent rougir autant qu'il avait bleuit. Le résultat serait donc une couleur inchangée.

Mais c'est compter sans l'accélération de l'expansion de l'Univers. Pendant le voyage du photon dans l'amas, ses dimensions augmentent. Le puits de potentiel diminue donc. Et par conséquent, le rougissement du photon est plus faible que ce qu'on avait envisagé. Et que son bleuissement à l'entrée. Par suite, le bleuissement diminue, mais ne s'annule pas.

Cet effet ayant été observé, favorise le modèle de matière noire froide, avec énergie noire…

Observations Hubble Deep Field semblent montrer que près de 25 ;% des galaxies lointaines étaient irrégulières contre 7 % aujourd'hui

---=OO=---




Attention, la fin de ce chapitre n'est actuellement qu'une ébauche.

Dans ce chapitre, vous rencontrerez de nombreux termes nouveaux, dont la consonnance est souvent semblable. Ceci prête naturellement à confusion. Pour bien vous souvenir de ces termes, retenez leur origine étymologique, elle vous sera d'un très grand secours. Vous trouverez à la fin de ce chapitre un résumé de ces étymologies.

Plan


Les atomes
Définitions
Masse d'un atome
Isotopes
Taille d'un atome
Représentation d'un atome
Stabilité
Interaction électromagnétique
Interaction forte
Interaction faible
Interaction gravitationnelle
Chimie / Physique nucléaire
Particules d'interaction
Les deux grands principes de la Mécanique Quantique
Le principe d'incertitude d'Heisenberg
Comportement des particules, principe d'exclusion de Pauli
Pression de Fermi
Etat quantique
Particules composées
Antiparticules
**Constitution des nucléons**
Propriétés essentielles des quarks
Résumé
Rayons cosmiques
Nouveaux quarks
Mésons
Structure du noyau
Physique des particules
Où en est-on aujourd'hui ?
Problèmes théoriques
Des particules composées
Masse des particules
L'unification des interactions
Electrodynamique quantique
Théorie électrofaible
Chromodynamique quantique
La brisure de symétrie
A propos de la supersymétrie
Les théories de cordes


# Les atomes

**De quoi la matière est-elle constituée ?**

Cette simple question cache une difficulté extraordinaire, qui n'est pas totalement maîtrisée aujourd'hui.

La matière est ce que nous connaissons et dont nous sommes faits. Son analyse a pris pratiquement tout le vingtième siècle... Le résultat est le *modèle standard de la physique des particules*, comprenant 12 particules considérées comme élémentaires. Mais la matière que nous voyons tous les jours n'est pas la seule possible. Les rayons cosmiques se sont avérés constitués en partie de particules instables, qui ne peuvent donc pas subsister dans notre environnement. Elles sont produites dans certaines réactions à haute énergie, et se désintègrent très vite en ne laissant que des particules ordinaires. Nous allons utiliser une approche essentiellement historique.

**Définitions**

Les *atomes* sont les constituants de la matière. Ils ont été imaginés par les philosophes grecs dans l'Antiquité (Démocrite, 4$^{e}$ siècle avant J.C.), qui leur ont donné ce nom : atome vient du grec *a* : privatif, et du verbe *tomein* : couper ; littéralement, il signifie *insécable*. Un atome ne devrait donc pas avoir de structure. Pourtant... L'idée des grecs était que, en coupant en deux un morceau de matière, puis en recoupant en deux l'une

des parties, et ainsi de suite, on arriverait à un point où on ne pourrait plus le faire. Le dernier morceau obtenu était donc un atome. Dans ce sens, il reste vrai qu'on ne peut plus couper un atome, **sans en changer les propriétés**.

Mais les atomes sont complexes, quelques belles expériences l'ont montré.

> La découverte de l'électron est une longue histoire. Elle débute par la classification périodique des éléments de Mendeléev, qui a donné les premiers indices. Ensuite, Georges Stoney en 1874 a obtenu d'autres information d'après l'électrolyse, et enfin l'électron a été caractérisé par J. J. Thomson en 1897 dans les rayons cathodiques. Ceci lui a valu le prix Nobel en 1906.

Ces recherches ont donc montré que l'atome contenait des électrons, particules négatives. Parallèlement à la découverte de l'électron, le noyau a été mis en évidence en 1911 par Ernest Rutherford.

> Rutherford bombarda une feuille d'or très mince par des particules alpha (noyaux d'hélium). Il remarqua que la plupart des particules alpha traversaient la feuille d'or sans en être perturbées, alors que quelques unes étaient au contraire fortement déviées. Il en conclut que la matière était constituée de particules minuscules, séparées par un vide bien plus vaste. Ces particules sont les noyaux atomiques (noyaux d'or en l'occurence).

L'expérience de Rutherford a, outre la découvete des noyaux, permis de calculer leur volume. Leur distance donne la taille des atomes, que l'on peut donc comparer à celle des noyaux.

Les atomes sont neutres. Sans cette neutralité, la matière dont nous sommes faits serait chargée, ce qui n'est évidemment pas le cas. Puisqu'ils contiennent des électrons négatifs, il faut qu'une charge positive équivalente soit associée. Il est naturel de penser qu'elle se localise dans le noyau, ce que confirment les expériences. C'est l'attraction électromagnétique entre la charge positive du noyau et les électrons qui lie ces derniers à l'atome.

Le noyau lui-même n'est pas simple. Il est constitué de deux types de particules, les *protons* et les *neutrons*. On les appelle génériquement *nucléons* (du latin *nucleus* = noyau). Comme leur nom l'indique, les neutrons sont électriquement neutres, alors que les protons portent une charge positive élémentaire (ce qui veut dire la même pour tous ; elle est égale à la charge de l'électron en valeur absolue, on la note donc $+e$). Un noyau comportant $Z$ protons présentera donc une charge électrique $+Z\,e$.

> A la charge électrique près, protons et neutrons se ressemblent beaucoup. Ceci justifie de les nommer génériquement *nucléons*. Mais il y a plus : un neutron abandonné à son sort, non lié dans un noyau atomique, ne survit pas longtemps ; en 15 mn à peu près, il se désintègre en proton ($n \rightarrow p + e^- + \nu_e$ cette réaction est dite *désintégration béta* ; $\nu_e$ est un neutrino électronique, qui sera défini plus loin). Cette transformation spontanée amène à considérer que le neutron est un état excité, et le proton l'état fondamental du nucléon.
>
> Les protons ont été découverts en 1919 par Rutherford encore, et les neutrons en 1932 par James Chadwick (dans la réaction $^4He + {}^9Be \rightarrow {}^{12}C + n$).

**En résumé :** les atomes sont constitués d'un *noyau*, comportant $Z$ protons (charge électrique $+Z\,e$) et $N$ neutrons, entouré d'un *cortège électronique* de $Z$ électrons, ce qui lui assure sa neutralité. Le nombre $Z$ de protons est appelé *numéro atomique* de l'atome. C'est lui qui le caractérise. Le nombre total de nucléons, $A = Z + N$, est nommé *nombre de masse* de l'atome. Le nombre de masse est donc, par définition, un entier. Un atome est noté par son symbole, avec en indice son numéro atomique, et en exposant son nombre de masse, les deux du côté gauche :

$^{12}_{6}C$ atome de carbone ordinaire

Cortège électronique et neutralité sont réalisés dans des conditions de température (ce qui revient à dire d'énergie) normales (température basse). Ceci constitue le modèle planétaire de l'atome, dû à Niels Bohr, qui le représente avec le noyau semblable au Soleil, et les électrons semblables aux planètes. Il n'est pas exact en Mécanique Quantique, mais se trouve bien utile encore pour essayer de comprendre le fonctionnement de l'atome. On pourra donc l'utiliser, en gardant bien en mémoire les limites de cette représentation.

**Masse d'un atome**

La masse de l'atome est concentrée presque uniquement dans le noyau. Ce dernier contient à peu près autant de neutrons que de protons (ceci est surtout vrai pour les moins lourds).

La masse d'un proton, notée $m_p$, est de $1{,}7\ 10^{-27}$ kg, c'est-à-dire 1,7 millièmes de milliardième de milliardième de milligramme... La masse du neutron est presque égale. La masse de l'électron est encore bien plus faible : $9{,}1\ 10^{-31}$ kg, soit 1.836 fois moins que la masse du proton.

> Le kilogramme n'étant pas adapté à des masses si petites, on définit l'*unité atomique* : 1 u = $1{,}660\ 540\ 2\ 10^{-27}$ kg. Pourquoi cette valeur ? Elle est censée représenter la masse d'un nucléon. Pour l'obtenir, on divise par 12 la masse de l'atome de carbone ordinaire (puisqu'il contient 12 nucléons).
>
> La masse d'un atome, exprimée dans cette unité, est nommée *masse atomique*. La masse atomique du carbone 12 est donc exactement 12 unités atomiques. Cette définition peut paraître curieuse, et en fait elle a varié au cours du temps. Certains chimistes ont pris le noyau d'hydrogène comme référence, d'autres l'oxygène 16 (1/16 de sa masse). Cette variété s'explique par l'énergie de liaison des nucléons dans le

noyau : variant d'un atome à l'autre, elle s'ajoute (E = mc ) à la masse atomique, qu'elle modifie légèrement.

La masse atomique est donnée dans le tableau de Mendéléev.

La masse du proton est alors : $m_p$ = 1,007 276 470 u. Celle du neutron est 1,008 664 904 u.

On voit que le neutron est légèrement plus massif que le proton. Or les particules se désintègrent toujours de la plus massive vers la moins massive. Ceci est une autre justification de la notion de nucléon, dont le neutron massif est un état excité, et le proton plus léger l'état fondamental.

Il ne faut pas confondre le *nombre de masse* entier, avec la *masse atomique*, qui est fractionnaire

Ainsi, un noyau atomique de Z protons contient à peu près 2 Z nucléons (moitié protons, moitié neutrons), sa masse est approximativement de 2 Z $m_p$. La masse des Z électrons est Z × ($m_p$ / 1.836). Donc le noyau est :

$$2\ Z\ m_p / (\ Z\ m_p / 1.836) = 2 \times 1.836 = 3.672 \text{ fois plus massif que les électrons}$$

99,97 % de la masse de l'atome est donc concentrée dans le noyau.

On utilise aujourd'hui un autre système d'unités, mieux adapté aux valeurs des masses. Les physiciens travaillent sur les particules dans de grands accélérateurs, en provoquant des collisions d'une particule projectile sur une cible fixe, ou bien de deux jets de particules opposés l'un contre l'autre. Alors, on détermine les caractéristiques du choc par l'énergie qui a été communiquée aux particules projectiles. Les particules étant accélérées par des champs électriques dans les premiers accélérateurs, on a pris l'habitude de déterminer l'énergie communiquée à une particule par la différence de potentiel qui lui est appliquée.

L'*électron-volt* (eV) est une unité d'énergie adaptée au monde microscopique. C'est l'énergie cinétique qui est communiquée à un électron accéléré dans le vide par une différence de potentiel de 1 volt.

En unités internationnales, l'eV = 1,602 $10^{-19}$ joules.

On utilise les multiples : keV (kilo eV = $10^3$ eV), MeV (Mega eV = $10^6$ eV), le GeV (Giga eV = $10^9$ eV), le TeV (Tera eV = $10^{12}$ eV).

L'énergie de l'accélérateur de particules le plus puissant jamais construit, le LHC, est actuellement de 7 TeV, mais passera bientôt à 14 TeV.

L'eV est une unité extrêmement petite. Il faut 6 $10^{18}$ eV (6 milliards de milliards) pour soulever 100 grammes d'un mètre, soit 400.000 fois l'énergie du LHC !

Lorsqu'on dispose, dans un accélérateur, d'une énergie suffisante, on peut créer une paire électron-positron. Ceci en vertu de l'équation si célèbre d'Einstein $E = m\ c^2$, qui signifie que masse et énergie sont équivalentes : l'une peut se transformer en l'autre, ce sont deux facettes d'une même réalité. Dans l'autre sens, une paire électron-positron peut disparaître, et l'énergie correspondante est créée. En vertu de cette équivalence, les physiciens ont pris l'habitude d'exprimer les masses des particules en unités d'énergie. Puisque $E = m\ c^2$, on obtient $m = E / c^2$. L'unité choisie est alors le *MeV/$c^2$*, ou le *GeV/$c^2$*, mais le plus souvent on note seulement, par abus de langage, *MeV* ou *GeV* (en omettant */$c^2$*). Si vous trouvez la masse d'une particule exprimée en *GeV*, rappellez-vous qu'elle est en réalité en *GeV/$c^2$*.

**Isotopes**

On peut considérer un atome dont le noyau comporte 1 proton et 1 neutron. Puisqu'il n'a qu'une seule charge électrique, il n'aura qu'un seul électron. Or ce sont les électrons qui déterminent les propriétés chimiques des corps, donc ce sera de l'hydrogène, comme s'il n'y avait qu'un proton seul. Sa masse étant plus grande, on l'appelle *hydrogène lourd* (lorsqu'il se combine à l'oxygène, il donne aussi de l'eau ; c'est la célèbre *eau lourde*). On dit que l'hydrogène lourd est un *isotope* de l'hydrogène. On le nomme plus souvent *deutérium*, et on lui associe le symbole particulier *D*. On peut ajouter un second neutron (1 proton, 2 neutrons) ; c'est encore de l'hydrogène, mais plus lourd encore, et nommé *Tritium* (symbole *T*). L'hydrogène est le seul élément dont les isotopes portent un nom particulier.

Isotope vient du grec *isos* = même, et *topos* = lieu. Il fait référence au fait que tous les isotopes d'un élément occupent la même case dans le tableau de Mendéléev, puisque celui-ci est formé d'après les propriétés chimiques qui ne dépendent pas du nombre de neutrons.

Il existe aussi un atome possédant deux protons et un neutron. Il possède deux charges électriques, il n'a pas les mêmes propriétés chimiques que l'hydrogène : c'est de *l'hélium*. Et puisqu'il comporte trois nucléons (protons et neutrons), on dit que c'est de l'hélium 3. Il en existe un autre : l'hélium 4 qui est le deuxième isotope de l'hélium. Ce dernier comporte bien sûr deux protons, sinon ce ne serait pas de l'hélium, et deux neutrons qui le rendent différent de l'hélium 3 : plus lourd, mais avec les mêmes propriétés chimiques. Nous verrons toutefois plus loin qu'ils ont des propriétés physiques différentes aussi.

Tous les noyaux atomiques ayant même nombre de protons (et nombre différent de neutrons) ont les mêmes propriétés chimiques et sont dans la même case du tableau de Mendéléev. Ce sont les isotopes de cet élément. Seuls les isotopes dont le nombre de neutrons est proche du nombre de protons (moins du double), sont stables.

Dans le tableau de Mendéléev, on trouve pour la masse atomique du chlore la valeur 35,5. La masse du proton étant 1,007 on pourrait penser que les masses atomiques, multiples entiers approximatifs de cette valeur resteraient proches d'un entier. Pour le chlore, ce n'est évidemment pas le cas. La raison est simple : il n'y a pas qu'un seul chlore, il y en a 24 (24 isotopes) ! Mais seulement 2 sont présents à l'état naturel sur Terre, les isotopes 35 et 37. L'isotope 36 est radioactif, et il est produit par divers mécanismes en petite proportion, que l'on peut négliger. La masse atomique 35,5 résulte donc du mélange des deux isotopes 35 et 37 : l'isotope 35 (18 neutrons, 75,78 % du mélange, masse atomique 34,9688 u) et l'isotope 37 (20 neutrons, 24,22 % du mélange, masse atomique 36,9659) : (34,9688× 75,78 + 36,9659× 24,22) / 100 = 35,4525.

A chaque fois que vous trouverez un poids atomique qui s'écarte nettement d'un entier dans le tableau de Mendéléev, vous saurez qu'il s'agit d'un mélange d'isotopes.

**Taille d'un atome**

Les atomes sont minuscules. La taille d'un atome est celle de son cortège électronique, soit de l'ordre de $10^{-10}$ m, *i.e.* un dix milliardième de mètre. On utilise comme unité de longueur dans le domaine atomique, le *fermi* (noté *fm*) qui vaut :

$$1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$$

1 millionième de milliardième de mètre

Un atome a donc une taille de l'ordre de 100.000 fermis, alors que le noyau ne mesure que quelques fermis.

Le noyau est 100.000 fois plus petit que l'atome

**Remarque** : la notion de taille d'un noyau atomique a-t-elle un sens ? Il est impossible de photographier un noyau pour en mesurer le diamètre. On utilise une autre technique, on le bombarde avec des projectiles suffisamment petits (?). La plupart continuent leur route sans être perturbés. Mais certains heurtent le noyau et rebondissent dessus : ils sont diffusés. Par analogie, imaginez que vous envoyiez des fléchettes sur une cible, les yeux bandés. Le bruit de la fléchette qui touche la cible vous permet seulement de compter combien d'entre elles ont atteint le but. En supposant que vous envoyiez beaucoup de fléchettes, distribuées aléatoirement dans la région de la cible, le rapport de celles qui ont touché sur le nombre total vous permettra de déduire la surface de la cible par rapport à celle du mur, donc le diamètre de la cible. Le problème est que, selon le type de fléchette utilisé (neutron, proton, électron), les résultats varient quelque peu. Mais ici, l'ordre de grandeur nous suffit.

Quand à l'électron, on ne sait pas trop quelle est sa taille exacte, car on manque de moyens pour le mesurer. Mais on sait qu'il est plus petit que $10^{-18}$ m, soit $10^{-3}$ fm. L'électron est 1.000 fois plus petit que le noyau, et $10^{8}$ (cent millions de) fois plus petit que l'atome...

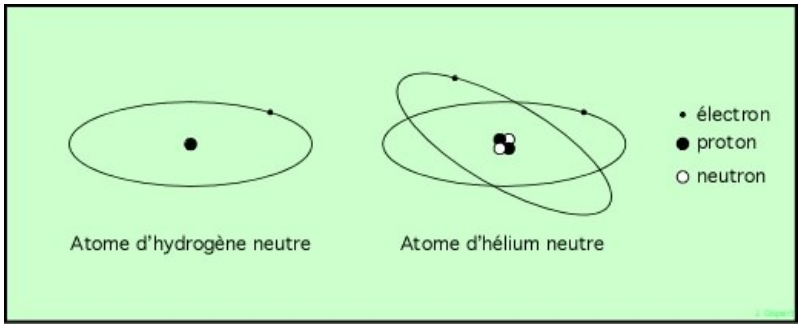
> Si le noyau d'un atome d'hydrogène (un proton) mesurait 1 mm de diamètre (une tête d'épingle), l'électron mesurerait moins d'un micromètre (une bactérie), et tournerait autour du proton à 100 m.
>
> A cette même échelle, le noyau aurait une masse de 170 millions de tonnes, l'électron de 9.000 tonnes.

Une conséquence de ces valeurs est que l'atome est totalement vide ! Le volume étant proportionnel au cube du rayon, et le rapport entre le diamètre du noyau et celui de l'atome étant de $10^{-5}$, le rapport de leurs volumes est de $(10^{-5})^3 = 10^{-15}$ soit 1 millionième de milliardième. Ou encore 99,9999999999999 % du volume de l'atome est vide...

L'analogie ci-dessus donne à réfléchir : tout l'équilibre de la matière qui nous entoure, et dont nous sommes faits, est réalisé par les électrons, qui sont tellement petits. La stabilité d'une naine blanche aussi repose sur eux... Petits, mais efficaces !

**Représentation d'un atome**

Schéma des deux atomes les plus simples et les plus légers (isotopes les plus courants) :




Représentation de deux atomes à l'aide du modèle planétaire

Evidemment, les proportions ne sont pas respectées, et de loin ! Ces schémas représentent le modèle planétaire de l'atome de Bhor. Conçu avant la Mécanique Quantique, ce modèle classique permet de bien représenter les niveaux d'énergie électronique de l'hydrogène, qui expliquent très bien son spectre, depuis l'infrarouge jusqu'à l'ultraviolet. La représentation d'orbites bien définies est fausse en Mécanique Quantique, mais bien pratique pour la compréhension.

**Cortège électronique**

C'est le nom que l'on donne à l'ensemble des électrons qui, liés à un noyau, assurent la neutralité de l'atome. Il est responsable des propriétés

chimiques des atomes, et aussi de nombreuses propriétés physiques, comme la fluorescence. L'étude de l'atome complet, avec ses électrons, ne fait pas partie au sens strict de la physique nucléaire. Elle est traitée dans le chapitre consacré à la lumière.

**Stabilité**

D'où vient la stabilité de ces structures ? Pourquoi les nucléons restent-ils ensemble, et pourquoi les électrons s'attachent-ils aux noyaux ? Parce qu'il existe des forces qui les réunissent.

Historiquement, la notion de force a été introduite par Newton pour expliquer que le Soleil attire la Terre, et lui permet ainsi de rester en orbite autour de lui. Cette notion de force, assez anthropomorphe, est tombé en désuétude. Elle a eu sa part dans les tentatives d'explication du monde, mais elle paraîssait un peu mystérieuse par son **action à distance et instantanée**. Elle est remplacée aujourd'hui par la notion relativiste d'*interaction*, qui est portée par un *champ*, lequel se propage à vitesse finie (celle de la lumière) par des ondes. Un champ matérialise la présence, en chaque point de l'espace, de l'influence de la source de l'interaction.

Nous allons donc voir quelles sont les interactions en cause. Elles sont au nombre de quatre.

**Interaction électromagnétique**

Depuis l'Antiquité, l'interaction électromagnétique est connue, sous ses deux formes : l'aimant naturel (*magnétite*, $Fe_3O_4$), capable d'attirer le fer, et l'ambre (*elektron* en grec) qui, frotté, attire les corps légers comme des poussières. L'aimant agit par *l'interaction magnétique*, l'ambre par *l'interaction électrique*. Ces deux formes, pourtant fort dissemblables en apparence (l'aimant naturel n'a pas d'action sur l'ambre), ont été unifiées par Maxwell, qui en a fait *l'interaction électromagnétique*. La justification de cette unification est donnée par le moteur électrique, la dynamo, etc. Dans le moteur électrique, un courant (électricité) produit un champ magnétique (magnétisme) qui donne la force motrice ; dans la dynamo, c'est un aimant qui tourne à l'intérieur d'une bobine de fil électrique ; le champ magnétique variant à cause de la rotation, induit un courant électrique dans le fil. Donc, courant électrique et champ magnétique s'induisent l'un l'autre.

L'interaction électromagnétique a été étudiée à propos de la lumière, et vous pouvez vous y reporter. Elle agit entre particules portant une charge électrique, c'est-à-dire protons et électrons (il existe d'autres particules chargées). C'est elle qui maintient les électrons autour du noyau, en nombre égal à celui des protons, ce qui assure la neutralité électrique de l'atome.

**Interaction forte**

Pour expliquer la liaison durable entre les nucléons, il faut une interaction qui agisse tout aussi bien sur les neutrons que sur les protons.

Les neutrons étant neutres, l'interaction électromagnétique ne convient pas. La gravité est bien trop faible, nous le verrons plus loin. On doit donc invoquer une interaction spécifique, possédant des propriétés très particulières : dans un noyau d'hélium, il y a deux protons pratiquement collés l'un à l'autre. Les deux protons portant chacun une charge électrique positive, se repoussent très violemment. Ils devraient par conséquent s'éloigner brutalement. Pour que ce ne soit pas le cas, l'interaction qui les colle doit être beaucoup plus forte, d'où son nom d'*interaction forte*. Elle doit agir indifféremment sur les protons et les neutrons, puisque ces derniers sont fixés dans le noyau. Mais pour que le noyau d'hélium soit stable, il faut ajouter au moins un neutron, qui participe à l'interaction forte et retient les deux protons, sans augmenter leur répulsion puisqu'il est neutre. Sans lui, ils se sépareraient. C'est pourquoi l'hélium 2 (2 protons, pas de neutrons) n'existe pas.

> L'interaction forte est beaucoup plus forte que l'interaction électromagnétique&,nsp;: $10^{37}$ fois plus ! Ce nombre est inimaginable... 10 milliards de milliards de milliards de milliards. C'est pour cette raison qu'il est infiniment plus facile de provoquer une réaction chimique (de nature électromagnétique) qu'une réaction nucléaire (mettant en jeu l'interaction forte) : ça demande d'autant moins d'énergie

Si l'interaction forte portait à grande distance, tous les nucléons devraient se réunir en un seul noyau atomique ! l'Univers serait un trou noir... Ce n'est manifestement pas le cas, et ceci ne s'explique qu'en admettant que l'interaction forte est à *très courte portée*. En fait, son domaine d'influence ne dépasse pas les dimensions du noyau atomique, car c'est justement lui qui les fixe : si la portée de l'interaction forte était plus grande, les noyaux atomiques seraient plus gros !

L'interaction forte est donc très forte à moins d'un fermi ($10^{-15}$ m), mais pratiquement inexistante au-delà.

> Le diamètre d'un noyau atomique se mesure par un petit nombre de fermis, une douzaine pour les plus gros.

Cette courte portée a deux implications importantes :

- la prédominance de l'interaction forte sur la répulsion électromagnétique ne fonctionne qu'à **très** courte distance. Si on met plusieurs protons dans un même noyau, puisqu'ils ne peuvent pas être tous au même endroit, leur distance deux à deux augmente, donc l'interaction forte entre eux diminue pour les plus éloignés. La répulsion électromagnétique diminue aussi, mais beaucoup moins vite ! Elle finira donc par prendre le dessus. On envisage donc une limite à la solidité des noyaux. Cette limite se manifeste de deux façons différentes :
  - d'abord par la limitation du poids des atomes, le plus lourd n'ayant que 92 protons (uranium naturel) ;
  - ensuite par la rupture spontanée de certains noyaux, c'est la radioactivité.
- la seconde concerne l'énergie des étoiles. La répulsion électromagnétique rend très difficile la fusion en maintenant éloignés les protons. Ainsi, il est difficile pour deux noyaux légers de se coller pour former un noyau plus lourd. C'est en partie ce qui permet à une étoile de vivre longtemps au lieu d'exploser immédiatement après sa formation.

Nous reviendrons plus loin sur l'interaction forte, dont les propriétés sont assez surprenantes, et dont l'explication met en jeu des éléments que nous verrons bientôt.

**Interaction faible**

On observe des transformations de particules : par exemple, la désintégration du neutron citée plus haut : $n \rightarrow p + e^- + \nu'_e$ (où $\nu'_e$ est l'antineutrino électronique). Le neutron étant électriquement neutre, il n'y a pas de charge électrique avant la réaction, c'est-à-dire à gauche de la flèche. Il ne doit pas y en avoir non plus à droite, pour satisfaire au principe fondamental de conservation de la charge. Or le proton qui remplace le neutron porte une charge positive. Celle-ci doit donc être annulée par une charge négative de même valeur absolue -e. C'est la création d'un électron qui y pourvoit. Dans cette désintégration, on peut faire aussi le bilan énergétique. Et là, ce fut la catastrophe ! Le bilan n'était pas équilibré, on trouvait plus d'énergie avant la réaction qu'après. Où était passée la différence ? La conservation de l'énergie est un autre principe fondateur de la physique, et il doit être respecté. Alors, Wolfgang Pauli a eu l'idée de concevoir une nouvelle particule, qui emporterait l'énergie manquante. Cette particule devait être électriquement neutre, puisque l'équilibre électrique est déjà réalisé. D'autre part, le bilan des masses montrait un équilibre entre les deux termes de la réaction, donc la masse de cette nouvelle particule devait être, sinon nulle, tout au moins extrêmement faible, plus faible que les erreurs de mesure. Cette particule a été nommée *neutrino* (petit neutre), par Enrico Fermi. C'est le $\nu'_e$ de la réaction précédente.

Mais cette réaction couramment observée, posait un problème de fond : ni l'interaction électromagnétique, ni l'interaction forte n'explique ces changements. Il fallait invoquer une nouvelle interaction, nommée *interaction faible*, car les mesures ont montré qu'elle était encore plus faible que l'interaction électromagnétique. Elle intervient dans toutes les réactions où figurent des électrons et des neutrinos.

**Interaction gravitationnelle**

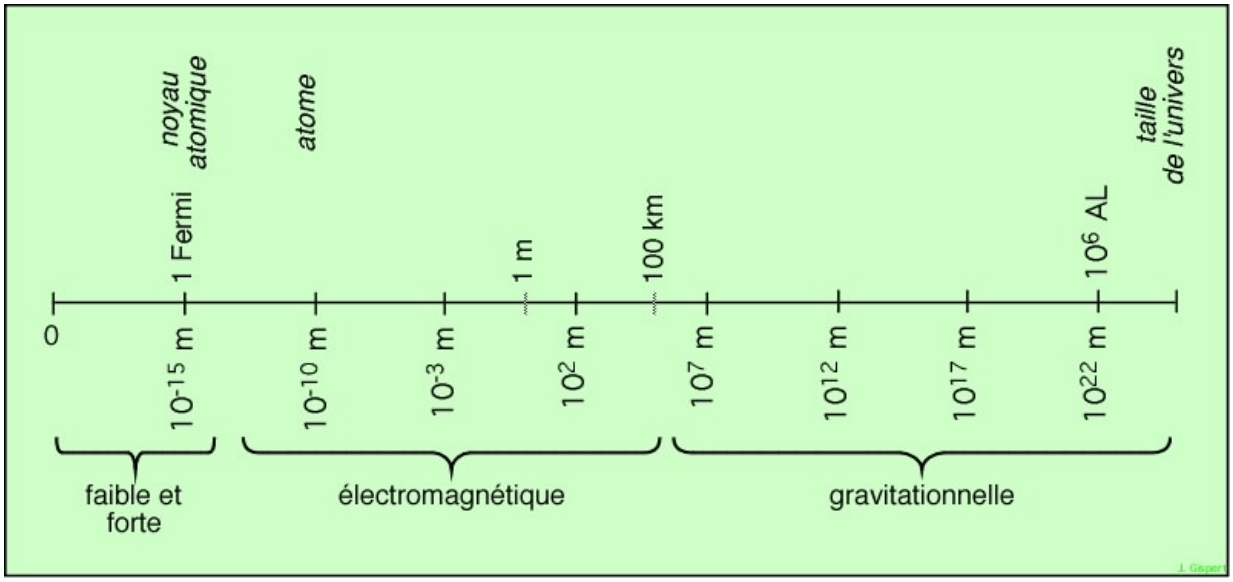
La quatrième interaction est connue depuis toujours, mais sans le savoir, comme la prose de Mr Jourdain : la gravité qui nous retient au sol est tellement naturelle et évidente, que peu de gens imaginent qu'il faut une force pour nous maintenir ainsi au sol.

L'interaction électromagnétique et la gravitation présentent une caractéristique commune : elles ont une **portée infinie**. Les deux sont additives. Si on place deux électrons au lieu d'un, on obtient une force électromagnétique double. Deux planètes attirent deux fois plus qu'une seule. Mais elles diffèrent aussi par leur intensité : l'interaction gravitationnelle est $10^{34}$ fois plus faible que l'interaction électromagnétique. Pour elle, l'union fait vraiment la force ! Tous les atomes qui constituent le Soleil s'unissent pour créer une force gravitationnelle capable d'enchaîner toutes les planètes... Une raison est que **les masses sont toutes positives** ! Elle s'additionnent, et **ne se neutralisent pas**, alors que les charges électriques présentent deux signes, l'un annulant l'autre. **Bien qu'elle soit de portée infinie, l'interaction électromagnétique est limitée par la neutralité de la matière**.

L'interaction gravitationnelle est tellement faible, qu'elle n'a strictement aucune influence sur les particules élémentaires, au niveau microscopique. Au niveau astronomique et cosmologique par contre, elle est la seule sensible, car son aspect additif prend le pas sur toutes les autres (d'ailleurs, la portée des autres est négligeable, car les deux interactions nucléaires forte et faible ont une portée très courte, et l'électromagnétisme a une portée infinie, mais limitée pratiquement par la neutralité globale de la matière).

> Dans cette remarque, on voit poindre les distinctions entre les domaines :
>
> - **microscopique**, où les interactions électromagnétique, faible et forte sont reines et la gravité négligeable, et
> - **macroscopique**, où c'est exactement l'inverse, et où la gravité règne sans partage.

Ces 4 interactions sont les seules nécessaires pour expliquer toute la physique actuelle, depuis les particules jusqu'à l'Univers dans son ensemble (et ceci jusqu'à preuve du contraire).




Portée des interactions

**Chimie / Physique nucléaire**

Les *réactions chimiques* consistent à coller des **atomes complets**, la colle étant l'*interaction électromagnétique*. Ce sont donc les **électrons** qui entourent le noyau qui sont responsables de la formation des molécules (agrégats d'atomes).

Par contre, les *réactions nucléaires* portent sur **les constituants des noyaux** (protons et neutrons). La force qui les lie est l'*interaction forte*.

La chimie se place donc à une échelle de distances 100.000 fois plus grandes que la physique nucléaire. Mais l'énergie mise en jeu est aussi très différente. L'énergie typique d'une réaction chimique se compte par un petit nombre d'électron-volts. Les réactions nucléaires jouent sur des MeV (millions d'électron-volts).

> Il est remarquable que la lumière du Soleil porte une énergie de l'ordre de l'eV, du même ordre que celle requise pour les réactions chimiques. Cette concordance permet la photosynthèse sans laquelle nous n'existerions pas !

**Fusion et fission**

La fusion construit des noyaux lourds à partir de noyaux plus légers (fusion de l'hydrogène, de l'hélium, du carbone...) ; la fission détruit des noyaux lourds pour restituer des noyaux plus légers (fission de l'uranium...).

La fusion de l'hydrogène donne 27 MeV par noyau d'hélium produit ; la fission de l'uranium donne de son côté 200 MeV par atome brisé. L'énergie nucléaire est donc des dizaines de millions de fois plus grande que l'énergie chimique.

Ces données ne doivent pas faire croire que la fission est plus énergétique que la fusion. Pour produire 27 MeV, la fusion utilise 4 protons, donc une masse de 4 $m_p$. Ce qui fait 27 / 4 = 6,75 MeV par nucléon (par unité de masse). Pour produire 200 MeV, la fission brise un atome d'uranium 235, de masse 235 $m_p$. Donc 200 / 235 = 0,85 MeV par nucléon seulement. Par unité de masse, la fusion de l'hydrogène produit donc 8 fois plus d'énergie que la fission de l'uranium.

Le tableau ci-dessous permet de comparer grossièrement les distances et les énergies dans les deux domaines, chimique et nucléaire (atomes pour la chimie, nucléons pour les noyaux atomiques). Les énergies de liaison sont aussi les énergies produites par les réactions :

| | **chimie** | **physique nucléaire** |
|---|---|---|
| **distance** | 100.000 fm | 1 fm |
| **énergie** | 1 eV | 100.000.000 eV |

**Particules d'interaction**

On a montré **expérimentalement** que la lumière est à la fois *corpusculaire* (le corpuscule est le *photon*, qui explique l'effet photoélectrique, le rayonnement du corps noir, la diffusion Compton...) et *ondulatoire* (l'onde électromagnétique, qui explique les interférences...). Pourquoi l'interaction électromagnétique serait-elle la seule à associer onde et corpuscule ? En fait, pourquoi toute interaction ne serait-elle pas portée par une particule spéciale ?

Ce pas a été franchi par Louis de Broglie : il a supposé que **toutes les particules ont une onde associée, et réciproquement**. Ce point de vue a l'avantage supplémentaire de limiter la vitesse de propagation de l'interaction. Puisque c'est une particule, elle ne peut se déplacer à une vitesse supérieure à celle de la lumière.

La *Mécanique Quantique*, basée sur ce principe, et la *Relativité*, sont les deux grandes théories physiques qui ont occupé les physiciens pendant tout le XX$^e$ siècle, et ce n'est pas fini.

> En application, l'onde associée à l'électron a permi de construire le *microscope électronique* : c'est l'onde de de Broglie de l'électron qui *éclaire* l'objet. La longueur d'onde des électrons dans un microscope électronique est de l'ordre de 3 pm (pico mètres) = 3 $10^{-12}$ m. Beaucoup plus courte que celle du photon, elle permet de voir des détails beaucoup plus petits. Malheureusement, il faut faire de l'optique à électrons, et celle-ci est moins bonne que l'optique visible. Le résultat est que, avec une longueur d'onde cent mille fois plus courte, on obtient une résolution pratique *seulement* 1.000 fois meilleure...

Chaque interaction se propage comme une onde, c'est ainsi qu'elle agit à distance, comme la lumière. Par analogie avec la lumière, et en suivant Louis de Broglie, on considère que les ondes qui portent les autres interactions ont aussi une particule associée, dite *médiatrice*. On aura donc deux types de particules : **les particules de matière, et les particules d'interaction**. Qu'est-ce qui les différencie ?

**Spin**

C'est une propriété que possèdent les particules, et que l'on associe, pour tenter de l'expliquer, à la rotation de la particule. Image qui trouve vite sa limite, mais qui a tout au moins donné un nom à cette propriété : le *spin*. La limitation vient du fait que le spin est *quantifié* -ce qui signifie qu'il ne peut prendre que certaines valeurs- par opposition à la Physique Classique, qui admettait pour toute propriété une continuité de valeurs.

> Si le spin était une vitesse de rotation, il pourrait prendre n'importe quelle valeur, comme 1,753 par exemple. C'est le cas pour une toupie, dont la vitesse diminue régulièrement et continuement.
>
> Mais le spin ne peut prendre comme valeurs que des entiers : 0, 1, 2,... -1, -2.... ou des demi-entiers : 1/2, 3/2 ... -1/2, -3/2 ...

Le spin différencie deux types de particules :

- les particules de spin demi-entier sont nommées *fermions*, et sont les particules de matière ;
- les particules de spin entier sont nommées *bosons*, et sont les particules d'interaction.

Le boson médiateur de l'interaction électromagnétique est le *photon*. Pour l'interaction faible, il y a trois bosons médiateursnbsp;: le $W^+$, le $W^-$ et le $Z^0$. Et pour l'interaction forte, il y a 8 *gluons* (explication plus loin).

Tous ces bosons ont été observés, leur existence est donc prouvée. Enfin, pour l'interaction gravitationnelle, le boson médiateur est le *graviton*, mais on n'a aucune preuve observationnelle de son existence. Il n'est pas étonnant que ce soit la dernière qui résiste, tels certains gaulois, puisqu'elle est associé à la moins intense de toutes les interactions. Théorisée par Einstein, dans la Relativité Générale, l'interaction gravitationnelle s'adapte à l'échelle macroscopique, mais non à l'échelle microscopique, car elle est incapable de modéliser les fluctuations de l'espace-temps qui s'y produisent.

## *Les deux grands principes de la Mécanique Quantique*

La Mécanique Quantique est surprenante, car à l'échelle microscopique des particules, la Nature n'a pas le même comporterment qu'à notre échelle macroscopique. Il est d'ailleurs possible que les notions que nous utilisons pour décrire les objets, découlant de notre expérience quotidienne, ne soient pas adaptés à la description des particules. Mais si c'est le cas, ce sera probablement l'avancée théorique qui nous permettra d'améliorer ces descriptions.

| |
|---|
| Le premier principe concerne l'observation d'une **particule isolée**,<br>alors que le second indique le **comportement collectif de particules identiques**. |

**Le principe d'incertitude d'Heisenberg**

On considère le montage des trous de Young. On lance des électrons en direction de l'écran percé, et on relève l'intensité du faisceau projeté sur un écran placé derrière. On y observe des franges d'interférence. Comment savoir si un électron particulier est passé par le trou du haut ou par celui du bas ? Imaginons qu'on l'éclaire avec une source lumineuse pour le voir passer. L'énergie du photon qui éclaire est h ν. Si elle est assez haute, elle nous renseigne précisément sur la position de l'électron, mais elle le perturbe (elle lui cède son énergie) et l'électron n'interférera plus : on sait d'où il vient, mais on ignore ce qu'il aurait fait si on l'avait laissé tranquille... Si on baisse l'énergie du photon, on baisse aussi la précision, la finesse de l'image. Lorsque la perturbation devient ainsi acceptable, on constate que l'image est assez floue pour qu'on ne sache plus par quel trou est passé l'électron ! Les interférences se produisent, mais on ne sait pas d'où il vient !!!

C'est cette théorie de la perturbation qui est à la base du principe d'incertitude : les moyens pour observer une particule microscopique la perturbent profondément. *A contrario*, sur un objet macroscopique, l'énergie cédée par quelques photons n'est en aucune manière capable de le perturber.

Le principe d'incertitude s'applique d'abord aux mesures de la position et de l'impulsion d'une particule (l'impulsion est le produit de la masse par la vitesse). Il stipule que :

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar$$

où Δx est la variation de position, et $\Delta p_x$ la variation d'impulsion (la relation s'applique pour le mouvement dans la direction x, et pour l'impulsion dans cette même direction). Ceci signifie que si on connait précisément x (Δx petit), alors on connait mal $p_x$ ($\Delta p_x$ grand, donc erreur sur la vitesse grande), et réciproquement. On ne peut connaître les deux simultanément avec une bonne précision. Mais les particules doivent obéir à cette règle : si on les rapproche, Δx diminue, et $\Delta p_x$ doit augmenter (autrement dit la vitesse doit augmenter, puisque p = m v). C'est ce qui explique la stabilité des naines blanches ou des étoiles à neutrons, l'augmentation de vitesse entraînant une augmentation de pression.

Principe d'incertitude d'Heisenberg

L'animation présente la courbe des valeurs *minimales* satisfaisant le principe d'incertitude, soit $\Delta x \, \Delta p_x$ = hBarre. Elle représente Δx = hBarre / $\Delta p_x$, ou bien $\Delta p_x$ = hBarre / Δx.

L'une des valeurs étant fixée, la valeur minimale de l'autre s'en déduit donc immédiatement, et se voit sur la courbe.

Deux curseurs, en bas de la fenêtre, permettent de choisir les valeurs de Δx ou $\Delta p_x$. Vous constaterez que toute variation imposée à l'un entraîne une variation de l'autre en sens inverse, de telle sorte que le produit $\Delta x \, \Delta p_x$ soit toujours égal à hBarre. Vous vérifierez cela en observant les valeurs données dans le haut de l'animation.

Par exemple, fixons Δx = 0,288. $\Delta p_x$ prend la valeur 3,467, telle que leur produit soit égal à 1. Pour que le principe d'incertitude soit satisfait, il faut que $\Delta p_x \geq 3{,}467$.

Les deux petits traits sur la courbe indiquent les valeurs de Δx (jaune) et $\Delta p_x$ (vert). Vous pouvez cliquer sur ces traits. Cliquez par exemple sur le jaune (Δx). Vous fixez Δx, et les valeurs de $\Delta p_x$ qui satisfont au principe d'incertitude correspondent à la partie de courbe dessinée en vert. Ce sont les valeurs de $\Delta p_x$ supérieures à la valeur minimale définie par le trait vert. Toute valeur de $\Delta p_x$ correspondant à la partie verte est

acceptable.

La contrainte $\Delta p_x \geq$ *valeur minimale possible* apparaît.

> Le principe d'incertitude explique pourquoi l'image de l'atome de Bhor, avec ses orbites bien définies, n'est pas correcte : si elle l'était, on connaîtrait simultanément la position et la vitesse de l'électron. Or le principe d'incertitude d'Heisenberg ne permet pas de connaître les deux à la fois, avec une grande précision. Il s'ensuit qu'une orbite au sens classique n'est pas définie. Sur une *orbitale* (mot qui remplace orbite), la position de l'électron peut être bien connue, mais alors sa vitesse l'est moins, ou réciproquement. On peut tenter de se représenter les électrons autour du noyau comme une sorte de nuage... flou.

**Remarque**

Le nom du principe est mal choisi. Il semble indiquer que l'on n'est pas capable de faire des mesures précises, et ce n'est pas le cas. Le problème est bien plus fondamental. Prenons un exemple compréhensible : nous voulons mesurer la fréquence d'une onde, par exemple le son d'une sirène. Pour mesurer la fréquence, il faut connaître l'intensité du son à **plusieurs** instants différents ! Plus la durée de la mesure est grande, plus grande est sa précision. Pour une durée très brève, nous devrons nous contenter d'une mesure grossière. Si vous voulez imager ceci, regardez une sinusoïde à travers une fente. Si la fente est large, vous en voyez beaucoup, et la mesure de la fréquence est facile. Si la fente est étroite, vous n'en voyez que très peu, et il faut imaginer le reste, ce qui rend la mesure bien moins précise. **Ce problème est donc inhérent aux ondes**, et puisque toute particule est décrite par son onde associée, elle est soumise à ce principe.

Mathématiquement, on considère deux grandeurs que l'on souhaite mesurer, et qui sont nommées *observables*. A chacune est associé, en Mécanique Quantique, un *opérateur* (fonction mathématique). Deux observables A et B sont dits *conjugués* si leurs opérateurs ne commutent pas : $AB - BA \neq 0$. C'est le cas entre autres de la position et de l'impulsion, du moment cinétique et de la position angulaire... C'est aussi le cas de l'énergie et du temps, mais pour une autre raison, car il n'existe pas d'opérateur correspondant au temps.

On préfère parfois nommer ce principe *principe d'indétermination*. Il est même élevé en théorème, car il se déduit logiquement des bases de la Mécanique Quantique.

Le principe d'incertitude s'applique aussi au domaine macroscopique, mais les limitations qu'il impose sont très très en-dessous des erreurs de mesures, même les plus précises. Il suffit, pour s'en persuader, de faire le calcul pour une voiture par exemple... Toutefois, des expériences très fines sont faites maintenant, et la vérification a pu être obtenue pour des objets aussi gros qu'une molécule de fullerène ($C_{60}$, formée de 60 atomes de carbone).

**Fluctuations du vide**

Imaginons que le vide soit, comme on le pensait à la fin du XIX$^{me}$ siècle, l'absence de toute chose (matière et énergie). Prenons un point quelconque dans ce vide. Puisqu'il n'y a rien, l'énergie y est, et y reste, nulle : $E = 0$ à tout instant. Entre deux instants quelconques $t_1$ et $t_2$, la variation d'énergie est donc $\Delta E = 0 - 0 = 0$. On peut faire des mesures aussi rapprochées que l'on veut, donc avec $t_2$ pratiquement égal à $t_1$. Alors, $\Delta T = 0$. Et le produit $\Delta E\ \Delta T$ est inférieur à hBarre !

Cette hypothèse d'espace totalement vide n'est donc pas possible : l'espace contient donc de l'énergie qui fluctue au cours du temps. En un point donné, l'énergie varie constamment. La conséquence immédiate est que, lorsqu'une fluctuation d'énergie est supérieure à la masse d'un couple particule-antiparticule, ce couple peut être créé. Mais pour respecter le principe d'incertitude, et permettre à l'énergie de retourner à une faible valeur, ce couple doit immédiatement s'anihiler en restituant son énergie de masse.

On conçoit donc aujourd'hui le vide quantique comme une mousse dans laquelle se créent et se détruisent constamment des paires de particules...

**Etat quantique**

L'état quantique d'une particule est défini par son énergie, son spin... toutes propriétés qui la caractérisent. Il traduit donc le fait que les particules obéissent à la statistique correspondant à leur type : statistique de Fermi-Dirac pour les fermions, de Bose-Einstein pour les bosons.

> La Mécanique Statistique décrit un gaz comme un ensemble de particules, dont elle détermine les propriétés macroscopiques (pression, masse volumique...), par l'application des lois physqiues, essentiellement de la Mécanique Quantique, sur ses composants microscopiques. La thermodynamique, théorie empirique, est ainsi retrouvée à partir de concepts bien plus fondamentaux.
>
> Pour apréhender un très grand nombre de particules, il est impossible de représenter et de mettre en équation les paramètres de chacune d'entre elles. On caractérise alors par exemple, dans un gaz, la proportion d'atomes ou de molécules (les constituants) possédant à tout instant une certaine vitesse. La théorie détermine ainsi quelle proportion d'atomes possède une vitesse donnée.
>
> Pour les photons, on peut déterminer de cette manière combien d'entre eux ont une énergie donnée, dans un milieu à la température T. Ils se comportent collectivement selon la *statistique de Bose-Einstein*. A partir de là, le physicien indien Satyendra Nath Bose a retrouvé la loi du rayonnement du corps noir (loi de

| |
|---|
| Planck). |

Les photons sont des bosons, et peuvent donc marcher au pas (statistique de Bose-Einstein) : l'application la plus connue est le laser. Dans un rayon laser, tous les photons ont exactement la même couleur, et sont en phase. Lorsque des bosons se mettent tous dans le même état, on parle de *condensation de Bose-Einstein*. L'association de "condensation" et de "Bose" dans cette locution peut aider à mémoriser la distinction entre les deux statistiques.

| | | | |
|---|---|---|---|
| Sur le plan mathématique, la différence entre bosons et fermions vient d'une symétrie. L'onde associée à une particule (onde de de Broglie) est décrite par une fonction d'onde $\Psi$, déterminée par Schrödinger. Pour deux particules identiques x et y, et deux points $p_1$ et $p_2$, la fonction est $\Psi(x, y)$. Le carré de sa norme $\|\Psi(x, y)\|^2$ donne la probabilité de trouver x en $p_1$, et y en $p_2$. $\|\Psi(y, x)\|^2$ donne la probabilité de trouver y en $p_1$, et x en $p_2$. Puisque les particules sont **identiques**, ces probabilités sont égales : $\|\Psi(x, y)\|^2 = \|\Psi(y, x)\|^2$. Cette égalité se réalise dans deux cas différents : | | | |
| $\Psi(x, y) = \Psi(y, x)$ | la fonction d'onde est symétrique | bosons | spin entier |
| $\Psi(x, y) = - \Psi(y, x)$ | la fonction d'onde est antisymétrique | fermions | spin demi-entier |
| Le lien entre le spin et la statistique est démontré par le *théorème spin-statistique*, qui est de nature relativiste (dans la théorie non-relativiste décrite par l'équation de Schrödinger, le spin est indépendant de la statistique, ce que l'expérience ne confirme pas). Il n'y a pas d'explication simple à donner. Il faut l'admettre. | | | |

La fonction d'onde symétrique signifie qu'on peut échanger deux particules (identiques) sans changer les propriétés globales. C'est le cas dans un rayon laser où tous les photons jouent exactement le même rôle. Par contre, si on échange deux fermions, la fonction d'onde étant antisymétrique, le signe du résultat est changé, et certaines propriétés physiques sont modifiées également.

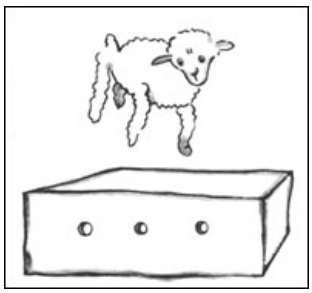
**Principe d'exclusion de Pauli, comportement des particules**

Le comportement collectif des bosons et des fermions est fondamentalement différent, et présente une **importance capitale** en astrophysique.

- Les bosons, particules d'interaction, ont un comportement grégaire : comme des moutons, ils se placent de préférence tous dans le **même état quantique**.
- Les fermions, particules de matière, sont individualistes : pas question pour eux de se mettre dans le même état.

S'il vous plait, dessine-moi un *boson* !

*Le Petit Prince*, Antoine de Saint Exupéry (presque...)



Dans le monde microscopique des particules, il n'est donc pas possible de définir exactement ce que fera une particule. On peut seulement donner la probabilité qu'elle ait un comportement déterminé. Chaque type de particule obéit ainsi à une *loi statistique* particulière. Et les lois associées aux bosons et aux fermions sont radicalement différentes. Ces deux lois statistiques portent les noms des physiciens qui les ont découvertes :

| | | |
|---|---|---|
| **bosons** (interaction) | spin entier | *statistique de Bose-Einstein* |
| **fermions** (matière) | spin demi-entier | *statistique de Fermi-Dirac* |

On dit que les particules de matière obéissent à la statistique de Fermi-Dirac, alors que les particules d'interaction obéissent à la statistique de Bose-Einstein.

Le **principe d'exclusion de Pauli** stipule que :

| |
|---|
| Deux fermions ne peuvent pas se trouver dans le même état quantique |

**Remarque importante** : le principe d'exclusion s'applique pour des particules ayant le **même état quantique**. En particulier donc, il ne s'applique qu'à deux fermions IDENTIQUES. Par exemple, à deux protons, à deux neutrons, mais pas à un proton et un neutron, qui sont des fermions différents. Par exemple, on peut très bien grouper deux protons et deux neutrons, pourvu que *chaque paire* soit dans un état de spin différent. C'est la particule alpha, noyau d'hélium (un proton de spin up, un proton de spin down, un neutron de spin up, un neutron de spin down). Et cette propriété assure sa grande stabilité, puisque ses quatre composants sont tous dans l'état d'énergie minimum !

**Pression de Fermi**

Lorsque deux fermions identiques (deux protons, ou bien deux neutrons, ou bien deux électrons...) se trouvent au même endroit (même position, $\Delta x$ négligeable), ils ne peuvent y rester. En effet, s'ils restent proches, c'est que leur vitesse relative est négligeable, donc que $\Delta p_x$ est proche de 0. Alors, le produit $\Delta x \, \Delta p_x$ est inférieur à hBarre, violant le principe d'incertitude. Pour le respecter, il faut que $\Delta p_x$ soit très grand, donc que la vitesse relative soit très grande. Par conséquent, l'un des deux fermions s'échappe à grande vitesse de l'autre, vitesse d'autant plus élevée que la proximité était grande. Et dans cette fuite, il heurte d'autres particules, auxquelles il confère une vitesse. Ceci produit donc une pression, nommée *pression de Fermi*.

La propriété remarquable de la pression de Fermi, est son **indépendance de toute source d'énergie** : elle est produite par un principe quantique, qui dépend de la nature des particules seulement. Elle est donc éternelle, pour autant que les particules elles-mêmes le soient.

La pression de Fermi explique la stabilité des naines blanches et des étoiles à neutrons : les naines blanches sont stabilisées par la pression de Fermi des électrons, les étoiles à neutrons par celle des neutrons, ces deux types de particules étant des fermions. Une fois le stade de naine blanche atteint, l'étoile n'a plus besoin d'énergie pour maintenir son équilibre contre la gravité : elle est devenue éternelle. Il en est de même des étoiles à neutrons, qui sont bien plus condensées que les naines blanches, et dont l'équilibre est assuré par les neutrons, beaucoup plus lourds que les électrons.

Mais la pression de Fermi a des limites : c'est la vitesse des fermions qui l'assure, et celle-ci ne peut en aucun cas dépasser ni même atteindre celle de la lumière. Plus la gravité écrase, plus les fermions se rapprochent, et plus leur vitesse augmente. Si la gravité devient assez forte pour que les neutrons approchent la vitesse de la lumière, la rupture n'est pas loin. La masse maximum d'une étoile à neutrons est donc celle pour laquelle le principe d'incertitude amène les neutrons exactement à la vitesse de la lumière. Au-delà, la pression de Fermi ne peut plus augmenter, et l'écrasement de l'étoile est inéluctable : elle devient un trou noir.

Dans les naines blanches, ce sont les électrons qui atteignent la limite de pression lorsqu'ils approchent la vitesse de la lumière. Mais une naine blanche qui s'effondre a encore la ressource de freiner l'écrasement par les neutrons... La masse maximale d'une naine blanche est la masse de Chandrasekhar.

**Particules composées**

Nous avons considéré jusque là des particules isolées. Si on considère maintenant des associations de plusieurs particules simples, comme par exemple un noyau d'hélium, que pourrait-on dire de leur comportement ? La règle est simple :

> Une particule composée est un **fermion** si elle comprend un **nombre impair de fermions** et un **nombre quelconque de bosons**. Sinon, c'est un boson.
>
> Ceci est facile à comprendre si on envisage la fonction d'onde de la particule composée, qui s'obtient par l'association des fonctions d'onde des constituants : pour chaque fermion ajouté, elle change de signe. Donc, s'il y en a un nombre impair, le signe résultant sera changé (la particule sera donc un fermion), inchangé sinon (ce sera un boson). Et pour chaque boson, le signe est conservé, il peut donc y en avoir un nombre quelconque.

Conséquences :

- les noyaux atomiques à **nombre pair** de nucléons (qui sont des fermions) sont des **bosons** ;
- les noyaux atomiques à **nombre impair** de nucléons sont des **fermions**&nbhsp;;
- en particulier, le noyau d'hélium 3 est donc un fermion ; celui d'hélium 4 est un boson.

C'est Einstein qui a découvert ces conséquences. Il en a déduit que ces particules, refroidies, devraient se retrouver toutes dans un même état quantique (condensation de Bose-Einstein). Ceci a été vérifié plus tard sur l'hélium 4 qui, au-dessous de 2,18 Kelvins, est superfluide. L'hélium 3 étant un fermion, ne peut être superfluide.

**Antiparticules**

Paul Dirac a réécrit l'équation de Schrödinger (l'équation qui donne la fonction d'onde en Mécanique Quantique) pour la rendre relativiste. Lorsqu'il a cherché les solutions de son équation (énergie), Dirac a trouvé que **le carré** de l'énergie avait une certaine valeur $E^2 = v$. Alors, l'énergie vaut $E = \pm \sqrt{v}$, soit deux valeurs de signe opposé ($E = +\sqrt{v}$, $E = -\sqrt{v}$). La solution négative correspondait à l'électron, mais la solution positive ne correspondait apparemment à rien. Dirac a imaginé qu'il existe une particule semblable à l'électron, mais de charge positive. Il l'a nommée *positron* (ou *positron*), ou anti-électron.

> Le positron a été découvert expérimentalement peu après par Anderson.
>
> Dans certaines réactions, un positron est émis. S'il est pris dans un champ magnétique, il parcourt une trajectoire circulaire, comme l'électron, mais à l'envers. Ce sens opposé permet de déterminer sa charge positive.
>
> Le même rayon de sa trajectoire (à la même énergie bien sûr) montre par ailleurs qu'il a la même masse.

Dirac a généralisé son idée en supposant que toute particule pourrait avoir son antiparticule. La suite lui a donné raison.

La caractéristique essentielle d'un couple particule-antiparticule et de pouvoir s'annihiler : lorsqu'elles se rencontrent, elles disparaissent, et laissent à leur place une paire de photons. Pour que l'énergie soit conservée, il faut que l'énergie des deux photons représente la somme des masses des deux particules. C'est l'équation d'Einstein $E = m c^2$ qui en rend compte. Prenons l'exemple courant de l'électron : sa masse, égale

à celle du positron, est de 511 keV/$c^2$. L'anihilation d'une paire électron-positron donne deux photons tels que E = h ν = 511 keV. Des annihilations de ce genre se produisent dans l'Univers, car des positrons sont produits dans certaines réactions énergétiques. Lorsqu'un positron rencontre un électron (qui sont partout), ils s'annihilent et produisent deux photons de 511 keV. On les observe effectivement. Réciproquement, si on dispose d'une énergie au moins égale à cette valeur, il est possible de créer une paire électron-positron.

On note que, lorsqu'un électron et un positron s'annihilent, la charge négative du premier, et la charge positive du second, s'annulent : -e + e = **0**. Si la charge d'une particule est nulle, elle peut être sa propre anti-particule puisque -0 + 0 = **0**. Le photon par exemple, particule neutre, est sa propre anti-particule.

**Dans le cas des fermions**, on parle de *particule de Majorana* (du nom d'Ettore Majorana) pour ceux qui sont leur propre antiparticule ; ou bien de *particule de Dirac*, pour celles dont l'antiparticule est distincte. A l'heure actuelle, on ne connait pas de particules de Majorana (le photon est un boson et non un fermion, il n'est donc pas concerné par cette dénomination). Pour le neutrino, on ignore laquelle de ces deux catégories lui convient.

**Constitution des nucléons**

En bombardant des protons à l'aide d'électrons de haute énergie dans un accélérateur de particules, on a pu découvrir que les protons montraient des points durs, et n'étaient pas d'une seule pièce. Cette expérience à mis en lumière l'existence d'un nouveau type de particules, nommées *quarks*. Un proton en contient trois (les neutrons également). Les quarks sont bien plus petits que le proton. Ce qui fait que le noyau de l'atome est lui-même pratiquement vide, puisque constitué de nucléons vides... A l'heure actuelle, on considère que les quarks sont des particules élémentaires (particules qui n'ont pas de structure).

Le nom *quark* a été donné par Murray Gell-Mann, qui les a imaginés, d'après une citation de James Joyce

"Three quarks for Muster Mark !
Sure he has not got much of a bark
And sure any he has it's all beside the mark"

Finnegans Wake, James Joyce

Les *quarks* sont des particules élémentaires massives, qui composent de nombreuses particules. Murray Gell-Mann en a défini les propriétés de telle manière que leurs associations donnent les propriétés observées des particules composées : masse, charge électrique, spin... (si la ville est rose, on peut en déduire que les briques dont elle est construite sont elle-mêmes roses, même si on est trop loin pour les voir). Pour former les protons et neutrons, il a dû considérer qu'il existait deux types de quarks, qu'il a nommés *up* (u) et *down* (d), sans quoi protons et neutrons auraient été identiques. Le proton est alors la combinaison de deux quarks up et d'un down (*uud*), le neutron d'un up et de deux down (*udd*).

Pour que le spin des protons et neutrons soit 1/2 (ce sont des fermions), il fallait que le spin des quarks soit aussi 1/2. Remarquez que le proton contient deux quarks identiques et un différent. Il suffit que les deux quarks identiques puissent se placer avec leurs spins anti-parallèles (spins +1/2 et -1/2) pour que l'assemblage satisfasse au principe d'exclusion, et obtenir le bon spin.

Pour la charge électrique, il a fallu considérer des charges fractionnaires :

Soit u la charge du quark up, d celle du quark down. La charge du proton sera donc u + u + d = 2u + d. Or la charge du proton vaut +e. Donc on a d'abord : 2u + d = +e.

La charge du neutron est : u + d + d = u + 2d. Mais cette charge est nulle, donc : u + 2d = 0.

On en déduit immédiatement que u = -2d, ce qu'on reporte dans la première équation : 2 (-2d) + d = +e.

-4d + d = -3d = +e.

D'où d = -e / 3. C'est la charge du quark down.

Reportant dans la seconde équation par exemple, il vient : u + 2(-e/3) = 0 ; donc u = 2e / 3. C'est la charge du quark up.

On avait dit que la charge de l'électron était élémentaire, ce qui signifie qu'on ne peut pas la diviser. Si on définit des charges fractionnaires, on se met quelque peu en contradiction. Mais le confinement des quarks lève cette contradiction, puisqu'on ne peut pas observer directement les charges fractionnaires (voir plus bas).

Continuons notre exploration. Dans leurs multiples expériences, les physiciens avaient découvert deux particules, nommées $\Delta^{++}$ et $\Delta^{-}$. Comme leurs noms l'indiquent, la première porte une charge +2e, la seconde une charge -e. Mais leur spin vaut 3/2. Il faut les définir par des quarks. Ceci est facile, et sert de justification à la théorie :

Le $\Delta^{++}$ est constitué de trois quarks u (charge électrique 3 × 2e/3 = 2e), le second est formé de trois quarks d (charge électrique 3 × (-e / 3) = -e).

Toutefois, l'existence de ces deux particules pose un véritable problème : pour obtenir le spin 3/2, il faut considérer que les trois quarks ont leurs spins parallèles (3 fois 1/2 = 3/2). Mais alors, ce sont trois fermions identiques, dans le même état quantique ! En violation apparente avec le principe d'exclusion. Pour sauver la théorie, il faut donc introduire une nouvelle charge, qui sera différente pour les trois quarks. On la nomme *charge de couleur*, et on lui donne les valeurs *rouge*, *vert* et *bleu*. Ainsi, dans ces particules, les trois quarks doivent obligatoirement être de trois couleurs différentes, et le principe d'exclusion est préservé.

Ceci semble un peu magique, mais la suite des travaux a parfaitement vérifié cette vision des choses, et même étendu la porté de l'explication. C'est la charge de couleur qui rend les quarks **sensibles à l'interaction forte**.

Ces couleurs n'ont rien à voir avec la notion habituelle, les particules considérées étant bien plus petites que la longueur d'onde de la lumière, mais elles ont été définies par analogie, car leur somme est neutre : bleu + vert + rouge = blanc (ce qui veut dire sans couleur, donc **neutre vis-à-vis de l'interaction forte**).

Les antiquarks portent des anticouleurs *anti-bleu*, *anti-vert*, et *anti-rouge*. Une couleur et son anti-couleur donnent également du blanc. Comme le + est l'opposé du -, l'anticouleur est l'opposé de la couleur. On pousse parfois l'analogie à l'équivalence anti-bleu = *jaune*, anti-vert = *magenta*, et anti-rouge = *cyan*.

**Interaction nucléaire**

C'est la charge de couleur qui permet l'interaction forte, elle agit sur les quarks et elle est à très courte portée. Puisque les protons et neutrons sont blancs, ils sont neutres vis-à-vis de l'interaction forte, et ne devraient pas y être sensibles... Ils ne devraient pas se coller pour former les noyaux. Mais dans un proton, les trois quarks ne produisent pas une symétrie sphérique : les quarks du proton voisin (ou du neutron), sont plus proches de l'un des trois, et de ce fait la force que celui-ci exerce sur eux est plus importante ; c'est ce résidu d'interaction forte qui produit la force attractive entre protons et neutrons, et assure la cohésion du noyau.

C'est aussi ce résidu qui a été étudié en premier, bien avant de découvrir les quarks. On l'appelle souvent *interaction nucléaire*, puisqu'elle porte sur les nucléons vus globalement. Le potentiel qui traduit cette action résiduelle, *potentiel de Yukawa*, a été décrit en 1935 par Yukawa. Il est de la forme :

$$V(r) = -C\,\frac{e^{-mr}}{r}$$

C est la constante de couplage de l'interaction. Le terme en r est positif, l'exponentielle aussi, la constante de couplage aussi, donc le signe - placé devant C indique que le potentiel est négatif, et que la force qui en dérive est attractive. m est la masse de la particule qui porte l'interaction.

Quand r = 0, l'exponentielle vaut 1, quelle que soit la masse m. Pour m > 0 et r > 0, l'exposant étant négatif, l'exponentielle tend vers 0 lorsque r croît. Et ce d'autant plus vite que m est plus grande. La valeur de r pour laquelle elle devient négligeable dépend de m, et définit la portée de l'interaction. Au-delà, l'interaction n'agit plus. Si m = 0 (l'exponentielle vaut alors 1), la portée de l'interaction est infinie, et l'on retrouve un potentiel de nature coulombienne (en 1/r). L'exponentielle est donc un terme d'amortissement, qui affaiblit le terme C / r lorsque r augmente.

## *Propriétés essentielles des quarks*

Pour résumer, nous avons vu que les quarks ont un spin qui vaut 1/2, donc :

| Les quarks sont des fermions |
|---|

D'après la règle énoncée plus haut, un groupement de trois fermions est aussi un fermion. Donc, les nucléons (tois quarks) sont des fermions *parce que* les quarks en sont !

Le nom de couleur vient des propriétés d'association, qui se résument par :

| Tout assemblage de quarks doit être blanc |
|---|

Ces deux règles permettent d'envisager les compositions possibles. On obtient du blanc par mélange des trois couleurs, donc par association de trois quarks ou de trois antiquarks (qui donneront une anti-particule), mais aussi avec un quark et un antiquark, portant deux couleurs complémentaires : bleu et anti-bleu par exemple.

- Les associations de trois quarks, portant chacun une couleur différente ; proton et neutron sont ainsi constitués ; combinaisons de trois fermions, ce sont donc aussi des fermions ;
- Les associations d'un quark de couleur c, et d'un anti-quark de couleur anti-c ; combinaisons d'un nombre pair de quarks, ce sont des bosons (règle d'association vue plus haut) ;
- La théorie prévoit des tétraquark (deux paires quarks-antiquarks), et des pentaquark (trois quarks, plus une paire quark-antiquark). Ils sont également blancs, mais non encore observés.

En dehors de la classification en bosons et fermions, qui est définie par le spin, on utilise une **autre classification**, définie par la masse. Elle subdivise le même ensemble de particules en :

- Les combinaisons quark-antiquark, nommées *mésons* (du grec *mesos* signifiant moyen, intermédiaire) ;
- Les combinaisons de trois quarks, nommés *baryons* (du grec *barys* = lourd).

Ce sont les baryons qui constituent notre matière, la *matière baryonique*. Lorsqu'on parle de *matière non baryonique*, on envisage donc l'existence de particules non formées de quarks, mais qui présenteraient une masse, et qui expliqueraient la matière noire.

Les particules constituées de quarks, donc les baryons et les mésons, sont nommées collectivement *hadrons* (du grec *hadros* = fort). Comme leur nom l'indique, ce sont celles qui ressentent l'*interaction forte*, ou *interaction de couleur*.

**Résumé** :

<table>
<tr><td rowspan="4">hadrons<br>interaction forte</td><td>baryons<br>part. lourdes</td><td>3 quarks</td><td>bleu + vert + rouge<br>anti-bleu + anti-vert + anti-rouge</td></tr>
<tr><td rowspan="3">mésons<br>part. de masse moyenne</td><td rowspan="3">quark + antiquark</td><td>bleu + anti-bleu</td></tr>
<tr><td>vert + anti-vert</td></tr>
<tr><td>rouge + anti-rouge</td></tr>
</table>

Les quarks qui forment notre matière sont deux : le *Up*, noté u, et le *Down*, noté d. Ils se différencient par une nouvelle propriété, un peu analogue au spin, et qu'on a noté *isospin*. Les valeurs de l'isospin sont *haut* et *bas*, d'où les noms des deux quarks.

Le proton est formé de deux quarks up et d'un down (*uud*), le neutron d'un up et de deux down (*udd*). Le quark up possède une charge électrique positive +2/3, et le down une charge négative -1/3. Faites le compte : uud, le proton, porte la charge +2/3 +2/3 -1/3 = 3/3 = +1, tandis que udd, le neutron, porte +2/3 -1/3 -1/3 = 0. Le mystère est éclairci.

Le méson $\pi^+$ (ou *pion positif*) est ud' (d' représente l'anti-quark d). Le quark u porte une charge +2/3, l'anti-d (d') porte la charge opposée du d, donc +1/3. Le méson $\pi^+$ porte donc une charge +1, qui justifie son nom. Le méson $\pi^-$ (ou *pion négatif*), est la combinaison u'd. Sa charge est donc -2/3 (u') -1/3 (d) = -1. Enfin, il existe un méson neutre. Nommé naturellement $\pi^0$, il est de constitution plus complexe : c'est un mélange d'états quantiques, formé de groupements dd' et uu'. La charge d'un groupe dd' est -1/3 +1/3 = 0. Pour le groupe uu', c'est +2/3 - 2/3 = 0. On peut donc, en respectant les règles d'association des états quantiques, former des particules neutres par association de ces groupes uu' et dd'. Les pions sont produits par les rayons cosmiques.

Toutes les combinaisons précédentes sont bâties sur les quarks de matière normale, u et d. Mais il existe deux autres familles de quarks, les *charmé* c (*charmed*) et *étrange* s (*strange*), et les *top* t et *bottom* b. Ils peuvent également s'associer pour produire des particules complexes, selon les mêmes règles. Et de fait, il y a beaucoup de possibilités... Mais ces groupements permettent de représenter très fidèlement les particules vraiment observées dans les accélérateurs, ce qui valide l'interprétation des quarks. Nous résumerons plus bas leur propriétés.

Prenons comme exemple de particules formées avec ces nouveaux quarks, le méson $K^+$, qui est un assemblage us', d'un quark up et d'un anti-quark s. Les particules qui contiennent des quarks s ou s' sont nommées *particules étranges*.

Tout ce qui précède concerne les particules dans leur état fondamental. Mais il existe aussi des états excités. Par exemple, le proton uud possède normalement un spin 1/2, car deux de ses quarks constituants prennent un état de spin, et le troisième l'état opposé. Mais si on communique à ce proton un peu d'énergie, on peut faire basculer le spin d'un des quarks, et obtenir un assemblage identique, mais de spin 3/2. Cette particule prend le nom de $\Delta^+$. C'est en fait un état excité et instable du proton.

Tout ceci peut paraître compliqué, mais en fait, à partir de seulement 6 quarks (et leurs anti-quarks), et quelques règles de construction simples, les physiciens sont parvenus à représenter l'ensemble des particules qu'ils observent dans les accélérateurs, à la fois dans leur état fondamental et dans les états excités. Jusqu'à maintenant, on n'a jamais obtenus de résultats contredisant ce modèle, qui de fait est devenu le *modèle standard de la physique des particules*.

> On dit parfois que la charge électrique d'une particule est +1. Dans ce cas, on veut dire réellement qu'elle vaut +e, puisque e est la charge élémentaire. De même, -1 signifie -e. Cette abbréviation consiste tout simplement à parler dans un système d'unités où la charge de l'électron serait +1.

**Confinement des quarks**

Les charges fractionnaires définies pour les quarks ne sont jamais observées ! La contradiction évoquée plus haut, relative à la charge élémentaire de l'électron, n'est qu'apparente. Les quarks ne sont jamais observés isolés... Donc, il était impossible d'observer directement une charge fractionnaire. Détaillons ce nouveau problème.

Le potentiel qui agit sur les quarks n'est pas le potentiel de Yukawa, mais il a été déterminé par les résultats des diverses expériences. Il est de la forme :

$$V(r) = -150 / r + 800 r$$

Lorsque r est très petit, le second terme est négligeable. Donc, à courte distance, le potentiel se réduit à V(r) = -150 / r. C'est un potentiel coulombien habituel. Mais si r est grand, c'est le premier terme qui devient négligeable. Et le potentiel prend la forme V(r) = 800 r, il est proportionel à la distance. La force, qui dérive (opération mathématique de dérivation) du potentiel, est alors de la forme F = 800. Elle est constante, ne dépend pas de la distance. Quelle que soit la distance qui sépare deux quarks, la force qui les réunit est toujours la même.

Si une fusée s'éloigne de la Terre, à chaque kilomètre parcouru, la force qui la retient diminue. A chaque fois qu'on lui communique un peu d'énergie, elle est un peu plus libre. Pour les quarks, rien de tel. Quelle que soit l'énergie qu'on leur fournisse, ils sont toujours aussi fermement liés l'un à l'autre. Pour les séparer, il faudrait une énergie infinie... On ne peut donc pas les séparer !

Il y a pire : si vous continuez à les éloigner, en fournissant assez d'énergie, vous arriverez à un niveau d'énergie tel que vous pourrez créer une paire quark-antiquark ! Au lieu de séparer les quarks, vous en avez créé deux nouveaux, de même couleur. Au lieu de se séparer, les deux

quarks ont formé ainsi un hadron. Impossible donc de les séparer : si on fournit une énergie croissante dans ce but, lorsqu'on atteint l'énergie correspondant à la création d'une paire quark-antiquark, cette paire se crée, diminuant d'autant l'énergie disponible. Si on continue de fournir de l'énergie, on créera ainsi de nouvelles paires, ce qui limite toujours l'énergie disponible, et empêche définitivement de séparer les quarks.

On appelle ce phénomène *hadronisation des quarks*. Décidément, ce sont de bien étranges particules qui nous constituent !

Dans les accélérateurs de particules, par exemple dans un choc électron-positron, il arrive qu'une paire quark-antiquark soit créée, et que les deux particules s'éloignent dans des directions opposées, à grande vitesse. Entre les deux, la force qui les relie diminue leur énergie, et cette énergie est utilisée pour créer des paires quark-anti-quark. Il se forme ainsi deux jets de hadrons (particules formées avec ces quarks créés), symétriques de part et d'autre du point de choc.

Par contre, si on rapproche des quarks, la force diminue. C'est ce qu'on appelle *liberté asymptotique*. Dans les conditions qui régnaient après le Big Bang, les quarks étaient très serrés, et donc totalement libres.

**Particule d'interaction forte**

Les quarks se collent l'un à l'autre par échange de *gluons*, comme l'interaction électromagnétique se transmet par échange de photons. Mais alors que le photon ne porte pas de charge électrique, chaque gluon porte une charge de couleur, et une charge d'anti-couleur : bleu et anti-rouge par exemple. Ceci devrait faire 9 gluons différents, mais à cause de la neutralité des combinaisons couleur-anticouleur, il n'en existe réellement que 8.

Tous les objets de l'univers s'expliquent par un subtil équilibre entre les distances qui séparent leurs composants, et l'intensité des forces en jeu :

- au sein du noyau atomique, ce sont les interactions forte et faible qui jouent ; les autres sont négligeables ;
- dans les atomes et les molécules, 100.000 à 1.000.000 de fois plus grands que le noyau, interactions forte et faible sont négligeables ; la gravitation porte sur trop peu de matière pour être efficace ; c'est l'interaction électromagnétique qui lie les électrons au noyau, et les atomes entre eux dans les molécules ;
- enfin, dans les grands objets (à partir de la taille des astéroïdes), la gravitation prend le pas sur toutes les autres forces, car la quantité de matière mise en jeu devient importante. L'interaction électromagnétique est aussi de portée infinie, mais elle agit sur des particules positives ou négatives. La matière étant globalement neutre, l'interaction électromagnétique n'a plus d'influence à grande distance.

**Rayons cosmiques**

Une bien curieuse affaire a fait courir, au sens propre, les physiciens du début de XX$^{e}$ siècle. Ils ont d'abord découvert qu'un électroscope à feuilles d'or se déchargeait spontanément, sans cause apparente. Il a fallu plus de vingt ans pour résoudre le problème, et c'est Victor Hess qui y est parvenu. Montant en ballon jusqu'à la stratosphère, il a montré que l'électroscope se déchargeait de plus en plus vite avec l'altitude croissante. La décharge venait donc de l'espace, provoquée par un rayonnement alors inconnu. Il a été nommé pour cela *rayonnement cosmique*. Peu après, on a compris que les rayons cosmiques étaient en fait des particules chargées. Elles avaient les propriétés d'un électron, mais étaient bien plus lourdes. On avait découvert un électron lourd, qui fut nommé *muon*.

Plus tard, on devait découvrir un troisième électron encore plus lourd, le *tau*. Ces deux nouvelles particules n'étaient pas connues avant car elles sont instables : il faut les observer très peu de temps après leur formation, avant leur désintégration. Les rayons cosmiques primaires arrivant sur la haute atmosphère, produisent des muons qu'on capte au sol. Le muon se désintègre en 2,2 µs en un électron, et deux neutrinos, à cause de sa masse supérieure.

On a ensuite compris que, dans la désintégration béta, le neutrino est associé à l'électron. Si bien qu'il devenait évident que d'autres neutrinos, associés respectivement au muon et au tau, devaient aussi exister. On n'a pas tardé à les mettre en évidence. Il a fallu donner des noms distinctifs à ces trois particules. Le premier neutrino a pris le nom de *neutrino électronique*, les deux autres étant le *neutrino muonique* et le *neutrino tauique*.

Les neutrinos ont une masse très faible, et pendant longtemps on a considéré qu'elle était nulle. Mais il n'en est rien, et c'est la physique du Soleil qui en a apporté l'indication sinon la preuve. Mais cette masse est vraiment extrêmement faible.

Les trois électrons, et les trois neutrinos, sont tous de faible masse. Aussi, ils sont nommés collectivement *leptons*, ce qui signifie *léger* en grec.

**Nouveaux quarks**

En utilisant de nouveaux outils, on fait toujours des découvertes innattendues. La Nature est plus riche que notre imagination... C'est ainsi que dans les accélérateurs de particules, construits pour étudier la matière courante, on a découvert des particules nouvelles, tout à fait surprenantes. Nous avons déjà parlé du muon et du tau, découverts dans l'accélérateur de particules naturel qu'est le cosmos. Mais les physiciens ont observé dans leurs détecteurs la signature de particules ressemblant aux quarks, mais tout de même différentes. Ils ont montré que ce sont des quarks, mais se différentiaient entre eux par une nouvelle propriété, qu'ils ont nommé *saveur* (encore un terme bien curieux, puisque la véritable saveur provient de la chimie, qui se passe à des dimensions des milliards de fois plus grandes).

Mais ces quarks nouveaux possèdent aussi l'isospin, et sont donc arrivés par paires. Les deux quarks déjà connus ont pour saveur up et down. Les nouveaux sont les quarks *charmé* c (vous avez bien lu, en anglais *charmed*), *étrange* s (*strange*), *vérité* t (truth, mais on préfère une autre apellation qui commence aussi par t : *top*), et le dernier *beauté* b (beauté n'est pas utilisé, on lui préfère *bottom*, dont la signification anglaise est tout de même moins poétique).

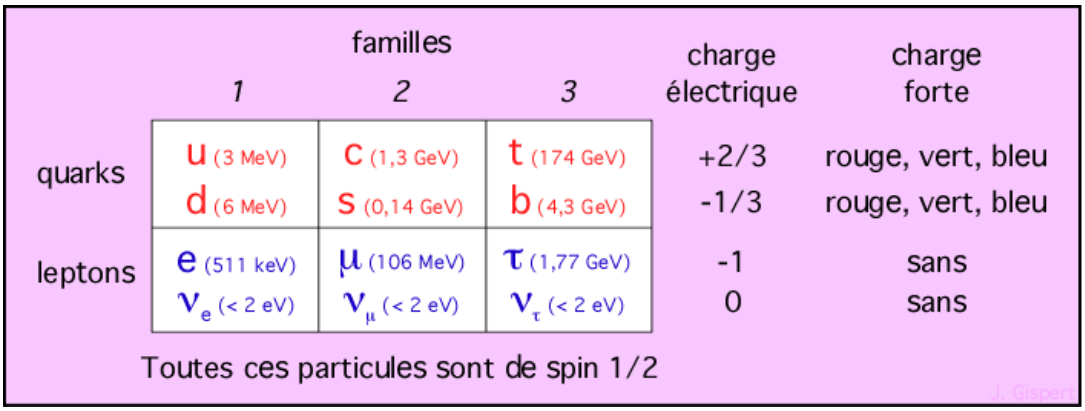
Maintenant, toutes les particules élémentaires qui composent la matière ont été décrites. Elles se classent en trois familles, qui possèdent des propriétés très semblables.

- les quarks u et d, l'électron et le neutrino électronique ;
- les quarks c et s, le muon et le neutrino muonique ;

- les quarks t et b, le tau et le neutrino tauique.

La première famille est celle de la matière que nous connaissons, les autres sont plus exotiques. Chaque famille comprend deux quarks, et deux leptons. Les particules des deux dernières familles sont instables, et se désintègrent rapidement en particules équivalentes de la première.

Le tableau ci-dessous les résume :




Ce sont les particules qu'on considère aujourd'hui comme élémentaires, en ce sens que les accélérateurs de particules n'ont jamais permis de les casser en constituants plus petits. Leurs masses sont indiquées entre parenthèses (en omettant / $c^2$). Les quarks sont les briques qui servent à construire la matière ordinaire. Les leptons sont les constituants légers de celle-ci. Les antiparticules ne sont pas notées.

De même, on peut écrire le tableau qui résume les propriétés essentielles des quatre forces fondamentales, et des particules associées :

| interraction | découvreur | médiateur | masse | spin | charge | vie | agit sur | portée | intensité |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *forte* | Hideki Yukawa | gluons | 0 | 1 | 0 | ∞ | quarks | 1,5 fermi | 1 |
| *électromagnétique* | Maxwell | photon | 0 | 1 | 0 | ∞ | quarks, leptons | infinie | $10^{-2}$ |
| *faible* | Glashow, S. Weinberg, A. Salam | $W^+$ | 80,4 GeV | 1 | +e | $3\ 10^{-25}$ s | quarks, leptons | 1,5 fermi | $10^{-7}$ |
| | | $W^-$ | 80,4 GeV | 1 | -e | $3\ 10^{-25}$ s | | | |
| | | $Z_0$ | 91,2 GeV | 1 | 0 | $3\ 10^{-25}$ s | | | |
| *gravitation* | Einstein | graviton | 0 | 2 | 0 | ∞ | quarks, leptons | infinie | $10^{-36}$ |

Le nom du boson W vient de l'anglais *Weak* (faible). Les masses sont données en *GeV* ; il faut lire *GeV/$c^2$* (voir plus haut).

L'intensité est une indication de la puissance relative des interactions. En fait, l'intensité de l'interaction forte dépend de l'énergie mise en jeu, ce qui explique que l'on trouve des valeurs différentes selon les auteurs. Lorsque l'énergie est très élevée, l'interaction forte diminue, jusqu'à une intensité égale à celle de l'interaction faible. Cette convergence des intensités est à la base des tentatives d'unification des forces fondamentales : les physiciens rêvent d'une seule force, qui expliquerait l'Univers lorsqu'il était très chaud, à très haute énergie.

On remarque sur ce tableau que l'interaction gravitationnelle est de très, très loin, la plus faible. Mais sa portée est infinie, aussi les petites contributions de chaque particule s'ajoutent pour arriver à une force colossale. Les particules médiatrices de l'interaction électromagnétique et de la gravitation ont une masse nulle, conférant à ces interactions une portée infinie. A l'opposé, la masse des bosons faibles ($W^+$, $W^-$ et $Z^0$) est très élevée, impliquant une très faible portée de l'interaction faible.

**Retour sur l'interaction forte**

L'interaction forte a été découverte comme force unissant les nucléons, et assurant la stabilité du noyau atomique. Mais ses propriétés sont quelque peu curieuses. Et lorsqu'on a mis en évidence les quarks, constituants des nucléons, la question s'est posée : qu'est-ce qui réunit les quark ? Il faut une force, et l'interaction forte est la candidate naturelle. On doit alors considérer que le nucléon est formé de trois quarks, liés les uns aux autres par l'interaction forte, et donc que cette dernière n'agit pas sur les nucléons, mais sur leurs composants.

La particule d'interaction, le gluon, a une masse nulle. Donc, la portée de l'interaction est infinie. Pourtant, la force qui unit les nucléons est au contraire à très courte portée... Comment concilier ces deux constatations opposées ?

Le cas de l'interaction forte est plus complexe que celui des autres interactions. Les particules de matière sensibles à l'interaction forte, les quarks, ne peuvent apparaître isolés : ils ne se montrent que dans des combinaisons blanches (neutres). Considérons un quark. Il crée autour de lui un champ de couleur (d'interaction forte) qui possède la symétrie sphérique. Plaçons deux autres quarks à proximité, tels que les trois couleurs soient différentes (la particule formée ne peut exister que si elle est blanche). Leurs champs sphériques se mélangent, et forment un champ résultant complexe. Si on s'éloigne suffisamment de l'ensemble, la séparation entre les trois quarks devient négligeable devant la distance d'observation, et ils apparaissent comme une unique particule blanche (**neutre**), donc le champ global produit est nul. C'est pourquoi le champ de couleur voit sa portée limitée par l'association neutre des quarks, à une distance de l'ordre du diamètre d'un noyau atomique.

Par contre, pour un quark qui se trouve pratiquement au contact avec le proton, le champ produit par ce dernier apparaît non symétrique : le quark extérieur ne peut pas être à la même distance des trois quarks qui le composent, et donc ressent plus l'un que l'autre. C'est ce reste d'interaction forte qui lie protons et neutrons dans le noyau atomique.

Il y a une analogie importante avec l'interaction électromagnétique. Une molécule est globalement neutre, mais son nuage électronique n'a pas forcément la symétrie sphérique. C'est le cas des molécules polaires : les électrons sont plus nombreux d'un côté que de l'autre. Alors, cette molécule crée autour d'elle un potentiel qui lui permet de se lier faiblement à un atome ou une autre molécule. Cette force de liaison est nommée *force de van der Wals.*

| La molécule d'eau est une molécule polaire. Elle est constituée d'un atome d'oxygène central et de deux atomes d'hydrogène qui lui sont attachés, et forment entre eux un angle 120 °. De ce fait, la molécule n'a pas la symétrie sphérique, et présente à courte distance un champ bipolaire. C'est ce que ressentent les atomes et molécules qui sont mis en solution dans l'eau. Cette caractéristique de la molécule d'eau confère à ce liquide les propriétés exceptionnelles de solvant qui permettent le vie, en particulier. |
|---|

**Mésons**

Jusqu'ici, nous avons évoqué les baryons (trois quarks), mais pas les mésons. La raison en est que ces derniers ne constituent pas de manière durable la matière habituelle. Ces particules n'existent que brièvement à la suite de certaines interactions qui les produisent. Elles apparaissent par exemple dans l'interaction des rayons cosmiques avec la haute atmosphère terrestre.

La première que nous mentionnerons est le *méson K*, ou *kaon*. Il est constitué d'une paire quark-antiquark (puisque c'est un méson). Il reste à préciser de quel quark et de quel antiquark il est fait. En fait, il existe plusieurs kaons : l'un est positif, un autre négatif, mais il en existe encore deux autres plus difficiles à interpréter. Il est temps de décrire ici un phénomène curieux de la Mécanique Quantique : la *superposition d'états*.

Cette notion est délicate, car elle ne se produit pas dans la vie courante. Une particule, à cause du principe d'incertitude d'Heisenberg, ne peut pas être caractérisée individuellement avec une précision fixée. Si on connait sa position par exemple, on ne pourra pas connaître sa vitesse. Alors, considérant un ensemble de particules identiques, on peut dire par exemple dans l'expérience des trous de Young vue plus haut, que 50 % des électrons passent par le trou 1, et 50 % par le trou 2. Ce qu'on résume en disant que l'électron moyen passe par 50 % du trou 1 et 50 % du trou 2... Autrement dit, l'électron est un mélange des deux états possibles. Pour un électron donné, il est bien évident qu'une des possibilités seulement se réalise. Mais comme on ignore laquelle, on ne peut parler que de statistiques, ce que fait le mélange d'états.

Pour en revenir aux kaons, il en existe deux autres qui sont des mélanges d'états :

$$K^- = \bar{u}\, s$$
$$K^+ = u\, \bar{s}$$
$$K^0_S = (\bar{d}\, s + \bar{s}\, d) / \sqrt{2}$$
$$K^0_L = (d\, \bar{s} + s\, \bar{d}) / \sqrt{2}$$

Le premier associe un antiquark up, de charge électrique -2/3 (moins parce que c'est un **anti**-quark), à un quark strange, de charge -1/3. Le résultat est une particule de charge -1, ce qui justifie le signe - accolé au nom de la particule.

Le second associe un quark up, de charge +2/3, à un antiquark strange, de charge +1/3, et donne une particule de charge +1.

Le troisième est une composition de deux états. Le premier de ces état à la charge +1/3 + (-1/3) = 0, le second état à la charge +1/3 + (-1/3) = 0. La somme des deux états est donc nulle, d'où l'exposant 0 accolé au nom de la particule.

Enfin, le dernier possède une charge nulle également, puisque ((-1/3) + (+1/3)) + ((-1/3) + (+1/3)) = 0.

## *Structure du noyau*

Le noyau atomique étant constitué de plusieurs particules, se pose le problème de leur arrangement interne. Comment les nucléons se comportent-ils dans le noyau ? Sont-ils statiques, fixés une fois pour toutes ? Sont-ils mobiles ? Sont-ils entassés n'importe comment ou bien arrangés selon une loi à découvrir ? C'est le genre de question qui s'est posée après la découverte du neutron, et qui se pose encore d'ailleurs, car la solution correcte n'est peut-être pas encore trouvée.

Tout d'abord, il faut parler d'une propriété des noyaux atomiques pris globalement. Certains sont stables, d'autres instables, et les physiciens ont vite fait le tri entre eux. Ce faisant, ils ont remarqué que certains numéros atomiques (nombre de protons) donnaient des noyaux plus stables que d'autres. Il en est de même avec les neutrons. Les nombres de protons ou neutrons suivants sont dit *magiques* : 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126. Les noyaux qui possèdent l'un de ces nombres de protons ou neutrons sont particulièrement stables. Le plomb 208 en est un : il comporte 82 protons, et donc 208 - 82 = 126 neutrons. Ses deux nombres sont magiques. Un modèle de noyau doit expliquer les nombres magiques, et les déterminer par la théorie. Le noyau d'hélium 4 est doublement magique, puisqu'il l'est pour ses protons (2) et pour ses neutrons (2).

Un premier modèle est celui de la *goutte liquide* : les nucléons sont relativement libres dans le noyau, comme les molécules dans un liquide. Ce modèle, correctement établi, a connu certains succès, et explique certaines des propriétés du noyau. Mais pas toutes, et il présente des défauts. Le plus grave est qu'il n'est pas quantique, et ne permet pas d'expliquer certains états excités discrets. Il est donc abandonné.

Le second modèle reprend pour le noyau une structure semblable à celle du cortège électronique : c'est le *modèle en couches*. Comme les électrons se placent dans des niveaux d'énergie discrets autour du noyau, les nucléons se placent de même à l'intérieur du noyau. Ces couches nucléoniques correspondent aux nombres magiques. Les noyaux correspondant à un nombre magique de protons ont la dernière couche complète : par analogie avec les couches électroniques, ce sont les plus stables.

Entre deux niveaux d'énergie électroniques, il y a une différence d'énergie qui est de l'ordre de grandeur de quelques électrons-volt. Les photons émis par une transition sont compris entre l'infrarouge et l'ultraviolet. Par contre, entre deux niveaux nucléoniques, la différence d'énergie est de l'ordre de 100 keV, ce qui fait que les photons émis par désexcitation nucléaire sont dans le domaine gamma très énergétique.

Le modèle en couches est très important, car il explique assez naturellement les réactions résonnantes, qui permettent par exemple la fusion de l'hélium dans les géantes rouges.

## *Physique des particules*

Physique fondamentale et astronomie ont développé, au XX$^{e}$ siècle, la connaissance de la matière, à petite et grande échelle. La matière habituelle... D'autres particules ont fait plus tard leur apparition sur la scène scientifique. La Physique des particules doit rendre compte de leur existence et de leurs propriétés.

A l'échelle des particules, règne la Mécanique Quantique. Impossible de s'en passer. Il faut donc une théorie qui satisfasse aux deux principes fondamentaux, le principe d'incertitude, et le principe d'exclusion.

> Le modèle d'atome de Bhor présente un inconvénient majeur : en tournant autour du noyau, l'électron devrait perdre de l'énergie, et donc finalement tomber sur le noyau. La solution à ce problème est venue de la Mécanique Quantique : l'électron ne tourne pas sur une orbite classique bien définie, mais se trouve dans un nuage électronique et applique les règles quantiques. En fait, on ne définit que la probabilité de l'électron de se trouver à un endroit donné autour du noyau. Mais la chose la plus curieuse est que sa probabilité de se trouver à l'intérieur du noyau n'est pas nulle ! Si on considère que le noyau est pratiquement vide, cela ne doit plus nous surprendre !

**Où en est-on aujourd'hui ?**

Le Modèle Standard des particules (les deux tableaux vus plus haut en décrivent les particules et leurs propriétés), a été établi, et donne des résultats excellents. Il décrit les interactions électromagnétique, forte et faible. Il est quantique, et compatible avec la relativité. On pourrait donc s'en contenter, mais le conditionnel montre bien qu'il y a une difficulté. Celle-ci tient en grande partie dans le problème de la masse. Si vous reprennez les deux tableaux, vous verrez des valeurs de masse affectées à chaque particule, mais vous ne trouverez dans le texte aucune explication à leur sujet. Les masses sont des paramètres libres, qui doivent être obtenues par l'observation (et qui le sont effectivement). Le Modèle Standard contient en tout 29 paramètres libres, ce qui est énorme.

Une théorie dans laquelle il y a tant de paramètres libres est suspecte : on suppose qu'il y a des relations non encore découvertes qui lieraient ces paramètres, et permettraient de les réduire à un nombre bien plus petit. Beaucoup de chercheurs travaillent donc dans cette direction, sur le plan théorique. Ainsi, dans la théorie la plus avancée, on a imaginé un mécanisme, dit *mécanisme de Higgs*, qui donnerait aux particules leur masse, et nous fournirait une explication plausible de leur existence. Si ce mécanisme de Higgs a lieu, alors il y a un *champ de Higgs* et un boson associé, le *boson de Higgs*. La chasse au boson de Higgs est donc ouverte.

Le *LEP* (*Large Electron-Positron collider*), qui était situé en souterrain à la frontière franco-suisse près de Genève, et qui était le plus puissant accélérateur de particules, a donné un résultat qui peut s'interpréter comme une confirmation du boson de Higgs. Mais il a été démantelé... pour faire place au *LHC* (*Large Hadron Collider*) dans le même tunnel. Le LHC a été construit en grande partie dans le but de trouver ce boson de Higgs, ou de démontrer qu'il n'existe pas. Donc de confirmer ou d'infirmer la théorie qui prévoit son existence.

**Problèmes théoriques**

La Mécanique Quantique, outil indispensable pour cette physique, nous propose des équations très complexes, qu'il est impossible de résoudre analytiquement. Ceci ne doit pas étonner, sachant que le mouvement des trois corps en mécanique céleste, bien plus simple, n'a pas lui-même de solution analytique. La mécanique céleste a contourné le problème en introduisant le calcul des perturbations : si le problème se décompose en une force principale, dominante, et une force secondaire dite *perturbation*, alors on peut développer les équations en séries, calculables. Mais dans le cas de trois corps de masses semblables, cette méthode ne s'applique évidemment pas, et seul un calcul pas à pas permet de déterminer une solution numérique. En Mécanique Quantique, on s'adresse à des particules ayant souvent des masses semblables, et donc on est dans le plus mauvais cas de figure.

Une question simple se pose : peut-on calculer la masse du proton, ou celle du neutron, à partir des masses des quarks qui les constituent ? La réponse est non, aujourd'hui. En effet, pour calculer la masse du proton, il faut résoudre les équations décrivant les interactions entre les trois quarks. Ceux-ci sont de masses égales... Les calculs que l'on peut faire aujourd'hui sont trop approximatifs. La théorie des perturbations s'applique dans un grand domaine d'énergies élevées, et donne de très bons résultats. Mais lorsque l'énergie tombe au niveau de celle du proton, l'approximation des perturbations devient bien trop mauvaise pour donner un résultat acceptable. Il faudra trouver une méthode bien plus directe, et ce problème est l'un des sept problèmes ouverts pour la résolution desquels l'Institut Clay a proposé en 2000 un prix d'un million de dollars...

L'idéal des physiciens serait de trouver un tout petit nombre de particules, dites élémentaires, qui se combineraient pour former toutes les autres. Et effectivement, on connaît quelques particules que l'on n'a jamais réussi à casser (elles sont donc élémentaires, sans structure, jusqu'à preuve du contraire), et d'autres qu'on a pu briser en divers composants. Malheureusement pour l'idéal, le zoo des particules est bien plus riche qu'on ne l'espérait. Plus on augmente l'énergie des accélérateurs, avec l'espoir de briser des particules pour les analyser, plus on crée de nouvelles particules par transformation de l'énergie. Chaque nouvelle particule pose un problème supplémentaire.

**Des particules composées**

$\Delta^{++}$ uuu (charge 3 × 2/3 = +2) , $\Delta^{+}$ uud (charge 2 × 2/3 - 1/3 = +1), $\Delta^{0}$ udd (charge 2/3 - 2 × 1/3 = 0), $\Delta^{-}$ ddd (charge 3 × (-1/3) = -1). On remarque que $\Delta^{+}$ et $\Delta^{0}$ sont exactement de même composition que les nucléons : proton uud et neutron udd. Pourtant, ce sont des particules différentes, si on considère le spin des quarks. Dans le proton et le neutron, deux des quarks ont le spin dans une direction, et le troisième dans la direction opposée. De ce fait, le spin des nucléons est 1/2. Dans les particules Δ, les spins sont tous alignés, et donc le spin vaut 3/2. Ayant la même composition que les nucléons, les $\Delta^{0}$ et $\Delta^{+}$ sont donc considérés comme des états excités de ces nucléons.

Les Δ ont leurs antiparticules, formées avec les antiquarks correspondants. Leur masse est 1,232 GeV/$c^2$.

Les particules Ω constituent toute une famille dont seulement deux membres ont été observés. Ces particules ne contiennent ni quark u ni d, mais tous les autres sont possibles, ce qui fait un nombre de combinaisons important :

| nom | composition | charge | spin | étrangeté | charme | bottomness | observé |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\Omega^{-}$ | sss | -1 | 3/2 | -3 | 0 | 0 | oui |
| $\Omega^{-}_{b}$ | ssb | -1 | 1/2 | -2 | 0 | -1 | |
| $\Omega^{0}_{c}$ | ssc | 0 | 1/2 | -2 | +1 | 0 | oui |
| $\Omega^{-}_{bb}$ | sbb | -1 | 1/2 | -1 | 0 | -2 | |
| $\Omega^{0}_{cb}$ | sbc | 0 | 1/2 | -1 | +1 | -1 | |
| $\Omega^{+}_{cc}$ | scc | +1 | 1/2 | -1 | +2 | 0 | |
| $\Omega^{-}_{bbb}$ | bbb | -1 | 3/2 | 0 | 0 | -3 | |
| $\Omega^{++}_{ccc}$ | ccc | +2 | 3/2 | 0 | +3 | 0 | |
| $\Omega^{+}_{ccb}$ | bcc | +1 | 1/2 | 0 | +2 | -1 | |
| $\Omega^{0}_{cbb}$ | bbc | 0 | 1/2 | 0 | +1 | -2 | |

Toutes ces particules ont leur antiparticule, dans laquelle les quarks sont remplacés par les antiquarks correspondants. Le passage des quarks aux antiquarks changeant le signe de la charge électrique, il en est de même pour les anti Omégas par rapport aux Omégas.

Passons maintenant aux combinaisons quark-antiquark, que l'on nomme de manière générique *quarkonium*. Lorsqu'on associe un quark et un antiquark, on obtient une particule qui peut être dans son état fondamental d'énergie minimale, ou dans un état excité. Les états excités ayant une énergie supérieure ont aussi une masse plus élevée ($E = mc^2$), et sont instables. Mais ces états apparaissent souvent dans les expériences en accélérateur. Ce sont parfois eux qui ont été détectés les premiers, éventuellement les seuls.

Considérons d'abord la configuration obtenue avec quark et antiquark b&nsp;: bb'. Cette configuration est nommée *bottomium* (quarkonium bottom), pour son état fondamental. Le bottomium a été découvert par les différents états du méson ϒ.

La seconde configuration de quarkonium est obtenue avec quark et antiquark charmés c : cc'. Elle est nommée *charmonium*. Le J/Ψ est de composition cc', c'est donc un état excité du charmonium dont la masse 3,096 GeV/$c^2$ est un peu supérieure à celle de l'état fondamental. La masse étant supérieure, cette particule est instable et se désintègre en un peu moins de $10^{-20}$ s.

Le nom curieux du J/Ψ est historique : il a été découvert simultanément (les deux publications datées du 11 novembre 1974) par deux équipes, qui bien sûr lui ont donné des noms différents. Du fait de la simultanéité des découvertes, on a associé les deux noms sous cette forme exceptionnelle.

Les physiciens bâtissent des théories pour expliquer tout ce qu'ils ont trouvé. Malheureusement, ces théories, pour être cohérentes, prévoient l'existence de particules non encore observées... qu'il faut chercher à leur tour, pour valider ou invalider la théorie ! Les choses ne sont pas simples.

Comment décrit-on une particule ? Par son état quantique, qui est l'énoncé de quelques propriétés.

La physique des particules a pour objet de décrire les particules qui existent, et leurs propriétés, et surtout d'expliquer comment elles se transforment, avec quelle probabilité, quelle énergie...

Il existe d'autres combinaisons plus lourdes, nommées *hypérons*. Les baryons sont donc l'ensemble des nucléons et des hypérons (les hypérons n'apparaissent pas dans le tableau).

**Masse des particules**

| particule | masse MeV/$c^2$ | particule | masse MeV/$c^2$ |
|---|---|---|---|
| e | 0,510999 | neutron | 939,6 |
| μ | 105,658 | proton | 938,3 |
| τ | 1776,99 | $\pi^+$, $\pi^-$ | 139,57 |
| u | 1,5 à 3,0 MeV/$c^2$ | $\pi^0$ | 134, 976 |
| d | 3 à 7 | $K^+$, $K^-$ | 493,677 |
| s | 70 à 120 | $K^0$ | 497,648 |
| c | 1,25 | γ (photon) | < 6 $10^{-17}$ eV |
| b | 4,2 | g (gluon) | 0 |
| t | 174,2 | $W^+$, $W^-$ | 80,403 $10^3$ |
| $H^0$ Higgs | > 114,4 $10^3$ | $Z^0$ | 91,1876 $10^3$ |

A gauche, les particules élémentaires, leptons et quarks, et hypothétique boson de Higgs. A droite, les particules composites, hadrons d'abord, et bosons d'interaction ensuite. Les masses sont données en équivalent énergie (Mev/$c^2$), sauf pour le photon, dont la masse est extrêmement petite, et peut-être strictement nulle.

Les incertitudes ne sont pas mentionnées, ce tableau étant donné seulement pour mémoire. Les données sont extraites du *Particle Physics Booklet* publié par le CERN, édition 2006.

**L'unification des interactions**

Après le grand succès de Maxwell, qui a unifié deux interactions autrefois distinctes (électricité et magnétisme), la grande quête est celle d'une interaction unique, qui engloberait toutes celles que l'on connait. Dans les conditions normales que nous connaissons, électricité et magnétisme sont de même intensité. C'est ce qui a permi à Maxwell de réussir son travail. Mais les autres interactions ont des intensités très différentes, ce qui fait qu'*a priori* elles apparaissent très dissemblables.

Signalons à ce sujet que l'électromagnétisme de Maxwell contient les bases de la Relativité : on montre que la théorie implique l'existence d'ondes qui se propagent à la vitesse c :

$$c = \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$$

où $\varepsilon_0$ et $\mu_0$ sont des constantes. Il s'ensuit que c est également une constante. C'est la vitesse de la lumière, qui ne dépend donc pas de l'observateur.

**Electrodynamique quantique**

L'*électrodynamique quantique* (Quantum ElectroDynamics, QED) est la théorie quantique de l'électromagnétisme. Elle n'unifie pas deux interactions différentes, mais quantifie l'électromagnétisme. Elle a remporté de grands succès, comme l'explication d'un dédoublement des raies spectrales de l'hydrogène, produit par les fluctuations du vide (décalage Lamb).

Tomonaga, Schwinger et Feynman ont eu le prix Nobel de physique 1965 pour cette théorie.

**Théorie électrofaible**

La théorie de l'interaction faible a été établie par Enrico Fermi. Mais elle s'appuie sur des expériences faites à énergie assez basse, celle disponible dans les accélérateurs de l'époque. Aussi, si on l'utilise dans une gamme d'énergie élevée, n'est-elle plus tout à fait en accord avec les observations. L'interaction faible voit en effet son intensité augmenter avec les énergies croissantes. Tellement que, vers les 100 GeV, elle devient équivalente à l'interaction électromagnétique. C'est ce qui justifie leur unification. C'est la masse des bosons $W^{\pm}$ et du $Z^0$ qui limite la portée de l'interaction faible, alors que la masse nulle du photon autorise une portée infine pour l'électromagnétisme.

La première unification est la *théorie électrofaible*. Comme son nom l'indique, elle unifie l'interaction électromagnétique avec l'interaction faible.

Cette théorie électrofaible a valu le prix Nobel de physique à S. Glashow, A. Salam et S. Weinberg en 1979.

**Chromodynamique quantique**

La théorie qui explique la constitution de certaines particules en quarks est la *chromodynamique quantique* (ce qui rappelle qu'elle décrit l'interaction de couleur, ou interaction forte). Elle a été établie par David Politzer, Frank Wilczek et David Gross en 1973, et leur a valu le prix Nobel de physique en 2004.

**La brisure de symétrie**

Les équations qui décrivent un système physique sont invariantes par une certaine transformation (symétrie) ; mais les solutions de cette équation peuvent être symétriques dans un domaine, et non dans un autre.

Une barre d'acier verticale, sur laquelle on applique un poids bien centré, se tasse si le poids n'est pas trop grand. L'ensemble est symétrique par rapport à l'axe de la barre. Si le poids est trop grand, la barre se plie dans une direction aléatoire. Il y a alors brisure de symétrie.

Un exemple courant de brisure de symétrie est le gel de l'eau. Lorsque la surface d'un lac gèle en hiver, elle passe de l'état liquide à l'état solide. Cette transition de phase (de la phase liquide vers la phase solide), s'accompagne d'un réarrangement des molécules d'eau. Dans la phase liquide, les molécules d'eau sont orientées dans n'importe quelle direction, car elles possèdent suffisamment d'énergie pour s'agiter et tourner, présentant successivement toutes les orientations possibles. Les chocs qu'elles reçoivent des autres molécules changent de même leur orientation. Toutes les directions de l'espace sont alors représentées par un ensemble de molécules à chaque instant. Mais lorsque l'eau commence à geler, l'agitation des molécules diminue fortement, et elles ont tendance à s'orienter toutes dans une même direction, car cet arragement minimise l'énergie de l'ensemble. C'est cette orientation commune qui construit le cristal (la forme des flocons de neige par exemple). Alors que dans l'état liquide les molécules ont toutes les orientations possibles, donc que le liquide présente le même aspect dans toutes les directions, une fois gélée, l'eau a perdu cette symétrie. L'orientation commune de toutes les molécules désigne une direction particulière de l'espace comme privilégiée. On dit qu'il y a eu une brisure de symétrie. Bien entendu, l'orientation des molécules d'eau se fait de proche en proche, à partir d'un germe où le gel commence. Ce germe donne le ton, d'une certaine manière, en imposant son orientation aux molécules voisines, qui à leur tour vont l'imposer à leur voisines. Ainsi, de proche en proche, cette orientation aléatoire de la première molécule va se répandre à toutes les molécules alentour.

Cet exemple vous montre aussi que la brisure de symétrie est liée à une baisse de température, c'est-à-dire d'énergie. Et elle caractérise une transition de phase. En cosmologie, on trouve ainsi plusieurs transitions de phase, qui participent à décrire l'état de l'Univers aujourd'hui, à partir d'un état extrêmement chaud initial.

Attention, l'exemple du lac peut s'étendre encore un peu : lorsque le gel commence, il n'y a aucune raison que ce soit un un seul point. Plusieurs germes peuvent commencer le gel en des endroits différents, et c'est bien ce qu'il se passe. Mais puisque l'orientation de la molécule germe est aléatoire, deux germes différents ne seront sûrement pas orientés pareillement. Et lorsque le gel se propage, il va produire des plaques qui s'étendent, avec des orientations différentes. Et lorsque deux plaques se rejoignent, on va constater un défaut d'orientation à leur jonction : une molécule d'eau à la jonction ne peut prendre deux orientation différentes. Elle doit choisir l'une ou l'autre, et par conséquent on observera deux molécules voisines d'orientation discordantes. Ces défauts dans le cristal sont nommés *défaut topologiques*. On les observe dans les cristaux, où la cristallisation se fait aussi à partir de germes. Et on envisage qu'ils aient pu apparaître dans le tissus même de l'Univers dans sa prime jeunesse, et ceci pose en cosmologie des problèmes actuellement non résolus.

On trouve des cas de brisure de symétrie dans la physique des particules. En particulier, le mécanisme de Higgs expliquerait la masse des particules par ce phénomène.

**A propos de la supersymétrie**

La supersymétrie consiste à unifier la matière et les forces, c'est-à-dire les fermions et les bosons. Pour cela, il est nécessaire que toute particule ait son superpartenaire. Le quark est associé à un quark supersymétrique, l'électron à un électron supersymétrique... De plus, le superpartenaire d'un boson est un fermion et réciproquement. Pour trouver des noms parlants pour ces nouvelles particules, on a pris la convention de placer un "*s*" devant le nom d'un fermion, pour en faire le boson superpartenaire. Ainsi, le superpartenaire de l'électron (un fermion), est le *sélectron* (un boson). Et pour les bosons, on a décidé d'ajouter le suffixe "*ino*" au nom du boson. Ainsi, le *photino* (fermion) est le superpartenaire du photon (boson). La supersymétrie multiplie par deux le nombre de particules (et même plus...). L'unification a un prix !

Mais les physiciens ne perdent pas leur humour :

> «... Une paire *(de particules supersymétriques)* suivant une autre, tout cela se rassemblait en une véritable arche de Noé des particules. Tôt ou tard, pris au filet des nouveaux snoms et nominos, vous commencez à vous sentir comme Sbozo le clown. Ou Bozo le clownino. N'importino squoi... »
>
> *Lee Smolin*
> *Rien ne va plus en physique*

Pour fixer les idées, voici un tableau établissant un parallèle entre les particules *normales* et les nouvelles particules supersymétirques :

| particule normale | symbole | spin | particule nouvelle | symbole | spin |
|---|---|---|---|---|---|
| électron | $e$ | 1/2 | sélectron | $\tilde{e}$ | 0 |
| muon | $\mu$ | 1/2 | smuon | $\tilde{\mu}$ | 0 |
| tau | $\tau$ | 1/2 | stau | $\tilde{\tau}$ | 0 |
| neutrino | $\nu$ | 1/2 | sneutrino | $\tilde{\nu}$ | 0 |
| quark | $q$ | 1/2 | squark | $\tilde{q}$ | 0 |
| photon | $\gamma$ | 1 | photino | $\tilde{\gamma}$ | 1/2 |
| bosons W | $W^+$, $W^-$ | 1 | Wino | ~W | 1/2 |
| boson Z | $Z^0$ | 1 | Zino | ~Z | 1/2 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| gluons | $g$ | 1 | gluino | ~g | 3/2 |
| graviton | $G$ | 2 | gravitino | ~G | 3/2 |
| boson de Higgs | $h$ | 0 | Higgsino | ~h | 1/2 |

**Les théories des cordes**

Toutes les théories des particules élémentaires considèrent en fait que les particules sont ponctuelles, sans dimension. Et certains problèmes se posent, qui viennent de là. Alors, certains ont imaginé de décrire les particules non plus comme des points, mais comme de minuscules (oh, combien !) cordes ayant une dimension. Ces cordes vibrent, un peu comme une corde de guitare. Etant finies, elles ont des modes de vibration bien définis, qui correspondent aux états excités de la particule.

Dans une théorie des cordes, les cordes peuvent vibrer dans bien plus que 3 dimensions. Mais comme nous n'en connaissons que trois, il faut que les autres soient invisibles, donc trop petites pour être perçues. On considère qu'elles sont enroulées sur elle-mêmes, mais ceci est difficile à imaginer...

Il n'y a pas une théorie des cordes, mais plusieurs, certains prétendent qu'il y en a une infinité... En fait, ces théories s'appuient sur des paramètres ajustables, et de là vient la difficulté. On règle les paramètres pour que la théorie s'adapte aux observations. Ce qui veut dire qu'on peut adapter la théorie à un peu n'importe quoi : elle n'est pas réfutable, ce qui la rend totalement inacceptable pour beaucoup de physiciens.

## *Résumé étymologique*

| *particule* | *origine* | *étymologie* | *explication* |
|---|---|---|---|
| **atome** | grecque | *a* = privatif; *tomein* = couper | insécable, qui est réputé non divisible en éléments plus petits |
| **lepton** | grecque | *leptos* = léger | les leptons sont les particules légères, électron, muon, tau et les neutrinos |
| **hadron** | grecque | *hadros* = fort | les hadrons sont les particules sensibles à l'interaction forte |
| **baryon** | grecque | *barys* = lourd | les baryons sont les particules lourdes, proton, neutron, etc. |
| **méson** | grecque | *mésos* = moyen, intermédiaire | les mésons sont les particules de masse intermédiaire ; ce sont des bosons formés d'un quark et d'un anti-quark |
| **boson** | nom propre | Bose, physicien indien | les bosons sont les particules qui se placent de préférence toutes dans le même état quantique. Ce sont les particules d'interaction. |
| **fermion** | nom propre | Fermi, physicien italien | les fermions sont les particules qui se placent dans des états quantiques différents. Ce sont les particules de matière. |
| **boson W** | anglaise | *weak* = faible | les bosons W + et - sont les deux vecteurs chargés de l'interaction faible. Le dernier est neutre, c'est le $Z_0$. |
| **boson $Z_0$** | | | |
| | | | |

---=OO=---




La Physique est la science qui vise à *représenter et expliquer le fonctionnement de la Nature*. Elle consiste à écrire des lois sensées représenter ce fonctionnement. Si c'est le cas, ces lois nous permettent de répondre aux différentes questions que l'on peut se poser à propos de tout phénomène.

Un physicien opère dans son laboratoire, y fait des expériences. De leur résultat, il infère les lois qui régissent les objets étudiés. Il est évident que cette approche est limitative par rapport au problème posé ci-dessus, puisque le champ de l'expérience n'est qu'une toute petite partie de la Nature ! On imagine donc que toute théorie bâtie de cette manière aura une portée limitée au domaine dans lequel les expériences la valident.

Mais le rêve de bâtir une Physique a-t-il un sens ? Autrement dit, existe-il des lois générales qui régissent la Nature ?

> Si un autre physicien, situé aux antipodes du premier, fait la même série d'expériences, en déduira-t-il les mêmes lois ? Si ce n'était pas le cas, ils ne pourraient se mettre d'accord, et la Physique n'existerait tout simplement pas.
> Fort heureusement pour notre compréhension, les lois sont les mêmes ici et là, et la Physique existe.

Ceci étant, il faut étudier comment les corps tombent, à quelles lois ils obéissent. Et ce problème est loin d'être simple. Galilée a joué un grand rôle dans sa résolution.

La première chose à comprendre pour la chute des corps, est l'indépendance de la matière. Ceci est loin d'être évident : lorsque les feuilles tombent à l'automne, on aime bien regarder leur chute lente et tourbillonante, qui est reposante pour l'esprit. Par contre, l'expérience de tous les jours nous montre qu'un objet compact, comme une pierre, tombe brutalement. Nos sens nous indiquent donc que la chute se fait selon la nature de l'objet qui tombe. Mais ceci n'est qu'une illusion, et il revient à Galilée de l'avoir compris, et d'avoir fait une expérience célèbre pour le montrer : il lâcha deux objets de nature différente du haut dela tour de Pise, et tout le monde pût constater que les deux arrivèrent au sol en même temps. Mais Galilée utilisa deux objets compacts, l'un plus lourd que l'autre. Il n'aurait pas pu utiliser une plume pour son expérience : celle-ci, dans sa chute, offre une grande surface à l'air qu'elle traverse, et l'écoulement de l'air autour d'elle la freine. Cet écoulement étant de plus turbulent, elle oscille.

Des physiciens ont fait cette expérience, bien après Galilée, dans une cloche à vide : l'air étant retiré, la plume n'a plus de support, et peut tomber librement. Mais la plus belle réalisation a été faite le 2 août1971 par Dave Scott, sur la Lune :

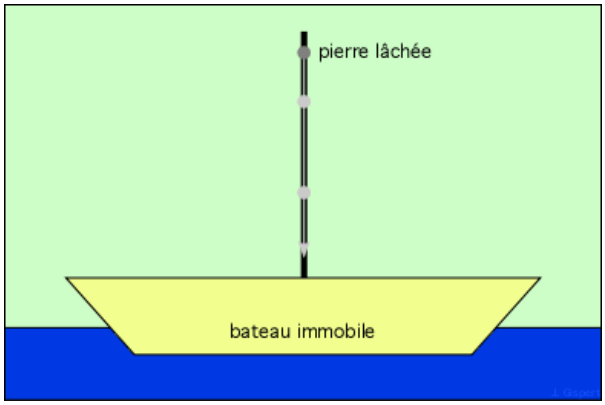
Le résultat est ici parfaitement visible : la plume tombe exactement comme le marteau dans le vide lunaire, et la nature du corps ne change pas sa réponse à une accélération.

Un autre problème important se pose : les lois sont-elles les mêmes si on fait les expériences dans un mobile ? Si elles n'avaient pas de lien, la Physique n'aurait guère de sens. D'innombrables phénomènes produisant un mouvement, la question est très importante.

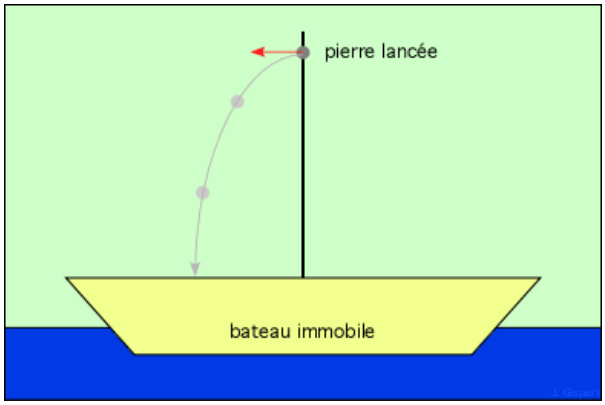
Une expérience illustre cette question :

**Le navire et la pierre.**

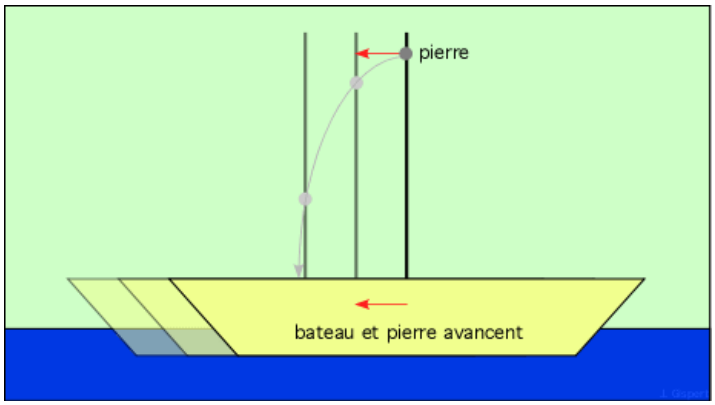
Considérons un navire au port, et la vigie qui lâche une pierre du sommet du mât. Vous imaginez bien que la pierre tombe au pied du mât.




Si la vigie lance la pierre vers l'avant, le bateau étant toujours immobile, la pierre tombera sur le pont un peu en avant du mât :




Maintenant, le navire est en haute mer, porté par un bon vent, et file à vitesse constante (mouvement rectiligne uniforme). Que fera la pierre, si la vigie répète son expérience dans ces nouvelles conditions, en lâchant la pierre sans la lancer ? (on suppose une mer d'huile, le navire restant parfaitement horizontal dans les deux cas). La réponse à cette question n'est pas si évidente. Bien des débats ont eu lieu à son sujet. Mais en fait, la pierre tombe toujours au pied du mât :



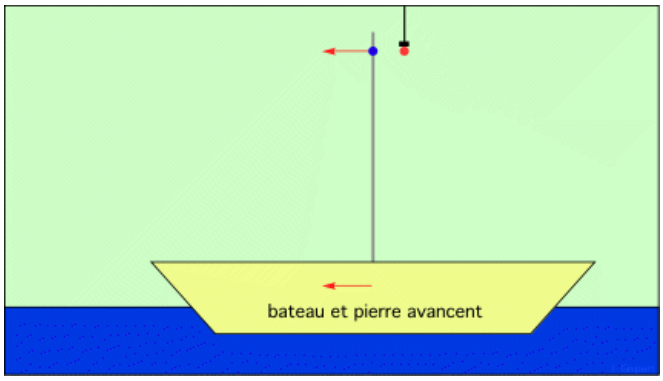

On pourrait imaginer qu'elle tombe en arrière, puisque la navire avance pendant la chute. Mais la pierre aussi avance, puisqu'avant de tomber, elle était portée par le bateau à la même vitesse que lui. Pendant sa chute, elle continue d'avancer par inertie, à la même vitesse que le bateau, et donc tombe au même endroit que lorsque le bateau était immobile.

On peut dire aussi que, vue du bateau, **la pierre n'a pas de mouvement horizontal par rapport au bateau**, même si le bateau avance ! Donc elle tombe bien au pied du mât.

| Conclusion : le résultat de l'expérience faite à bord est le même, que le bateau soit à l'arrêt ou en translation **uniforme**. |
|---|

On peut sans doute comprendre mieux tout ceci si on suppose que le bateau passe sous un pont (navigation fluviale). Et lorsque le bateau passe, quelqu'un lâche une pierre du pont au même moment que la vigie au sommet du mât. Les deux pierres sont soumises à la même force de gravitation, et donc leur mouvement vertical est le même. Mais celle qui est lâchée du pont n'a pas de vitesse horizontale, et tombe donc d'un

mouvement vertical pur. Par contre, celle qui est lâchée du mât possède, au moment où commence sa chute, une vitesse horizontale identique à celle du bateau. Aussi conserve-t-elle cette vitesse par inertie. Elle est donc animée de deux mouvements, et suit une trajectoire qui les combine. L'animation ci-dessous le montre :




Il y a deux choses à retenir de cela :

- vue du bateau, la pierre tombe toujours au pied du mât, que le bateau soit à l'arrêt ou en mouvement uniforme (la physique est la même dans les deux situations) ;
- deux personnes qui observent la chute, l'une sur le bateau et en mouvement avec lui, l'autre sur le quai et qui voit le bateau se déplacer, ne décriront pas la scène de la même manière. Elles seront d'accord sur le point de départ et sur le point d'arrivée de la pierre (sommet et pied du mât), mais pas sur la trajectoire observée pour y parvenir.

Il faut donc admettre que l'on puisse décrire différemment UN MEME PHENOMENE, selon le point de vue d'où on l'observe. En termes plus techniques, on dira que les mesures de position que l'on fait de la pierre dépendent de la situation de l'observateur !

Ce sont les conséquences de ces points de vue différents qui constituent la *Relativité Galiléenne*.

Précisons encore un peu cela : vu du quai, la trajectoire de la pierre est une parabole, vue du bateau elle est rectiligne. Mais si on projete la parabole sur un axe vertical, autrement dit si on annule le mouvement horizontal de la pierre, on retrouve exactement le mouvement de la pierre vu du bateau. Cette annulation du mouvement du bateau peut se faire si l'observateur qui est sur le quai marche dans la même direction et à la même vitesse que le bateau. Il voit alors le bateau immobile, et la pierre tomber verticalement au pied du mât.

Cette remarque nous indique que, même si les histoires racontées par deux personnes sur un même phénomène peuvent différer, on peut envisager un moyen de transformer l'une en l'autre, et donc de réduire ces différentes histoires à une seule qui représente le phénomène lorsqu'on ne se déplace pas par rapport à lui. Dans la suite, nous allons préciser tout cela. Puisque la différence est une question de point de vue, lepromeneur sur le quai peut changer de point de vue en marchant à la même vitesse que le bateau.

**Observateurs galiléens et équivalence**

On utilise le terme *observateur* au lieu de expérimentateur. Le second a un sens actif, le premier est passif. Cependant on considère que, même lorsqu'on monte une expérience, on est passif pendant son déroulement, et on observe ce qu'il se passe.

On s'intéresse à la Mécanique : la *Mécanique* est la science qui étudie les mouvements et/ou les déformations, produits par des forces.

Pour traiter le problème du mouvement (la Mécanique), on se limite ici aux mouvements à vitesse constante (la valeur de la vitesse ne change pas, et la direction du mouvement reste la même). Ces mouvements sont appellés *mouvements uniformes*, ou *translations uniformes*.

On nomme *observateurs galiléens* deux observateurs qui sont en translation uniforme l'un par rapport à l'autre.

La conclusion vue plus haut a été généralisée grâce à de multiples expériences mécaniques faites par des observateurs galiléens :

**Deux observateurs galiléens, qui font les mêmes expériences, trouvent les mêmes résultats**

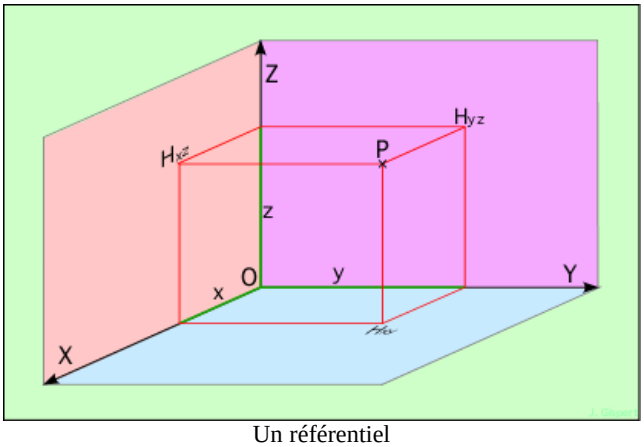
Dans les exemples ci-dessus, le hunier est un premier observateur lorsqu'il lâche la pierre, navire à quai.
Il est un second observateur lorsqu'il la lâche, bateau en mouvement uniforme.
Dans les deux cas, il constate que la trajectoire de la pierre suit le mât.

L'impossibilité de distinguer les résultats des expériences de mécanique faites par deux observateurs galiléens se nomme *équivalence des observateurs galiléens*.

**Référentiel**

Puisque l'observateur doit évaluer des mouvements, il doit d'abord repérer la position d'un objet. Considérons un phénomène simple, comme le mouvement d'un boule de billard lancée sur une surface plane et horizontale. Pour pouvoir établir une loi du mouvement, il faut être capable de dire où se trouve la boule, à chaque instant. Il faut donc repérer la position, et le temps. Pour la position, il suffit de placer un mètre en ruban près de la trajectoire de la boule. Pour le temps, il faut une horloge. Donc, une ligne droite graduée (on l'appellera *axe*), et une horloge.

Plus généralement, si le mobile suit une courbe plus complexe, il faudra trois axes au lieu d'un (les trois étant bien sûr gradués). L'ensemble des trois axes constitue un *repère*, ou plutôt un *référentiel*. Les axes sont en général pris perpendiculaires les uns aux autres.



Un référentiel

Le point P est repéré par ses trois coordonnées x, y et z (en vert sur les axes). Pour les trouver, on construit le parallélépipède rectangle ayant pour sommets opposés le point P et l'origine O, et les arêtes parallèles aux axes. Les coordonnées sont les distances de P aux trois plans fondamentaux OXY, OXZ et OYZ.

Les trois axes jouent exactement le même rôle. Aussi, dans la suite, pour des raisons de simplicité, nous ne considérerons en général qu'un seul axe, l'axe X. Les formules qui s'en déduisent sont des modèles : il faut les reproduire pour Y et Z en changeant les noms des variables (changer x en y pour l'une, x en z pour l'autre).

A chaque observateur sera attaché un référentiel, dans lequel il est immobile (pour un expérimentateur, ce sera le laboratoire dans lequel il travaille).

On appelle *repères galiléens*, ou *référentiels galiléens*, ou *repères inertiels*, ou *référentiels inertiels*, des référentiels qui sont en translation uniforme l'un par rapport à l'autre.

**Relativité du mouvement uniforme**

Une conséquence immédiate est que deux observateurs galiléens, placés dans des cabines sans fenêtres, et faisant des expériences de mécanique, ne pourront jamais savoir s'ils sont en mouvement rectiligne uniforme ou au repos. Et cela implique que **le repos n'existe pas !** On peut *se croire* au repos, et être en translation uniforme, même à une vitesse qui nous paraîtrait grande, sans s'en apercevoir. La preuve ? La Terre est en train de tourner sous vos pieds, et vous vous déplacez à la vitesse de 1.221 km $h^{-1}$ (à la latitude de Marseille ; à l'équateur, c'est 1.670 km $h^{-1}$, et aux pôles, c'est évidemment nul) sans le ressentir ! (Il s'agit de la vitesse circulaire autour de la Terre, mais sur un bref moment, on peut la considérer comme une vitesse linéaire). De même, dans un avion, à 800 km $h^{-1}$, on ne ressent rien ; on peut verser une boisson dans un verre sans la renverser : le liquide, comme la pierre dans le bateau, est entraîné avec l'avion, et tombe bien dans le verre ! Par contre, on ressent très bien lorsque l'avion commence sa descente, car il y a un **changement de vitesse** (la vitesse n'est plus uniforme, mais à ce moment-là, l'hôtesse vous a retiré vos verres !) : les changements de vitesse concernent la Relativité Générale.

Remarquez de plus que, le *repos absolu* n'existant pas, la *vitesse absolue* n'existe pas davantage : on ne peut définir la vitesse d'un observateur que *par rapport* à un autre. Et cette notion est totalement symétrique : il est équivalent de dire que $O_1$ se déplace à la vitesse v par rapport à $O_2$, ou que $O_2$ se déplace à la vitesse -v par rapport à $O_1$ (le signe - parce que la direction est opposée : si $O_2$ va vers l'ouest par rapport à $O_1$, alors $O_1$ va vers l'est par rapport à $O_2$). Cette première notion de symétrie sera très importante pour fonder la Relativité Restreinte.

| La Relativité Galiléenne indique que le mouvement est relatif |
| --- |
| Elle ne s'applique qu'aux observateurs galiléens |
| Elle postule que la Mécanique est la même pour tous les observateurs galiléens |

Nous n'avons pas l'habitude de raisonner ainsi, parce que nous disposons en permanence d'un référentiel qui nous *semble* absolu, la Terre. Et par rapport à lui, l'un des observateurs est souvent au repos. Mais songez qu'en fait, nous sommes entraînés par la Terre autour du Soleil (30 km $s^{-1}$), par le Soleil dans la Galaxie (230 km $s^{-1}$), qui se précipite vers Andromède (400 km $s^{-1}$), *etc*. Quand on arrive au super-amas, le reste de l'Univers est fait d'objets de même nature, les autres super-amas. Lequel prendre comme repère absolu ?

Il n'existe donc pas de référentiel absolu auquel rapporter toutes les expériences, et donc nous ne pourrons jamais que rapporter l'une à l'autre. C'est cela la Relativité Galiléenne.

Incidemment, le repos et le mouvement uniforme sont équivalents ! Puisque chacun ne peut être défini que par rapport à un référentiel, il suffit que l'on prenne le référentiel de repos du corps, et un référentiel en mouvement uniforme par rapport à lui, et que l'on applique l'équivalence de ces deux référentiels.

**Principe d'inertie**

Le principe d'inertie avait été envisagé avant Galilée, mais c'est lui qui l'a formalisé. Il résulte de ses travaux sur les plans inclinés. Il s'énonce :

| Un corps qui n'est soumis à aucune force est soit au repos, soit en mouvement rectiligne uniforme. |
| --- |

Tant que le corps ne subit pas de force, il persévère donc dans ce mouvement.

Il est impossible de se placer dans les conditions exactes de ce principe : l'expérience de Galilée ne pouvait annuler les frottements de ses mobiles sur le plan incliné. Le principe est donc une extrapolation d'expériences réelles approchées.

Puisque la masse de l'objet d'expérience ne varie pas, ainsi que sa vitesse, leur produit ne change pas au cours du temps. Ce produit est nommé *quantité de mouvement*, ou *impulsion*, ce dernier terme étant préférable maintenant.

Il en résulte le principe de la *conservation de la quantité de mouvement*.

Si un système est constitué de deux corps, la quantité de mouvement totale du système est la somme des quantités de mouvements des deux corps. C'est elle qui se conserve. S'il y a interaction entre les deux corps, leurs vitesses peuvent changer, mais de telle manière que la quantité de mouvement totale du système reste inchangé. De là découle le principe de l'action et de la réaction. La conservation de la quantité de mouvement est l'un des grands principes de la physique.

## *Problème fondamental*

Considérons deux observateurs galiléens. Supposons que l'un des deux étudie le mouvement d'un corps. Que voit l'autre s'il observe la même expérience ? Pour lui, le corps est en mouvement par rapport à l'autre observateur, qui est lui-même en translation uniforme par rapport à lui.

Ce problème fondamental est celui de la **composition des mouvements**. On considère trois observateurs galiléens en mouvement les uns par rapport aux autres :

| |
|---|
| $O_2$ se déplace à la vitesse constante $v_1$ par rapport à $O_1$ |
| $O_3$ se déplace à la vitesse constante $v_2$ par rapport à $O_2$ |
| A quelle vitesse se déplace $O_3$ par rapport à $O_1$ ? |

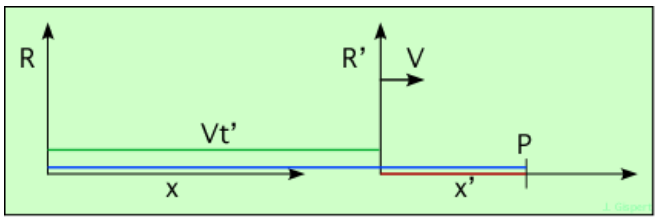
L'illustration classique que nous verrons plus loin est la suivante :

$O_1$ est le quai d'une gare ;
$O_2$ est un train qui roule à $v_1 = 100$ km $h^{-1}$ par rapport à $O_1$ (le quai) ;
$O_3$ est un voyageur qui marche dans le train ($O_2$) à $v_2 = 5$ km $h^{-1}$.
A quelle vitesse voit-on se déplacer le voyageur ($O_3$) depuis le quai ($O_1$) ?

**Transformation de Galilée (changement de référentiel)**

Le problème qui se pose maintenant est de concilier deux physiciens qui auraient étudié le même phénomène dans deux référentiels différents. Les lois qu'ils ont trouvées sont-elles compatibles ? Ont-elle la même forme ? Et surtout, connaissant une loi déterminée dans le référentiel R, peut-on déduire la loi correspondante dans un référentiel différent R', où personne n'a fait d'expériences ? (par exemple faire atterrir et redécoller un engin spatial sur une planète jusque-là inexplorée).

Puisque le cadre choisi concerne les référentiels galiléens, il faut déterminer comment passer d'un référentiel galiléen à un autre (par conséquent se déplaçant à vitesse constante par rapport au premier). La transformation de Galilée permet de calculer les coordonnées dans un référentiel $O_1$, d'un point du référentiel $O_2$, en translation uniforme par rapport à $O_1$ :




On voit sur le schéma deux référentiels (deux axes sont représentés), celui de droite R' étant animé de la vitesse V par rapport à celui de gauche R (la vitesse est figurée par la petite flèche attachée à l'axe vertical). Le point P est repéré par son abscisse x' dans R'. Mais on peut le repérer aussi par son abscisse x dans R. Connaissant x', que vaut x ?

Formellement, il faut distinguer le temps dans les deux référentiels : t dans R, et t' dans R' (une horloge est attachée à chacun). Mais toutes les horloges mécaniques construites n'ont jamais montré la moindre différence de marche. Donc, rien ne permet, dans le domaine d'expérience considéré, de distinguer les deux temps : t = t'.

La réponse se voit sur le schéma : l'abscisse x de P dans R est représentée par le segment en bleu. Il s'obtient comme somme du segment vert et du segment rouge ; le premier est la distance V t' parcourue par le référentiel R' depuis l'origine du temps (où les origines coïncidaient) ; le second est l'abscisse x' de P dans R'. Donc, $x = x' + V t'$.

C'est la transformation de Galilée. Puisque nous avons choisi les axes de telle manière que Ox soit orienté comme la vitesse V, les deux autres coordonnées ne changent pas :

Transformation de Galilée

$$x = x' + Vt'$$
$$y = y'$$
$$z = z'$$
$$t = t'$$

La première de ces relations explique que les coordonnées dans R se déduisent de celles dans R' en ajoutant simplement la distance parcoure par R' dans le temps t'. La dernière nous est naturelle, puisqu'elle dit que le temps est le même partout ! C'est le temps absolu de Newton.

La symétrie évoquée plus haut entre les deux observateurs se traduit par la possibilité de passer du référentiel R au référentiel R', tout aussi bien que de R' à R. En effet, la seconde des deux relations étant elle-même symétrique, se conserve : t' = t. Partant de la première, on peut en tirer x' = x - v t'. Mais puisque t' = t, elle donne : x' = x - v t, ou encore x' = x + (-v) t. On retrouve exactement la même formule, avec la vitesse -v à la place de v. Mais c'est justement la vitesse du référentiel R vu de R'. Les formules de changement de référentiel sont donc inversibles.

La transformation de Galilée a été utilisée pour tous les besoins de la Physique jusqu'à ce qu'on la remette en cause à la fin du XIX$^{e}$ siècle.

**Réponse galiléenne : addition des vitesses**

Cette transformation étant posée, la règle d'addition des vitesses en découle. Considérons un référentiel R, supposé au repos, et un référentiel R' en translation uniforme par rapport à R à la vitesse V.

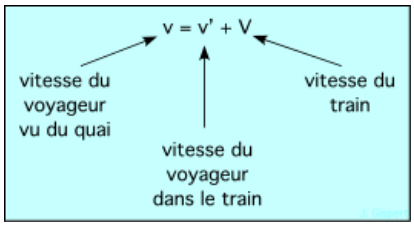
Dans le référentiel R', un mobile se déplace à la vitesse v'. Quelle est la vitesse de ce mobile dans R ?

En utlisant la transformation de Galilée, il est aisé de montrer que :

$$v = v' + V$$

C'est la *règle d'addition galiléenne des vitesses*. On la pratique intuitivement, parce qu'elle correspond à notre expérience quotidienne, conditionnée par des vitesses très faibles.

Dans le cas du train, on a :




En relativité galiléenne, les lois de la Mécanique sont les mêmes dans tous les référentiels galiléens (c'est-à-dire en translation uniforme). Ceci découle de l'équivalence des référentiels galiléens.

**Question essentielle** Si les deux observateurs en mouvement relatif uniforme obtiennent les mêmes résultats physiques, les traduiront-ils par les mêmes équations ? Autrement dit, la **forme mathématique** des phénomènes est-elle indépendante de l'observateur (galiléen) ? En répondant à cette question, on posera des barrières permettant de délimiter le terrain pour la Relativité Restreinte. Si les équations ont la même forme, on dit qu'elles sont *invariantes par changement de référentiel*.

Les expériences précédentes sont limitées, car les vitesses relatives sont très faibles. Elles définissent la *Physique Classique*, celle des petites vitesses qui nous est familière. Mais la technologie humaine est maintenant capable de produire des vitesses très grandes, qui sortent du domaine dans lequel la Physique Classique a été élaborée. On voit là une propriété fondamentale des lois de la Physique : elles sont établies dans un cadre bien défini, et sont donc valables dans ce cadre. En dehors, il est possible que les lois restent valables, mais il est possible tout autant qu'elles diffèrent. C'est bien ainsi qu'il faut concevoir la théorie de la Relativité Restreinte. Elle part du constat que la Physique Classique (Relativité Galiléenne) **ne permet pas** de sortir de son cadre des petites vitesses, ce que nous allons voir dans le chapitre suivant.

La pertinence de la Relativité Galiléenne dépend de la finesse des expériences correspondantes. Pour le problème du train, elle donne une réponse parfaitement satisfaisante (en accord avec l'expérience). Mais nous verrons que, si on remplace le voyageur par un rayon lumineux, la Relativité Galiléenne ne donnera pas la bonne réponse, car elle sort du cadre d'expériences qui la valident (les petites vitesses). C'est la Relativité Restreinte qui apportera la bonne explication.

Tout ce que nous avons dit jusque-là sur les référentiels et les observateurs, s'applique aussi à la Relativité Restreinte, la différence entre elles étant le rapport des vitesses considérées avec la vitesse de la lumière : si ce rapport est petit (vitesses des mobiles très petites devant la vitesse de la lumière, domaine de notre expérience quotidienne), alors la Relativité Galiléenne est pertinente, sinon (vitesses proches de c) c'est la Relativité Restreinte qui donne la réponse correcte.

**Le temps**

Nous n'avons rien dit jusqu'ici à propos du temps. Il est admis que celui-ci est au-dessus de nos préoccupations, c'est une donnée aussi intangible que l'espace lui-même. Si le mouvement est relatif, le temps et l'espace sont, eux, absolus. Ils caractérisent la Physique Classique, le

cadre Newtonien (dans laquelle il s'est développé). Le temps est une variable, dont la valeur est identique pour tous les observateurs !

**Que sont l'espace et le temps ?**

En Physique Classique, le vide est l'absence de matière. Mais alors, qu'est-ce qu'un espace vide ? Pour le concevoir, il faudrait l'observer. Donc y être, et alors, il n'est plus vide… Admettons cependant que notre présence ne change rien. Qu'observerons-nous, s'il n'y a rien ? L'espace en lui-même n'est pas observable. Postuler qu'il existe est une vue de l'esprit !

Pour le temps, le problème est un peu le même. Comment mesurer le temps, s'il n'y a rien ? Pas le moindre repère, rien qui bouge… Là encore, l'existence du temps en-dehors de toute matière est une illusion !

Mais ces deux illusions ont été enracinées dans notre compréhension du monde, par des phénomènes de prolongement. Ce qui existe ici et maintenant doit exister aussi ailleurs, et dans un autre temps. Et cette illusion est la base de toute la physique pré-relativiste (Relativité Galiléenne).

**La dynamique**

La dynamique est l'étude du mouvement des corps. Partant du principe d'inertie, un corps qui ne subit pas de forces continue sur sa lancée. Mais si une force lui est appliquée, son mouvement en est affecté.

L'accélération d'un mobile est la variation de sa vitesse. Il est évident qu'elle concerne les changements dans la grandeur de la vitesse : pour passer de 50 km $h^{-1}$ à 100 km $h^{-1}$ en ligne droite, une voiture subit une accélération. Mais à vitesse linéaire constante, il faut aussi une accélération pour changer de direction. On le ressent bien lorsque, passager d'une voiture, on prend un virage serré. De la même manière, la Lune dont la vitesse a toujours à peu près la même grandeur, subit en permanence de la Terre une accélération (de la pesanteur, ou gravitationnelle), qui courbe sa trajectoire.

Le *principe fondamental de la dynamique* est la proportionnalité entre l'accélération et la force :

$$f = m \gamma$$

Vous pouvez trouver ici la méthode géométrique utilisée par Newton pour l'obtenir.

Toute la Mécanique Céleste (en particulier) est basée sur cette identité. Elle relie deux notions de nature différente : la force est une notion dynamique (grec *dynamis* : puissance), alors que l'accélération est une notion cinématique (grec *kinema* : mouvement). Elle indique donc qu'une force produit un mouvement.

Elle s'écrit aussi : $f = dp / dt$, où $p = m v$.

$dp / dt$ est la dérivée, par rapport au temps, de la vitesse, c'est-à-dire le changement de vitesse ; p est nommé *impulsion*. C'est sous cette forme qu'elle sera reprise par la Relativité Restreinte.

**Electromagnétisme**

Jusqu'ici, nous avons parlé de la Mécanique et de l'invariance de ses lois par transformation de Galilée. Mais qu'en est-il de l'électromagnétisme ?

Si on applique la transformation de Galilée aux quatre équations de Maxwell, qui définissent l'électromagnétisme, on s'aperçoit qu'elles ne sont pas toutes invariantes. Par conséquent, l'électromagnétisme, théorie qui a pourtant fait ses preuves, n'est pas compatible avec la Relativité Galiléenne. Ceci sera expliqué plus en détails dans le chapitre suivant…

## *Résumé*

La Relativité Galiléenne est une étude des points de vue différents de deux observateurs, en translation uniforme l'un par rapport à l'autre, sur un même phénomène.

Tous les observateurs partagent le même espace et le même temps.

**Principe d'inertie** : les expériences de Galilée lui ont permi de définir le principe d'inertie
*un corps en mouvement, s'il ne subit aucune force extérieure, continue ce mouvement dans la même direction, à vitesse constante*.

**Principe de Relativité Galiléenne** : les lois de la **Mécanique** sont invariantes dans la transformation de Galilée.

**Observateurs galiléens** : les observateurs galiléens sont en translation uniforme par rapport à l'autre (si la vitesse de deux observateurs n'est pas constante, ils ne sont pas galiléens).

**Equivalence des observateurs galiléens** : deux observateurs galiléens, qui font les mêmes expériences de Mécanique, obtiennent les mêmes résultats.

**Le repos absolu n'existe pas** : il est impossible à un observateur galiléen de savoir, en faisant des expériences de mécanique, s'il est en mouvement ou au repos.

**Il n'existe pas de référentiel absolu** : c'est une conséquence de l'absence de repos absolu.

**Le temps est absolu** : il est le même pour tous les observateurs galiléens. La transformation de Galilée ne fait donc intervenir que les positions dans les deux référentiels (et leur vitesse relative).

**Addition des vitesses** : conséquence de la transformation de Galilée.

**Relation fondamentale de la dynamique** : $f = m \gamma$.

**Cadre de l'expérience quotidienne** : la transformation de Galilée ne s'applique que pour les vitesses faibles devant celle de la lumière, et pour des observateurs galilélens. Elle est à la base de toute la Physique Classique non relativiste.

Les principes qui supportent cette théorie sont validés indirectement par les expériences, par l'intermédiaire des lois qu'ils permettent d'établir, et dans le cadre cité.

---=OO=---




Les objets de notre perception impliquent invariablement temps et lieu ensemble.
Personne n'a jamais observé de lieu, sauf en un instant donné,
ni de temps, sauf en un endroit précis.

*Minkowski*

**Plan**


1.1 Origine historique
- 1.1.1 Bases
- 1.1.2 Principe de Relativité

1.2 La lumière
- 1.2.1 L'éther
- 1.2.2 Vitesse de la lumière
- 1.2.3 Electromagnétisme
- 1.2.4 But de la Relativité Restreinte

1.3 Relativité du temps
- 1.3.1 Automobile de Poincaré
- 1.3.2 Dilatation du temps
- 1.3.3 Horloges

1.4 Espace-temps
- 1.4.1 Défaut de la Relativité Galiléenne
- 1.4.2 Transformation de Lorentz
- 1.4.3 Vie du muon

1.5 Où l'on reparle de Pythagore
- 1.5.1 Invariant relativiste
- 1.5.2 Représentation
- 1.5.3 Cônes de lumière
- 1.5.4 Lignes d'univers
- 1.5.5 Addition des vitesses

1.6 Conséquences
- 1.6.1 Non simultanéité
- 1.6.2 Contraction des longueurs
- 1.6.3 La masse en Relativité
- 1.6.4 Relation fondamentale de la dynamique
- 1.6.5 Energie de masse
- 1.6.6 Formalisme
- 1.7 Un peu d'histoire

1.8 Résumé


## *1.1 Origine historique*

La théorie de la Relativité Restreinte à été publiée en 1905 par Albert Einstein, et la légende veut qu'il l'ait imaginée entièrement seul. Ce n'est pourtant pas le cas, et des travaux bien antérieurs l'ont précédée. Tout d'abord, les travaux de Henri Poincaré et Hendrik Lorentz sur la transformation des coordonnées, qui ont déjà amené la notion d'espace-temps. Ensuite, l'œuvre d'Henri Poincaré, qui a publié dès 1902 une version de la Relativité bien avancée. Le travail de Poincaré était une œuvre de mathématicien, et Einstein lui a ajouté l'interprétation physique indispensable. Il ne faut pas oublier qu'Einstein était un théoricien et qu'il a exercé son intuition sur la façon dont la Nature *doit* fonctionner. Une fois son opinion faite, il cherchait le moyen de la transposer dans une théorie, et en général, celle-ci lui donnait raison.

### 1.1.1 Justification

Pourquoi a-t-on remis en question la Relativité Galiléenne, alors que toutes les expériences de Mécanique étaient si bien expliquées ?

Rappellons que la Mécanique Céleste s'est développée au cours du XVII$^{e}$ siècle, et que ses performances sont exceptionnelles ! Elles ont permis de prédire les éclipses avec une précision de quelques secondes (la théorie de la Lune sera améliorée par Brown en 1930). Alors, pourquoi changer une équipe qui gagne ?

Le problème n'est pas venu de la Mécanique, mais de l'Electricité. Plus précisément, de la théorie de l'Electromagnétisme achevée par Maxwell.

Le texte qui suit *n'est pas* un cours de Relativité Restreinte. Son but est de montrer comment la Relativité résoud les problèmes posés par les théories antérieures, et comment elle s'est développée.

### 1.1.2 Principe de Relativité

La Relativité Galiléenne prend en compte les référentiels galiléens, et impose que les lois de la Mécanique soient invariantes par la transformation de Galilée (lorsque les vitesses sont petites devant celle de la lumière, mais ceci n'est pas indiqué, et n'apparaîtra que plus tard comme un défaut de la théorie).

La Relativité Restreinte conserve les référentiels galiléens, mais généralise en levant la restriction sur les vitesses, et en imposant l'invariance des lois de l'électromagnétisme. Elle impose donc l'invariance de toutes les lois de la Physique dans la transformation de Lorentz-Poincaré (qui remplace la transformation de Galilée).

> Remarquez le principe de construction des deux théories : elles établissent (par l'observation) un principe d'invariance, puis l'appliquent pour construire des lois (mathématiques) qui respectent ce principe.
> Le principe d'invariance établit que les lois sont les mêmes pour des observateurs en mouvement l'un par rapport à l'autre : à vitesse constante faible pour la Relativité Galiléenne, à vitesse constante quelconque pour le Relativité Restreinte.
> Les lois doivent être les mêmes pour un physicien sur le quai de la gare, et son collègue dans le train.
> Les lois de la Relativité Restreinte sont littéralement construites à partir des lois de la Relativité Galiléenne, modifiées de façons à être invariantes par la transformation de Lorentz.

## *1.2 La lumière*

La lumière étant une onde électromagnétique, voyons ce qu'elle nous réserve. La lumière est une onde, c'est une affaire entendue. Après avoir longtemps hésité entre une théorie corpusculaire (déjà les grecs…) et une théorie ondulatoire, les physiciens se sont laissés convaincre par les expériences de diffraction et d'interférences, que seules les ondes pouvaient expliquer. Donc, la lumière est une onde. Une onde se propage dans un milieu matériel ! (pensez au son, qui est une variation de pression ; heureusement il ne se propage pas dans le vide, sans quoi le Soleil nous ferait un drôle de vacarme).

Mais la lumière qui nous parvient du Soleil se propage dans le vide. Comment la lumière peut-elle se propager sans milieu matériel ?

### *1.2.1 L'éther*

Pour contourner cette difficulté, les physiciens ont imaginé l'existence d'un milieu qui baignerait tout l'espace, vide ou non, et dans lequel la lumière se propagerait ; c'est un milieu *ad-hoc* qu'ils ont nommé *éther*. Tous les phénomènes que l'on considère en physique sont des **phénomènes locaux** ! Leur distance spatiale et temporelle est petite. Par contre, la notion d'éther est une **notion globale**.

Le problème était alors de le mettre en évidence, et d'en définir les propriétés exactes (par rapport à la matière en particulier).

L'éther, s'il existait, constituerait un référentiel absolu, par rapport auquel on pourrait déterminer tous les mouvements. Le repos par rapport à l'éther serait envisageable, contrairement à ce qu'on a dit au sujet de la Relativité Galiléenne. Mais l'éther n'étant pas directement accessible (on ne peut y poser un repère), il n'y a pas de contradiction dans la théorie.

### *1.2.2 Vitesse de la lumière*

La lumière pose un problème tout à fait particulier. La Mécanique Classique admettait les interactions à distance instantanées (la gravitation en particulier est une force ne dépendant pas du temps pour sa transmission, mais attention, gravitation et lumière ne sont pas la même chose). Par conséquent, dans la physique classique, la lumière se propage instantanément. Or ceci est faux. La vitesse de la lumière est très grande, mais finie. La première démonstration en a été donnée par Römer, qui a expliqué une erreur périodique entre les positions calculées et mesurées des satellites de Jupiter (sur les phénomènes remarquables que sont leurs éclipses). La période de cette erreur était égale à la révolution synodique de la planète, donc elle était liée aux mouvements combinés de Jupiter et de la Terre. Römer a montré qu'il fallait tenir compte du temps que met la lumière pour nous parvenir, selon que Jupiter est en opposition ou en conjonction, la distance changeant de 300 millions de km entre ces deux points. Si la vitesse de la lumière est finie, l'erreur s'explique par la différence de temps pour parcourir un trajet plus ou moins long. Römer avait trouvé une vitesse de l'ordre de 200.000 km $s^{-1}$, ce qui est déjà très bien étant données les difficultés de la méthode. Remarquez que cette première mesure a utilisé une distance de plusieurs centaines de millions de kilomètres pour mettre cet effet en évidence.

Par la suite, Foucault a réalisé un montage permettant de mesurer la vitesse de la lumière sur une distance faible (quelques kilomètres). Puis des méthodes électriques ont été utilisées, avec une bien meilleure précision (la vitesse de la lumière intervient dans les équations de l'électromagnétisme, puisque la lumière *est* un phénomène électromagnétique).

Ces expériences mesuraient la vitesse de la lumière dans le vide (Römer) puis dans l'air (Foucault) ; les mesures électromagnétiques donnent la vitesse dans le vide, celle qui intervient dans les équations de l'électromagnétisme.

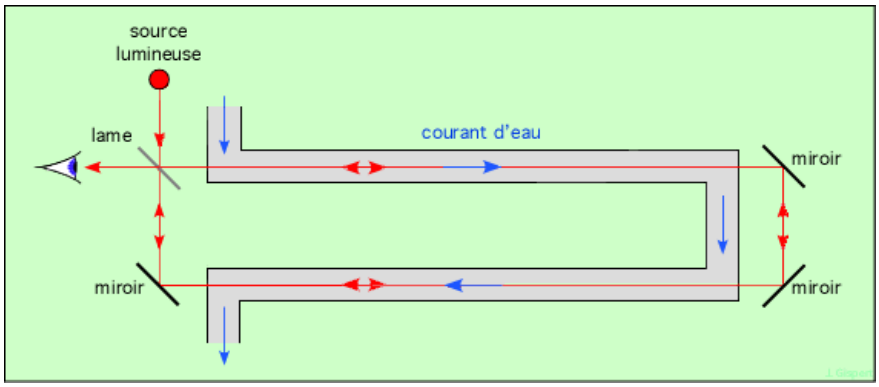
Ensuite, de nombreuses expériences, dont celles, célèbres, de Fizeau et de Michelson-Morlay, ont prouvé que la vitesse de la lumière est la même pour tous les observateurs galiléens, que ceux-ci soient au repos ou en mouvement. Les physiciens se sont ensuite tournés vers les phénomènes fins, liés aux conditions de la mesure.

**Expérience de Fizeau**

L'expérience a consisté à mesurer la différence de vitesse de la lumière, lorsque l'éther dans lequel elle se déplace est entraîné par un milieu matériel (on ne pensait pas que l'eau elle-même entraînerait la lumière).

Fizeau a envisagé de faire passer le rayon lumineux dans un courant d'eau, mais pour mettre en évidence une différence forcément très faible (sinon elle aurait été mise en évidence bien avant), il fallait produire des interférences, phénomène extrêmement sensible. Pour cela, Fizeau

faisait passer le rayon lumineux deux fois dans un courant d'eau, grâce à une lame semi-réfléchissante :



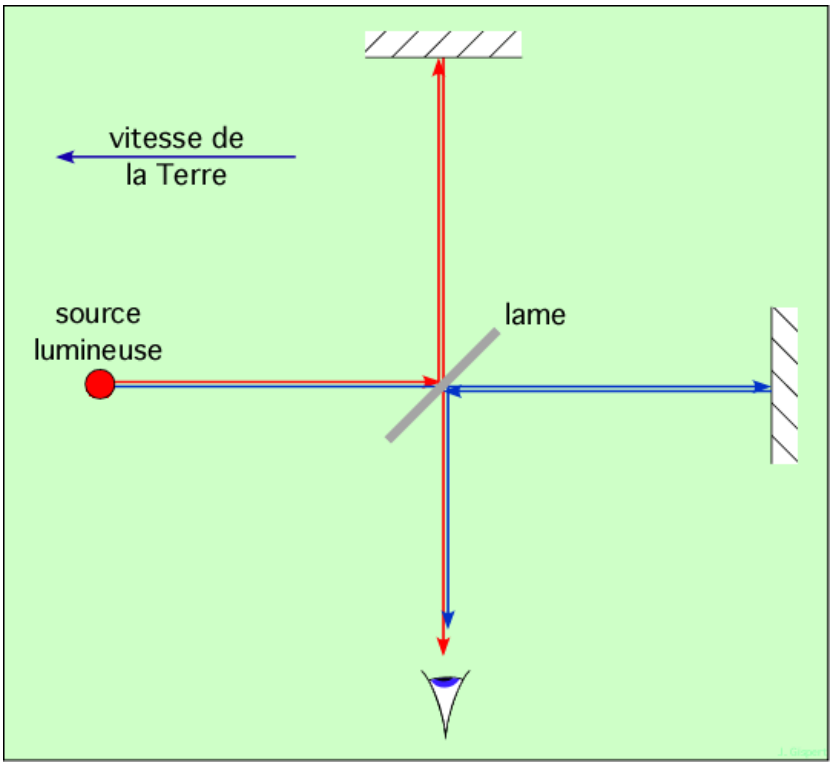

L'expérience a donné un résultat, sous la forme d'une formule empirique, **qui n'est pas en accord avec l'addition des vitesses de la Mécanique Classique**. Par contre, il sera parfaitement expliqué par la Relativité Restreinte, car il constitue une approximation au premier ordre de la formule relativiste d'addition des vitesses. Pour l'instant, c'est donc un accroc dans la théorie en usage, mais ce sera aussi une justification de la Relativité.

**Expérience de Michelson-Morlay**

L'expérience de Michelson et Morlay est la plus célèbre des expériences de cette catégorie, et celle qui a emporté l'assentiment des physiciens.

Si la lumière se propage dans l'éther, étant donné que la Terre traverse celui-ci à 30 km $s^{-1}$, la vitesse de la lumière doit être plus grande dans la direction du mouvement que dans la direction perpendiculaire. L'expérience consiste à lancer un rayon lumineux vers une lame semi-réfléchissante. Un partie du rayon, figurée en rouge, se réfléchit sur la lame, puis sur le miroir, revient vers la lame et la traverse pour atteindre l'observateur (bien sûr, une partie du rayon se réfléchit sur la lame au retour et revient vers la source ; cette partie est perdue). Une autre partie de la lumière émise (représentée en bleu) traverse la lame, se réfléchit sur le second miroir, puis se réfléchit sur la lame au retour (une autre partie traverse…). L'observateur reçoit donc deux rayons différents, émis par une même source, mais ayant parcouru des chemins différents, à une vitesse différente si l'on en croit la physique classique (addition des vitesses). Lors de l'aller-retour dans la direction du mouvement (de la Terre), la perte dans un sens ne compense pas le gain dans l'autre, et le résultat classique est un déphasage du rayon bleu par rapport au rayon rouge.

Ce déphasage doit être observé, il est nettement au-dessus des erreurs de mesure.




Et l'on n'a rien vu ! L'expérience refaite maintes fois a été têtue, elle a toujours donné le même résultat, négatif… Il n'y a pas d'entraînement de la lumière par l'éther. Et comme l'éther a été imaginé pour porter la lumière, il n'a plus de raisons d'être ! *Exit* l'éther …

Cette expérience a montré donc qu'il n'existe pas de référentiel absolu (l'éther). Elle a aussi montré que la vitesse de la lumière est indépendante de la vitesse de déplacement de la Terre : c + 30 km $s^{-1}$ = c ! Cette équation, mathémtiquement fausse mais significative, met en défaut l'addition classique.

### 1.2.3 L'électromagnétisme

L'électromagnétisme est défini par un jeu de quatre équations (équations de Maxwell) qui permettent de décrire tous les phénomènes concernant l'électricité et le magnétisme. Or un petit calcul à partir de ces équations indique la formation d'ondes électromagnétiques, dont la vitesse de propagation est donnée par :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

Les deux termes $\varepsilon_0$ et $\mu_0$ sont les deux constantes fondamentales de l'électricité et du magnétisme. Par conséquent, la vitesse des ondes électromagnétiques qui en découle est aussi une constante. Le calcul montre qu'elle est égale à la vitesse de la lumière. Il a été prouvé par ailleurs que la lumière est bien cette onde électromagnétique-là. Donc la vitesse de la lumière, déduite de l'électromagnétisme, est bien une constante.

Sans considérer les ondes, le simple examen de la quatrième de ces équations, l'équation de Maxwell-Ampère, suffit pour prouver que la vitesse de la lumière est finie. En effet, elle s'écrit :

$$\vec{rot}\,\vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \frac{1}{c^2}\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Si c est infini, le terme dE / dt a son coefficient nul. Il disparaît donc, ce que contredit l'expérience. Et dans ce cas, les équations de Maxwell seraient invariantes dans la transformation de Galilée.

Tout ceci fait un ensemble de problèmes qui affectent la théorie, et qui appellent à définir une sur-théorie, englobant celle-ci et résolvant ces problèmes. Ce sera la Relativité Restreinte.

**Observateurs galiléens**

Ce qui a été dit à propos de la Relativité Galiléenne n'a pas à être remis en cause : l'équivalence des référentiels galiléens est conservée.

**Résumé**

Pour synthétiser cette introduction, nous pouvons noter que :

- il n'existe pas de référentiel absolu ;
- les observateurs galiléens sont équivalents entre eux ;
- la vitesse de la lumière est la même dans tous les référentiels.

## *1.2.4 But de la Relativité Restreinte*

Regardons le résultat essentiel de la Relativité Galiléenne à la lumière (c'est le cas de le dire) de l'invariance de c. Reprenons pour cela le simple problème du train, mais en remplaçant le voyageur par un rayon lumineux issu d'une lampe fixée au wagon, et dirigée vers l'avant. Lorsque cette lampe est allumée, à quelle vitesse l'observateur situé sur le quai voit-il se déplacer le rayon lumineux ?

La réponse est simple. On applique la loi d'addition des vitesses $v_q = v_{Lt} + V_t$, où $v_{Lt}$ est la vitesse de la lumière dans le référentiel du train, $V_t$ est la vitesse du train par rapport au quai, et $v_q$ la vitesse du rayon lumineux par rapport au quai. Dans l'exposé du problème nous avions $V_t$ = 100 km $h^{-1}$ ; $v_{Lt} = c$, donc :

$$v_q = c + 100 \text{ km } h^{-1}$$

Inutile de faire le calcul, il est évident que le résultat est strictement supérieur à c. La conséquence de l'addition des vitesses est que le rayon lumineux se déplace à une vitesse supérieure à c par rapport au quai.

Nous venons de voir que ce résultat est en contradiction flagrante avec l'expérience. Et c'est toujours l'expérience qui a raison contre la théorie ! Par conséquent, la loi galiléenne d'addition des vitesses est fausse.

La Mécanique Classique ne peut donc s'étendre hors de son domaine des petites vitesses, puisque la vitesse de la lumière est la même dans tous les référentiels (ce qui implique que l'addition des vitesses n'est pas réelle). Voilà les idées de base à partir desquelles la Relativité a été bâtie. Remarquez qu'elles sont particulièrement solides.

Le but de la Relativité Restreinte est de décrire les lois de la physique,
déterminées par des observateurs galiléens,
même à grande vitesse.

De nombreux physiciens ont cherché à résoudre le problème. Abandonner l'addition des vitesses signifie la remplacer par une autre formule qui donnerait les mêmes résultats à petite vitesse, mais qui limiterait toujours à la vitesse de la lumière. La recherche de cette formule est un problème mathématique, qui a de nombreuses solutions. Il a été résolu par Poincaré et Lorentz, mais prenons les choses par le début.

## *1.3 Relativité du temps*

**Notation**

Dans ce qui suit, on notera les coordonnées dans le référentiel mobile avec des primes : x', y', z', t', alors que les coordonnées dans le référentiel fixe n'en auront pas. Cette convention permet de distinguer immédiatement dans quel référentiel une variable se place.

### 1.3.1 Automobile de Poincaré

Si nous partons, comme Poincaré et Einstein, de l'invariance de la vitesse de la lumière dans tous les référentiels, on peut comprendre que le temps ne puisse être absolu !

Prenons une source lumineuse et un miroir, ce dernier bien en face de la lampe. Plaçons-les verticalement dans une voiture à l'arrêt (figure 1.1).

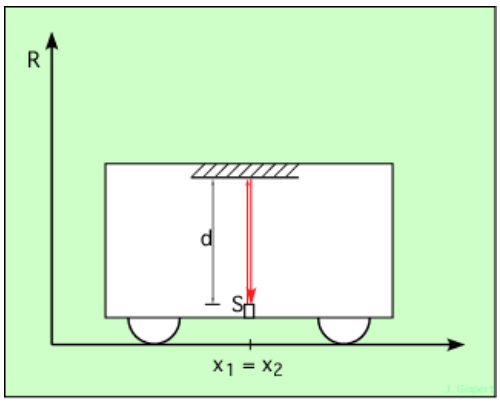



Figure 1.1 : Le rayon dans le référentiel de la voiture

Un rayon lumineux issu de la lampe va se réfléchir sur le miroir, et revenir à la lampe. Si d est la distance entre la lampe et le miroir, le rayon lumineux (en rouge) a parcouru la distance 2 d, à la vitesse c évidemment, donc dans le temps t = 2 d / c.

Vu du bord de la route (figure 1.2), associé au référentiel R', dans lequel la voiture est en mouvement à la vitesse V, le signal lumineux est émis lorsque la voiture est en $x'_1$, et reçu par la lampe, après réflexion sur le miroir, lorsque la voiture est en $x'_2$.

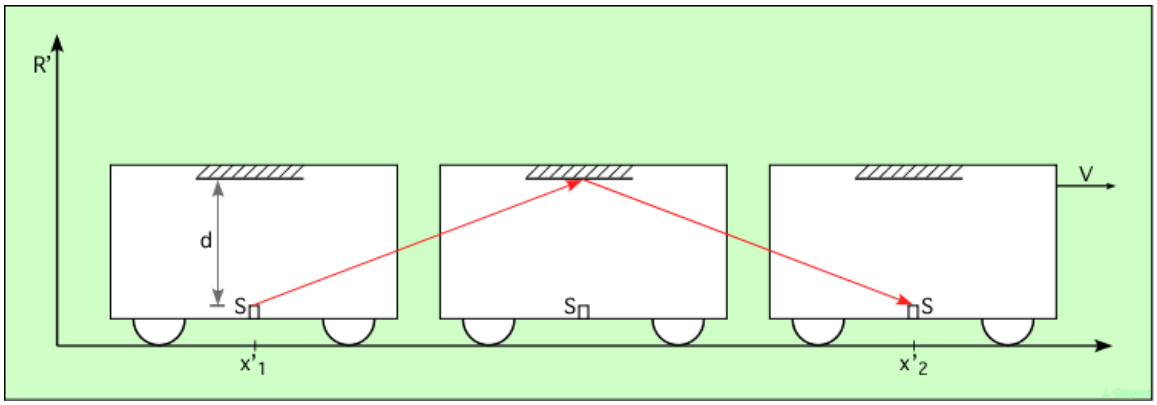



Figure 1.2 : Le rayon vu du bord de la route

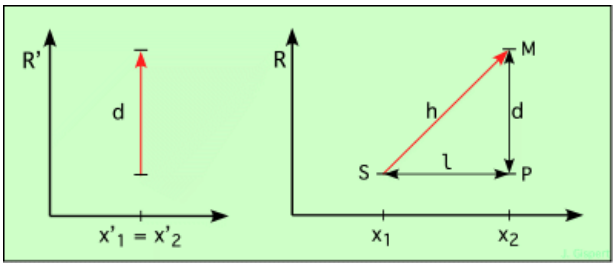
Lorsque le signal atteint le miroir, la voiture est au milieu de ce parcours. Le trajet du signal (en rouge), vu de la route, est donc plus long que vu de la voiture. Or il est parcouru à la même vitesse c, puisque la lumière se déplace à cette vitesse-là dans tous les référentiels. Donc, puisque le trajet est plus long, et parcouru à la même vitesse, le temps de parcours **doit** être plus long. Le temps mesuré depuis le bord de la route est par conséquent supérieur au temps propre, mesuré dans la voiture.

> La mesure du temps dépend donc de la vitesse du référentiel en mouvement. Le temps n'est plus absolu comme le supposait la Mécanique Classique (la Relativité Galiléenne).
>
> Chaque observateur possède son *temps propre*, celui du référentiel dans lequel il est au repos.

Précisons le lien : on a constaté expérimentalement que la vitesse de la lumière était la même dans tous les référentiels galiléens. Ceci **implique** que le temps mesuré par différents observateurs est différent.

### 1.3.2 Dilatation du temps

Schématisons les deux référentiels de la voiture :




Le dessin de gauche montre le référentiel de la voiture. Il représente le seul rayon qui va de la source au miroir (moitié du trajet total). Le dessin de droite illustre la même situation vue de la route. Le rayon lumineux est diagonal, son trajet est de longueur h, la voiture s'est déplacée de la longueur l, et le miroir est toujours éloigné de d de la source.

Dans le tableau ci-dessous, Δ représente une différence. Δt est la différence entre deux temps, donc une durée.

| R' référentiel de la voiture | R référentiel de la route |
|---|---|
| **Δt'** = temps pour parcourir **d** de la source au miroir, à la vitesse c | **Δt** temps pour parcourir **h** de la source au miroir, à la vitesse c |
| $\Delta t' = t'_2 - t'_1$ = heure de réception - heure d'émission dans R' | $\Delta t = t_2 - t_1$ = heure de réception - heure d'émission dans R |
| $d = c\,\Delta t'$ | $h = c\,\Delta t$ |
| | l : distance parcoure par la voiture pendant le temps Δt, à la vitesse v |
| | $l = v\,\Delta t$ |
| | triangle SPM est rectangle, Pythagore : $h^2 = l^2 + d^2$ |

Reportons dans la dernière égalité les valeurs de h, l et d trouvées plus haut : $(c\,\Delta t)^2 = (v\,\Delta t)^2 + (c\,\Delta t')^2$ c'est une relation entre Δt et Δt'.

$c^2\,\Delta t^2 = v^2\,\Delta t^2 + c^2\,\Delta t'^2$ $c^2\,\Delta t^2 - v^2\,\Delta t^2 = c^2\,\Delta t'^2$

$(c^2 - v^2)\,\Delta t^2 = c^2\,\Delta t'^2$ $\Delta t^2 = c^2\,\Delta t'^2 / (c^2 - v^2)$

et enfin, divisant par $c^2$ à droite : $\Delta t^2 = \Delta t'^2 / (1 - v^2 / c^2)$

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

Cette mesure de la dilatation du temps, que nous venons d'obtenir facilement sur un exemple, est un cas particulier de la transformation générale que nous verrons plus loin. Mais cette dernière se détermine sur d'autres principes. On pose :

$$\gamma(V) = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

et donc :

$$\Delta t = \gamma(v)\,\Delta t'$$

**Remarque 1**

Vous pouvez constater que la mesure du temps dépend du trajet parcouru par la voiture, donc de la position de la voiture ! Par conséquent, espace et temps sont mélangés… Le temps t' mesuré depuis le bord de la route, dépend à la fois du temps t mesuré dans la voiture, et de la distance d entre la source et le miroir : t' = F(d,t).

**Remarque 2**

Ce phénomène a été considérablement amplifié sur le schéma. En effet, si la distance d vaut 1,5 m, la lumière mettra pour parcourir les 3 m de l'aller-retour, un temps propre t = 3 m / 300.000 km $s^{-1}$ = $10^{-8}$ s, soit 10 milliardièmes de seconde. Pendant ce temps, la

voiture, roulant à 100 km $h^{-1}$, aura parcouru l'énorme distance de… 0,28 millièmes de millimètre ! Autant dire que les 3 dessins de la voiture, à droite, devraient être superposés sans possibilité de les distinguer. C'est pourquoi, avec de petites vitesses, il est absolument impossible de ressentir les effets de la Relativité. Ceci explique qu'on ne l'ait pas découverte plus tôt.

Rêvons un instant que la voiture puisse se déplacer à la vitesse de la lumière (attention aux radars…). Pendant que le rayon lumineux atteint le miroir, la voiture aura parcouru 1,5 m (la même distance, puisqu'elle va à la même vitesse). Il en est de même pour le rayon réfléchi. Au total la voiture aura avancé de 3 m pendant l'aller-retour du rayon. Donc, l'angle des rayons rouges est au maximum droit contre le miroir ; dans tous les cas réels (V < c), il est aigu. Sur le dessin, pour la lisibilité, il a été représenté obtus…

**Remarque 3**

A partir de cette expérience, on peut obtenir très facilement la relation entre les deux référentiels (transformation de Lorentz-Poincaré).

La relativité du temps est un phénomène de perspective :

le temps dépend du point de vue sous lequel on le mesure.

**Autre explication**

Une fusée s'éloigne à une vitesse proche de la vitesse de la lumière. A chaque seconde de son horloge, elle envoi un signal vers la Terre. Pour mesurer le temps qui s'écoule dans la fusée depuis la Terre, on utilise ces signaux. Mais il est évident qu'entre deux signaux successifs, la fusée à parcouru une distance non négligeable, et que le signal aura d'autant plus de trajet à parcourir pour parvenir sur Terre. Mais pour tenter un calcul direct, il faudrait bien prendre garde à ne pas mélanger les référentiels, ce qui n'est pas si simple… Conservons donc cette image comme une indication qualitative, et non quantitative.

Evidemment, si la Terre envoi des signaux vers la fusée, le même allongement de la distance est réalisé, et donc le mouvement est vu ralenti pareillement. Cet allongement du temps observé est symétrique.

#### 1.3.3 Horloges

Reprenons la voiture dans son référentiel, et imaginons que, lorsque le rayon revient à l'émetteur, il déclenche ainsi un second éclair. L'arrivée du second en déclenchera un troisième, et ainsi de suite. Les événements « arrivée d'un éclair » peuvent être considérés comme des tops d'horloge : notre système lumineux *est* une horloge. Dans la voiture, nous pouvons parfaitement l'utiliser pour mesurer le temps.

Sur le bord de la route, nous pouvons installer une horloge identique : les deux horloges fonctionnent pareillement, chacune dans son référentiel. Etant identiques, elles ont le même temps propre. Mais vu du bord de la route, le trajet aller-retour effectué par le rayon lumineux de l'horloge embarquée fait un chemin plus long que celui fait dans l'horloge à terre. Par conséquent, le temps mesuré, du bord de la route, sur l'horloge embarquée, est plus long que celui mesuré sur l'horloge fixe. C'est-à-dire que les passagers de la voiture (et la voiture elle-même) vieillissent moins vite !

### *1.4 L'espace-temps*

Puisque la mesure du temps est relative à la position de l'observateur, elle dépend, nous l'avons vu, à la fois des coordonnées d'espace et de temps de l'autre référentiel. Ces quatre coordonnées sont donc indissociables, et constituent *l'espace-temps*. Ce dernier est un espace mathématique, qui possède des propriétés très semblables à notre espace habituel à 3 dimensions, mais il en a 4. On peut y définir une longueur, un volume… Ce sont simplement des fonctions mathématiques ayant les mêmes propriétés que leurs correspondantes dans l'espace à trois dimensions.

#### 1.4.1 Défaut de la Relativité Galiléenne

Nous avons vu plus haut que l'addition des vitesses de la Relativité Galiléenne ne s'applique pas lorque les vitesses (une d'entre elles au moins) sont proches de la vitesse de la lumière. Comment résoudre ce problème, qui s'est posé au début du $XX^{e}$ siècle ? Soit la notion de vitesse de la lumière indépendante du référentiel était fausse, soit c'était la loi d'addition des vitesses. Toutes les expériences qui ont été faites ayant conclu à l'invariance de la vitesse de la lumière, il ne restait plus qu'à admettre que la formule d'addition des vitesses ne pouvait s'appliquer lorsque les vitesses sont proches de celle de la lumière. Bien sûr, la physique classique ne pouvait être remise en cause dans le domaine de vitesses (très petites devant la vitesse de la lumière) où elle avait été définie. Il fallait donc trouver une nouvelle loi de composition des vitesses, qui corresponde avec la loi d'addition classique pour les vitesses faibles, mais qui ne dépasse jamais la vitesse de la lumière.

Puisque l'addition des vitesses découle de la transformation de Galilée, celle-ci n'est plus valable. Il faut lui substituer une forme plus complexe. C'est par là que la recherche a été faite.

**Terminologie** : On parle de *phénomène relativiste* lorsque les vitesses mises en jeu sont comparables avec celles de la lumière ; dans le cas contraire, il est dit *non relativiste*. Le domaine non relativiste est donc celui de la Mécanique Classique. L'écart entre les résultats classiques et relativistes y est insignifiant.

**Remarque importante** La discussion précédente est fondée sur l'invariance de la vitesse de la lumière, qui est un phénomène électromagnétique. Basée là-dessus, la Relativité Restreinte a abouti à une formalisation de l'espace-temps qui étend cette vitesse limite à toutes les interactions (gravitationnelle, faible, forte). Comment les propriétés de la lumière peuvent-elles s'étendre aux autres interactions ? En fait, **la Relativité Restreinte décrit une propriété de l'espace-temps, non de la lumière**.

Ce postulat d'invariance de la vitesse de la lumière n'est donc pas nécessaire pour construire la Relativité Restreinte, et la transformation de Lorentz-Poincaré peut se démontrer en dehors de lui. Au contraire, l'invariance de la vitesse de la lumière apparaîtra comme une conséquence de cette transformation, conséquence qui s'applique à toutes les interactions, éliminant ainsi le problème.

Jean-Marc Lévy-Leblond a donné une démonstration qui produit la transformation de Lorentz-Poincaré en utilisant l'homogénéité et l'isotropie de l'espace-temps, ainsi que l'équivalence des référentiels galiléens. Cette démonstration met en évidence une vitesse limite, sans en donner la valeur. Cette vitesse limite peut être assimilée à la vitesse de la lumière, mais pourrait aussi lui être supérieure. En fait, une particule ne peut atteindre cette vitesse limite que si sa masse est rigoureusement nulle. Ceci sera expliqué plus loin. La masse du photon est réputée nulle ; si ceci est exact (et non approché) alors la vitesse limite est bien c. Mais toute la théorie resterait valable, même s'il y avait une différence minime entre la vitesse limite et c. Et Louis de Broglie a toujours soutenu que le photon possède une masse, extrêmement petite, mais non nulle. Si c'était le cas, sa vitesse c serait très légèrement inférieure à la vitesse limte.

La vitesse limite devenant ainsi une propriété de l'espace-temps, il est naturel que tout ce qui se passe dans l'espace-temps en soit affecté, et par conséquent que toutes les interactions subissent la même limitation.

### 1.4.2 Transformation de Lorentz-Poincaré

La transformation obtenue est la suivante :

$$x' = \gamma(V)(x - V\,t) \qquad t' = \gamma(V)(t - \frac{V\,x}{c^2})$$

$$\text{avec : } \gamma(V) = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}}$$

On reconnait le facteur γ qu'on avait trouvé dans le cas particulier de l'automobile de Poincaré.

**Remarque 1** : si $c \to \infty$, $v^2 / c^2 \to 0$, et donc $\gamma(V) = 1$, et $V\,x / c^2 \to 0$. D'où $x' \to x - V\,t$, et $t' \to t$. La transformation de Galilée est donc compatible avec celle de Lorentz-Poincaré, lorsque la vitesse limite est infinie (ce qui revient à dire qu'il n'y a pas de vitesse limite, ce qui est le paradigme de la Mécanique Classique). La vitesse de la lumière c étant très élevée (300.000 km $s^{-1}$), il est impossible de distinguer entre les deux transformations, tant qu'on ne fait que des expériences à faible vitesse.

**Remarque 2** : la transformation de Lorentz-Poincaré donnée ci-dessus est simplifiée (on la dit parfois *spéciale*), en ce sens que l'on n'a considéré qu'un seul axe d'espace pour le référentiel, cet axe étant parallèle à la vitesse du référentiel. La transformation de Lorentz-Poincaré complète comprend les axes y et z, qui sont inchangés par le mouvement. Donc y' = y et z' = z. Enfin, si on considère le référentiel dans une orientation quelconque par rapport à la vitesse, il suffira de faire une rotation pour obtenir les formules à appliquer. L'effet relativiste s'applique *dans la direction de la vitesse, il est nul dans les directions perpendiculaires*. Si le référentiel n'est pas aligné avec la vitesse, l'effet se réparti éventuellement sur les trois axes, par projection.

**Remarque 3** : La construction actuelle de cette transformation s'appuie sur l'homogénéité de l'espace-temps, et sur l'équivalence des observateurs galiléens. Cette dernière implique, mathématiquement, que les transformations constituent un groupe (ensemble muni d'une loi de composition interne associative, possédant un élément neutre et un opposé). Toute transformation doit posséder une inverse (le point de vue de l'autre référentiel), et il doit exister une transformation identique *(i.e.* qui ne change rien), c'est la transformation à vitesse nulle. Ces deux propriétés mathématiques permettent de déterminer une transformation qui contient une constante dont la dimension est une vitesse. Appellons X cette vitesse ; la transformation trouvée est la transformation de Lorentz-Poincaré dans laquelle c est remplacé par X. Cette constante, déterminée par les propriétés de l'espace-temps, totalement en dehors de la vitesse de la lumière, apparaît en jouer le rôle. On peut les assimiler, si le photon a bien une masse strictement nulle. Sinon, la vitesse de la lumière serait très légèrement inférieure à cette constante. Le fait que ce soit une constante de structure de l'espace-temps explique clairement que toutes les interactions en soient affectées. C'est bien plus satisfaisant que de croire que les autres interactions se plient aux propriétés de la lumière (pourquoi pas la réciproque ?).

**Importance de l'effet** : Prenons par exemple une fusée se déplaçant à 8 km $s^{-1}$ (vitesse de satellisation autour de la Terre). Entre le référentiel R lié à la Terre, et le référentiel R' lié à la fusée, la transformation de Lorentz-Poincaré donne :

$$\gamma(8) = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{8^2}{300.000^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1-0{,}000\ 026\ 66^2}} = 1{,}000\ 000\ 000\ 355\ 555$$

$\gamma(V) = 1$ à $3\ 10^{-10}$ près, soit 3 dix-milliardièmes ! Ceci est totalement non significatif. Même pour la vitesse d'une fusée, il n'est pas possible de distinguer entre les deux formules. Pour une vitesse de 30.000 km $s^{-1}$, soit c / 10, l'écart n'est encore que de 5 millièmes… Pour envoyer une fusée sur Mars, la Mécanique Classique est totalement justifiée. *A posteriori*, on justifie également la Mécanique Céleste basée sur la loi de Newton. Cependant, cette loi de Newton sera prise en défaut lorsqu'on considérera des corps très denses, étoile à neutrons ou trou noir. Mais ceci est une autre histoire, qui concerne la Relativité Générale.

**Linéarité** : Les transformations de Lorentz-Poincaré sont linéaires par rapport aux longueurs et au temps. En effet, les coefficients γ(V), V et c sont indépendants de x et t, ce sont des constantes. Et donc, la transformation est de la forme :

$$x' = \alpha x + \beta t, \qquad t' = \delta t + \epsilon x$$

Ceci a une conséquence importante : la mesure d'une longueur est de la même forme que celle d'une position. En effet, une longueur est la différence de deux positions : $l = x_2 - x_1 = \Delta x$. En écrivant la transformation de Lorentz-Poincaré pour chacun des deux points $x_1$ et $x_2$, et en retranchant, on trouve :

$$\Delta x' = x'_2 - x'_1 = \gamma(V)(x_2 - V\,t_2) - \gamma(V)(x_1 - V\,t_1) = \gamma(V)[(x_2 - x_1) - V(t_2 - t_1)]$$

$$\Delta x' = \gamma(V)(\Delta x - V\Delta t)$$

C'est-à-dire que, grâce à la linéarité, on peut remplacer dans la transformation de Lorentz-Poincaré, une position par une longueur, et un instant par une durée.

#### 1.4.3 Vie du muon

Le muon est un électron lourd (il a la même charge électrique, mais une masse 207 fois plus élevée). Etant plus lourd, le muon est instable, et se désintègre spontanément en un électron et deux neutrinos (conservation de la charge électrique et de la charge leptonique). Sa durée de vie, dans son référentiel, c'est-à-dire au repos, est de $\Delta t' = 2{,}2$ µs. Les muons se déplacent à une vitesse très proche de celle de la lumière, V = 0,995 c. Donc, la distance qu'ils peuvent parcourir avant de se désintégrer, dans leur référentiel, est de $\Delta x' = c\,\Delta t' = 300.000$ km $s^{-1} \times 2{,}2$ µs = 0,66 km = 660 m. Or les muons sont produits en abondance dans la haute atmosphère, par le rayonnement cosmique. Ces muons se déplacent vers le sol, et ne devraient parcourir que quelques 660 m en moyenne. Par conséquent, ils devraient être pratiquement inobservables au sol. Ce que contredit l'expérience !

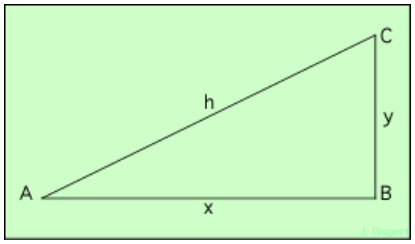
Mais si on raisonne maintenant dans **notre** référentiel, lié au sol, on doit considérer le passage du référentiel lié à la particule, à celui lié au sol. L'un se déplace par rapport à l'autre à la vitesse V = 0,995 c, et le muon est immobile dans son référentiel. Le temps est multiplié par :

$$\gamma(V) = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}} \Rightarrow \gamma(0{,}995\,c) = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{(0{,}995\,c)^2}{c^2}}} \approx 10$$

donc $\Delta t = 10\,\Delta t'$, et puisque la vitesse est la même dans les deux référentiels, $\Delta x = 10\,\Delta x' = 10 \times 660$ m = 6,6 km. Ceci en moyenne. C'est une valeur qui explique tout à fait la présence de muons d'origine cosmique à basse altitude. La transformation de Lorentz-Poincaré, clé de voûte de la Relativité Restreinte, permet donc de comprendre ce phénomène. Mais en retour, cette observation valide la théorie.

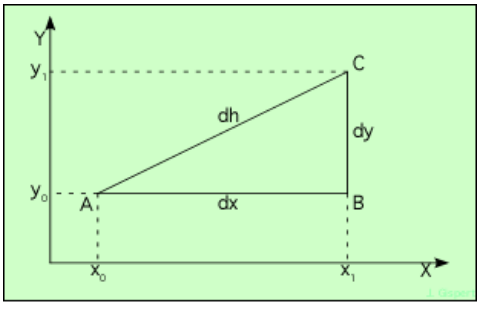
### *1.5 Où l'on retrouve le Théorème de Pythagore*

Tout le monde connait ce fameux théorème, qui donne la longueur de l'hypoténuse d'un triangle rectangle :




Le théorème de Pythagore permet de calculer l'hypoténuse h, à l'aide des côtés de l'angle droit x et y : $h^2 = x^2 + y^2$.

Dans un référentiel à deux dimensions, on peut ainsi mesurer un segment quelconque AC :



Les côtés sont maintenant notés $dx = x_1 - x_0$, et $dy = y_1 - y_0$. Par conséquent, l'application du théorème donne : $dh^2 = dx^2 + dy^2$.

Pourquoi avoir nommé les côtés avec un *d* ? La notation utilisant *d* signifie *différentielle*, et représente une longueur infiniment petite (c'est la différence de deux positions infiniment voisines). Ceci parce que, sur une très petite longueur, on peut confondre un arc de courbe avec un petit segment de droite. Une courbe est ainsi décomposée en une succession de minuscules segments, c'est-à-dire par une ligne brisée qui lui ressemble énormément (et qui lui ressemble d'autant plus que le découpage est plus fin). Tout le calcul différentiel est basé sur ce principe, et la Relativité est une grande consommatrice de ce genre de calcul, parce qu'elle ne fixe pas les données dans l'absolu, mais relativement les unes aux autres.

Enfin, ce théorème se généralise immédiatement à trois dimensions (notre espace physique) : $dh^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$.

Considérons maintenant un photon, qui se déplace évidemment à la vitesse de la lumière. Comme on considère un déplacement infinitésimal, il se passe dans un temps lui aussi infinitésimal, que l'on note donc dt. Pendant ce temps dt, le photon parcours la distance $dh = c\ dt$. Donc : $dh^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 = c^2\ dt^2$.

Faisant passer la somme centrale à droite du signe = on obtient une quantité nulle : $c^2\ dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 = 0$.

Cette équation est fondamentale, car elle représente le comportement d'un photon dans l'espace-temps (puisqu'elle le décrit en fonction des coordonnées d'espace et de temps). Peut-on la généraliser pour une particule non relativiste (à faible vitesse) ? Pendant le temps dt, la lumière parcourt toujours la longueur c dt, et la particule ne parcours qu'une longueur bien moindre, $dx^2 + dy^2 + dz^2$. Par conséquent, $c^2\ dt^2 > dx^2 + dy^2 + dz^2 \quad c^2\ dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 > 0$.

On vient donc de trouver un terme qui représente le cheminement d'une particule, relativiste ou non, dans l'espace-temps. Si la particule se déplace à la vitesse de la lumière (particule de masse nulle), ce terme est nul ; sinon, il est positif. On le note $ds^2$, et on l'appelle *intervalle d'univers*. Il est donc défini par : $ds^2 = c^2\ dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$.

Remarquez que les signes des termes de temps et d'espace sont opposés. Certains auteurs définissent le $ds^2$ en prenant la convention de signe opposée (le terme $c^2\ dt^2$ négatif, les autres positifs, mais les termes dépendant de l'espace sont toujours de signe opposé au terme dépendant du temps).

Remarquez aussi que le premier terme $c^2\ dt^2$ est le carré du produit c dt d'une vitesse par un temps. Une vitesse étant le rapport d'une distance sur un temps, c dt est une longueur. Donc le $ds^2$ s'exprime en unités de longueur au carré.

Cette expression définit la *Métrique de Minkowski* :

$$\mathbf{ds^2 = c^2\ dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2}$$

Aucun signal ne peut se déplacer plus vite que la lumière. Donc, le $ds^2$ d'une particule ne peut être que positif ou nul.

**Remarque** : la dénomination *métrique* est ici employée à tort. Une véritable métrique est une forme quadratique définie positive, ce qui n'est pas le cas ici (à cause des signes -). On devrait parler de *pseudo-métrique*, ou de *forme Lorentzienne*.

### 1.5.1 Invariant relativiste

Le $ds^2$ que nous venons de définir est un *invariant relativiste*, c'est-à-dire qu'il ne change pas de valeur si on passe d'un référentiel galiléen à un autre. Il est facile de le démontrer : on calcule $c^2\ t'^2 - x'^2$, et on y remplace t' et x' par les valeurs données par la transformation de Lorentz-Poincaré. On montre ainsi que : $c^2\ t'^2 - x'^2 = c^2\ t^2 - x^2$.

Cette invariance fait apparaître le $ds^2$ comme le carré d'une longueur : lorsqu'on change de point de vue dans l'espace ordinaire à trois dimensions, la longueur d'une règle nous apparaît différente, mais pourtant elle ne l'est pas. Si on regarde la règle de face, on voit x = l, y = 0. Si on la tourne de 90°, on voit alors x = 0 et y = l. Mais la longueur

$$\sqrt{x^2 + y^2}$$

ne change pas !

Dans l'espace-temps, cette notion de longueur est plutôt celle de distance entre événements : la transformation de Lorentz-Poincaré change à la fois la mesure d'espace et la mesure de temps, mais la longueur qu'on en déduit, la distance entre les événements, ne varie pas. La transformation de Lorentz-Poincaré permet de faire de la géométrie dans l'espace-temps.

Remarquez aussi que la définition du $ds^2$ est semblable au théorème de Pythagore. Celui-ci nous donne la longueur de l'hypoténuse, et c'est bien une longueur que nous avons définie ici, puisqu'elle est invariante.

Enfin, lorsqu'on fait tourner une règle dans notre espace à trois dimensions, elle ne change pas de longueur, mais nous la voyons en apparence de longueurs différentes. Dans l'espace-temps, on démontre aussi que la transformation de Lorentz-Poincaré est une rotation !

### 1.5.2 Représentation

Pour bien comprendre la Relativité, il importe d'avoir une représentation intelligible de l'espace-temps. Il n'est pas question de nous tordre les méninges (qui le sont bien assez) pour arriver à conceptualiser un espace à 4 dimensions de manière simple, parce que notre expérience quotidienne se déroule dans un espace qui n'en a que trois. Alors, pour visualiser ce dont on parle, on aplatit le monde ! Cette méthode n'est d'ailleurs pas choquante, puisque c'est exactement ce que nous faisons lorsque nous prenons une photo : on capture une image du monde à trois dimensions sur une pellicule qui n'en a que deux, et lorsqu'on regarde la photo, on imagine la troisième dismension. Et lorsqu'on regarde le ciel, c'est bien une image à deux dimensions de l'espace que nous avous !

Qu'est-ce-qu'un film ? Une succession d'images fixes qui, projetées très rapidement l'une après l'autre, nous donne l'illusion de la continuité et du mouvement. Nous allons faire un film (figure 1.3) pour représenter l'espace-temps, réduit à deux dimensions.

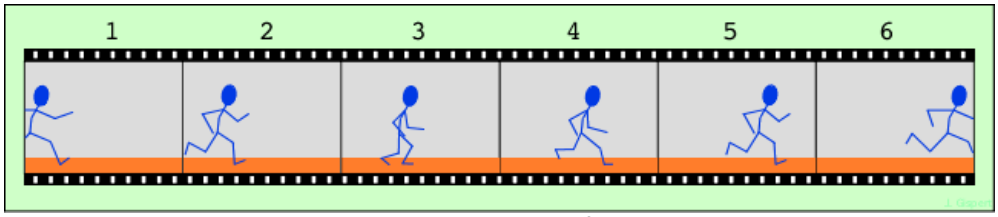


Figure 1.3 : Un petit film

Prenez votre film préféré (sur pellicule).

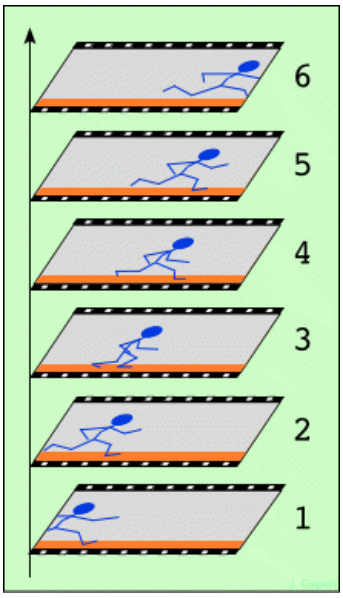
Découpez les images, et empilez-les, l'image la plus ancienne dessous, la plus récente dessus.

Dans ces conditions, l'axe vertical représente le temps, chacune des images étant séparée de la précédente par un vingt-cinquième de seconde.

Vous aurez une claire illustration de cette représentation !

Dans l'espace-temps, bien sûr, il y a continuité, alors qu'ici on a des trous entre deux images.

Il faudrait ajouter une infinité d'images entre les 1 et 2, et ceci est la limitation de cette analogie.




Effacez les images sur la pellicule, pour ne garder que les plans successifs, dans lesquels la scène se jouera. Voilà notre représentation de l'espace-temps. Tout phénomène physique peut donc s'y représenter par une sorte de film. Dans la réalité, l'espace physique étant de dimension 3, il faut par la pensée remplacer chaque plan par un volume. Mais c'est la seule difficulté, tout le reste étant inchangé.

### 1.5.3 Cônes de lumière

Pour expliquer les cônes de lumière graphiquement, nous allons prendre la représentation de l'espace-temps étudiée au paragraphe 1.4.1. L'espace sera représenté par un plan horizontal quelconque, et le temps par l'axe vertical. Ainsi, tout plan horizontal représente l'espace, au temps correspondant à la coordonnée verticale.

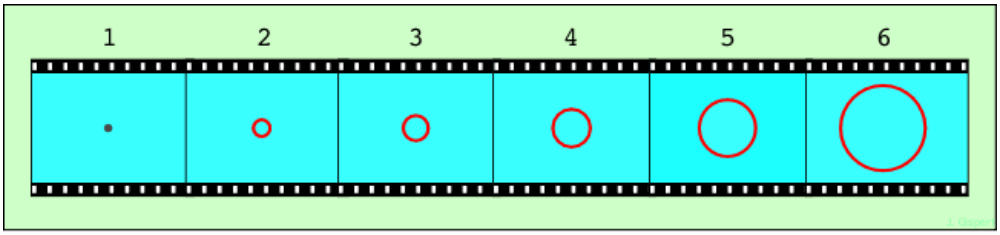


Figure 1.4 : des ronds dans l'eau

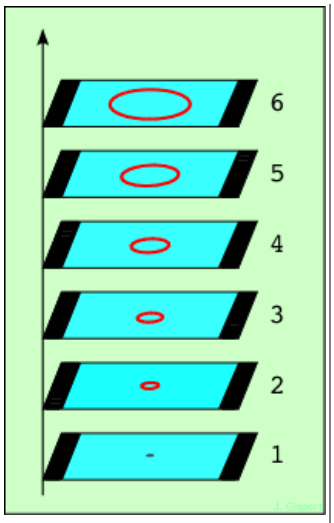
Filmons une pierre tombant dans la piscine (figure 1.4). Elle produit une onde qui se propage depuis le point de chute. Le film échantillonne les images toutes les 25 ms. C'est pourquoi il y a des trous entre deux images. Dans notre perception, c'est la persistance rétinienne qui les comble.

En empilant les images, on obtient le dessin ci-contre

L'axe vertical représente le temps, qui croît de bas en haut.

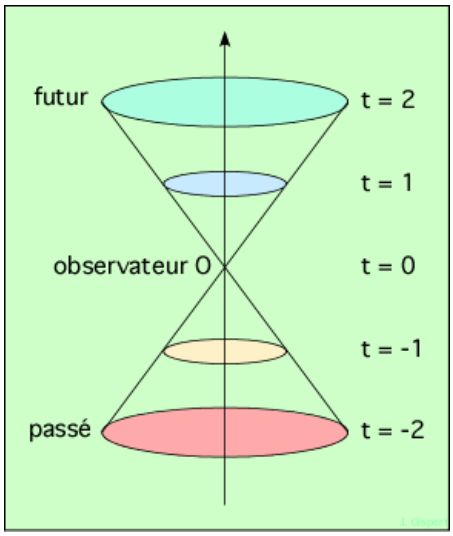
Dans l'espace-temps, bien sûr, il y a continuité : on ne peut ici représenter que quelques images avec des trous entre elles.

Imaginez que vous filmez avec une caméra ultra-rapide. Au lieu de prendre pour sujet la pierre dans la piscine, filmez une ampoule qui émet un éclair. Sur la première image, seule l'ampoule brille. Sur la seconde, elle s'est déjà éteinte, mais l'onde émise se trouve maintenant sur un petit cercle dont le rayon est r = c dt, dt étant le temps qui sépare les deux images. Sur la troisième, le cercle s'est agrandi de la même quantité c dt (puisque le temps qui sépare deux images est le même).




D'une image à l'autre, en montant, les cercles s'agrandissent donc régulièrement (vitesse de l'onde constante), et constituent un cône. Il ne nous reste qu'à expliciter un peu le dessin.

Considérons un point quelconque du temps présent, où se tient l'observateur O (ici et aujourd'hui). Dessinons l'axe du temps vertical passant par ce point (tout axe parallèle serait équivalent, celui-ci est simplement le plus pratique). Les cercles de couleur représentent une partie de l'espace à un instant donné : c'est l'ensemble des points dont la distance spatiale (habituelle) est inférieure à une certaine limite R(t), le rayon du cercle (on note R(t) parce que ce rayon dépend du temps).



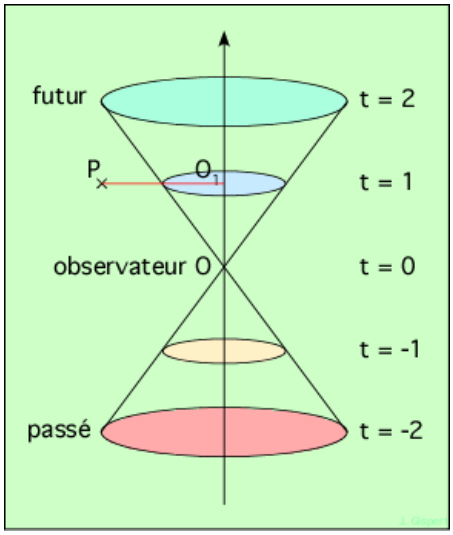

Supposons qu'une lampe soit allumée par l'observateur à t = 0 (ici et maintenant). Elle illumine l'espace dans toutes les directions. Les photons s'éloignent de l'observateur O horizontalement, puisqu'ils voyagent dans l'espace (restreint à deux dimensions). Mais le temps avance, donc les positions successives des rayons montent le long de l'axe du temps. Le cercle bleu représente donc la partie de l'espace qui sera baignée de lumière à t = 1, son rayon étant R(1) = c ; le vert à t = 2, de rayon R(2) = 2 c…

De même, au-dessous de l'observateur, on peut envisager de faire tourner le film à l'envers : descendre le long de l'axe du temps en-dessous de O consiste à remonter dans le passé. Puisque le temps va toujours vers le haut, on ne peut pas envoyer un signal vers le bas, mais on peut en recevoir : le cercle jaune contient tous les points de l'espace qui sont visibles par l'observateur, s'ils ont émis un signal depuis t = -1, puisqu'ils sont à une distance au plus égale à celle que peut parcourir la lumière pendant ce temps. Le cercle rouge enfin contient les points visibles qui ont émis le signal depuis t = -2.

La lumière se comporte exactement comme les ronds dans l'eau. C'est une onde qui se propage à une vitesse particulière. Si nous n'en sommes pas conscients, c'est que la vitesse de la lumière est vraiment trop grande pour nos sens. Pour inonder une pièce de 3 m lorsqu'on tourne l'interrupteur, il lui faut seulement $10^{-13}$ s, soit un dix millième de milliardième de seconde…

Qu'en est-il des points à l'extérieur du cône ? Pour un temps t donné (par exemple t = 1), les points qui ont eu le temps d'envoyer un signal depuis t = 0 sont dans le cercle de rayon ct. Ceux qui sont à l'extérieur de ce cercle (P par exemple) n'ont pas pu transmettre un signal depuis t = 0 (ils ont pu en envoyer, mais ceux-ci ne sont pas encore parvenus). Ils sont en-dehors de l'horizon… Mais si on attend t = 2, alors l'horizon s'est agrandi, et le point P s'y trouve maintenant inclus. Un signal qui aurait été émis de P à t = 0 parvient enfin à l'observateur.

Tous les points sur le schéma qui sont à l'extérieur du cône sont causalement indépendants du point O. Aucun signal n'a pu être échangé entre eux et O. L'extérieur du cône représente les points de l'Univers non liés causalement à O. Ceci veut dire qu'un événement ne peut être la cause d'un autre que s'il a pu lui envoyer un signal pour le provoquer !

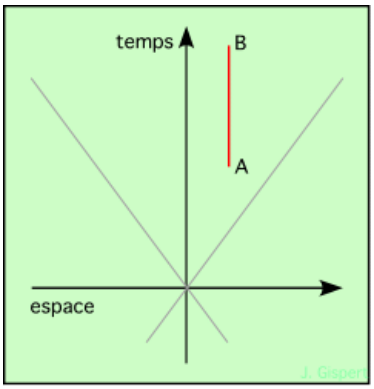



Lorsque l'Univers est devenu transparent (recombinaison), un signal de ce type est parti de tous les points de l'Univers, dans toutes les directions. Aujourd'hui, nous recevons ce signal depuis les points pas trop éloignés, qui constituent donc *l'Univers observable*. Supposons que le cercle rouge représente la recombinaison. A mesure que le temps passe, il s'éloigne de O le long de l'axe du temps (c'est O qui monte, entraînant son cône), et ce faisant, son diamètre augmente. Notre Univers observable croît donc au fil du temps.

### 1.5.4 Ligne d'univers

Conisdérons deux événements A et B dans l'espace-temps. A est déterminé par une position (coordonnée horizontale) et par un temps (coordonnée verticale) ; B également. Toute ligne continue joignant A et B est une *ligne d'univers*. Nous allons préciser cela en considérant des exemples simples :

**Première ligne** :



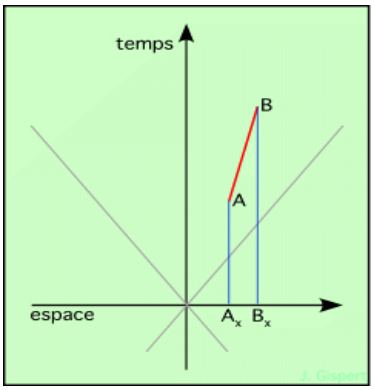

Elle décrit un objet immobile dans l'espace. Les événements A et B sont donc à la même coordonnée horizontale (puisque l'objet qui s'y trouve ne bouge pas).

Mais le temps passe, donc la coordonnée verticale monte. L'objet ne bougeant pas dans l'espace, tous les points entre A et B sont aussi à la même coordonnée horizontale. Pour aller de A à B, il suffit d'attendre…

Par conséquent, la ligne d'univers de cet objet est une ligne droite verticale.

Il s'agit d'une ligne d'univers particulière de *type temps* (ou de *genre temps*), parallèle à l'axe du temps.

**Deuxième ligne** :




Les événements A et B sont maintenant à des coordonnées horizontales différentes $A_x$ et $B_x$, ce qui montre que l'objet se déplace.

La ligne d'univers étant droite, le temps mis pour parcourir une distance infinitésimale d est le même partout. Donc la vitesse est constante.

Par conséquent, un tel mobile se déplace de $A_x$ à $B_x$ à vitesse constante. Sa vitesse est inférieure à la vitesse de la lumière, puisque la pente de la trajectoire est inférieure à la pente d'un cône de lumière (qui représente justement la trajectoire d'un rayon lumineux).

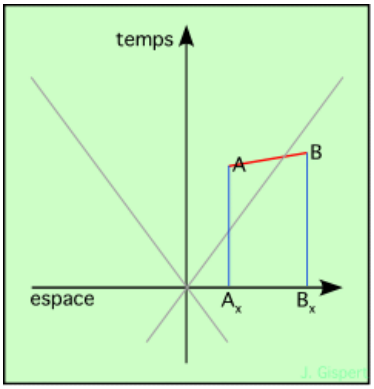
Cette ligne d'univers est également de genre temps.

**Troisième ligne** :

La pente de la ligne d'univers est plus forte que la pente du cône de lumière.

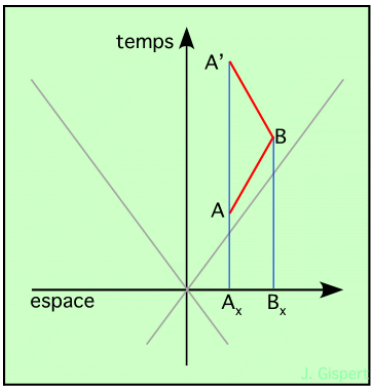
Ceci montre que la vitesse du mobile est supérieure à la vitesse de la lumière.

Aucun mobile connu ne se déplaçant à une telle vitesse, cette ligne d'univers n'a pas d'interprétation physique. On avait toutefois envisagé l'existence de particules qui se déplaceraient **toujours** à une vitesse supérieure à celle de la lumière. Elles étaient nommées *tachyons*. Pour elles, la surface du cône de lumière serait tout aussi infranchissable, mais elles vivraient à l'extérieur.




On dit que cette ligne d'univers est de *genre espace*, car elle se trouve à l'extérieur du cône de lumière **issu** de A.

**Quatrième ligne** :




On considère une ligne d'univers plus complexe, formée de deux segments de doite. L'interprétation de chacun des segments est claire (voir plus haut).

La première ligne, de A à B, correspond à un déplacement du mobile de $A_x$ à $B_x$, à vitesse constante positive (le mobile s'éloigne de l'origine dans le sens des x croissants).

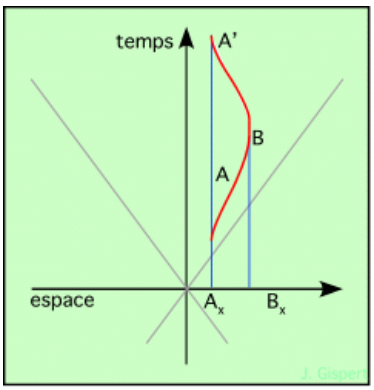
La seconde ligne représente le déplacement du mobile de B vers A', A' ayant la même position dans l'espace que A. Donc, le mobile revient à son point de départ. La vitesse est évidemment différente de celle de la première ligne, puisque maintenant le mobile se déplace dans le sens des x décroissants (.

La ligne d'univers composée est celle de l'un des deux jumeaux de Langevin. Celle de son frère est la ligne de genre temps qui relie A et A'. Cette ligne d'univers est de genre temps.

Bien évidemment, on peut construire des lignes d'univers plus complexes : nous n'avons considéré jusqu'ici que des déplacements à vitesse constante (avec un changement de vitesse brutal dans le dernier exemple). Si le mobile reste au repos, sa ligne d'univers est parallèle à l'axe des temps. S'il se déplace à vitesse constante, sa ligne est inclinée vers la droite si la vitesse est positive, vers la gauche sinon. La pente de la droite mesure la vitesse : pente nulle, vitesse nulle. Pente égale à celle du cône de lumière, vitesse de la lumière.

De ceci on déduit que, si un mobile accélère, la pente de sa ligne d'univers augmente ; s'il ralentit, elle diminue. On peut donc facilement interpréter une courbe quelconque.

**Ligne quelconque** :




Sur ce nouveau schéma, on voit une ligne courbe, qui présente plusieurs variations.

Partant de $A_x$ (événement A) , le mobile accélère (la pente de sa ligne d'univers augmente, tout en restant inférieure à la pente du cône). Arrivé à mi-chemin de $B_x$, le mobile commence à ralentir (la pente diminue).

Puis il arrive en $B_x$, et s'arrête (ligne droite verticale). Il stationne en $B_x$ un certain temps (segment de droite vertical).

Enfin, il repart vers $A_x$ en accélérant, puis à mi-chemin ralentit, et arrive enfin à son point de départ $A_x$avec une vitesse nulle (courbe tangente à l'axe vertical bleu).

C'est une ligne d'univers assez générale de genre temps.

Une ligne d'univers représente donc bien le mouvement d'un mobile, avec la limitation à une seule dimension, puisqu'il n'est pas possible de représenter à plat une ligne d'univers en trois dimensions.

On va maintenant déduire une application très intéressante de cette représentation, et du formalisme qu'elle traduit.

Le principe d'inertie de Galilée dit : *en l'absence de forces, un corps est soit au repos, soit en mouvement rectiligne uniforme*.

Si le corps est au repos, sa ligne d'univers est une droite verticale. S'il est en translation uniforme (vitesse constante), sa ligne d'univers est aussi une droite, mais inclinée par rapport à la verticale, d'autant plus que sa vitesse est plus grande.

Si on raisonne dans l'autre sens , tout mobile dont la ligne d'univers est une droite,

se déplace en ligne droite dans l'espace,
**et** à vitesse constante,
donc est en translation (droite) uniforme (vitesse constante).

Le principe d'inertie de Galilée se réécrit donc ainsi :

> En l'absence de forces, un corps se déplace en ligne droite dans l'espace-temps.
> Cette ligne est de genre temps.

Il n'y a plus de référence à la vitesse constante, celle-ci est contenue dans la rectitude de la ligne d'univers, qui amalgame l'espace **et** le temps !

Cette reformulation n'a l'air de rien, mais elle est fondamentale :

> Elle laisse entrevoir qu'on puisse considérer d'autres lignes d'univers, pas forcément droites.
> Et généraliser le principe d'inertie à ces lignes-là…

Une ligne d'univers non droite décrivant un mouvement accéléré (dernier schéma ci-dessus), l'idée de base de la Relatitvité Générale se trouve dans cette reformulation. Les lignes à considérer seront les géodésiques d'un espace-temps courbe.

#### 1.5.5 Addition des vitesses

La formule élémentaire d'addition des vitesses galiléenne ne peut être conservée, mais par quoi la remplacer ? La réponse est simple, il suffit de combiner les mouvements de trois référentiels (vu plus haut à propos du train) : R, que nous considérons au repos, R' qui se déplace par rapport à R à la vitesse $v_1$, et R" qui se déplace par rapport à R' à la vitesse $v_2$. En écrivant les transformations de Lorentz-Poincaré, et en les combinant, on aboutit à une formule, qui doit être de même forme que la transformation vue plus haut. Le référentiel R" se déplace par rapport au référentiel R à une vitesse v, qui est donnée par l'expression :

$$v = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1\, v_2}{c^2}}$$

Là encore, si nous faisons tendre c vers $+\infty$, nous voyons que le terme $v_1\, v_2 / c^2$ tend vers 0. Il reste alors la loi d'addition de Galilée. La loi d'addition relativiste n'en est donc qu'une généralisation, valable quelle que soit la vitesse.

Comme dans la théorie galiléenne, les deux vitesses considérées ici sont parallèles. Si ce n'est pas le cas, il faut effectuer les projections sur les trois axes.

### *1.6 Conséquences*

Tout d'abord, l'expression "tout est relatif", qui a eu une grande vogue, dénote une profonde incompréhension de la Relativité. Bien sûr, le temps absolu n'existe plus, non plus que la longueur absolue. Mais la vitesse de la lumière est un nouvel absolu ! Et il existe toujours un temps au repos, et une longueur au repos. Nous avons vu que, quand on est en quasi-repos (vitesse petite devant c), les changements sont insignifiants, l'effet de perspective est négligeable. Il ne reste donc que le domaine des très grandes vitesses qui nécessite l'usage des formules relativistes.

#### 1.6.1 Non simultanéité

La simultanéité de deux événements est une chose toute naturelle pour nous. Mais c'est une illusion…

Considérons deux événements qui ont lieu simultanément dans leur référentiel au temps $t_1 = t_2$, respectivement en $x_1$ et $x_2$ ($x_1 \neq x_2$). En effet, dans la transformation de Lorentz-Poincaré, le temps se transforme par :

$$t'_1 = \gamma(V)\left(t_1 - \frac{V\, x_1}{c^2}\right) \quad et \quad t'_2 = \gamma(V)\left(t_2 - \frac{V\, x_2}{c^2}\right)$$

Le terme $\gamma(V)$ ne dépend que de la vitesse relative des référentiels ; il est donc de même valeur pour $t'_1$ et $t'_2$. Les deux événements étant simultanés dans R, $t_1 = t_2$. Pour savoir si les événements sont simultanés dans R', calculons $t'_2 - t'_1$. Puisque $t_1 = t_2$ les termes correspondant s'annulent ; mais il reste les termes $V\, x_1 / c^2$ et $V\, x_2 / c^2$, qui sont différents puisque $x_1 \neq x_2$.

Donc, dans R', $t'_1 \neq t'_2$, et les deux événements ne sont pas simultanés. Et puisque la différence entre $t_1$ et $t_2$ dépend directement de $x_1$ et $x_2$, on voit bien que c'est un effet de perspective.

La simultanéité des événements est donc un phénomène relatif, qui dépend du référentiel dans lequel on observe.

Là encore, si vous faites tendre c vers l'infini, vous constatez que les deux termes qui produisent la différence s'annulent. Les phénomènes sont perçus aux mêmes instants pour les deux observateurs. Dans notre expérience quotidienne, la vitesse de la lumière est bien trop grande pour que nous constations la relativité de la simultanéité, et nous avons bien l'impression que deux événements simultanés pour un observateur le sont aussi pour tous les autres.

### 1.6.2 Contraction des longueurs

La *longueur propre* d'un objet est, par définition, la longueur mesurée dans le référentiel où il est au repos. Par opposition, on nomme *longueur impropre* la longueur mesurée dans un référentiel en mouvement par rapport à l'objet mesuré.

**Propriété 1** : $\gamma(V)$ est toujours plus grand que 1

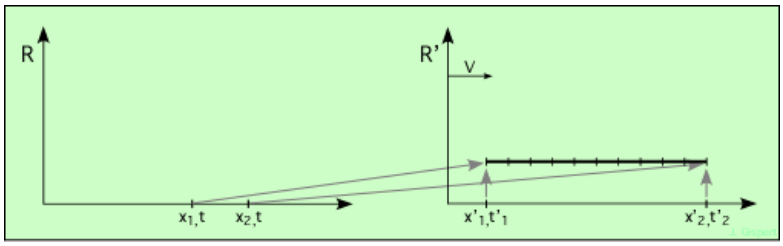
V prend toutes les valeurs possibles de -c à +c. Lorsque V = 0, c'est-à-dire au repos, $\gamma(V) = 1$, et tout se passe comme en Mécanique Classique. Tant que V reste petite, $\gamma(V)$ reste proche de 1 (très proche même). Ce n'est que lorsque V atteint des vitesses de l'ordre de quelques dizaines de pourcent de la vitesse de la lumière que $\gamma(V)$ commence à augmenter significativement, et modifie les résultats de manière mesurable. En fin, lorsque V tend vers ±c, $\gamma(V)$ tend vers l'infini.

**Propriété 2** : $\gamma(-V) = \gamma(V)$

Ceci est évident, puisque la vitesse n'intervient dans l'expression de $\gamma$ que par son carré, qui est toujours positif.

**Propriété 3** : Longueur impropre < longueur propre

Considérons une règle placée dans un référentiel R' où elle est immobile, et alignée avec l'axe des x'. Sa longueur propre est l', et les positions de ses extrémités sont $x'_1$ et $x'_2$.




Dans le référentiel R', la règle étant au repos, on peut mesurer les positions $x'_1$ et $x'_2$ à des instants $t'_1$ et $t'_2$ différents, puisque le résultat des mesures est indépendant du temps (la règle ne bouge pas). Par contre, si on se place dans le référentiel R, on voit la règle se déplacer. On peut y mesurer la position des extrémités de la règle, mais si on le fait à des instants différents, les mesures n'auront aucun sens, puisque la règle se sera déplacée entre les deux. Donc, il faut mesurer $x_1$ et $x_2$ au même instant $t_1 = t_2$. Dans ce référentiel, la longueur mesurée de la règle est notée l.

La longueur de la règle, dans tout référentiel, est égale à la différence entre les positions de ses deux extrémités. Dans R', $l' = x'_2 - x'_1 = \Delta x'$ ; dans R, $l = x_2 - x_1 = \Delta x$. Ecrivons les transformations de Lorentz-Poincaré relatives aux longueurs :

$$\Delta x' = \gamma(V)(\Delta x - V\Delta t)$$

Puisque $t_1 = t_2$, $\Delta t = 0$. Donc il reste : $\Delta x' = \gamma(V)\,\Delta x$. On en tire :

$$\Delta x = \frac{\Delta x'}{\gamma(V)}$$

$\gamma(V)$ étant > 1 (V > 0), $\Delta x$ est strictement plus petit que $\Delta x'$. C'est ce qu'on nomme *contraction des longueurs*.

La diminution de longueur est symétrique : R' étant en mouvement par rapport à R, un observateur situé dans R' voit une autre règle identique dans R raccourcie, dans la même proportion $\gamma(V)$. Ceci est parfaitement logique, si on se souvient que le repos n'existe pas. Dire que R' se déplace à la vitesse V par rapport à R signifie simplement que la différence de vitesse des deux référentiels, par rapport à un troisième référentiel, est V. Vus de ce troisième référentiel, R et R' peuvent parfaitement être tous deux en mouvement uniforme, donc jouer des rôles parfaitement symétriques. Donc, il serait invraisemblable de penser qu'ils puissent avoir un comportement différent.

La loi de contraction des longueurs a été trouvée en 1889 par Georges Fitzgerald. Il l'a publiée, mais malheureusement la revue a été suspendue pour des raisons financières. Elle a été retrouvée en 1892 par Hendrik Lorentz, qui l'a publiée. Plus tard, Lorentz a eu connaissance du travail de Fitzgerald, et l'a associé à sa découverte ! La loi de contraction des longueurs porte donc le nom de *loi de Fitzgerald-Lorentz*. Un bel exemple (rare) de *fair-play* (mot **d'origine** anglaise).

Notons que la vitesse est le rapport de la distance parcourue sur le temps de parcours, et que la vitesse de la lumière est invariable. Puisque nous avons vu plus haut une dilatation du temps, il est bien nécessaire, pour la compenser, d'observer une contraction des longueurs. Sans quoi la vitesse de la lumière serait variable…

**Application**

Soit une fusée se déplaçant à la vitesse v par rapport à la Terre. Comment un observateur terrestre voit-il le temps (1 seconde) et les longueurs (1 mètre, dans le sens du mouvement) à bord de la fusée ? (on prend c = 300.000 km $s^{-1}$)

| vitesse v | km $s^{-1}$ | γ(v) | temps | longueur |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 1 | 1 s | 1 m |
| 0,05 c | 15.000 | 1,0012 | 1,0012 s | 0,9988 m |
| 0,1 c | 30.000 | 1,005 | 1,005 s | 0,995 m |
| 0,2 c | 60.000 | 1,02 | 1,02 s | 0,980 m |
| 0,3 c | 90.000 | 1,048 | 1,048 s | 0,953 m |
| 0,4 c | 120.000 | 1,091 | 1,091 s | 0,916 m |
| 0,5 c | 150.000 | 1,155 | 1,155 s | 0,865 m |

| vitesse v | km $s^{-1}$ | γ(v) | temps | longueur |
|---|---|---|---|---|
| 0,6 c | 180.000 | 1,25 | 1,25 s | 0,8 m |
| 0,7 c | 210.000 | 1,4 | 1,4 s | 0,714 m |
| 0,8 c | 240.000 | 1,666 | 1,666 s | 0,600 m |
| 0,9 c | 270.000 | 2,29 | 2,29 s | 0,436 m |
| 0,95 c | 285.000 | 3,202 | 3,202 s | 0,312 m |
| 0,99 c | 297.000 | 7,088 | 7,088 s | 0,141 m |
| 0,999 c | 299.700 | 22,37 | 22,37 s | 0,045 m |

On constate que pour les vitesses petites par rapport à c (bien que fort grandes pour nous), le facteur γ reste proche de 1, et longueurs et durées restent proches des valeurs mesurées dans leur référentiel. Même pour la vitesse de 150.000 km $s^{-1}$, le temps mesuré n'est encore que de 1,155 s, ce qui est un accroissement encore faible. Le temps est doublé pour v = 259.807 km $s^{-1}$. Ensuite, la progression s'accélère. Pour 0,999 c, soit 299.700 km $s^{-1}$, le mètre ne mesure plus que 4,5 cm…

Dans les accélérateurs de particules, des vitesses encore plus proches de c sont atteintes. Ce tableau montre bien les problèmes que cela pose dans l'interprétation des résultats.

### 1.6.3 La masse en Relativité

Tout d'abord, il faut préciser les termes employés : la masse d'une particule est définie au repos, et elle reste constante. Mais pour accélérer un objet, il faut lui communiquer une énergie croissante avec la vitesse : plus il va vite, plus il faut d'énergie pour l'accélérer. Lorsqu'on définit la loi fondamentale de la dynamique F = m γ, on se place dans le cadre classique, vitesses faibles devant c.

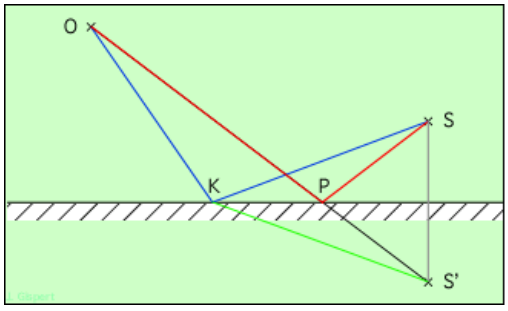
On généralise la notion de masse inerte en introduisant à sa place le *coefficient d'inertie*, fonction de la vitesse : F = *I*(v) γ. Il faudra calculer ce coefficient d'inertie.

Revenons provisoirement à la Mécanique Classique. Fermat a découvert le principe qui régit l'optique :

**Principe de Fermat**
La lumière se propage d'un point à un autre sur la trajectoire dont la durée de parcours est minimale.

Il découle immédiatement de ce principe que dans un milieu homogène, les propriétés étant les mêmes partout, le plus court chemin (le plus rapide) est la ligne droite. Mais les lois de la réflexion et de la réfraction en dérivent directement aussi.

Ce principe s'illustre géométriquement pour la loi de la réflexion :




La source ponctuelle S émet un rayonnement dans toutes les directions. Un observateur situé en O voit l'image de la source dans le miroir. Quel est le chemin parcouru par la lumière pour faire le trajet ? La lumière pourrait *a priori* se réfléchir en un point quelconque du miroir. Mais le principe de Fermat nous dit que ce trajet doit être parcouru en un temps minimum, ce qui élimine tous les rayons possibles, sauf un. La lumière se déplace ici dans un seul milieu, homogène. Donc sa vitesse est la même partout. Par conséquent, le trajet le plus rapide est aussi le plus court. On voit bien que le trajet en bleu SKO est plus long que le trajet en rouge. Mais comment déterminer, parmi tous les trajets possibles, celui qui est le plus court ? Pour cela, dessinons le symétrique de la source par rapport au miroir, soit S ′. Il est évident que le plus court trajet de S′ à O est la ligne droite S′ O passant par P.

Mais puisque S′ est le symétrique de S par rapport au miroir, PS′ = PS. Donc SPO = S′ PO, et par conséquent SPO est minimum, donc parcouru dans le temps minimum. C'est la solution recherchée. Remarquez d'ailleurs que si vous regardez un objet dans un miroir, vous avez bien l'impression de le voir dans la position symétrique par rapport au miroir, ce qui confirme le calcul (on *voit* l'objet dans la direction *d'où nous arrivent les rayons* qu'il émet). Enfin, cette construction est utilisée en optique géométrique pour tracer le rayon réfléchi sur un miroir (la méthode s'applique aussi dans le cas d'un miroir non plan, en considérant la tangente à la surface au point de réflexion).

Insistons bien sur l'homogénéité du milieu : elle induit l'équivalence entre plus courte distance et plus court temps ! Dans le cas de la réfraction, il y a deux milieux différents, donc deux vitesses différentes. Alors, la distance la plus courte ne correspond pas avec le temps le plus court, et

c'est ce dernier que le principe de Fermat impose (parce qu'il correspond à la réalité).Mais dans ce cas, il n'y a pas de construction géométrique possible.

On peut traduire le principe de Fermat de façon plus simple : la lumière prend toujours le chemin le plus rapide.

Un siècle plus tard (1744), Maupertuit définit un principe analogue en Mécanique, le *Principe de moindre action*. L'action est définie comme le produit de la masse, par la vitesse et par l'espace.

**Principe de moindre action**
Lorsqu'un système mécanique change d'état, il le fait en minimisant la variation de l'action.

En utilisant ce principe, il suffira de chercher les évolutions qui minimisent cette variation pour obtenir la solution des problèmes mécaniques.

Nous pouvons maintenant en venir au coefficient d'inertie défini plus haut, et noté *I*(v). Le principe de moindre action s'applique en Relativité, à la condition de généraliser la définition de l'action. Alors, le coefficient d'inertie se détermine comme application de ce principe appliqué à l'action relativiste. La valeur obtenue est :

$$I(v) = \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Lorsqu'un objet est au repos, sa vitesse est nulle, donc *I*(v) = *I*(0) = m (m est la masse mesurée au repos). Tant que la vitesse reste faible par rapport à c, le rapport $v^2/c^2$ reste très proche de 0, et *I*(v) reste très proche de m. C'est ce qui justifie la Mécanique Classique. Mais lorsque v approche c, le rapport $v^2/c^2$ tend vers 1, et le coefficient d'inertie tend vers l'infini ! Une particule qui se déplace à une vitesse proche de celle de la lumière présente un coefficient d'inertie très grand, qui s'oppose à son accélération.

C'est la raison pour laquelle il est impossible d'accélérer une particule de masse non nulle, à la vitesse de la lumière. C'est aussi ce qui explique que les accélérateurs de particules consomment tant d'énergie pour accélérer un malheureux électron… Lorsque sa vitesse approche celle de la lumière, son coefficient d'inertie, pour l'accélérateur qui est au repos, devient très grand. Il faut énormément d'énergie pour l'accélérer encore un peu.

### 1.6.4 Relation fondamentale de la dynamique

La relation fondamentale de la dynamique étant valable pour les petites vitesses, il faut la conserver. Mais on y remplace la masse inerte par le coefficient d'inertie :

$$f = I(v)\,\gamma$$

Le coefficient d'inertie tendant vers l'infini lorsque la vitesse tend vers c, il en résulte qu'il est impossible d'accélérer une particule matérielle massive à la vitesse de la lumière.

### 1.6.5 L'énergie de masse d'une particule

Nous avons l'habitude d'une masse invariable. Lavoisier a pu dire « rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme ». Mais regardons d'un peu plus près ce que cela signifie. « Rien ne se perd » veut dire que toute la masse que nous mesurons avant la réaction (chimique), se retrouvera après. « Rien ne se crée » constitue la réciproque : toute la masse que l'on trouve après la réaction y était forcément avant. « Tout se transforme » : les propriétés chimiques changent, donc à masse constante.

Nous allons voir qu'en fait ceci n'est pas vrai… Tout au moins, pas tout à fait. Lorsqu'on fait une réaction chimique, de la masse peut apparaître ou disparaître. Mais en faible quantité, de l'ordre de $10^{-8}$, ce qui est très difficilement mesurable, et ne l'était pas du temps de Lavoisier. Mais il s'agit là de réactions chimiques, les interactions entre atomes étant de type électromagnétique, à très faible énergie. Dans les réactions nucléaires, c'est l'interaction forte qui agit, et l'énergie de liaison est de l'ordre de $10^{-2}$, c'est-à-dire 1 %, ce qui est facilement mesurable. L'échange entre masse et énergie ne pouvait passer inaperçu lorsqu'on a commencé à réaliser des réactions nucléaires, alors que les réactions chimiques les cachaient parfaitement.

Le même principe variationnel que plus haut donne l'expression de l'énergie d'une particule en mouvement. Elle s'exprime par :

$$E = \frac{m\,c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Si la vitesse est nulle, c'est-à-dire dans le référentiel de la particule, le rapport $v^2/c^2$ est nul, le dénominateur vaut 1, et il ne reste que :

$$E = m\,c^2$$

Relation bien connue !

Par l'égalité entre la masse et l'énergie (au coefficient c près), elle exprime que ces deux notions n'en font qu'une, qu'il y a équivalence entre elles. Par conséquent, l'une peut se transformer en l'autre, et c'est ce qui se produit dans le Soleil lorsqu'il transforme un peu de la masse d'hydrogène pour rayonner l'énergie qui nous fait vivre.

Pour mieux voir l'équivalence entre la masse et l'énergie, imaginons (comme les cosmologistes le font souvent) une nouvelle unité de longueur :

| |
|---|
| Soit l'unité L, telle que L = 300.000 km.<br>Avec cette unité, la vitesse de la lumière c = 1 L $s^{-1}$ (1 L par seconde).<br>La formule ci-dessus devient tout simplement : **E = m** ! |

L'équivalence entre énergie et masse est évidente.

La Relativité Restreinte est donc une théorie de l'espace-temps, dans laquelle la vitesse de la lumière apparaît comme une constante liée à sa structure. Elle définit les relations entre deux observateurs galiléens, et toutes les conséquences qu'elles entraînent. Mais sa limite est dans ses prémices : seules les vitesses constantes sont traitées, et dès qu'il y a une accélération (changement quelconque de vitesse), elle trouve sa limite.

C'est dans cette limitation que se trouvent les justifications de la Relativité Générale…

#### 1.6.6 Formalisme

Le temps se modifiant dans la transformation de Lorentz-Poincaré, doit maintenant faire partie intégrante de tout objet décrivant les lois de la physique. Prenons un exemple simple : en théorie classique, la vitesse est représentée par un vecteur à trois composantes, chacune correspondant à la projection de la vitesse sur l'axe correspondant. Puisque le temps est le même pour tous les observateurs, il est inutile de le représenter partout. Mais en Relativité, il faut l'adjoindre à chaque objet. Par conséquent, la vitesse, dans notre exemple, sera représentée par un vecteur à quatre composantes au lieu de trois.

Mais pour respecter le Principe de Relativité Restreinte, il faut que ces vecteurs puissent passer d'un référentiel galiléen à un autre. Donc, qu'ils se transforment comme les événements. On appelle donc *quadrivecteur* un vecteur à quatre composantes qui se transforme par la transformation de Lorentz-Poincaré.

Les noms des quadrivecteurs correspondant à des vecteurs de la théorie galiléenne sont constitués du préfixe *quadri*, accolé au nom du vecteur classique. Ainsi, on parle de *quadrivitesse*. Et puisque la vitesse est définie comme le rapport dx / dt, on remplace dx par ds, et dt par dτ (dτ étant la durée propre).

Sur l'ensemble des quadrivecteurs, on définit un produit scalaire *semblable* au produit scalaire habituel. Soient les quadrivecteurs $V_1 = (x_1, x_2, x_3, x_4)$ et $V_2 = (y_1, y_2, y_3, y_4)$ ; leur produit scalaire est $V_1 . V_2 = x_1 . y_1 - x_2 . y_2 - x_3 . y_3 - x_4 . y_4$. Remarquez les signes - à la place des sommes traditionnelles.

A partir de ce produit scalaire, on définit une pseudo-norme : $|| V ||^2 = V . V = x_1^2 - x_2^2 - x_3^2 - x_4^2$. Ce n'est pas une vraie norme, parce qu'elle n'est pas définie positive. Elle représente la longueur du quadrivecteur.

Le tableau suivant montre comment on définit trois notions relativistes à partir des notions classiques :

| **Galilée** | | **Einstein** | |
|---|---|---|---|
| vitesse | $v = dx / dt$ | quadrivitesse | ${}_4v = ds / d\tau$ |
| accélération | $a = dv / dt$ | quadriaccélération | ${}_4a = d_4v / d\tau$ |
| quantité de mouvement | $p = m v$ | quadrivecteur impulsion-énergie | ${}_4p = m\ {}_4v$ |

**Remarque 1**: le quadrivecteur impulsion-énergie est noté parfois ${}_4p = mc^2{}_4v$. Le facteur $c^2$ peut être omis, si on considère un système d'unités dans lequel la vitesse de la lumière vaut 1.

L'adaptation de l'électromagnétisme est plus complexe, mais elle procède des mêmes méthodes.

Toute la Relativité Restreinte est ainsi notée dans le formalisme des quadrivecteurs.

**Remarque 2** : la Relativité Restreinte n'est pas une réinvention des lois de la physique, mais seulement *leur réécriture dans un formalisme plus général*, élargissant leur domaine d'application. Cette réécriture met en évidence de nouvelles conséquences, qui ont toutes été validées par l'expérience.

**Remarque 3** : considérant une onde électromagnétique dans son référentiel R', et dans un référentiel considéré fixe R, on peut calculer, par l'application des transformations de Lorentz-Poincaré, l'expression de la fréquence dans les deux référentiels d'une part, et celle de l'énergie dans les deux référentiels d'autre part. Faisant le rapport, on trouve : $E' / \nu' = E / \nu$. Ceci quel que soit le référentiel R. Il en découle donc l'existence d'une constante, que l'on note h, telle que $E = h \nu$. C'est la formule de Planck, qui est à la base de la Mécanique Quantique. On pourrait donc dire que la Mécanique Quantique est en partie issue de la Relativité, mais c'est en fait par des considérations expérimentales qu'elle a été fondée.

## *1.7 Un peu d'histoire*

La Relativité Restreinte est associée au nom d'Einstein. Mais les choses sont un peu plus compliquées. Les problèmes de la Mécanique Classique ne faisaient plus de mystère pour les physiciens, et nombreux étaient ceux qui cherchaient comment en sortir.

- Michelson et Morley ont montré expérimentalement que la vitesse de la lumière est indépendante de celle de l'observateur ;
- Georges Fitzgerald a proposé en 1889 que tout objet qui se déplace dans l'éther se contracte dans la direction de son mouvement d'un facteur $(1 - v^2 / v^2)^{1/2}$ ;
- Heinrik Lorentz a établi en 1892 les transformations qui portent son nom, et qui mettent en relation les coordonnées d'espace et de temps. Il a ainsi retrouvé la formule de Fitzgerald, et ces transformations sont donc celles de Fitzgerald-Lorentz ;
- Henri Poincaré, en 1904, publie le principe de relativité étendu à toutes les lois de la physique. Un an avant Einstein.

Tout ceci ne doit pas diminuer les mérites d'Einstein, mais il faut admettre qu'il n'a pas bâti la Relativité Restreinte *ex nihilo*, comme on semble le croire souvent. Et qu'il a même profité du travail des autres physiciens pour le faire. Il est extrêmement difficile de lutter contre les idées admises pour avancer&helip;

Pour de plus amples informations historiques sur la Relativité, consulter *le destin de l'Univers*, de Jean-Pierre Luminet.

## *1.8 Résumé*

**Principe d'inertie** : le principe d'inertie est conservé.

**Le repos absolu n'existe pas** : ceci n'est pas remis en cause, pas plus que l'inexistence de référentiel absolu.

**Observateurs galiléens** : constituent toujours le cadre de cette théorie, mais leurs vitesses ne sont plus limitées que pas celle de la lumière.

**Principe de Relativité Restreinte** : toutes les lois de la physique sont invariantes dans la transformation de Lorentz-Poincaré.

**Le temps est relatif** : le temps mesuré par deux observateurs galiléens dépend de leur vitesse relative.

**Espace-Temps** : le cadre de la théorie est maintenant l'espace-temps, combinaison des coordonnées d'espace et du temps.

**Contraction des longueurs** : les longueurs mesurées dans un référentiel en mouvement sont contractées dans le sens du mouvement.

**Dilatation des durées** : les durées mesurées dans un référentiel en mouvement sont dilatées…

**Simultanéité** : la simultanéité des phénomènes n'est plus qu'un souvenir. Elle dépend de la position de l'observateur dans l'espace-temps, c'est-à-dire de sa vitesse par rapport aux phénomènes observés.

**Perspective** : la relativité du temps et de l'espace est un phénomène de perspective, qui dépend de la position de l'observateur.

**Transformation de Lorentz-Poincaré** : elle remplace la transformation de Galilée. Elle définit à la fois les positions et le temps, puisque celui-ci est relatif à la vitesse des observateurs.

**Vitesse limite** : l'existence d'une vitesse limite *dépend des propriétés de l'espace-temps*, et non de celles de la lumière. Par conséquent, elle s'applique à toutes les interactions.

**Composition des vitesses** : découlant de la transformation de Lorentz-Poincaré, elle limite les vitesses possibles à une vitesse maximum, qui pourrait être celle de la lumière.

**Métrique de Minkowski** : la métrique mesure la distance entre deux événements. La métrique adaptée à la Relativité Restreinte est la métrique de Minkowski, généralisation du théorème de Pythagore.

**Invariant** : le $ds^2$ est un invariant de l'espace-temps. Il est l'équivalent de la longueur dans l'espace physique. La transformation de Lorentz-Poincaré représente une rotation dans l'espace-temps, qui conserve les longueurs comme une rotation habituelle dans l'espace.

**Electromagnétisme** : cette théorie a été modifiée pour satisfaire au principe relativiste. Sous cette forme, elle est invariante dans la transformation de Lorentz-Poincaré.

**Domaine d'application** : La différence numérique sur les temps et les positions, entre la Relativité Galiléenne et la Relativité Restreinte, ne se fait sentir que pour des vitesses proches de celle de la lumière ; jusqu'à c / 10, elle reste très faible. Basée sur les repères galiléens, donc sans accélérations, elle ne concerne que les domaines où les forces gravitationelles sont négligeables. Donc dans un Univers pratiquement vide…

**Relation fondamentale de la dynamique** : $f = I(v)\ \gamma$.

La vitesse limite obtenue est la vitesse de la lumière, si le photon est de masse nulle. La masse du photon est extrêmement petite, mais il n'est pas sûr qu'elle soit strictement nulle. Si elle ne l'était pas, la vitesse de la lumière serait un peu inférieure à la vitesse limite. Pour l'instant, rien ne permet de supposer qu'elles diffèrent.

L'équivalence des observateurs galiléens implique que les transformations permettant de passer d'un référentiel galiléen à un autre forment un

groupe. Cette propriété, avec l'isotropie de l'espace, permet de construire la transformation de Lorentz. Equivalence des observateurs galiléens et isotropie de l'espqce-temps fondent la Relativité Restreinte.

La Relativité Restreinte explique de nombreux phénomènes, autrement incompréhensibles (durée de vie du muon, du pion…).

**La Relativité Restreinte ne tient pas compte des accélérations. C'est sa limitation, qui nécessite une nouvelle théorie : ce sera la Relativité Générale.**

---=OO=---




Le chemin le plus court d'un point à un autre est la ligne droite,
à condition que les deux points soient bien en face l'un de l'autre...
*Pierre Dac*

**Plan**

1.1 Introduction
1.2 Comparaison
1.3 Principe d'équivalence d'Einstein
  1.3.1 Décalage spectral gravitationnel
  1.3.2 Courbure des rayons lumineux
  1.3.3 Ralentissement des horloges
  1.3.4 Forces de marée
1.4 Chronogéométrie
1.5 Géométrie
  1.5.1 Coordonnées de Gauss
  1.5.2 Mollusque de référence
  1.5.3 Métrique de Minkowski
  1.5.4 Métrique de Schwarzschild
  1.5.5 Coordonnées comobiles
  1.5.6 Métrique de Robertson-Walker
1.6 Formalisme tensoriel
  1.6.1 Tenseur métrique
  1.6.2 Tenseur de Ricci
  1.6.3 Tenseur impulsion-énergie
  1.6.4 Equation d'Einstein
  1.6.5 Trou noir
  1.6.6 Ondes gravitationnelles
  1.6.7 Frame dragging, Lense-Thirring
1.7 Résumé

Présentation informelle de la Relativité Générale

Ce texte est en cours de construction, et n'est pas satisfaisant sous la forme actuelle. Cependant, il peut constituer une aide pour comprendre les fondements de la Relativité Générale, et ses relations avec les autres théories de gravitation.

## *1.1 Introduction*

La lecture de ce chapitre est facilitée par la connaissance des notions définies dans la Relativité Restreinte.

La Relativité Générale a été publiée par Albert Einstein en 1915, dix ans après la Relativité Restreinte. Elle vient pour supprimer la limitation conservée par cette dernière, depuis la Relativité Galiléenne, de ne considérer que les observateurs galiléens. La Relativité Générale prend en compte tous les observateurs, même s'ils sont accélérés. En ce sens, la Relativité Générale est une écriture universelle des lois de la physique.

Elle abandonne la structure sous-jacente, fixe, de l'espace-temps, pour l'amalgamer à son contenu matériel. L'équation d'Einstein dit simplement que la géométrie de l'espace-temps est égale à son contenu matériel. Ainsi, la géométrie est déformée pas les masses, et les mobiles suivent des géodésiques de cet espace courbe.

Le formalisme mathématique utilisé pour décrire cette géométrie est *l'algèbre tensorielle*.

**Accélération**

On appelle *accélération* toute opération qui modifie l'état de mouvement d'un objet, c'est-à-dire tout ce qui change sa vitesse. N'oubliez pas que la vitesse a une direction et un sens : il n'est pas équivalent d'aller vers l'est ou d'aller vers l'ouest, même si on y va dans les deux cas à 50 km $h^{-1}$ (50 km / h) ! Alors, lorsqu'on change de direction, même en conservant la même valeur de la vitesse (en km $h^{-1}$), on subit une accélération, et le référentiel qui la subit n'est plus galiléen.

**Espace-temps**

La Relativité Restreinte a apporté la définition de l'espace-temps comme théatre des phénomènes. Bien que le temps se soit trouvé mélangé à l'espace dans ce nouveau concept, l'espace-temps existe en dehors de son contenu. La Relativité Générale est à ce point de vue une rupture essentielle : nous verrons qu'à propos de la gravité (Relativité Générale), il ne s'agira plus d'un espace-temps externe, théatre des phénomènes, mais d'un espace-temps acteur lui-même, qui participe au phénomène en se déformant sous l'effet des masses et de l'énergie. Ce sont ces déformations qui guident les mobiles.

## *1.2 Comparaison*

La Relativité Restreinte décrit la physique de manière à respecter le principe de Relativité. Ceci signifie que les lois de la physique doivent être invariantes dans un changement de référentiel galiléen, c'est-à-dire sous la transformation de Galilée. Les référentiels galiléens ne tiennent, par nature, pas compte des accélérations, puisqu'ils sont en translation uniforme. La Relativité Générale est donc venu pour combler cette lacune, et donc décrire les lois de la physique de telle façon qu'elles soient invariantes dans un changement de référentiel quelconque, accéléré ou non.

| La Relativité Restreinte décrit le vol de croisière seulement<br>La Relativité Générale décrit aussi le décollage et l'atterrissage |
|---|

Ceci pour dire que pendant le vol de croisière d'un avion, en négligeant les turbulences, on est emporté dans un mouvement de translation uniforme. L'avion constitue donc un référentiel galiléen, et on peut y appliquer la Relativité Restreinte. Par contre, pendant les phases de décollage et d'atterrissage, le mouvement est accéléré, et la Relativité Générale peut seule déterminer précisément le mouvement.

## *1.3 Principe d'équivalence d'Einstein*

Dans l'étude des mouvements accélérés, on distingue deux situations : celle dans laquelle on communique un mouvement en appliquant une force, et celle dans laquelle le corps tombe dans un champ de gravitation. Elles sont fondamentalement différentes, mais partagent une même forme de proportionnalité.

- La *masse inerte* est celle qui oppose une résistance lorsqu'on tente d'accélérer un objet ;
- La *masse pesante* est celle qui l'attire vers le sol dans un champ de gravitation.

Ce sont *a priori* deux notions très différentes. Cette distinction est très importante, et elle se manifeste dans la vie courante (bien qu'on n'en ait pas conscience) : soulever un objet, et le lancer, sont deux choses bien différentes. Pour le soulever, on lutte contre la pesanteur, produite par la Terre et dirigée vers elle (verticalement), alors que pour le lancer (horizontalement), on le propulse perpendiculairement à la direction du poids. Donc, dans ce cas, le poids ne change pas. On ne devrait pas ressentir d'effort pour cela. Pourtant, on sent bien la force nécessaire pour animer l'objet. **Poids**, et **résistance à la mise en mouvement**, sont donc deux notions différentes, mais que nous mélangeons dans notre expérience. Physiquement, on doit les séparer, et Einstein a bien insisté la-dessus.

- Pour soulever un objet à la surface de la Terre, il faut fournir un effort proportionnel à sa masse, et à l'attraction de la Terre. Sur une autre planète, l'effort serait proportionnel à la même masse, mais à une attraction différente (six fois plus faible sur la Lune par exemple). Le poids en serait donc différent, bien que la quantité de matière qui constitue l'objet soit la même. On appelle cette masse, la *masse pesante*.
- En athlétisme, le lancer du poids n'est pas difficile parce que le poids *pèse*, mais parce qu'il est *inerte*.
- Le lancement du même poids sur la Lune, où il pèserait 6 fois moins, serait tout aussi difficile. La vitesse qui lui serait fournie avec le même effort serait exactement la même. Bien sûr, puisque son poids serait six fois inférieur, la parabole qu'il parcourrait en tombant serait plus allongée, et il irait plus loin.
- Lorsqu'une sonde à destination de Mars est en orbite autour de la Terre, son poids est nul, mais il faut pourtant beaucoup d'énergie pour l'accélérer vers la planète, car c'est la *masse inerte* qui s'y oppose.

Si nous ne faisons pas la différence entre ces deux phénomènes, c'est certainement parce que dans notre environnement terrestre, elle ne se manifeste pas de manière sensible. Il faut un raisonnement pour la mettre en lumière. Et la cause de cela est que les deux masses ont la même valeur !!! Les physiciens en ont fait un principe :

| Le **principe d'équivalence faible** stipule que la mesure de ces deux masses est la même.<br>Il est vérifié par l'expérience à $10^{-12}$ près. |
|---|

Il est utilisé en physique depuis très longtemps.

Remarquez de plus que parmi toutes les forces qui s'appliquent à un corps, seules les forces d'inertie et gravitationnelles dépendent de la masse. Les autres dépendent de charges spécifiques, charge électrique, charge de couleur.

Einstein est allé un peu plus loin dans cette équivalence. Si on réalise des expériences locales (à courte distance, disons dans la cabine d'un ascenseur), on peut considérer que le champ gravitationnel est homogène , car :

- sa variation en hauteur est négligeable (l'intensité est la même au plancher et au plafond de la cabine) ;
- la verticale est la même pour tout le monde dans la cabine. La verticale d'un lieu est la droite qui joint ce lieu au centre de la Terre. Si deux points sont très proches à la surface de la Terre, les verticales qui passent en ces points peuvent être considérées parallèles.

**Il n'y a alors aucune différence entre une chute libre dans ce champ homogène, et une absence totale de champ**. Einstein en déduit le principe d'équivalence fort :

---

> Le résultat des expériences faites dans un référentiel en chute libre ne dépend pas de l'état de mouvement du référentiel.

Ce principe pose donc qu'une accélération -une augmentation ou diminution de vitesse- produit des effets identiques à un champ de gravitation. Se laisser tomber en chute libre, c'est accélérer son mouvement **exactement** comme la pesanteur le demande. C'est donc en annuler les effets, et c'est pourquoi un astronaute dans sa cabine flotte librement : il tombe exactement comme la cabine. Dans le référentiel de la cabine en chute libre, la gravité est donc nulle.

**Note** : on appelle *impesanteur* la situation dans laquelle on ne ressent pas de pesanteur. Ce terme remplace celui d'*apesanteur*, pour éviter toute confusion entre 'la pesanteur' et 'l'apesanteur', deux choses contraires, mais phonétiquement identiques.

**Réciproquement**, une accélération peut avoir les mêmes conséquences qu'un champ de pesanteur :

- Lorsqu'on se trouve dans un avion au décollage, dans sa phase d'accélération intense, on est plaqué contre le dossier du siège, exactement comme on le serait si l'avion était immobile, en position verticale.
- Dans la navette spatiale avant le décollage, l'équipage est assis dos vers le sol. Il subit la gravité. Au décollage, l'accélération s'ajoute à la gravité, ce qui augmente beaucoup le poids apparent que les personnes ressentent, et qui les plaque contre le dossier du siège.
- Pour un futur voyage vers Mars, les effets de l'impesanteur étant néfastes à long terme, il faudra recréer dans le vaisseau une pesanteur artificielle. Il y a pour cela deux solutions : soit on l'accélère en permanence (la pesanteur se produit vers l'arrière du vaisseau, mais ceci est impossible pour des raisons de consommation de carburant), soit on le met en rotation (la pesanteur se produit alors perpendiculairement à l'axe de rotation, d'autant plus intense qu'on est plus loin de l'axe ; voir le film *2001, Odyssée de l'espace*...). Dans les deux cas, il s'agit d'une accélération, qui simule une pesanteur.

> A l'instar de ce que nous avons vu pour la Relativité Restreinte, aucune expérience ne peut révéler si le laboratoire dans lequel elle est faite est soumis à un champ de gravitation, ou à une accélération.

Dans la cabine en chute libre, si on lance une boule avec une vitesse v, celle-ci continuera le mouvement imprimé en ligne droite, à vitesse constante(par rapport à la cabine). On a pu le vérifier souvent avec des images de cosmonautes qui jouent avec un stylo ou autre petit objet. Ceci montre que le référentiel propre de la cabine, accéléré par le champ de pesanteur, est un *référentiel inertiel* (dans lequel le mouvement inertiel se réalise). Un référentiel inertiel est donc un référentiel auquel la somme des forces appliquées est nulle.

> **Les référentiels accélérés sont équivalents à des champs gravitationnels**

Ce principe a des conséquences totalement insensibles dans la vie courante : le *décalage spectral gravitationnel*, la *courbure des rayons lumineux* et le *ralentissement des horloges*, le tout dans un champ de gravitation.

### 1.3.1 Décalage spectral gravitationnel

**Rayon lumineux longitudinal** Considérons une fusée qui accélère avec l'accélération g. Au plancher de la cabine se trouve un émetteur de lumière. Il émet un rayon qui sera capté par un détecteur situé au plafond. Le rayon part à l'instant $t_0$, alors que la fusée se déplace à la vitesse $v_0$. La distance entre l'émetteur et le récepteur est h. Le rayon mettra donc le temps $t = h / c$ pour atteindre le récepteur. Mais la fusée accélère. Pendant le temps T, sa vitesse augmente de $\Delta v = g\ t = g\ h / c$. Donc, lorsque le rayon arrive sur le récepteur, la vitesse de celui-ci a augmenté de $\Delta v$. Le récepteur s'éloigne du rayon, et la longueur d'onde de celui-ci apparaît donc décalée vers le rouge par effet Doppler-Fizeau. Si la fusée accélérait vers le bas, le décalage serait vers le bleu.

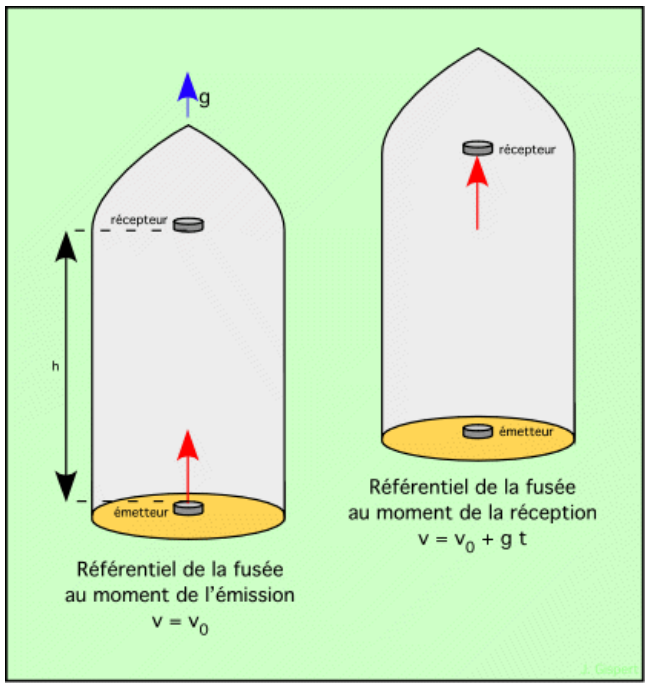



Figure 1.1 : Fusée en accélération

En vertu du principe d'équivalence des référentiels, même accélérés, on doit observer le même phénomène dans un référentiel (cabine) fixe placé dans un champ gravitationnel d'accélération égale. Or cette observation a été faite avec un résultat en parfait accord avec la théorie. Ceci renforce donc la confiance dans le principe d'équivalence entre accélération et champ gravitationnel.

On admet ce phénomène en vertu du principe d'équivalence, et on le valide par l'expérience. Mais pour le comprendre, on peut penser que le photon émis en bas d'un champ de gravitation possède une énergie $E = h \nu$, fonction de sa couleur. Mais pour monter verticalement, il doit perdre un peu d'énergie. Ce faisant, sa vitesse ne change évidemment pas, mais sa fréquence baisse. Et donc, en atteignant le récepteur, sa fréquence est $\nu' < \nu$, avec l'énergie correspondante $E = h \nu' < h \nu$.

### 1.3.2 Courbure des rayons lumineux

**Rayon lumineux transversal** Considérons notre fusée, avec la source lumineuse maintenant à gauche, et le récepteur à droite. Dans le référentiel de la fusée, le rayon se propage en ligne droite. Mais vu de la Terre, lorsqu'il touche le récepteur, la fusée est plus loin. Son mouvement étant accéléré, la vitesse a varié pendant ce laps de temps, et donc la trajectoire **observée** du rayon lumineux est un arc de courbe.

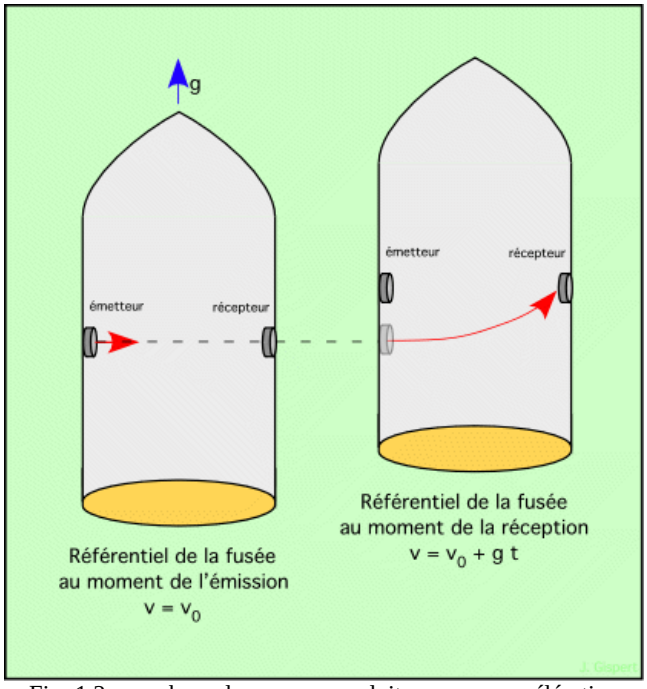



Fig. 1.2 : courbure des rayons produite par une accélération

On remarque que la courbure (flèche rouge) se fait dans le sens de l'accélération (flèche bleue).

Encore une fois, en vertu du principe d'équivalence, ce mouvement accéléré est équivalent à un champ de gravitation. Donc, dans un champ de gravitation, le rayon lumineux doit également suivre une trajectoire courbe, et la courbure se fait dans le sens de l'accélération. L'effet est très faible, ce qui explique qu'il n'ait jamais été mis en évidence expérimentalement avant sa prédiction théorique.

Cet effet a été confirmé dès l'éclipse totale de Soleil du 29 mai 1919. Une photo des étoiles visibles autour de la Lune cachant le Soleil a été prise. La comparaison avec une photo réalisée six mois auparavant, lorsque le Soleil était de l'autre côté du ciel, loin de ce champ d'étoiles, a montré que les étoiles paraissaient légèrement plus éloignées qu'en l'absence du Soleil. Ce test a été une magnifique confirmation de la Relativité Générale, et en particulier du principe d'équivalence dont elle procède.

Cette courbure est totalement inexplicable, et même inconcevable, dans la théorie Newtonienne. Puisque la masse $m$ du photon est nulle, la force Newtonienne qu'il ressent $F = G M m / r^2$ est strictement nulle. Mais en Relativité, la courbure de l'espace-temps n'a aucun rapport avec la lumière (on l'a vu dans la dérivation de la transformation de Lorentz) ; c'est une propriété de l'espace-temps lui-même, qui s'applique donc à tout ce qui s'y trouve, matière et lumière confondues.

### 1.3.3 Ralentissement des horloges

Nous allons utiliser le principe d'équivalence entre les référentiels accélérés et les référentiels placés dans un champ de gravitation pour déterminer le ralentissement des horloges.

Considérons un disque en rotation, avec une horloge placée au centre (donc sans vitesse), et une autre identique à la périphérie. Cette dernière se déplace en tournant à une vitesse $v = \omega r$ ($\omega$ est la vitesse angulaire de rotation). La Relativité Restreinte est applicable à ces deux horloges, et en fonction de leur vitesse relative, prédit un ralentissement de l'horloge extérieure par rapport à l'horloge centrale. Donc, une accélération produit un ralentissement des horloges, et puisque cette accélération est équivalente à un champ de gravitation, il en est de même pour celui-ci.

La vérification de ce phénomène est difficile, car il est très faible. Mais elle a cependant été réussie dans le faible champ gravitationnel de la Terre, et constitue une éclatante vérification de la Relativité Générale.

### 1.3.4 Forces de marée

Les forces de marée sont des forces fictives, dues à une différence de ressenti d'un champ gravitationnel.

La figure 1.2 montre un objet massif sphérique (planète, étoile à neutrons par exemple). Y figurent deux trajectoires de chute libre, ui convergent vers le centre du corps attracteur. Une particule placée en $A_1$ est soumise à la gravité. Un peu plus tard, elle est en $A_2$ étant tombé vers le corps central.

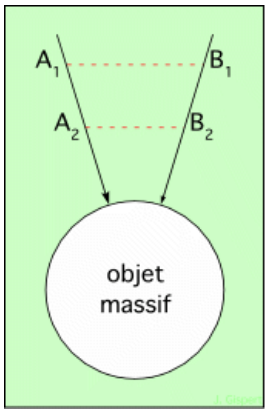


Fig. 1.2 : Champ gravitationnel

**Première constatation** : le champ gravitationnel de l'objet diminue lorsqu'on s'éloigne : il varie en $1 / r^2$, où r est la distance au centre. Plaçons deux particules en $A_1$ et $A_2$. La plus proche du corps central, en $A_2$, ressent une gravité plus importante, et donc accélère plus fortement que l'autre. Donc elle s'en éloigne, puisque l'autre tombe moins vite. Lorsque la seconde sera arrivée en $A_2$, elle ressentira une gravité plus forte également, mais la première sera encore plus proche du centre, et son accélération sera toujours supérieure. Par conséquent, cette différence de gravité en fonction de l'éloignement produit une séparation des deux particules, qu'on peut interpréter comme une force tendant à les éloigner l'une de l'autre. C'est une force fictive en ce sens qu'elle n'est due qu'à la différence entre deux forces réelles, mais ses effets sont bien réels. Dans le référentiel lié à $A_1$ (resp. $A_2$), on voit $A_2$ (resp. $A_1$) s'éloigner.

Si ces deux particules appartiennent à un objet solide, cette force de marée s'oppose à la force de liaison entre elles (qui les maintient ensemble). Si la force de marée est plus forte que les forces de cohésion, l'objet se cassera (l'endroit le plus lointain du centre attractif où ceci se produit est la limite de Roche).

**Seconde constatation** : vous remarquerez par ailleurs que chaque particule tombe vers le centre de l'objet massif, donc leurs trajectoires se coupent au centre du corps attracteur. Par conséquent, dans leur mouvement, elles se rapprochent l'une de l'autre : la distance $A_2B_2$ est plus petite que la distance $A_1B_1$. Tout se passe donc comme s'il y avait une force qui pousse les deux objets qui tombent à se rapprocher l'un de l'autre, perpendiculairement à leur direction de chute. Cette force est une force de marée. Elle est aussi fictive que la précédente, étant comme elle due à la différence entre les forces appliquées aux deux particules.

Si on laisse tomber un objet étendu, un rectangle $A_1\ B_1\ B_2\ A_2$, il subit cette force, étant comprimé dans sa largeur et étiré dans sa longueur.

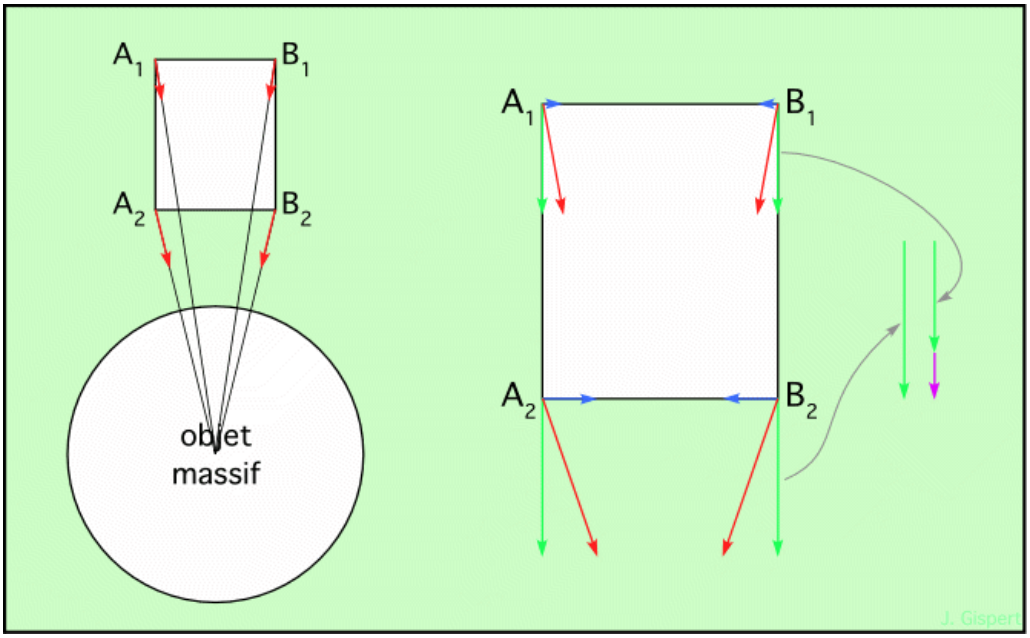


Fig. 1.3 : Détail du champ gravitationnel

Sur la partie gauche, les flèches rouges indiquent la direction et l'intensité de la force d'attraction ressentie par chaque point (l'intensité est donnée par la longueur des flèches). La partie droite du schéma montre le détail de la force appliquée aux 4 points considérés. La décomposition de ces forces selon deux axes perpendiculaires met en évidence les forces de marée (flèches bleues) qui compriment l'objet. Dans l'autre

direction, les flèches vertes représentent la composante verticale de l'attraction ; elles sont reportéestout à droite du schéma, et leur différence est représentée par la flèche violette. Cette dernière représente donc la force d'étirement produite par la différence de gravité entre deux points de distance différente. Vu du point $B_1$ par exemple, la flèche vioette représente la force qui éloigne $B_2$.

Les explications qui précèdenet sont donnnées dans un langage newtonnien. Mais on peut interpréter le rapprochement des trajectoires au voisinage de l'objet massif de deux façons différentes :

- par une force qui agit pour obliger les objets à se rapprocher (approche newtonnienne) ;
- par une courbure de l'espace (approche relativiste).

Dans la première de ces interprétations, les forces de marées apparaissent comme des forces fictives, n'ayant pas de source précise. De plus, leur action instantanée est en contradiction avec la Relativité Restreinte.

Dans la seconde interprétation, les particules en chute suivent tout simplement des trajectoires naturelles, dans un espace courbe. Expliquons cela par analogie : la surface de la Terre nous semble grossièrement plate, mais elle ne l'est pas, même localement. Elle est parsemée de bosses et de creux, que sont les montagnes et les vallées. Où coule la rivière ? dans le fond de la vallée, car c'est l'endroit où son énergie potentielle est minimale (attirée par la Terre, l'eau tombe tant qu'elle le peut). Dans l'espace courbe qu'est la surface du sol montagnard, le torrent suit une géodésique : c'est une courbe de moindre énergie.

Par analogie, on peut considérer que les deux particules $A_1$ et $B_1$ précédentes tombent simplement selon une trajectoire naturelle dans un espace courbe. Si l'espace était plat, leurs trajectoires seraient parallèle et parcourues à vitesse constante, mais puisque l'espace est courbé, elles se coupent au centre de l'objet attracteur et la vitesse augmente au cours de la chute. La courbure de l'espace est produite par l'objet attracteur.

## *1.4 Chronogéométrie*

La Relativité Générale se fonde sur la géométrie de l'espace-temps, déterminée par le contenu en matière-énergie de l'Univers. C'est là l'idée originale d'Einstein. Généralisant le principe d'inertie, il a imaginé que les corps se déplacent **toujours** selon ce principe, mais dans un espace-temps déformé par la matière. Le principe d'inertie galiléen indique qu'une particule se déplace, tant qu'elle n'est pas soumise à des forces, en ligne droite. Mais qu'est-ce qu'une ligne droite ? C'est le chemin le plus court pour relier deux points. Or à la surface d'une sphère par exemple, la ligne de plus court chemin n'est pas une droite, mais un arc de grand cercle : c'est la trajectoire suivie par les avionsà la surface de la Terre. Si l'Univers était à deux dimensions, et de forme sphérique, les mobiles inertiels parcouraient donc des arcs de grand cercle. Ils seraient tout naturellement contraints de rester dans leur espace ! L'arc de grand cercle y est la ligne la plus rapide pour aller d'un point à un autre.

Partant de cette idée, Einstein a envisagé que notre espace-temps ne soit pas plat, comme l'intuition courante nous le fait croire, mais parfois courbé. Alors, un mobile inertiel, comme par exemple une planète autour du Soleil, suivrait une trajectoire qui épouse la forme de l'espace-temps. Au voisinage du Soleil, il est évident que la déformation doit avoir la symétrie sphérique. Et donc que la trajectoire inertielle de la planète doit tourner autour...

La déformation de l'espace-temps produite par une masse est d'autant plus forte que l'on est plus près. La courbure de l'espace est donc plus importante qu'à grande distance, c'est pourquoi les planètes proches vont plus vite. Dans l'autre direction, un objet qui tombe en chute libre rencontre, en avançant, un espace-temps de plus en plus courbé, et c'est pourquoi sa vitesse augmente.

Il faut donc voir la modélisation de la gravité par la géométrie comme faisant intervenir également le temps. D'où le nom de chronogéométrie qu'on peut attacher à cette description de l'espace-temps.

Pour faire intervenir le temps, il suffit de l'incorporer à la description de la même manière que l'espace, donc de l'introduire comme quatrième variable après les trois variables d'espace. Mais la géométrie sera semblable, avec cette dimension de plus. Il faut donc d'abord étudier la géométrie elle-même.

**Géométrie euclidienne** C'est la géométrie de l'école, qui nous semble si naturelle qu'on ne saurait la remettre en question. Sur quoi est-elle basée ? Sur des observations, et c'est ce qui fait sa force.

Malgré cette base expérimentale, la Géométrie euclidienne est une abstraction pure. Accrochons deux pendules (ficelle soutenant une petite masse), au plafond. Ils se positionnent verticalement sous l'effet de la pesanteur. Visuellement, les ficelles sont parallèles. Plus précisément, si on mesure leur distance aux deux extrémités, on trouve bien sûr la même valeur. Si on prolonge par la pensée ces deux ficelles, on obtient la notion euclidienne de parallèles : ce sont deux droites qui ne se rencontrent jamais (elles gardent constante leur distance). A partir de là, Euclide a bâti toute sa Géométrie, celle qui est toujours enseignée au niveau élémentaire. Le nom même Géométrie signifie en grec : mesure de la Terre. Il montre bien que cette théorie est basée sur des observations pratiques.

L'abstraction vient de l'erreur commise en mesurant les distances des deux ficelles en haut et en bas. Il est impossible de mettre en évidence une différence, pourtant cette différence existe. Et le vrai prolongement des ficelles donne deux droites qui se coupent au centre de la Terre. La Géométrie euclidienne est donc basée sur une erreur de mesure. Remarquez de plus que la géométrie d'Euclide serait la bonne, s'il n'y avait pas la Terre... C'est bien la preuve que la présence de la Terre a une influence sur la géométrie (au-delà du nom...). **Et ce qui fait que la Relativité Restreinte ne s'adresse, strictement, qu'à un Univers vide.**

Euclide a eu du génie, car il a résumé sa Géométrie en cinq postulats, dont le dernier a donné des sueurs aux mathématiciens pendant des siècles. Ce dernier postulat dit que "dans un plan, par un point extérieur à une droite on peut faire passer une parallèle à cette droite, et une seule". Ce postulat avait, pour les mathématiciens, des allures de théorème : ils en ont cherché vainement une démonstration à partir des quatre premiers. L'échec de ces recherches **ne prouve pas** l'impossibilité de démontrer. La démonstration pourrait être trop difficile pour avoir été trouvée. Mais Gauss, dès 1817, a soupçonné que ce postulat **ne pouvait pas** être démontré ; on dit dans ce cas qu'il est *indépendant* des autres.

### *Géométries non euclidiennes*

C'est Gauss qui est à l'origine de ces géométries. Il a créé une géométrie sur la surface d'une sphère, la géométrie elliptique, dans laquelle les géodésiques sont les intersections avec la surface, des plans passant par le centre. Ce sont donc les grands cercles de la surface. Par deux points distincts passe une droite et une seule. Mais étant donnés une ligne et un point extérieur à cette ligne, il n'existe pas de ligne passant par ce point et ne la coupant pas. Donc, il n'existe pas de parallèle à la ligne donnée passant par le point. Cette géométrie satisfait à tous les autres axiomes d'Euclide. C'est donc la première géométrie non euclidienne.

L'eixstence de géométries qui satisfont les premiers postulats d'Euclide, mais pas le cinquième, prouve que ce dernier en est indépendant. Euclide a donc admis que par un point extérieur à une droite passe une parallèle et une seule. On peut postuler, à la place, que par ce point ne passe aucune doite parallèle à la droite donnée, on obtient la géométrie de Riemann, ou au contraire qu'il y en a une infinité, et on obtient les géométries hyperboliques de Lobatchevski et Boliyai.

**Choix d'Einstein** Sur la sphère, l'arc de grand cercle est parcouru à vitesse constante. On peut donc bien considérer que c'est un mouvement inertiel, le long d'une ligne qui est **la plus droite possible**. Définissons alors ces lignes naturelles, que nous appellerons *géodésiques*, comme étant les lignes parcourues par des mobiles inertiels. Précisons que inertiel signifie : sans subir de forces extérieures.

On peut encore généraliser cette idée, en considérant des mouvements accélérés (donc non inertiels au sens classique). Considérons un objet en chute libre (qui ne subit d'autre force que la gravité), vers un corps central. Il tombe en ligne droite, radiale, vers le centre de l'attracteur. Mais son mouvement est accéléré. Si on imagine que l'espace-temps est modifié par la masse centrale de telle manière que les intervalles d'univers soient modulés en fonction de la distance au centre, alors l'objet en chute libre suit une trajectoire inertielle dans cet espace-temps. Par conséquent, en modélisant la géométrie de l'espace-temps par les masses présentes, on peut ramener tout mouvement à un mouvement inertiel.

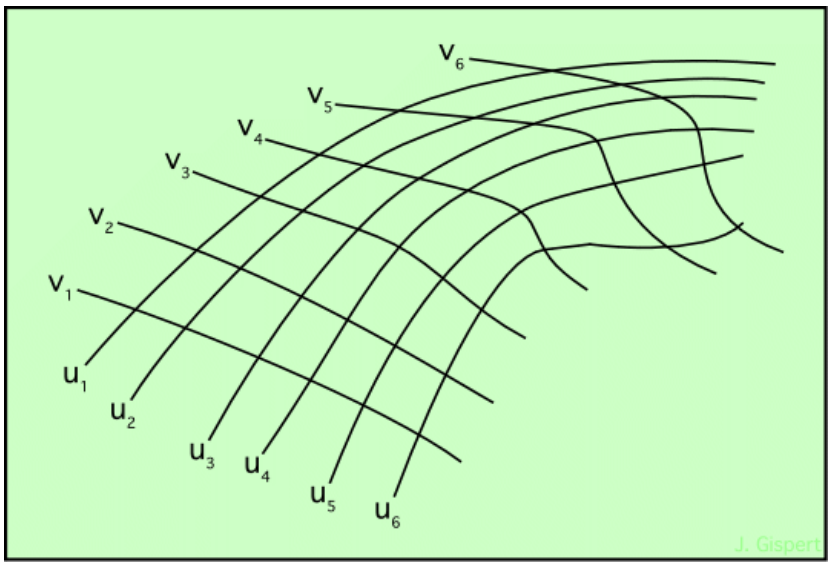
Cette idée étant posée, il reste à la formaliser. Pour cela, il faut décrire la géométrie de l'espace-temps, et dire qu'elle est équivalente à son contenu matériel... La description de l'espace-temps se fait par l'intermédiaire de la métrique.

## *1.5 Géométrie*

La métrique de Minkowski est une métrique euclidienne, qui décrit un espace-temps localement plat ; elle ne convient donc pas. Il faut utiliser une métrique plus élaborée, capable de représenter les déformations géométriques de l'espace-temps.

#### 1.5.1 Coordonnées de Gauss

Les coordonnées de Gauss sont des coordonnées curvilignes. On a l'habitude de mesurer les longueurs sur des règles droites. Pourtant, losqu'un tailleur prend vos mesurations, il utilise un mètre de couturière, ruban souple gradué qui s'adapte à la forme du corps pour en obtenir les mesures. Les coordonnées de Gauss sont basées sur ce principe : elles sont mesurées le long de lignes pouvant être courbes.




Pour mesurer un plan, il faut habituellement deux droites perpendiculaires graduées (coordonnées cartésiennes). On détermine la position d'un point en y faisant passer deux parallèles aux axes de coordonnées. Par définition, les parallèles issues de deux points différents ne se coupent pas. Pour les coordonnées de Gauss, c'est la propriété qui est retenue : les courbes le long desquelles on mesure les longueurs ne doivent pas se couper. Et naturellement, entre deux courbes quelconques, il doit en exister une qui vérifie aussi la propriété.

#### 1.5.2 Mollusque de référence

L'étude de la gravitation faite par Einstein lui a montré qu'il n'est pas possible de trouver un corps rigide qui serve de point de repère. Dans un champ gravitationnel, ce corps doit se déformer, pour s'adapter. On peut toujours imaginer et trouver un champ assez intense pour cela,  : c'est le cas des marées, qui déforment le géoïde, c'est aussi le cas d'un satellite qui tournerait autour de sa planète en deça de la limite de Roche. Puisqu'on ne peut pas trouver de corps rigide qui convienne pour matérialiser un référentiel, Einstein a imaginé un objet assez souple pour s'adapter aux différentes conditions qu'il rencontre.

C'est un tel objet qu'il nomme *mollusque de référence*.

Il a la propriété correcte de suivre les déformations de l'espace-temps. Mais il conserve la notion intuitive de séparation entre coordonnées d'espace et de temps, ce que la théorie ne justifie absolument pas.

Les référentiels étant maintenant donnés, il faut définir les relations entre points voisins, et ceci se fait par la définition d'une métrique. La métrique est la distance qui sépare deux poits voisins. Nous avons déjà vu, en Relativité Restreinte, la métrique de Minkowski qui lui est appropriée. Mais il faut définir d'autres métriques adaptées à diverses situations.

### 1.5.3 Métrique de Minkowski

La métrique décrit les propriétés **locales** de l'espace-temps. Elle donne la distance infinitésimale entre deux points voisins. On distingue plusieurs métriques : ceci doit se comprendre très bien, car les propriétés de l'Univers ne sont pas forcément identiques en tous points.

Considérons d'abord l'Univers à très grande échelle, où le Principe Cosmologique s'applique. Si la courbure est nulle, c'est-à-dire si l'Univers est euclidien, la métrique de Minkowski est pertinente :

$$ds^2 = c^2\,dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$$

Elle est définie en coordonnées cartésiennes (les coordonnées habituelles). Nous l'avons déjà rencontrée en Relativité Restreinte, car l'espace ne peut être plat que s'il ne contient pas de matière, puisque celle-ci le déforme. Pour la Cosmologie, ou l'étude des objets compacts, il faut définir une métrique différente.

### 1.5.4 Métrique de Schwarzschild

Au voisinage d'un corps massif (étoile normale, naine blanche, étoile à neutrons, trou noir), il est bien évident que la gravité est forte, et que le champ gravitationnel présente la **symétrie sphérique**. Dans ce cas, c'est la métrique de Schwarzschild qui s'applique :

$$ds^2 = (1 - r_s/r)\,dt^2 - \frac{1}{1 - r_s/r}\,dr^2 - r^2\,(d\theta^2 + sin^2\theta\,d\phi^2)$$

Elle est définie en coordonnées sphériques, qui représentent naturellement la symétrie de l'espace autour d'un objet compact.

La métrique montre un premier terme qui dépend du temps. Son coefficient dépend d'une constante $r_s$. A l'extérieur de l'objet compact, $r > r_s$. Donc le coefficient de $dt^2$ est inférieur à 1. Tant qu'on reste loin de l'objet, le coefficient vaut pratiquement 1. Le second terme présente le même coefficient, mais au dénominateur. Il vaut 1 également à grande distance. La métrique se réduit alors à $ds^2 = dt^2 - dr^2 - r^2\,(dt^2 + \sin^2 d\varphi^2)$, qui est la métrique de Minkowski exprimée en coordonnées sphériques. Ceci signifie que, loin d'une masse, l'espace-temps reprend sa forme euclidienne. Par contre, à courte distance, il est réellement déformé.

$r_s = 2\,G\,M / c^2$ (exprimé en unités usuelles) est le rayon de Schwarzschild. La complexité de cette métrique est justifiée par la déformation de l'espace-temps imposée par le corps massif. Au voisinage des corps massifs (étoiles à neutrons, des trous noirs...), c'est elle qui doit être considérée.

Le sinus qui apparaît est dû à l'utilisation des coordonnées sphériques.

### 1.5.5 Coordonnées comobiles

Avant de décrire la métrique FLRW, il faut définir un système de coordonnées adaptées à décrire un Univers non statique.

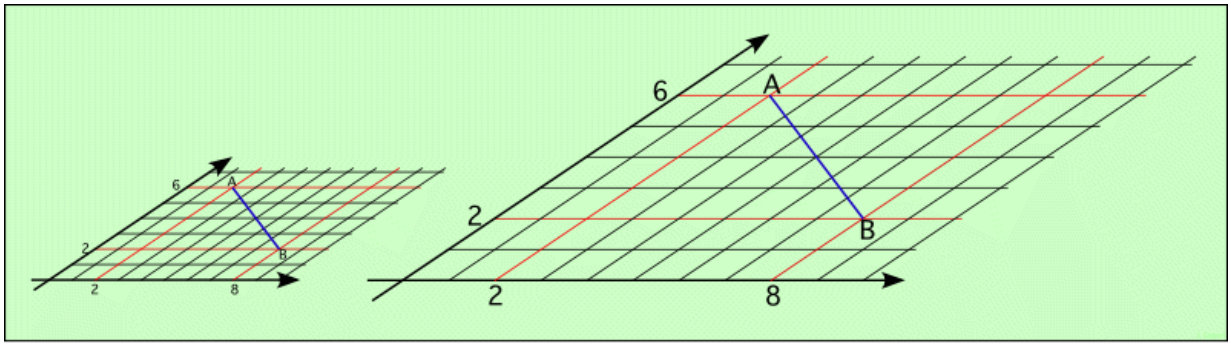
Les coordonnées comobiles sont indispensables en cosmologie, et plus généralement en Relativité. Considérons deux points dans l'espace-temps, dont la distance instantanée est d. Si l'espace est en expansion, la distance d croît avec le temps. Il faut donc remplacer la variable par une fonction du temps. Mais imaginez qu'on dessine dans l'espace-temps, une grille régulière qui représente les coordonnées. Si l'espace-temps est en expansion, la grille qui lui est attachée croît avec lui. Et donc la distance mesurée sur cette grille reste constante. Puisque l'accroissement de distance entre les galaxies n'est pas dû à un déplacement de ces galaxies, mais à une dilatation de l'Univers entre elles, il est logique de considérer que leur distance reste constante. C'est ce que permettent les coordonnées comobiles.

Soit r(t) la distance entre deux points A et B. Elle est variable, en fonction de l'évolution de l'espace-temps, c'est-à-dire en fonction du temps t. Mais cette évolution est la même en tous points, d'après le principe cosmologique. Donc, elle ne dépend pas des coordonnées d'espace. Soit d la distance comobile entre ces points. Elle est constante, mais bien sûr r(t) est fonction de d. On le traduit par l'écriture :

$$r(t) = a(t)\,d$$

La nouvelle fonction a(t) ainsi définie, représente la variation de la distance en fonction du temps, et se nomme *facteur d'échelle*. d représente la distance comobile, c'est-à-dire comme si l'expansion n'existait pas. Comme nous venons de le voir, le facteur d'échelle ne dépend que de t.

On peut illustrer les coordonnées comobiles par un schéma :




Supposons que l'espace entre les galaxies soit quadrillé, et que le quadrillage s'écarte avec l'expansion, comme s'il était peint dans l'espace-temps lui-même. Le schéma montre les coordonnées comobiles d'une partie de l'Univers à deux instants différents. A gauche, l'Univers est encore contracté ; les points A et B, qui représentent deux galaxies, ont les coordonnées (2, 6) et (8,2). La distance entre A et B est de 7,2 unités (théorème de Pythagore).

Plus tard, à droite, les distances dans l'Univers ont doublé. Mais la grille de coordonnées a aussi doublé, et les points A et B sont toujours en (2, 6) et (8,2). Le calcul de la distance entre A et B donne toujours 7,2 en unités comobiles. Ainsi, la distance comobile entre les deux galaxies, **mesurée sur ce quadrillage**, ne change pas ! Les deux galaxies sont au repos dans leur système de coordonnées, c'est l'espace-temps qui s'agrandit entre elles.

Mais en coordonnées réelles, r(t) = a(t) d. Puisque nous avons dit que les distances réelles avaient doublé, on peut écrire à l'instant $t_2$ de la figure de droite :

$$r(t_2) = 2\ d$$

Où l'on voit que la distance comobile étant la même, la distance réelle est bien doublée !

Le quadrillage définit un système de coordonnées nommées *coordonnées comobiles*. Notons *r* la distance entre les deux galaxies, et *x* la distance comobile entre elles. L'une varie, l'autre non. Notons *a(t)* la proportion entre les deux :

$$r(t) = a(t)\ x$$

On appelle *facteur d'échelle* la fonction a(t). Elle décrit l'expansion de l'Univers en fonction du temps.

> Si on suppose $a(t) = 1 + t$, on a $r(t) = (1 + t)\ x = x + t\ x$. Au temps $t = 0$, on trouve $r(0) = x$. Au temps $t = 1$, $r(1) = 2\ x$ ; à $t = 2$, $r(2) = 3\ x$... Les distances augmentent donc linéairement en fonction du temps.

#### 1.5.6 Métrique de Robertson-Walker

C'est la métrique générale adaptée à la description de l'Univers. Elle suppose l'espace-temps homogène.

Elle est parfois notée **métrique FLRW**, rappellant tout de même qu'elle a été définie d'abord par Friedmann et Lemaître ! Elle est définie par :

$$ds^2 = -c^2\,dt^2 + a(t)^2\left[\frac{dr^2}{1-k\,r^2} + r^2\left(d\theta^2 + sin^2\theta\,d\phi^2\right)\right]$$

La métrique, adaptée à l'étude globale de l'Univers, utilise les coordonnées comobiles, compatibles avec le principe cosmologique.

## *1.6 Formalisme tensoriel*

Le principe de Relativité énonce que tous les référentiels sont équivalents. Or un référentiel est défini par un système de coordonnées. Donc, les lois de la physique doivent être réécrites dans un formalisme indépendant d'un système de coordonnées particulier. Et ceci est bien naturel, puisque les déformations sont locales, donc différentielles (la physique décrit les différences entre deux points voisins). C'est le calcul tensoriel qui permettra de représenter les lois dans ces conditions.

Pour écrire l'équation fondamentale d'Einstein, il faut donc représenter mathématiquement ces déformations géométriques. Ce problème est compliqué, mais il avait déjà été résolu par Riemann et Lobatchevski, qui avaient fondé les géométries non euclidiennes. Elle s'appuie sur un tenseur (tableau de nombres) de dimension 4 (4 × 4 nombres), qui comprend donc 16 valeurs :

| | | | |
|---|---|---|---|
| **$a_{11}$** | $a_{12}$ | $a_{13}$ | $a_{14}$ |
| $a_{21}$ | **$a_{22}$** | $a_{23}$ | $a_{24}$ |
| $a_{31}$ | $a_{32}$ | **$a_{33}$** | $a_{34}$ |
| | | | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| $a_{41}$ | $a_{42}$ | $a_{43}$ | $\mathbf{a_{44}}$ |

Chaque ligne, et chaque colonne, correspond à l'une des 4 variables x, y, z, t (ou à d'autres coordonnées si l'espace-temps est décrit différemment).

### 1.6.1 Tenseur métrique

Il est rare que toutes les valeurs soient indépendantes. Prenons par exemple le tenseur métrique $g_{\mu\nu}$ pour la métrique la plus simple, celle de Minkowski $ds^2 = c^2\,dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$ :

$g_{\mu\nu} =$

| | | | |
|---|---|---|---|
| $\mathbf{c^2}$ | 0 | 0 | 0 |
| 0 | **-1** | 0 | 0 |
| 0 | 0 | **-1** | 0 |
| 0 | 0 | 0 | **-1** |

On voit, sur la diagonale, les coefficients du $ds^2$ : $c^2$ coefficient de $dt^2$, et -1 pour les trois autres.

L'algèbre tensorielle est basée sur le calcul linéaire : en multipliant deux fois ce tenseur par le vecteur (dt, dx, dy, dz), on obtient le $ds^2$ de la métrique de Minkowski. Il constitue donc une représentation de cette métrique. Mais sa présentation est bien plus riche, car les calculs effectués grâce à lui permettent de manipuler en bloc plusieurs équations différentes.

Le tenseur métrique ci-dessus ne comporte que 4 composantes non nulles. D'autres tenseurs en ont un peu plus. Par exemple, si le tenseur est antisymétrique, les valeurs opposées par rapport à la diagonale (valeurs en gras dans le tableau), doivent être égales en valeur absolue, mais de signes opposés :

$g_{\mu\nu} =$

| | | | |
|---|---|---|---|
| 0 | $+a_{12}$ | $+a_{13}$ | $+a_{14}$ |
| $-a_{12}$ | 0 | $+a_{23}$ | $+a_{24}$ |
| $-a_{13}$ | $-a_{23}$ | 0 | $+a_{34}$ |
| $-a_{14}$ | $-a_{24}$ | $-a_{34}$ | 0 |

Les cellules qui ont les valeurs opposées sont représentées de la même couleur. Sur la diagonale, la seule façon de satisfaire à $a_{ii} = -a_{ii}$ est $2 \times a_{ii} = 0$, soit $a_{ii} = 0$. Il ne reste que 6 valeurs différentes (celles situées au-dessus de la diagonale par exemple, les autres s'en déduisant par changement de signe).

Le tenseur métrique le plus général possède effectivement 16 coefficients. Mathématiquement, le coefficient $a_{ij}$ représente le produit scalaire du vecteur de base $e_i$ par le vecteur de base $e_j$.

### 1.6.2 Tenseur de Ricci

Le tenseur de Ricci (formulé par Gregorio Ricci-Curbastro) permet, par des valeurs appropriées, de représenter la géométrie locale de l'espace-temps. Il décrit comment varient les vecteurs de base (les axes de coordonnées et leurs unités). Il représente donc les déformations de l'espace entre deux points voisins. Dans la figure 1.3, les flèches rouges montrent l'attraction ressentie en chaque point du rectangle. Le tenseur de Ricci correspondant exhiberait les différences entre ces flèches, de façon à pouvoir calculer les différents points à partir de l'un d'eux. Si je connais le point A, et si je sais que autour de A la variation du coefficient de x est de dx, je peux calculer la valeur de x au point B. *Idem* pour les autres coordonnées.

Ainsi, de proche en proche, on pourra calculer une trajectoire complète par transformations successives.

### 1.6.3 Tenseur impulsion-énergie

Le tenseur impulsion-énergie décrit le contenu énergétique de l'espace-temps, en fonction de la matière et de l'énergie qui s'y trouvvent (puisque la matière est équivalente à de l'énergie en vertu de $E = mc^2$). Comme les tenseurs précédents, il décrit non pas le contenu absolu, mais son évolution d'un point à un un point voisin. C'est lui qui décrit donc l'action des masses, et des énergies, qui agissent dans l'espace-temps.

### 1.6.4 Equation d'Einstein

Nous pouvons maintenant écrire l'équation d'Einstein. Nous avons dit que la Relativité Générale décrit la géométrie de l'espace-temps en fonction de son contenu matériel (et énergétique). Pour cela, l'équation d'Einstein égale simplement un tenseur représentant la géométrie de l'espace (notons-le G pour l'instant), à un autre représentant son contenu matériel-énergie (noté E). La géométrie est donc modelée par la matière et l'énergie présentes.

L'équation d'Einstein s'écrit :

G = E

Nous avons supposé que toute la description de la géométrie était comprise dans le tenseur G, et toute la description de la matière-énergie dans le tenseur E. a situation n'est évidemment pas aussi simpliste, mais la structure générale de l'équation est bien celle-là. De manière plus détaillée, l'équation s'écrit :

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8 \pi G}{c^4} T_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu}$$

- $R_{\mu\nu}$ est le tenseur de Ricci, $g_{\mu\nu}$ la métrique, et R un coefficient de courbure. L'ensemble des termes de gauche représente donc bien la géométrie.
- $T_{\mu\nu}$ est le tenseur impulsion-énergie, et $\Lambda$ est la constante cosmologique. Cette dernière s'interprète de façon différente, mais sa position ici à droite de l'équation correspond à son interprétation en terme d'énergie du vide. Les termes de droite concernent donc le contenu de l'espace-temps.

Si on place la constante cosmologique à gauche, elle prend un aspect géométrique, qui peut être utile dans certaines circonstances, mais c'est la première interprétation qui correspond aujourd'hui à la tendance en cosmologie (la *tendance* en cosmologie représente un courant majoritaire, étayé par des résultats expérimentaux et/ou théoriques. Ce n'est pas le seul désir de changer pour renouveler les stocks, comme dans d'autres domaines...).

### 1.6.5 Trou noir

Un trou noir correspond à la métrique de Schwarzschild, qui s'applique à sa symétrie sphérique, en l'absence de rotation puisque celle-ci modifie la symétrie. Le modèle qui décrit un trou noir en rotation est celui de Kerr, mais c'est une autre histoire.

Nous avons vu plus haut que la métrique de Schwarzschild est équivalente à celle de Minkowski, à grande distance (lorsque r est grand devant $r_s$, donc lorsque 1 - $r_s$ / r vaut pratiquement 1). Mais près du trou noir, cette approximation n'est absolument plus valable. Une particule qui tombe vers le trou noir se trouve, à un instant t, à la distance r du trou noir, et r > $r_s$ (rayon de Schwarzschild de l'objet). Faisons donc tendre r vers $r_s$ par valeurs supérieures (r reste toujours plus grand que $r_s$). Alors, $r_s$ / r tend vers 1 par valeurs inférieures. Le terme en $dt^2$ de la métrique de Schwarzschild tend donc vers 0. Le dernier terme $r^2$ ($d\theta^2$ + $\sin^2\theta$ $d\varphi^2$) tend vers une valeur finie. Enfin, le terme médian

$$\frac{1}{1-r_s/r}\, dr^2$$

tend vers l'infini, puisque le dénominateur 1 - $r_s$ / r tend vers 0. Donc le $ds^2$ tend vers l'infini.

$$ds^2 = (1 - r_s/r)\, dt^2 - \frac{1}{1 - r_s/r}\, dr^2 - r^2\, (d\theta^2 + sin^2\theta\, d\phi^2)$$

Par conséquent, l'intervalle entre deux événements tends vers l'infini. Ce qui veut dire que, vu de l'extérieur, ce qui se passe à la surface du trou noir est figé.

### 1.6.6 Ondes gravitationnelles

La résolution de l'équation d'Einstein permet de mettre en évidence des défomations périodiques de l'espace-temps produites par le déplacement des masses (exactement comme la déplacement des charges électriques produit des déformations du champ électromagnétique, c'est-à-dire des ondes électromagnétiques). On en déduit que les masses en mouvement produisent des ondes gravitationnelles.

Le problème vient de la différence énorme entre l'intensité des deux interactions que l'on vient de citer. La gravitation est $10^{38}$ fois plus faible que l'interaction électromagnétique. Aussi, l'énergie transportée par les ondes gravitionnelles est-elle plus faible dans les mêmes proportions. Et c'est tant mieux pour nous, car si elles avaient la même intensité, les tremblements de terre les plus violents ne seraient, en comparaison, que de douces plaisanteries (et ils ne le sont malheureusement pas).

Dans ces conditions, la détection des ondes gravitationnelles est un problème très sérieux, non encore résolu. Des instruments volumineux ont été construits dans ce but (VIRGO, LIGO), mais ils n'ont toujours pas la sensibilité suffisante pour espérer détecter des petits phénomènes courants. Ils ne pourraient détecter, à la rigueur, que des effondrement d'une étoile massive en trou noir à courte distance, ou la fusion de deux trous noirs.

A ce propos, il n'est pas question d'envisager que deux trous noirs se rencontrent par hasard et fusionnent ; la probabilité est bien trop faible. Pour que deux trous noirs fusionnent, il faut qu'ils soient déjà proches l'un de l'autre, c'est-à-dire en orbite commune. Un tel couple peut résulter de l'effondrement de deux étoiles déjà associées et assez massives pour suivre un tel destin.

Mais dans une situation proche, on a découvert un couple d'étoiles à neutrons, dont l'un des membres est un pulsar. Le couple est nommé *pulsar binaire*. Il est nommé PSR 1913+16. Les deux objets sont compacts, et tournent à une distance très faible l'un de l'autre, de l'ordre de 3 R (soit un peu plus de 2 millions de kilomètres). L'excentricité est de 0,66, et l 'orbite est parcourue en moins de 8 heures. Dans ce ballet infernal, selon la Relativité Générale, les deux étoiles doivent rayonner des ondes gravitationnelles, mais le calcul montre qu'elles sont encore indétectables avec les instruments actuels.

Cependant, la production de ces ondes entraîne une perte d'énergie du couple. D'où provient l'énergie rayonnée ? La seule possibilité est l'énergie potentielle des deux étoiles, qui définit leur distance. Perdant de l'énergie, elles ralentissent et se rapprochent inexorablement l'une de l'autre. Or la période des pulsations d'un pulsar est extrêmement précise (elle provient de sa rotation sur lui-même). Et puisque l'orbite est très excentrique, il y a de grandes variations de vitesse entre le périastre et l'apoastre. Donc, un décalage Doppler différent entre ces deux points. La mesure de ce décalage variable a permi de remonter aux paramètres orbitaux, et de connaître précisément les masses des deux objets (de l'ordre de 1,4 M ). Enfin, les observations prolongées font apparaître un ralentissement de la période orbitale, en parfait accord avec celui prévu par la Relativité Générale.

Ainsi, le pulsar binaire nous a donné l'opportunité de vérifier cette théorie dans l'une de ses prévisions les plus subtiles, vérification impossible à faire directement à l'heure actuelle (janvier 2011). Le bon accord entre les observations et la théorie est la seule preuve que nous ayons actuellement de l'existence des ondes gravitationnelles.

Plus récemment, en 2003, on a découvert un pulsar double (les deux composantes sont des pulsars) à 1.600 AL de la Terre, et nommé PSR J0737-3039. Cet objet a permi une confirmation encore bien plus précise de la théorie. En plus, des chercheurs toulousains pensent que ce couple pourrait donner une première preuve de l'existence d'une énergie du vide. Mais les instruments disponibles aujourd'hui ne sont, là encore, pas assez sensibles...

#### 1.6.7 Frame dragging, ou effet Lense-Thirring

Josef Lense et Hans Thirring, astronomes autrichiens, ont découvert en 1918 une conséquence de la Relativité Générale, qui s'observe lorsque l'objet qui produit la gravité est en rotation. Il se traduit par un entraînement de l'espace-temps par la rotation, qui en retour va modifier les géodésiques autour de l'objet. Mais cet effet est extrêmement faible, et aucune vérification n'a pu être réussie à ce jour. La sonde américaine Gravity Probe B (NASA) a été lancée en 2005, et a terminé son programme d'observations. Les données recueillies ont été traitées, mais présentent un bruit non prévu qui perturbe fortement leur interprétation. Un travail de filtrage a dû s'achever en 2010, et une publication devrait suivre bientôt.

## *1.7 Résumé*

- La Relativité Générale complète la Relativité Restreinte, dont elle reprend les principes essentiels. Mais elle marque une rupture profonde avec elle, en ce sens qu'elle ne considère plus l'espace-temps comme un cadre dans lequel interagissent les particules. L'espace-temps n'existe plus en dehors de la matière qu'il contient.
- La Relativité Générale est une théorie géométrique : la gravitation y est décrite comme une déformation de l'espace-temps produite par les masses.
- La Relativité Générale n'impose plus aucune limite sur les observateurs : quelles que soit leurs vitesses relatives, ils sont pris en compte.
- Mais la Relativité Générale a sa propre limitation. Elle décrit toujours la partie spatiale de l'espace-temps comme un continuum. Elle n'est donc pas compatible avec l'autre théorie fondamentale du XX$^{e}$ siècle, la Mécanique Quantique.
- Les physiciens sont à l'œuvre, depuis très longtemps maintenant, pour trouver une théorie de gravitation quantique. Mais pour l'instant sans succès. Des théories candidates existent, mais aucune n'est pour l'instant passée du papier à l'expérience.
- En Relativité Restreinte, le mouvement de la Terre autour du Soleil est un mouvement accéléré par la gravité ; en Relativité Générale, c'est un mouvement inertiel dans un espace-temps courbé par la masse du Soleil.

**Application**

Le phénomène de lentille gravitationnelle est une application très importante de la Relativité Générale. Il est une précieuse source de renseignements dans de nombreux domaines.

Une lentille optique, en verre, concentre les rayons lumineux issus d'une source en un point, le foyer. C'est la déviation des rayons par la différence d'indice de réfraction qui permet cette concentration. Or une masse dévie aussi les rayons lumineux. On peut donc imginer une analogie entre ces deux phénomènes. Considérons donc l'observateur (la Terre), une galaxie éloignée, et un amas de galaxies entre les deux on suppose que l'alignement est parfait. Alors, les rayons issus de la galaxie lointaine seront déviés vers l'axe par la masse de l'amas, et si les conditions de distance sont favorables, ils viendront converger vers l'obsrvateur.

Ce phénomène, prévu par la théorie, a été maintes fois observé. Il donne lieu à des arcs lumineux (image d'une galaxie lointaine), des points multiples (croix d'Einstein), dans les cisconstances évoquées ci-dessus. Mais on peut aussi avoir ce phénomène avec des masses bien plus faibles, et des objets plus proches. Par exemple si une naine brune (un centième de la masse du Soleil) passe devant une étoile de la Galaxie. Cette idée a été exploitée pour dénombrer les naines brune existant dans la Galaxie.

---=OO=---




… Ou, penchés à l'avant des blanches caravelles,
Ils regardaient monter en un ciel ignoré
Du fond de l'océan des étoiles nouvelles.

*José Maria de Heredia, Les conquérants*

**Plan**

1 Définitions
1.1 Introduction
1.2 Cosmologies antiques
2 Bases observationnelles
2.1 Répartition de la matière visible
2.2 Densité moyenne de l'Univers
2.3 Expansion
2.4 Age de l'Univers
2.5 Le Big Bang
2.6 Fond diffus cosmologique
2.7 Origine du fond cosmologique
2.8 Composition chimique de l'Univers
2.9 Energie noire
2.10 Composition de l'Univers
2.11 Les trois piliers
3 Bases théoriques
3.1 Réactions d'équilibre
3.2 Principe cosmologique
3.3 Horizon cosmologique
3.4 Problème de l'horizon
3.5 But de la cosmologie
3.6 Temps cosmique
4 Mise en équation du problème
4.1 Coordonnées comobiles
4.2 L'équation de Friedmann
4.3 Equation du fluide
4.4 Equation d'état
4.5 Equations du problème
4.6 Autre présentation de l'équation de Friedmann
4.7 Densité critique
4.8 Importance de la densité critique
5 Modèles
5.1 Univers de matière
5.2 Univers de rayonnement
5.3 Mélange
5.4 Univers vide
5.5 Equation des Omégas
6 Une histoire thermique de l'Univers
6.1 Le modèle de Big Bang de base
6.2 Le tout début : ère de Planck
6.3 Transition de phase Grande Unification
6.4 Ere des quarks : plasma quarks-gluons
6.5 Découplage des neutrinos
6.6 Formation des baryons
6.7 Annihilation des protons
6.8 Annihilation des électrons
6.9 Nucléosynthèse
7 Transition rayonnement-matière
7.1 Recombinaison
7.2 Découplage et Surface de dernière diffusion
7.3 Formation des structures
7.4 Ages sombres
7.5 Réionisation
8 Au-delà du modèle de base
8.1 Matière noire
8.2 Accélération
8.3 Quelques problèmes du modèle de base
8.4 L'inflation
8.5 Epoque de l'inflation

### 1.1 Introduction

Jusqu'à une époque récente, l'Homme a toujours eu la préoccupation de comprendre son environnement dans son ensemble, sans en avoir les moyens. Sur le plan observationnel, l'œil nu est limité à quelques centaines d'années-lumière, c'est-à-dire à la proche banlieue du Soleil (à peine un dix-millionième de l'Univers observable en distance ; l'Univers observable est l'ensemble de ce que l'on peut voir aujourd'hui, il est défini plus loin. En volume, ce n'est plus que la fraction $10^{-21}$ de ce qui existe…). Les télescopes performants n'ont été construits qu'à partir de la seconde moitié du XIX$^{e}$ siècle, et l'observation du ciel très profond ne date que de quelques années.

La cosmologie a considérablement évolué avec le temps, et avec les découvertes que les nouveaux instruments permettaient à mesure de leur invention. Elle a donc commencé par une très longue période d'observation à l'œil nu, qui ne donnait accès qu'aux seuls astres directement visibles, les autres restant inconnus.

L'invention de la lunette, puis du télescope, ont ouvert le champ des étoiles d'abord, puis des nébuleuses et des galaxies. Mais la découverte de nouveaux objets n'était pas suffisante pour en comprendre l'organisation. Il fallait en plus un cadre théorique, qui permette de les expliquer, ainsi que leurs relations. Kepler a défini les premières lois du mouvement, ouvrant la voie à Isaac Newton qui a créé ce premier cadre, avec la Gravitation Universelle. Il a permi d'expliquer avec une grande précision les mouvements des planètes (à l'exception d'un petit résidu

inexplicable, l'avance du périhélie de Mercure), et de représenter correctement le Système Solaire. Mais les connaissances de notre environnement ne permettaient guère d'aller plus loin.

Les nébuleuses, connues depuis longtemps, étaient ainsi nommées à cause de leur aspect télescopique. On les séparait en deux classes : les spirales et les autres. La question était ouverte de savoir si ces spirales étaient proches ou lointaines, mais les outils manquaient pour le déterminer. Proches, elles auraient été constituées de gaz ; lointaines, elles auraient été de grands rassemblements d'étoiles. Dans le premier cas, l'Univers restait limité à l'ensemble des étoiles que l'on connaissait. Mais dans le second cas, notre Voie Lactée devenait un rassemblement semblable aux nébuleuses spirales, et du coup l'Univers n'était plus limité à notre banlieue, mais explosait littéralement dans notre conception. La preuve instrumentale de cette seconde vision n'est venue qu'au début du XX$^{e}$ siècle grâce au télescope Hooker de 2,5 m.

A la même époque, en 1915, Albert Einstein publiait la Relativité Générale, théorie de la gravitation applicable à de grandes masses et de grandes vitesses. Ainsi, les observations et le cadre théorique nécessaire à leur interprétation sont contemporains.

Dès la publication de cette théorie, des chercheurs l'ont appliquée à l'étude de l'Univers : de Sitter (1917) a modélisé un Univers vide de matière, ne contenant que de l'énergie ; Alexandre Friedmann (29 juin 1922) et Georges Lemaître (1927) ont résolu le problème dans un Univers de densité uniforme, et montré qu'il devait être soit en contraction, soit en expansion.

Einstein de son côté, recherchait une solution stationnaire, n'envisageant pas que l'Univers puisse être différent aujourd'hui de ce qu'il était dans le passé. Pour cette raison, n'obtenant pas de solution à ses yeux satisfaisante, il a légèrement modifié son équation (ajout de la *constante cosmologique*), pour y parvenir. Mais il a été démontré plus tard que l'équilibre obtenu est un équilibre instable, ce qui signifie que *toute perturbation ne peut que s'amplifier*, produisant la contraction ou l'expansion. A cette nouvelle, Einstein a amèrement regretté d'avoir fait cet ajout.

> Si vous avez du mal à imaginer comment l'Univers peut être constamment variable localement, tout en étant invariable globalement, songez à une plage battue par la houle. Elle est toujours la même (globalement), alors que les grains de sable qui la composent changent constamment (localement).

La Relativité Générale reste le seul cadre, actuellement, qui permette de représenter l'Univers dans son entier ; c'est la clé de la Cosmologie. On peut donc dire qu'il y a deux époques pour la Cosmologie : avant et après la Relativité Générale.

Au début de XX$^{e}$ siècle encore, Harlow Shapley et Vesto Slipher (1915) découvraient que toutes les galaxies (les nébuleuses spirales) dont ils prenaient les spectres, présentaient un décalage de leurs raies spectrales vers le rouge. L'explication la plus vraisemblable a vite été donnée : l'Univers est en expansion, et les distances entre les galaxies s'accroissent parce que l'Univers grossit. Cette interprétation n'est pas immédiate, mais nécessite un modèle théorique, fourni justement par la Relativité Générale. Sur le plan théorique, la Gravitation Universelle de Newton permettait d'aborder le problème, mais elle n'était conçue que dans un contexte de faibles masses et posait des problèmes sérieux qui en limitaient l'application en Cosmologie.

Georges Lemaître a déduit les conséquences passées de l'expansion : en regardant le film à l'envers, on voit l'Univers se contracter jusqu'à une densité très grande. Il en a déduit que 'Univers avait dû se trouver dans un état d'extrême condensation, qu'en vertu des idées de l'époque sur la radioactivité, il a nommé atome primitif. Cette notion n'est autre que le Big Bang, sauf le nom. L'essentiel est l'existence d'un instant initial.

La Relativité Générale est-elle la théorie ultime pour décrire l'Univers ? N'oublions pas qu'elle ne décrit *que* la gravitation ! Dans l'Univers actuel, très dilué et froid, la gravitation est largement prépondérante. Mais en remontant le temps à l'envers de l'expansion, on arrive à un instant où la matière était si dense et chaude, constituant un milieu de particules élémentaires dans lequel la gravitation devient aussi intense que les autres interactions, et ne peut plus être négligée. Toutes les interactions doivent être prises en compte par une seule théorie globale, qui unifie la Relativité Générale, pour la gravitation, avec la Mécanique Quantique, qui traduit les autres interactions.

La Relativité Générale utilise, pour la gravitation, un cadre spatio-temporel continu mais déformable. Elle se base sur l'équivalence entre la structure de l'espace-temps et son contenu matière-énergie. Or la Mécanique Quantique indique que l'énergie est quantifiée (ne s'échange que par valeurs discrètes). Mélanger les deux théories reviendrait donc à quantifier la structure même de l'espace-temps, d'où la notion parfois évoquée d'une structure microscopique spongieuse de l'espace-temps.

Il y a bien longtemps que les physiciens cherchent à quantifier la gravitation, mais pour l'instant sans succès. Dans ces conditions, la Relativité Générale reste la théorie pertinente pour décrire l'Univers, dans la limite où la gravité est prépondérante, c'est-à-dire après ce qu'on appelle le *mur de Planck*. Entre le mur de Planck et le Big Bang, la Relativité ne peut tout simplement rien dire, et en particulier ne peut pas valider la notion même de Big Bang.

Aujourd'hui, la fameuse constante cosmologique est vue sous un angle bien différent, avec une autre interprétation : peut-être fera-t-elle un retour utile dans la théorie, c'est au moins ce que certains pensent maintenant. Si elle est positive, elle produit une expansion de l'Univers, qui s'accorde bien avec des observations récentes (accélération de l'expansion).

La théorie cosmologique qui explique au mieux les faits d'observation est donc bien le célèbre Big Bang, sans considérer l'époque avant le mur de Planck. Mais les choses ne sont pas aussi simples que le schéma de base, qui présente bien des inconvénients. Dans le principe de cette théorie, il existe un instant zéro, à partir duquel les choses commencent à exister. Une description complète des diverses phases par lesquelles est passé l'Univers est donnée, et prévoit ce que l'on devrait observer. La force de la théorie tient justement dans certaines observations qui confortent cette vision. Mais l'existence même de cet instant zéro n'est pas sans poser des problèmes difficiles, et il est peut-être tout simplement inutile. On peut envisager que, autour de cet instant théorique, la physique soit assez différente de ce que nous connaissons, et que l'instant zéro n'existe pas. Notons de plus que l'existence d'un instant zéro entraîne celle d'un âge de l'Univers.

Nous présenterons d'abord certaines cosmologies antiques, adaptées aux observations à l'œil nu. Elles ont beaucoup d'intérêt sur le plan philosophique, car elles nous indiquent comment les Hommes qui les ont conçues se représentaient le Monde qui les entourait. Aujourd'hui, nous sommes dans une situation tout à fait semblable : nous nous représentons le monde (l'Univers) en fonction de nos connaissances observationnelles et de nos outils théoriques d'interprétation. L'avenir dira dans quelle mesure nos idées actuelles sont en adéquation avec la

réalité.

## *1.2 Cosmologies antiques*

### 1.2.1 Cosmologie avant 1915

- cosmologies antiques (Aristote)
- cosmologies jusqu'à Emmanuel Kant
- révolution copernicienne
- compréhension des nébuleuses spirales  Univers plus grand

### 1.2.2 Cosmologie après 1915

- convergence des datations
- radiosources lointaines  évolution de l'Univers
- distribution uniforme de l'hélium

### 1.3 Le cadre de la Cosmologie

## *2 Bases observationnelles*

Avant de penser à établir une théorie, il faut savoir de quoi on va parler exactement, c'est-à-dire faire l'inventaire de l'Univers tel qu'il nous apparaît aujourd'hui.

Le point de départ est l'état actuel de l'Univers, tel qu'il ressort des multiples observations que l'on fait depuis presque un siècle. Les ingrédients sont :

- la quantité de matière qu'il contient (définie par sa densité moyenne), sa composition chimique, sa répartition ;
- la quantité de rayonnement, la température ambiante.

### 2.1 Répartition de la matière visible

En s'éloignant de la Terre, nous observons successivement :

- Le système solaire, avec le Soleil au centre, les planètes, astéroïdes, comètes, qui lui tournent autour. La masse du Soleil est grande (2 $10^{30}$ kg), celle de l'ensemble des autres objets du système solaire est mille fois moindre. Et le système solaire est une sphère qui s'étend jusqu'au nuage de Oort. Il est donc pratiquement vide. Le diamètre d'une planète est de l'ordre de 20.000 km, la distance qui les sépare de l'ordre d'une centaine de millions de kilomètres. La masse volumique moyenne du système solaire est autour de $10^{-8}$ kg $m^{-3}$ = $10^{-11}$ g $cm^{-3}$ (densité de l'eau : 1.000 kg $m^{-3}$ = 1 g $cm^{-3}$).
- La Galaxie contient quelques 150 milliards d'étoiles. Et elle s'étend sur 30 kpc. Ce qui lui donne une masse volumique moyenne encore beaucoup plus faible, de l'ordre de $10^{-21}$ kg $m^{-3}$ = $10^{-24}$ g $cm^{-3}$.
- Au-delà, on trouve les galaxies les plus proches : M31 (Andromède), M33 (le Triangle), et d'autres moins importantes, dont les Nuages de Magellan. Elles forment le Groupe Local. On observe, plus loin, des groupes de même importance, quelques dizaines de galaxies. Ces groupes ont une masse volumique de l'ordre de $10^{-23}$ kg $m^{-3}$ = $10^{-26}$ g $cm^{-3}$.
- Les groupes s'assemblent à leur tour en amas, riches de quelques centaines à quelques milliers de galaxies, et d'un diamètre de l'ordre de 3 Mpc. Mais la masse volumique d'un amas est encore plus faible : $10^{-24}$ kg $m^{-3}$ = $10^{-27}$ g $cm^{-3}$.
- Les amas se regroupent en super-amas, d'un diamètre de l'ordre de 30 à 70 Mpc. La masse volumique est du même ordre que dans les amas, parce que les amas proches se touchent presque dans les super-amas.
- Enfin, à plus grande échelle encore, on ne trouve plus de nouvelles structures, et l'Univers commence à paraître homogène : en ne regardant que les super-amas, on voit le même aspect dans toutes les directions et à toutes les distances. Et là, la masse volumique baisse encore, à cause des immenses espaces entre les super-amas. Elle est estimée entre $10^{-26}$ et $10^{-27}$ kg $m^{-3}$ = $10^{-29}$ à $10^{-30}$ g $cm^{-3}$ ($10^{29}$ à $10^{30}$ fois moins dense que l'eau).

Les descriptions ci-dessus montrent bien la difficulté de déterminer la masse volumique de l'Univers. Localement (ce terme englobant des distances jusqu'à la centaine de méga-parsecs), la masse est très inégalement répartie, les inhomogénéités sont énormes : les étoiles sont des condensations de matière à forte densité (quelques g $cm^{-3}$ en moyenne), au milieu de grands espaces vides. Le système solaire est constitué du Soleil, de grande masse volumique, entouré de vide. La masse volumique moyenne résulte de la combinaison de ces deux valeurs. Aux échelles supérieures, le phénomène de concentration-vide s'accentue encore. Ce n'est qu'en atteignant des distances de quelques centaines de méga-parsecs que l'on distingue l'homogénéité. Mais de notre petit observatoire terrestre, c'est bien difficile à sonder.

La quantité de matière présente dans l'Univers actuel est décrite par **la masse volumique moyenne de l'Univers**. En faisant la moyenne, on divise la masse totale par le volume total, ignorant la répartition de la matière dans ce volume.

> **Analogie**. Un cube de 1 m de côté rempli d'eau a une masse de 1 tonne, et sa masse volumique moyenne est $\rho = M / V = 1\ t / 1\ m^3 = 1\ g\ cm^{-3}$. L'eau est uniformément répartie dans le cube. Mais si nous

remplaçons l'eau par une masse de plomb de 1 tonne (un cube de plomb de 45 cm de côté placé au centre), nous aurons de la matière au centre et du vide autour. Mais la masse volumique sera la même $\rho = M / V = 1\ t / 1\ m^3 = 1g\ cm^{-3}$.

Donc, la masse volumique moyenne de l'Univers nous renseignera sur ses propriétés à très grande échelle (plusieurs centaines de méga-parsecs, où l'Univers est homogène), mais pas sur ses propriétés locales. Celles-ci seront tout simplement *oubliées*. Cette simplification est indispensable pour pouvoir aborder le problème, qui sinon serait bien trop complexe.

### 2.2 Densité moyenne de l'Univers

Pratiquement, les mesures de cette masse volumique sont très difficiles à faire, car elles nécessitent l'évaluation précise de la quantité de matière qui emplit un certain cube d'Univers. Or un tel cube contient des galaxies, que l'on détecte par la lumière qu'elles nous envoient, mais qu'on ne peut pas peser ! On peut cependant évaluer la masse des étoiles qui produisent cette lumière. Pour cela, il faut compter les étoiles, et déterminer leurs propriétés moyennes.

L'étude des étoiles proches montre que leur masse moyenne est proportionnelle à leur luminosité moyenne, pour un grand nombre d'étoiles de types divers :

$$M = 4\ L$$

où la masse M est donnée en masses solaires M , et la luminosité L en luminosités solaires L . Mesurant la luminosité totale d'une galaxie, on en déduit donc sa masse. C'est ainsi qu'on obtient la masse globale d'une galaxie, masse lumineuse s'entend.

La luminosité globale d'une galaxie est évaluée à $L_{gal}$ $2\ 10^{10}$ L . D'ou sa masse :

$M_{vis}$ _ $4\ L_{gal} = 4 \times 2\ 10^{10}\ M = 8\ 10^{10}\ M$

Il reste à déterminer le nombre de galaxies dans un volume donné, c'est-à-dire à les compter, tout simplement. On trouve un nombre moyen de $n_{gal}$ $0{,}005\ Mpc^{-3}$. Ayant la masse d'une galaxie, et le nombre de galaxies par unité de volume, la densité en découle immédiatement :

$$\rho_{vis} \quad M_{vis}\ n_{gal} = 8\ 10^{10}\ M \times 0{,}005\ Mpc^{-3} = 4\ 10^{8}\ M\ Mpc^{-3}$$

Cette densité, ramenée à des unités plus habituelles, est du même ordre que celle donnée plus haut. Elle signifie que chaque cube d'Univers de 1 Mpc de côté contient une masse moyenne de $4\ 10^8$ M , soit l'équivalent de 400 millions de fois le Soleil.

La masse du Soleil est de $1{,}988\ 10^{30}$ kg, 1 Mpc = $3{,}086\ 10^{22}$ m. La densité est donc :

$\rho_{vis} = 4\ 10^8\ M\ Mpc^{-3} = 4\ 10^8 \times 1{,}988\ 10^{30}\ kg \times (3{,}086\ 10^{22}\ m)^{-3}$.

Soit : $\rho_{vis} = 7{,}952\ 10^{38} / 29{,}389\ 10^{66}\ kg\ m^{-3} = 0{,}27\ 10^{-28}\ kg\ m^{-3} = 2{,}7\ 10^{-30}\ g\ cm^{-3}$. On retrouve le même ordre de grandeur que ce qui était indiqué plus haut.

En surmontant pour le mieux toutes ces difficultés, on évalue à peu près correctement la masse volumique actuelle de l'Univers, et la valeur obtenue est très faible :

$$\rho = 10^{-26}\ kg\ m^{-3} = 10^{-29}\ g\ cm^{-3}$$

La masse du proton étant de $1{,}67\ 10^{-27}$ kg, elle correspond à peu près à 6 atomes d'hydrogène par $m^3$.

#### 2.2.1 Matière sombre

Malheureusement (pour la mesure précédente), les galaxies contiennent aussi de la matière obscure : du gaz qui n'est pas dans les conditions physiques qui lui permettraient de rayonner (par exemple les nébuleuses sombres, tels les *objets de Barnard* mais aussi les régions HI qui rayonnent à 21cm). La matière visible n'est que la partie émergée de l'iceberg…

C'est la première source d'incertitude, car la matière sombre n'est pas prise en compte dans l'évaluation précédente. Par analogie avec notre Galaxie, où l'on peut faire des observations fines, et avec les galaxies proches, également accessibles, cette matière est évaluée à quelques 10 fois la matière visible, ce qui est considérable.

#### 2.2.2 Matière noire

Mais le plus grave pour la mesure, se présente lorsqu'on étudie la dynamique : les nuages d'hydrogène qui entourent la Galaxie devraient tourner comme les planètes autour du Soleil, c'est-à-dire d'autant plus lentement qu'ils sont plus éloignés, puisque toute la masse attirante se trouve en-dessous. Or on sait depuis les travaux de Fritz Zwicky (1930) que ce n'est pas le cas, et qu'ils tournent tous à la même vitesse, quel que soit leur éloignement du centre. Pour expliquer les mouvements de ces nuages, il faudrait que la Galaxie ait une masse 10 fois supérieure !

Dans les amas aussi, les galaxies se déplacent bien trop vite pour que l'amas soit stable. En ne considérant que la masse visible des étoiles, ils

devraient se disloquer dans l'espace en très peu de temps, ce qui fait qu'on ne devrait observer que quelques rares amas, aléatoirement formés depuis peu et pas encore disloqués. Mais on en observe beaucoup, donc ils sont stables sur des durées comparables à l'âge de l'Univers, donc il y a de la masse invisible pour expliquer cette stabilité. Le déficit est ici de 400 fois la masse visible !

Ces observations sont à la base de l'idée de *matière noire* : il faut bien expliquer les observations. On invoque pour cela, une matière qui agit gravitationnellement comme la matière ordinaire, mais qui est insensible à l'interaction électromagnétique (puisqu'elle n'émet pas de lumière, et n'en absorbe pas, sans quoi on la verrait). Sans cette matière hypothétique, les parties externes des galaxies seraient éjectées par la force centrifuge (ou plus correctement, par leur inertie) ; il en serait de même des galaxies dans les amas. Pour l'instant, cette matière noire ne se manifeste que par ce biais.

### 2.3 Expansion

De 1919 à 1922, dans le but de mesurer leurs vitesses, Vesto Slipher a mesuré le décalage spectral des galaxies proches et découvert qu'elle s'éloignaient toutes (presque), indiquant que l'Univers était en expansion. En 1924, Henrietta Leavitt a montré comment mesurer les distances dans l'Univers proche, grâce à la relation qu'elle a déterminée entre la période et la luminosité des céphéides. A la suite de cela, Lundmark a obtenu en 1925 une corrélation entre la vitesse radiale des galaxies et leur distance. La dépendance qu'il en déduisait était quadratique, ce qui traduit la difficulté induite par les mouvements propres des galaxies proches. En 1927, Humason commence un programme de mesure des décalages spectraux de galaxies faibles, donc plus lointaines. Cette même année, Georges Lemaître publie sa théorie de *l'atome primitif*, qui est le premier modèle expliquant l'Univers en expansion, et qui est la base du Big Bang. Deux ans plus tard, en 1929, Hubble publie un article dans lequel il suggère une relation linéaire (conforme à la prédiction de Lemaître), entre le décalage spectral et la distance de galaxies proches. Cette relation ne s'appuyait que sur des galaxies dont les mouvements propres sont importants (car elles sont toutes plus proches que l'amas de Virgo), et la dispersion des vitesses ne donnait qu'une grossière augmentation de la vitesse avec la distance (cf Jean-Pierre Luminet, *L'invention du Big Bang*). Elle a malgré tout été nommée *loi de Hubble*.

Le *décalage spectral* est le déplacement des raies d'absorption (ou d'émission) observé dans le spectre d'un objet, par rapport à un spectre pris au laboratoire (c'est-à-dire au repos). Le décalage spectral mesure la vitesse d'un objet par rapport à l'observateur. Il est défini comme la différence **relative** entre la longueur d'onde mesurée $\lambda_0$ et la longueur d'onde émise $\lambda$ :

$$z = \frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda}$$

Considérons un objet à z = 1. On a alors $1 = (\lambda_0 - \lambda) / \lambda$ $\lambda_0 = 2 \times \lambda$

Toutes les longueurs d'onde de cet objet sont doublées. Par exemple, un rayonnement émis à la limite de l'ultra-violet (0,4 µm), se retrouve à la limite de l'infra-rouge (0,8 µm). Le décalage atteint la largeur totale du spectre visible !

La solution qui convenait était donc l'expansion. Mais Hubble a indiqué que les galaxies proches nous *fuient* à une vitesse qui est proportionnelle à leur distance, et expliqué le décalage vers le rouge par un effet Doppler dû à une vitesse d'éloignement réelle. Or l'expansion ne produit pas un véritable effet Doppler, puisque les galaxies ne s'éloignent pas de nous et sont immobiles dans l'espace en expansion qui se dilate. De plus, envisager que toutes les galaxies s'éloignent de nous reviendrait à nous placer au centre de l'Univers… ce à quoi on a renoncé depuis Copernic !

Les galaxies ne s'éloignent pas de nous, c'est bien l'espace qui nous en sépare qui est en expansion. Et cette propriété avait été également trouvée théoriquement par Alexandre Friedmann quelques années plus tôt, à partir de l'équation d'Einstein. Friedmann a publié exactement la loi de proportionnalité deux ans avant Hubble (on peut voir à ce sujet le livre de Jean-Pierre Luminet *l'invention du Big Bang*).

La vitesse trouvée par Hubble était aussi bien trop grande, de l'ordre de dix fois. La constante qui représente cette vitesse aujourd'hui (car la constante est en fait variable…), est appelée *constante de Hubble*, et notée $H_0$. L'indice 0 signifie *aujourd'hui*. La valeur qu'on lui reconnaît actuellement, déduite de mesures récentes, est de :

$H_0 = 72 \pm 8$ km s$^{-1}$ Mpc$^{-1}$ HST 2001

$H_0 = 71{,}9 \pm 2{,}6$ km s$^{-1}$ Mpc$^{-1}$ WMAP 2008

Remarquez l'incertitude sur la mesure : 8 km s$^{-1}$, par rapport à 72 km s$^{-1}$, représente 11 %. En 2008, l'erreur tombe à un peu moins de 4 %. Des mesures nouvelles seront encore nécessaires pour arriver à une valeur vraiment digne de confiance. Elle signifie qu'à **chaque seconde**, l'Univers s'accroît dans toutes les directions de 72 km pour chaque mégaparsec de distance. Cette valeur donne le vertige, parce que 72 km de plus à chaque seconde semble énorme ! Mais cet accroissement correspond à un million de parsecs, ce qui est une distance assez impressionante aussi. On se propose de traduire cette valeur dans des unités qui nous sont plus sensibles que le mégaparsec :

Changeons les km en µm, les secondes en siècles, et les Mpc en km.
1 km = $10^3$ m = $10^3 \times 10^6$ µm = $10^9$ µm.
1 s = 1 / 60 × 60 × 24 × 365,25 × 100 siècle = 1 / 3.155.760.000 siècle $310^{-10}$ siècle
1 Mpc = 3,086 $10^{22}$ m = 3,086 $10^{19}$ km.
Reportant ces valeurs dans la constante, on obtient :
$H_0 = 72$ ($10^9$ µm) × (3 $10^{-10}$ siècle)$^{-1}$ × (3,086 $10^{19}$ km)$^{-1}$.
$H_0 = 72\ 10^9$ µm × 3,16 $10^9$ siècle$^{-1}$ × 0,324 $10^{-19}$ km$^{-1}$

$$H_0 = 7{,}4\ \mu m\ siècle^{-1}\ km^{-1}$$

Ceci signifie que chaque kilomètre d'Univers s'allonge de 7,4 µm en un siècle ! C'est la longueur d'une grosse bactérie… Vu sous cet angle, l'expansion semble bien plus raisonnable. Mais lorsqu'on considère des milliards d'années-lumière (ou de parsecs), les choses ont une autre dimension.

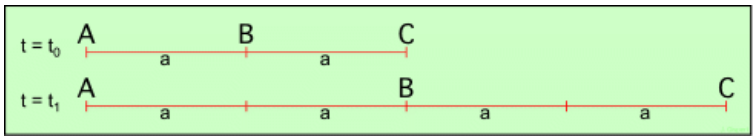
Il faut aussi comprendre que pour les courtes distances (inférieures au méga-parsec), l'expansion ne se fait pas sentir : les autres forces de la Nature sont bien trop importantes pour que la matière puisse se plier à l'expansion générale. Ainsi, les galaxies sont fortement liées gravitationnellement, et ne subissent donc pas la dilatation de l'espace. Ce n'est qu'à l'échelle des distances entre les amas de galaxies que l'expansion se fait sentir, et prend toute son ampleur. D'autre part, les objets qui nous entourent (y compris nous-même), sont gouvernés par les forces électromagnétiques qui définissent les distances entre les atomes. Tout ceci est donc insensible à l'expansion.

Un autre point peut sembler délicat. Si on applique la loi de Hubble à des galaxies très éloignées, on peut trouver une vitesse supérieure à la vitesse de la lumière ! Il suffit de considérer une galaxie située à une distance d telle que c = H d, soit d = c / H. Avec H = 72 km $s^{-1}$ $Mpc^{-1}$, on trouve d = 300.000 km $s^{-1}$ / 72 km $s^{-1}$ $Mpc^{-1}$ = 4.166 Mpc. Soit 4 milliards de parsecs ou 13 milliards d'années-lumière. C'est à peu près la taille de l'Univers observable. Une galaxie plus éloignée semblerait s'éloigner à une vitesse supérieure à celle de la lumière, mais ceci ne pose pas de problème, car il ne s'agit nullement d'une vitesse des galaxies l'une par rapport à l'autre, mais d'un effet dû à l'expansion de l'Univers : c'est l'espace qui s'étend entre les deux galaxies, **qui chacune est immobile dans son espace**. Il ne s'agit donc absolument pas d'une vitesse relative des deux galaxies, et la Relativité n'est pas mise en défaut.

### 2.3.1 Découverte théorique de l'expansion

L'expansion de l'Univers a été découverte par Georges Lemaître, en résolvant l'équation de Friedmann, elle-même tirée de l'équation d'Einstein qui décrit la géométrie de l'espace-temps. Alexandre Friedmann a aussi obtenu un résultat semblable. Alors qu'Einstein lui-même cherchait une solution stationnaire (Univers en équilibre), ce qui l'a amené à introduire la constante cosmologique, Lemaître a démontré que les seules solutions possibles représentaient un Univers soit en expansion, soit en contraction. Théoriquement, il est impossible de choisir entre les deux, mais il était clair qu'il fallait s'attendre à un Univers non statique.

Il est facile de montrer que, dans un univers homogène, la vitesse de deux galaxies l'une par rapport à l'autre, est proportionnelle à la distance qui les sépare.



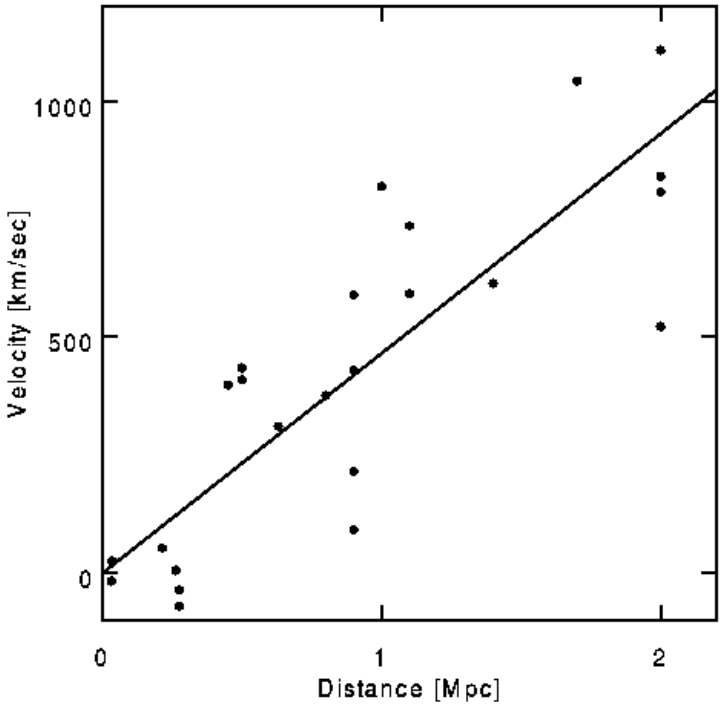
Calcul de la vitesse d'expansion

A l'instant $t_0$, les galaxies B et C se trouvent à la distance a et 2a respectivement de A. Plus tard, à l'instant $t_1$, elles se trouvent respectivement aux distances 2a et 4a (l'homogénéité implique que les distances AB et BC ont été multipliées par une même valeur, sinon les propriétés de l'espace-temps ne seraient pas les mêmes en des points différents). Entre ces deux instants, l'augmentation de distance à A de B est de $\Delta d_B$ = 2a - a = a, celle de C est de $\Delta d_C$ = 4a - 2a = 2a. Donc, la vitesse d'éloignement de B est $v_B = \Delta d_B / \Delta t$ = a / Δt, et celle de C est $v_C = \Delta d_C / \Delta t$ = 2a / Δt. Donc vu de A, la vitesse d'éloignement de C est double de celle de B. On pourrait prendre des points à des distances plus grandes, le résultat serait de même nature. On en déduit :

$$v = H\ d$$

où H est une constante. La vitesse d'éloignement est proportionnelle à la distance de l'objet considéré.

Cette relation est connue sous le nom de *loi de Hubble*, parce que ce dernier a trouvé, quelques années plus tard, que quelques galaxies proches présentaient une vitesse d'éloignement grossièrement proportionnelle à leur distance.




graphique original de Hubble

On voit la très forte dispersion, due aux mouvements propres des galaxies observées, qui sont du même ordre de grandeur que l'expansion. L'échantillon utilisé n'est pas représentatif, ne comprenant que des galaxies plus proches que Coma.

**2.4 Age de l'Univers**

On en tire facilement d = v / H. Cette formule équivalente donne la distance parcourue comme le produit de la vitesse v par 1 / H. Or, pour obtenir une distance, il faut multiplier une vitesse par un temps. Donc, 1 / H est un temps. On pose :

$$t = 1 / H$$

D'où d = v t. Comment interpréter ce temps ? d est la distance qui nous sépare d'une galaxie G donnée. En considérant que l'expansion dure depuis que les galaxies étaient toutes regroupées (distance nulle, début de l'Univers), et sachant que G se déplace à la vitesse v (supposée constante), elle a mis le temps t = 1 / H pour arriver à sa position actuelle. Donc, ce temps est l'âge de l'Univers (temps écoulé entre le rassemblement des galaxies et aujourd'hui).

**Attention** : dans ce raisonnement, on a supposé H constante dans le temps. Or ceci n'est qu'une approximation. En effet, l'expansion de l'Univers est ralentie par l'attraction gravitationnelle que les amas de galaxies exercent les uns sur les autres. Donc, l'expansion a dû être plus rapide dans les débuts de l'Univers. Dans ce cas, le temps est plus petit, et donc l'Univers moins vieux que 1 / H. Mais en plus, on a montré récemment que l'expansion s'accélère, depuis un milliard d'années à peu près, ce qui complique encore un peu l'interprétation.

En résumé, la valeur 1 / $H_0$ (valeur de H aujourd'hui) est un ordre de grandeur de l'âge de l'Univers, qui doit être modulé par le fait que H n'est pas constante dans le temps. L'âge fini de l'Univers, borné par 15 Ga, est attesté par le fait qu'on ne trouve ni objets astronomiques, ni radionucléides plus vieux.

**Temps caractéristique**

A un instant quelconque dans l'histoire de l'Univers, la valeur t = 1 / H représente toujours un temps. C'est le temps écoulé depuis le Big Bang. Mais ce tepmps est lié à la vitesse d'expansion, qui n'a pas de raison a priori d'être constante. Donc, à tout instant, 1 / H représente le temps caractéristique d'expansion, le temps pendant lequel les dimensions de l'Univers changent significativement. En un temps plus bref, on peut considérer que les propriétés de l'Univers ne changent pas beaucoup.

Il sera intéressant de comparer ce temps caractéristique avec le temps propre de certains phénomènes physiques. Si un phénomène nécessite un temps supérieur au temps caractéristique d'expansion pour se réaliser, les conditions physiques auront changé avant qu'il ait pu se produire de manière significative. Ainsi, il y aura une course entre l'expansion et les phénomènes qui peuvent se dérouler dans certaines conditions, forcément éphémères. Nous verrons ce mécanisme à l'œuvre plusieurs fois.

## *2.5 Le Big Bang*

Si l'Univers a toujours été en expansion, ce que rien ne vient contredire, **il a eu un début**, instant 0, point de départ de l'expansion. On le situe vers 13,7 milliards d'années, à 200 millions d'années près. La densité et la température de l'Univers ont été infinies à cet instant origine.

L'existence de ce début nous autorise à parler de l'âge de l'Univers, en comptant le temps écoulé depuis.

Mais nous pourrons aussi écrire l'histoire de l'Univers. A gros traits, la densité et la température de l'Univers ne feront que décroître au cours du temps, produisant des changements de conditions physiques extrêmement importants. Au début, le milieu était à une température que l'on ne peut pas produire en laboratoire, et la physique qui le décrit est donc inconnue. Il ne nous sera donc pas possible d'écrire l'histoire de l'Univers jusqu'à l'instant 0, jusqu'au Big Bang lui-même. Les tout premiers instants resteront encore dans l'ombre.

Mais ensuite, lorsque l'Univers s'est suffisamment refroidi, les conditions physiques deviennent accessibles à nos connaissances, et ce que nous pourrons en dire prend sons sens. L'expansion était si rapide au début, que la température a baissé très brutalement. Notre compréhension de l'Univers commence donc un très bref instant après le Big Bang.

Disons tout de suite que le Big Bang est une notion théorique. En effet, puisque la physique qui le concerne nous est inconnue, nous ne pouvons savoir s'il a eu lieu réellement, ou si des phénomènes que nous ignorons l'auront empêché. On peut se poser des questions sur la signification d'une densité infinie… Mais se poser des questions à son sujet ne constitue par une preuve de non existence !

Dans la suite, nous considérerons donc que quelque chose a eu lieu, qui a amené l'Univers dans des conditions de densité et de température très élevées. Et nous tenterons de raconter l'histoire de l'Univers à partir de là.

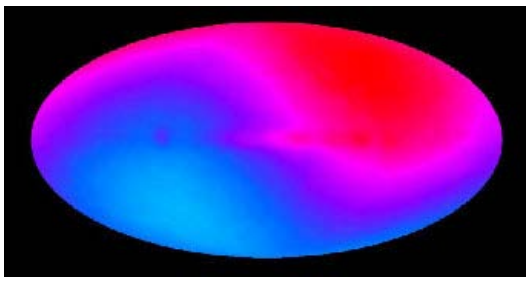
### 2.6 Fond diffus cosmologique

Le *fond micro-onde* (*fond diffus cosmologique, Cosmic Microwave Background, CMB*), découvert accidentellement par Penzias et Wilson en 1965 (prix Nobel 1978 pour cette découverte), est aujourd'hui bien connu. En particulier, sa température moyenne (très proche de la température effective) est précisément de 2,725 K.

Il présente les caractéristiques suivantes :

- **il couvre tout le ciel**.
- **corps noir** : le rayonnement présente un spectre de corps noir presque parfait, à toutes les longueurs d'onde où il a été mesuré. Cette propriété permet d'en déterminer très précisément la température.
- **abondance** : les photons sont nombreux, on en observe 500 par centimètre-cube.
- **âge** : Ce sont les plus vieux photons qu'on puisse voir, puisqu'ils proviennent de la période où l'univers est devenu transparent.
- **température d'émission** : pour que cette émission se produise, il faut que la température du milieu soit de l'ordre de 3.000 K.
- **décalage spectral** : sa température actuelle de ≈ 3 K est donc 1.000 fois plus faible que la température d'émission. Ce rapport nous expliquera comment l'Univers a changé depuis l'émission.
- **uniformité** : la température mesurée en tous points donne la même valeur, à l'exception de fluctuations qui ne dépassent pas $5\ 10^{-5}$ (fluctuation relative, c'est-à-dire $\Delta T / T$). Cette uniformité est remarquable, et pose un problème pour interpréter les premiers instants de l'Univers.
- **conséquence** : Les inhomogénéités de ce rayonnement nous renseignent sur les différences de température à l'époque de son émission. Par conséquent, en l'observant, nous voyons une carte thermique de l'Univers de l'époque ! Les zones les plus chaudes sont les plus denses ; on pense donc que ce sont les germes des grandes structures (galaxies, amas, super-amas) observées aujourd'hui.

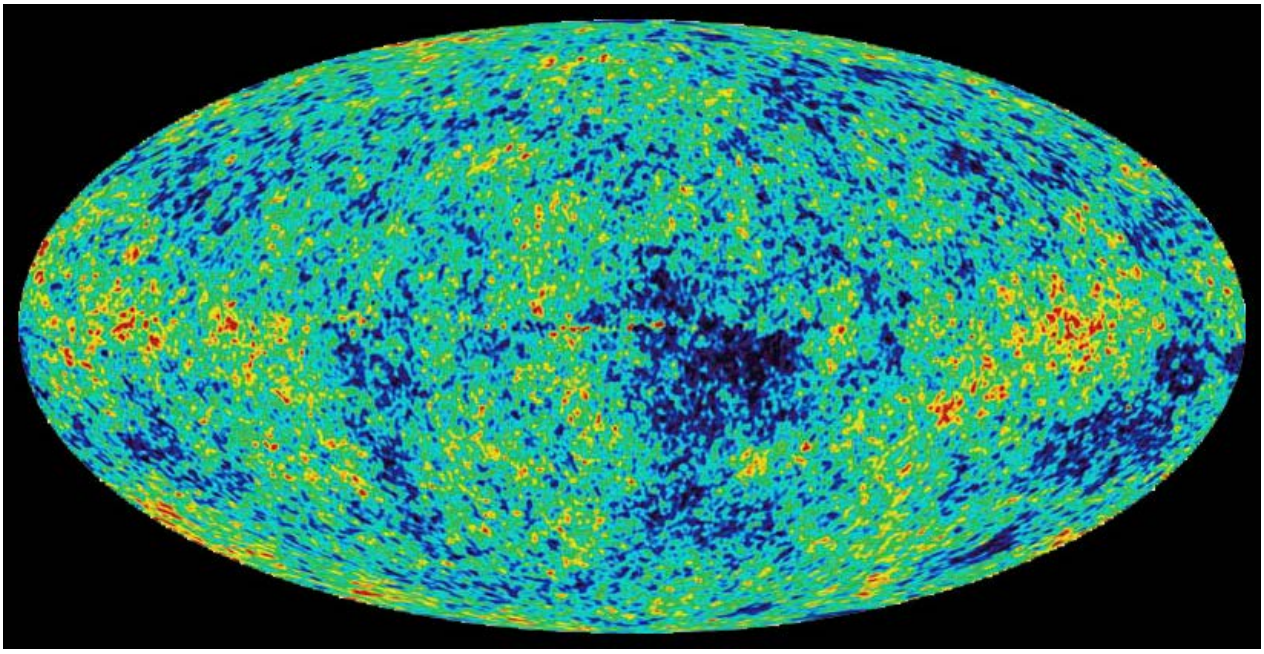
La première analyse précise a été faite par le satellite *COBE* (*COsmic Background Explorer*) de la NASA, pour une couverture totale du ciel. Mais il a été observé avec plus de précision sur une portion limitée par le ballon européen BOOMERANG. A ces instruments pionniers a succédé le satellite *WMAP* (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*), qui a précisé les résultats.



COBE Science Working Group

Lorsqu'on observe ce rayonnement brut, on trouve une disymétrie entre deux points opposés du ciel. Ceci, loin de discréditer les données, les renforce et prouve qu'il s'agit bien d'un rayonnement cosmologique : s'il était émis localement, il serait entraîné comme la Terre, et ne montrerait pas cette anisotropie. En effet, la Terre n'est pas immobile dans l'Univers : elle se déplace autour du Soleil, qui tourne autour de la Galaxie, elle-même en mouvement… En combinant ces mouvements, on détermine un point de l'espace vers lequel se dirige la Terre, en allant à la rencontre du rayonnement cosmologique, qui apparaît donc légèrement décalé vers le bleu, c'est-à-dire plus chaud. Dans la direction opposée, on fuit ce rayonnement, qui apparaît donc décalé vers le rouge, c'est-à-dire plus froid. De plus, entre ces deux directions opposées, la température varie en fonction du cosinus de l'angle, exactement comme on s'y attend. Cette anisotropie est de quelques $10^{-3}$ en relatif.

On peut donc retrancher cette différence de température fonction de la direction, pour obtenir une carte comme celle montrée ci-dessous, qui est due à WMAP. La direction de ce phénomène est parfaitement compatible avec les mouvements de la Terre dans l'Univers proche.



Le fond micro-ondes Crédit : WMAP Science Team, NASA

Les fluctuations visibles sur cette carte sont des différences de température de 0,00001° au maximum. Il faut l'aide de la théorie pour déterminer à quelle époque cette lumière a été émise, et dans quelles conditions. C'est en fonction d'un modèle que les résultats peuvent être interprétés. Nous verrons donc d'abord comment construire des modèles, et ensuite nousinterpréterons les données observationnelles en fonction de ce modèle. Si le modèle donne une vision cohérente de l'ensemble des données,on pourra le considérer comme représentatif.

**2.7 Origine du fond cosmologique**

A la fin des années 40, Georges Gamow et ses étudiants Ralph Alpher et Robert Hermann, ont étudié les premières phases de l'Univers, lorsque sa température était extrêmement élevée. Ils ont compris que le rayonnement restait piégé dans la matière dense, jusqu'à ce que la densité baisse, avec l'expansion, au-dessous d'un certain seuil. Ils en ont déduit que du rayonnement a été émis alors partout dans l'Univers, et que nous devrions le voir encore aujourd'hui. En 1948, Alpher et Hermann ont publié un article dans lequel ils prédisaient un rayonnement d'une température de 5 K qui devrait couvrir tout le ciel. Malheureusement, leur travail a été totalement oublié… et le prix Nobel est allé à d'autres plus chanceux.

L'interprétation de ce rayonnement confirme les travaux de Georges Lemaître et Alexandre Friedmann, qui ont montré que les solutions des équations d'Einstein (Relativité Générale), ne produisaient que des modèles d'Univers en contraction, ou en expansion, mais en tous cas non stationnaires. L'homogénéité de ce rayonnement en elle-même pose le problème de l'horizon, mais pour l'instant, deux aspects sont à considérer :

- le contraste profond entre l'homogénéité du rayonnement et l'inhomogénéité de la matière ;
- les faibles fluctuations du rayonnement qui seraient à l'origine des grandes structures de l'Univers (galaxies, amas de galaxies).

Le premier de ces points est délicat, car dans une époque reculée, lorsque l'Univers était très dense, il y avait obligatoirement un équilibre thermique entre la matière et le rayonnement (les collisions permanentes entre photons et particules de matière échangent de l'énergie). Comment se fait-il que cet équilibre ait été rompu ? La matière devrait, en considérant ce seul aspect, être restée tout aussi homogène aujourd'hui. Les modèles devront résoudre ce problème.

Le second point semble montrer que, dès l'époque où ce rayonnement a été émis, il y avait des inhomogénéités de très faible amplitude($10^{-5}$). Ce sont des points légèrement plus chauds que le reste du ciel, donc probablement légèrement plus denses. On suppose que ces inhomogénéités sont les amorces de la formation des galaxies. Mais ceci reste à confirmer par des études nouvelles.

Nous avons admis que l'Univers était très condensé, donc très chaud, peu après le début. Nous devons en conclure qu'il rayonnait approximativement comme un corps noir. Et ce rayonnement devait être à courte longueur d'onde, correspondant à la température élevée. Comment se fait-il qu'on observe aujourd'hui un rayonnement à très basse température ? Il faut une explication basée sur les propriétés des ondes.

A partir de la métrique de Robertson-Walker (la métrique mesure les distances), on démontre que la longueur d'onde s'étire comme les distances au cours de l'expansion : $\lambda \quad a(t)$, d'où :

$$\lambda_r / \lambda_e = a(t_r) / a(t_e)$$

où $\lambda_r$ est la longueur d'onde à la réception, alors que $\lambda_e$ est la longueur d'onde à l'émission. Puisque le décalage spectral est défini en fonction de la longueur d'onde comme $z = (\lambda_r - \lambda_e) / \lambda_e$, on a $z + 1 = \lambda_r - \lambda_e$ et par suite :

$$\boxed{1 + z = a(t_0) / a(t_e)}$$

où on considère la réception aujourd'hui avec $t_r = t_0$.

### 2.8 Composition chimique de l'Univers

La composition chimique de l'Univers est la répartition de la masse selon les différentes espèces chimiques : hydrogène, hélium, carbone, oxygène…

Pour déterminer cette composition, observer celle de la Terre est un très mauvais choix, car lors de sa formation, elle a concentré les éléments lourds. Un meilleur choix est celui du Soleil, qui s'est formé il y a 5 milliards d'années, à partir d'une nuage de gaz plus représentatif. Cependant, ce nuage avait déjà été contaminé par des explosions de supernovæ, et donc sa composition avait été modifiée. Le milieu le plus représentatif de la composition primordiale se trouve en fait dans les grands nuages moléculaires, qui n'ont pas évolué depuis le début de l'Univers.

Leur composition est maintenant bien connue. Elle ne comporte que les éléments les plus légers : hydrogène (et son isotope le deutérium), hélium ($^4$He et un peu de $^3$He), et lithium. Les autres éléments en sont absents. Cependant, la théorie des étoiles nous montre qu'elles sont capables de synthétiser tous les éléments de l'hélium jusqu'au fer, puis de les répandre dans l'espace lors des violentes explosions de supernovæ. Pour les éléments plus lourds que le fer, leur présence est justifiée par des réactions nucléaires à très énergie qui se produisent pendant l'explosion d'une étoile. Les taux de production mesurés, déduits de la fréquence des explosions et de la quantité de chaque élément que l'explosion peut produire, sont en bon accord avec les observations d'abondances. Par conséquent, tous les éléments en dehors des plus légers cités plus haut sont effectivement produits exclusivement par les étoiles au cours de leur vie ou lors de leur explosion. Il reste quelques éléments légers, comme le bérylium et le bore, trop fragiles pour être synthétisés efficacement par les étoiles, et qui ne sont pas expliqués par la nucléosynthèse primordiale. On les observe dans les rayons cosmiques, mais leur production est expliquée par des réactions de spallation qui détruisent des éléments plus lourds (carbone, azote).

Donc, observant la composition actuelle de l'Univers, et tenant compte de ce qui a été ajouté au fil des temps par les étoiles, on aboutit à une composition simple de l'Univers primordial, contenant seulement les éléments légers cités plus haut. Et de fait, l'histoire de l'Univers, telle qu'on la conçoit aujourd'hui, explique très bien cette composition, et ceci constitue l'une des bases observationnelles de la Cosmologie moderne.

### 2.9 Energie noire

Il reste un ingrédient encore plus insaisissable : l'*énergie noire*. Depuis une dizaine d'années, on a découvert que l'expansion de l'Univers était accélérée, et non pas ralentie comme on le pensait avant. En effet, l'attraction gravitationnelle cumulée de toutes les galaxies s'oppose à l'expansion, qu'elle freine forcément. D'où le consensus sur un ralentissement. Mais une observation des supernovæ Ia lointaines est venu tout bouleverser. Celles-ci sont produites par l'effondrement gravitationnel d'une naine blanche qui accrète de la matière provenant d'un compagnon de type géante rouge. Lorsque la masse atteint la limite de Chandrasekhar, l'explosion se produit. Les conditions du phénomène, liées à cette masse limite, expliquent bien que la quantité d'énergie dégagée soit la même d'un événement à l'autre. Ces objets peuvent donc servir de chandelle standard pour évaluer les distances, d'autant plus qu'ils sont très lumineux.

Une étude systématique des supernovæ Ia a montré que les plus faibles, donc aussi les plus lointaines et les plus anciennes, sont moins lumineuses que ce que l'on pensait. Il y a deux façons de comprendre cet effet : soit la physique des supernovæ a changé, ce qu'on n'envisage pas vu les indications données plus haut, soit la distance à laquelle elles se trouvent est à revoir. C'est bien sûr cette seconde hypothèse que l'on privilégie, et qui montre que les distances dans l'Univers ont augmenté plus que ce que l'on croyait. Donc que l'expansion a été plus rapide que ce qu'on croyait auparavant. Cette accélération a commencé il y a quelques milliards d'années.

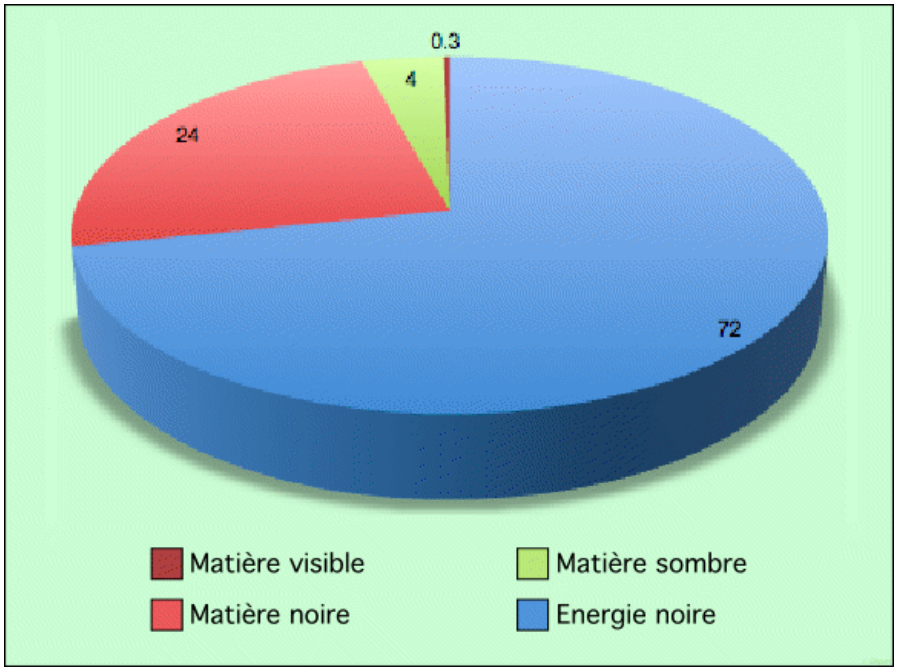
La question est maintenant de comprendre d'où vient l'énergie qui permet cette accélération ? N'ayant *a priori* aucune explication sous la main, on invoque là encore une composante mystérieuse de l'Univers, que l'on nomme *énergie noire*, et qui n'est mise en évidence que de cette façon.

On remarquera que matière noire et énergie noire sont toutes deux mises en évidence par des phénomènes dynamiques. Et toutes deux dépendent étroitement, pour leur explication, des théories physiques actuelles les plus poussées, et par là-même les plus spéculatives. Mais pour l'instant, nous n'avons pas le choix… Peut-être les résultats à venir du LHC pourront-ils nous éclairer sur l'un, voire les deux mystères !

### 2.10 Composition de l'Univers

D'après ce qui vient d'être dit, et que de très nombreuses études appuient, l'Univers est constitué de :

- 0,3 % de matière visible ordinaire ;
- 4 % de matière sombre ordinaire ;
- 24 % de matière noire non baryonique ;
- 72 % d'énergie noire, énergie du vide quantique.




Si tout ceci donne plus de 100 %, ce n'est pas grave : les valeurs données sont bien évidemment approchées…

**Attention** La différence entre la matière visible et la matière sombre réside simplement dans les conditions physiques, qui font que la première brille et la seconde pas. La matière visible est constituée essentiellement d'atomes, construits avec des protons et des neutrons. Ces particules sont nommées collectivement des *baryons*. Aussi, la matière que nous connaissons est-elle nommée *matière baryonique*. Par opposition, la matière noire, complètement hypothétique à l'heure actuelle, est nommée *matière non baryonique*. En effet, si elle était faite de protons, elle brillerait, ou absorberait la lumière, et nous la verrions !

**Remarque philosophique** : Copernic nous a chassés du centre de l'Univers, en y plaçant le Soleil. Les astronomes ont ensuite détrôné le Soleil, tant par sa position non centrale, que par ses mensurations qui n'en font qu'une étoile tout à fait ordinaire. Voilà que maintenant, la matière dont nous sommes faits n'est plus qu'une infime partie de ce qui constitue l'Univers ! Décidément, nous devrions être bien modestes…

**Résumé**

L'Univers contient donc la matière ordinaire brillante, la matière ordinaire sombre, plus une matière totalement inconnue et largement majoritaire, qui ne se manifeste à nous que par les perturbations gravitationnelles qu'elle produit. Les physiciens des particules recherchent activement cette dernière matière, et les instruments installés autour du LHC pourraient bientôt nous apporter quelques éclaircissements sur ce sujet.

Toutefois, quelques irréductibles astronomes pensent que la matière noire n'a jamais existé ailleurs que dans l'imagination des théoriciens. On ne l'a en effet invoquée que pour résoudre un problème de dynamique. Ce problème aurait-il une autre solution ? C'est la direction dans laquelle se sont engagés certains théoriciens en proposant des théories de gravitation newtonienne modifiée. Mais à ce jour, les résultats ne sont pas à la hauteur de leurs espérances. Il faut toutefois reconnaître que notre connaissance de la gravité est limitée au voisinnage du Soleil. Serait-elle différente à plus grande distance ?

### 2.11 Les trois piliers

La Cosmologie moderne s'appuie sur les trois piliers observationnels vus ci-dessus :

- **l'expansion** (accélérée). Elle implique que, dans le passé, l'Univers était plus dense qu'aujourd'hui, les galaxies plus proches les unes des autres. En remontant très loin, on aboutit à un état où toute la matière de l'Univers était concentrée dans un volume extrêmement petit, avec une densité effrayante, sinon infinie. Cet état définit l'instant zéro.
- **le fond de rayonnement cosmologique** : la première conséquence de cette condensation est que l'Univers devait être aussi extrêmement chaud, et qu'il devait rayonner. Ce rayonnement a évolué avec l'expansion.
- **la composition chimique** observée de l'Univers (proportion des différents éléments), bien décrite par la théorie, est une excellente justification de celle-ci. Nous verrons ceci en détail.

Une critique de ce paradigme est en préparation. Elle sera mise en ligne prochainement.

L'interprétation de ces trois observations montre qu'elles ne concernent pas la même époque. L'expansion est observée telle qu'elle est aujourd'hui, sans nous renseigner sur les valeurs passées du taux d'expansion.

Par contre, le fond de rayonnement est un vestige de l'époque à laquelle l'Univers est devenu transparent, ce qui remonte à 380.000 ans après le début de l'expansion. Son observation nous renseigne donc sur une époque précise, et nous donne ainsi un point fixe pour les modèles.

Enfin, la composition chimique primordiale provient d'une période où les réactions nucléaires ont pu se produire dans un Univers juste assez chaud pour cela. Ensuite, elles ont cessé et la composition n'a plus changé. Elles témoignent donc de cette période, de courte durée, et située encore bien avant l'émission du fond cosmologique.

Par conséquent, ces trois piliers des modèles de Big Bang sont non seulement des faits à expliquer, mais aussi des dates à respecter. Et leur enchaînement nous fixe une partie de l'histoire de l'Univers.

## *3 Bases théoriques*

Les idées essentielles pour concilier toutes les observations dérivent tout d'abord de l'expansion, vue à l'envers. En supposant qu'un film ait été fait depuis des milliards d'années, et qu'on puisse passer ce film à l'envers en (très très) accéléré, on verrait les galaxies se rapprocher les unes des autres. Viendrait un moment où elles se rejoindraient (peut-être seulement la matière qui les constitue), en une masse indifférenciée. Celle-ci se condenserait encore jusqu'à… peut-être un état de densité infinie. C'est en tous cas ce que donne une approximation qui ne considère pas la physique des premiers temps, d'ailleurs inconnue.

Cette condensation est à l'origine des modèles de Big Bang, initiés par l'atome primitif de Georges Lemaître.

Mais les choses ne sont pas si simples. Considérer que l'Univers a débuté dans un état de condensation extrême, et s'est dilué au fil du temps jusqu'à sont état actuel, pose plusieurs problèmes de compatibilité : comment l'état initial peut-il conduire à l'état actuel ? Certaines propriétés sont difficiles à expliquer.

A l'heure actuelle, la gravité est une force extrêmement faible, qui n'arrive à régner que dans des milieux où la matière est très condensée, l'Univers globalement étant de densité dérisoire. Mais en passant le film à l'envers, et s'approchant du début, on constate que la densité moyenne de l'Univers était très forte, et que par conséquent, la gravitation jouait un rôle important. Dans ces conditions, nous devons utiliser une théorie de la gravitation comme base de toute théorie cosmologique.

La Gravitation Universelle de Newton a été utilisée dans ce but, mais elle a posé des problèmes liés à ses bases mêmes, qui en ont empêché le développement.

La Relativité Générale, publiée en 1915, a été appliquée à la cosmologie très rapidement. Représentant la gravitation comme une déformation de l'espace-temps par les masses présentes, elle fournit un cadre bien adapté à l'étude de l'Univers à grande échelle, et se trouve à la base des théories cosmologiques modernes.

Elle considère qu'en tout point, l'Univers (à grande échelle) présente une courbure spatiale, la même partout. Mais des considérations théoriques que nous verrons plus loin, confrontées aux mesures de densité, indiquent que la courbure est proche de zéro. Nous verrons aussi que ceci est difficile à justifier…

Nous allons successivement établir les bases théoriques de la cosmologie, puis en déduire des modèles simples. L'analyse de ces modèles confrontés aux observations, pose un certain nombre de problèmes. Leur solution passera par une modification du modèle de base, en lui ajoutant une période d'inflation, pendant laquelle les distances dans l'Univers ont crû exponentiellement.

### 3.1 Réactions d'équilibre

La création d'une paire particule-antiparticule fait apparaître une masse qui est le double de la masse de la particule (particule et antiparticule ont la même masse). Pour créer une paire, il faut donc disposer d'une énergie au moins égale à leur énergie de masse totale. Par conséquent, la température, qui est équivalente à l'énergie du milieu, doit dépasser une température plancher correspondant à la masse des particules. Tant que le milieu est bien au-dessus de cette température, des paires se créent donc en abondance. Mais le milieu est aussi très dense, et une particule rencontre rapidement son antiparticule. Elles s'anihilent donc, en restituant l'énergie qui avait servi à leur création. Plus il y a de créations, plus il y a de particules et d'antiparticules, donc plus les chances de rencontres augmentent. Par conséquent, plus il y a de création, plus il y a d'annihilations, et il se crée un équilibre. Cet équilibre est caractérisé par une certains abondance des particules de ce type.

Si l'énergie du milieu est très élevée (donc aussi sa température), plusieurs types de particules peuvent exister en équilibre. Des interactions fréquentes entre toutes ces particules assurent l'équilibre thermique. Celui-ci est produit par les échanges d'énergie entre les particules qui interagissent : les moins énergétiques en gagnent, les plus énergétiques en donnent.

Considérons une particule de masse m, que l'on exprimera en unités d'énergie (MeV ). Ceci est possible en vertu de l'équivalence $E = m\,c^2$. Si l'énergie disponible dans l'Univers est supérieure à deux fois l'énergie de masse d'une particule, elle peut produire une paire particule-antiparticule.

Considérons par exemple l'électron. Sa masse est $m_0 = 9{,}11\ 10^{-31}$ kg, qui correspond à une énergie de 0,511 Me V / $c^2$ (0,511 MeV = $9{,}11\ 10^{-31}$ kg × $c^2$). Pour créer un électron et son antiparticule positron (qui possède la même masse), il faut donc 2 × 0,511MeV , soit 1,022 MeV . Si l'énergie disponible est supérieure, c'est-à-dire si la température est au-dessus d'un milliard de K, alors des paires électron-positron peuvent se créer à partir de cette énergie.
Mais la densité est forte, et la probabilité qu'un électron rencontre un positron est donc aussi très élevée : la rencontre est aussi certaine que la création de la paire. En se rencontrant, l'électron et le positron s'annihilent (toujours par l'équation $E = m\,c^2$) et restituent l'énergie qui avait servi à les produire. L'ensemble de ces deux réactions : création-annihilation, est une relation d'équilibre.

A un instant donné, il vient de se créer un certain nombre de couples électron-positron, mais il faut un peu de temps à ces particules pour se rencontrer et s'annihiler. Ce petit délai est suffisant pour qu'il existe, à chaque instant, quelques particules de chaque espèce, électrons et positrons.
Toutes les réactions d'équilibre maintiennent donc une proportion plus ou moins importante de couples de particules.

Dans ce qui précède, nous avons considéré une température particulière. Que se passe-t-il si la température baisse ? L'énergie disponible baisse tout autant. Et à force de baisser, elle se retrouve en-dessous de l'énergie nécessaire à la création de paires. Celle-ci stoppe donc. Mais l'annihilation qui les détruit n'a aucune raison de cesser ! Ce raisonnement nous amène à la conclusion que toutes ces particules doivent se détruire, il ne doit plus en rester une seule …

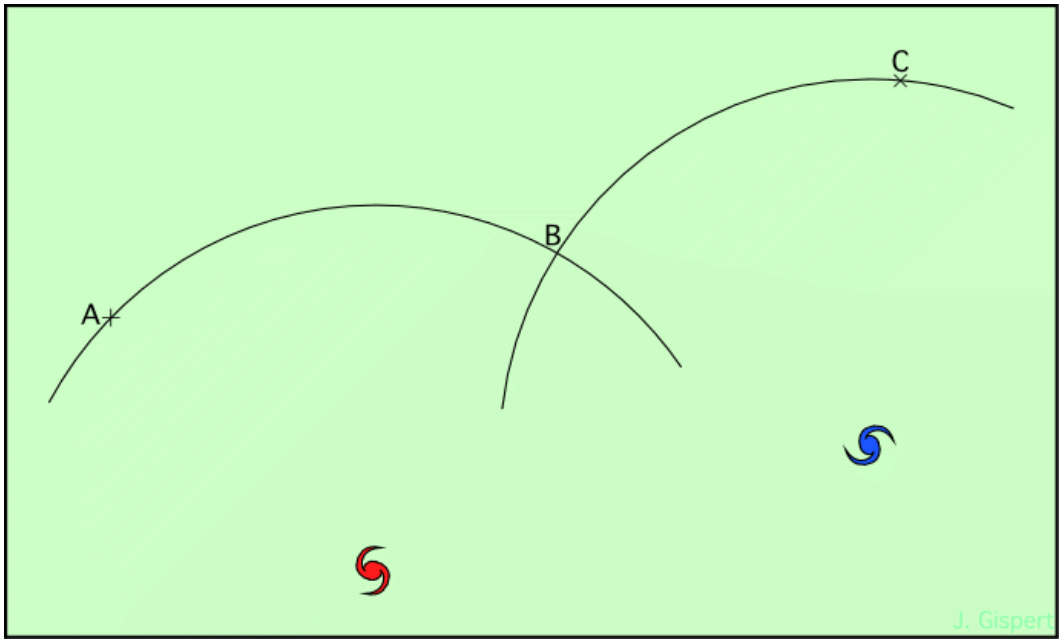
La matière existe pourtant ! L'explication provient sans doute (mais ceci est encore du domaine de la recherche), d'une disymétrie de désintégration des particules : les antiparticules ont une probabilité de se désintégrer légèrement supérieure (un milliardième …). Par conséquent, lorsque la température a baissé, certaines particules et antiparticules se désintègrent, avant de pouvoir s'annihiler. Et comme les antiparticules se désintègrent un peu plus, il restera finalement quelques particules. Exactement, pour un milliard de particules et un milliard d'antiparticules, il reste un seule particule. C'est-à-dire que l'Univers pourrait être beaucoup plus dense si la différence de probabilité était plus importante, ou tout simplement vide de matière si elle était nulle.

### 3.2 Principe cosmologique

Le premier problème qui se pose, avant d'aborder une théorie, est de caractériser ce que nous observons. Nous sommes sur Terre, en un point particulier de l'Univers, et nous ne pouvons pas nous en échapper pour observer d'un autre point de vue. Nous n'aurons jamais qu'un seul regard, il nous est impossible de savoir comment se présente l'Univers aux hypothétiques habitants d'une lointaine galaxie. Les seules observations possibles, depuis notre coin d'Univers, sont en profondeur.

Les observations que nous pouvons faire nous montrent un Univers qui a le même aspect, globalement, dans toutes les directions où l'on regarde, au moins en regardant assez loin pour gommer les irrégularités locales. Ceci a amené les astronomes à considérer, et à poser comme premier principe, que l'Univers est *isotrope*, ce qui signifie qu'il a le même aspect dans toutes les directions, vu depuis la Terre. Un Univers isotrope pourrait très bien présenter une densité décroissante depuis le centre où nous l'observons, en fonction de la distance. Mais une telle configuration nous donnerait une position privilégiée, que les astronomes ne sont pas prêts à admettre sans preuves.

Puisque la Terre ne joue pas de rôle privilégié, il doit en être de même partout ailleurs, et l'Univers doit être isotrope de tous les points d'observation.




l'Univers est isotrope vu de la galaxie rouge et de la galaxie bleue.

L'isotropie de l'Univers en tous points entraîne son homogénéité.

De la galaxie rouge, les points A et B, situés à la même distance, mais dans des directions différentes, ont donc les mêmes propriétés (isotropie de l'Univers autour de la galaxie rouge). De la galaxie bleue, on peut dire que les points B et C ont aussi les mêmes propriétés (isotropie autour de la galaxie bleue). Donc, les points A et C ont aussi les mêmes propriétés. Vu de la galaxie rouge, C n'est pas à la même distance que A et B, et pourtant ses propriétés sont identiques. L'isotropie autour des deux galaxies implique donc l'identité de propriétés entre des points non situés à la même distance. Le point C ayant été pris arbitrairement, on peut en déduire que tous les points de l'Univers ont les mêmes propriétés, c'est-à-dire que l'Univers est *homogène*.

Ce raisonnement nécessite toutefois, pour être correctement applicable, de connaître la distance, même si celle-ci n'est pas obtenue avec une très grande précision.

L'homogénéité de l'Univers est donc élevée au rang de *Principe Cosmologique*.

Ce n'est qu'un principe, car il s'appuie sur une propriété postulée : nous n'occupons pas un point privilégié de l'Univers.

Il a l'avantage de rendre les équations beaucoup moins difficiles (quoique la difficulté n'ait pas disparu pour autant). Cependant, il faut garder en tête les limitations de ce principe, puisque l'homogénéité de l'Univers n'apparaît réellement qu'à des échelles supérieures à la centaine de méga-

parsecs… Ignorer, dans les équations, toutes les turbulences locales (dans les galaxies et les amas de galaxies) est une approximation importante, de nature à affaiblir quelque peu les conclusions des modèles ainsi construits, mais qui se justifie à très grande échelle. Il y aura donc encore longtemps du travail pour les jeunes cosmologistes ! La matière sur laquelle ils travaillent est jeune aussi, et n'a pas encore bien affirmé son caractère.

### 3.3 Horizon cosmologique

Puisqu'il y a un début, qui se situe vers 13,7 milliards d'années (ordre de grandeur), rien n'a pu se propager dans l'Univers plus longtemps. Aussi, toute lumière qui nous parvient aujourd'hui a été émise au plus tôt il y a 13,7 milliards d'années. La vitesse de la lumière étant une constante absolue, un objet situé plus loin que 13,7 milliards d'années-lumière n'a pas eu le temps de nous éclairer, aussi se trouve-t-il au-delà de notre *horizon* (l'horizon est ce qui limite la vue). L'ensemble des objets qui ont eu le temps de nous envoyer un signal constitue l'*Univers observable*.

Lorsqu'on jette une pierre dans l'eau, elle produit une onde circulaire (des ronds dans l'eau) qui s'étend à partir du point de chute P. Cette onde est analogue de l'Univers observable sur la surface du bassin. Avant que la pierre ne tombe, tous les points de la surface du bassin existent. A partir de la chute, l'onde se propage et atteint des points de plus en plus loin, à mesure qu'elle avance.

**Remarque** : s'il n'y a pas eu d'instant zéro *stricto sensu* (pas de singularité), la surface de dernière diffusion (voir plus loin) en tiendra lieu.

*Attention* :

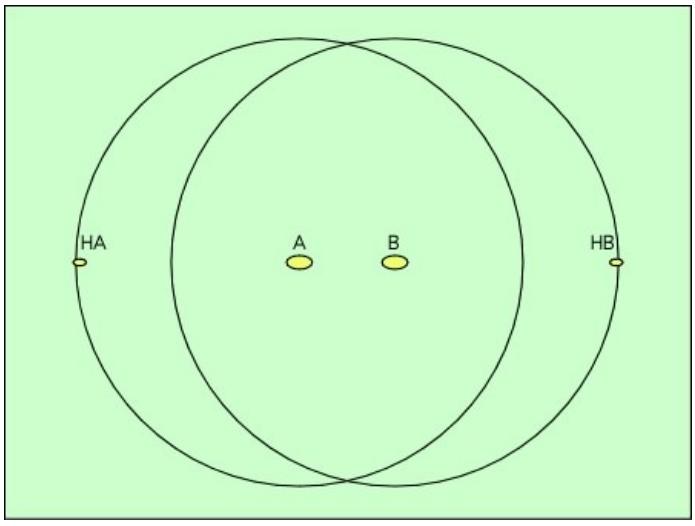
- à chaque seconde, le rayon de l'Univers observable s'accroît de 300.000 km…
- l'Univers observable n'est pas le même pour tout le monde.

Le schéma ci-dessous montre deux galaxies A et B, desquelles on observe l'Univers. La galaxie HA est située à la limite de l'Univers observable pour A : si elle était située un peu plus loin, sa lumière n'aurait pas eu le temps de parvenir en A. Il est aisé de constater que cette même galaxie HA est hors de portée de la galaxie B, puisque sa distance à B est égale à sa distance à A, augmentée de la distance AB.

Puisque la lumière parcours 300.000 km supplémentaires à chaque seconde, le cercle représentant l'Univers observable de chacune des galaxies s'accroît ; il viendra un jour où la galaxie HA sera englobée dans l'Univers observable de B, il suffit d'avoir de la patience…

> Imaginez qu'on braque un télescope dans une direction, et qu'on n'y détecte aucun objet brillant. Si dans cette direction se trouve une galaxie lointaine, hors de l'horizon, un jour viendra où sa lumière aura enfin parcouru la distance qui nous en sépare, et elle sera alors visible. On pourrait constater qu'elle s'allume dans le télescope. Malheureusement, les choses sont un peu plus lentes que cela : le diamètre d'une galaxie comme la nôtre est de 100.000 A.L. Aussi, l'étoile la plus proche de nous s'allumera la première, et la galaxie ne sera visible en totalité qu'au bout de 100.000 ans ! L'astronomie est vraiment une école de patience…

Partant de 0, le rayon de l'Univers observable à un instant t donné est donc c t, où c est la vitesse de la lumière. Puisque cette vitesse est la même dans toutes les directions, l'Univers observable en A est une sphère de rayon c t centrée sur A.




Cette notion d'Univers observable est fondamentale dans notre compréhension de l'Univers : nous n'en voyons de toutes façons qu'une petite partie, forcément finie ! La question de savoir si l'Univers est infini est donc hors de portée de nos observations directes.

L'étude des amas de galaxies, et des structures à plus grande échelle encore (super-amas…), nous rapproche des limites de l'Univers observable. Elle a donc inéluctablement des conséquences sur la cosmologie.

La vitesse de la lumière étant absolue, la lumière qui est partie de notre région il y a 13,7 milliards d'années atteint aujourd'hui les points les plus éloignés que nous pouvons observer. L'Univers observable est donc la *sphère d'influence* qui nous concerne : tout ce qui est en dehors ne nous a jamais influencé, et n'a jamais été influencé par nous.

### 3.4 Problème de l'horizon

L'existence d'un horizon et l'expansion, mises ensemble posent un problème.

L'horizon grandit aujourd'hui plus vite que l'expansion (puisque la vitesse de la lumière est très supérieure à la vitesse d'expansion). Symétriquement, si on remonte le temps vers le Big Bang, l'horizon diminue plus vite que l'expansion. Par conséquent, la portion d'Univers que nous voyons aujourd'hui est bien plus grande que celle que l'on aurait pu voir peu de temps après le Big Bang, disons au moment où a été émis le rayonnement cosmologique.

Pour le comprendre, considérons un instant proche du début de l'Univers, où son âge est, disons, d'une année. L'horizon d'un observateur s'étend à une année-lumière autour de lui. Si on considère l'Univers âgé d'une minute, l'horizon n'est plus qu'à une minute-lumière, c'est-à-dire à 18 millions de kilomètres. C'est bien moins que la distance de Mercure au Soleil. A cette époque-là, aucun signal, aucune information, n'avait pu franchir une distance plus grande. Deux points situés alors à 36 millions de kilomètres l'un de l'autre par exemple, n'ont pas pu échanger de signaux. **La température de l'un est par conséquent sans aucun rapport avec la température de l'autre**. Ceci va constituer l'un des grands problèmes posés à la théorie du Big Bang, puisque le fond de rayonnement cosmologique est remarquablement égal sur tous les points de la sphère céleste. Ceci signifie que la température était partout égale dans l'Univers à ce moment-là. Qu'est-ce qui a bien pu égaliser la température avec cette précision, en des points inaccessibles les uns aux autres ?

Les théories de Big Bang élémentaires ne le résolvant pas, il faudra recourir à l'inflation pour expliquer cela.

### 3.5 But de la cosmologie

La cosmologie vise à caractériser l'état initial de l'Univers, et son évolution. Cette évolution, appliquée à l'état initial choisi, doit donner l'état actuel, tel qu'il est observé. Si ce n'est pas le cas, il faut remettre en cause, soit l'état initial, soit l'évolution, soit les deux !

1. Le premier point est l'existence d'un état initial, départ de l'expansion. En remontant le temps assez loin, on constate que l'Univers devait être si compact, que les lois de la physique que nous connaissons deviennent très incertaines, voire inexistantes. L'état initial que nous choisissons est donc le premier où les lois de la physique connue commencent à s'appliquer.
2. L'Univers considéré est l'Univers observable. Nous ignorons s'il y a quelque chose en dehors de lui. Mais il s'accroît à chaque seconde, et ce qui n'est pas visible aujourd'hui le sera demain, si ça existe.
3. L'évolution de l'Univers se conçoit par l'application des lois de la physique, telles que nous les connaissons aujourd'hui par les expériences de laboratoire, et supposées invariantes dans l'espace et dans le temps. Cette invariance n'est pas seulement postulée, mais les observations nous permettent de voir des objets (galaxies par exemple) fort loin de nous, et de constater qu'ils se comportent comme les objets proches. Donc que les lois de la physique sont les mêmes partout dans l'Univers. D'autre part, les objets lointains sont vus tels qu'ils étaient lorsque la lumière que nous en recevons les a quittés, c'est-à-dire il y a très longtemps (une durée comparable à l'âge de l'Univers), ce qui nous permet de conclure que ces lois n'ont pas évolué depuis. Leur application est donc valide, et peut nous renseigner sur l'évolution de l'Univers depuis ses débuts.

Pour ce qui est de l'état initial, il nous est actuellement impossible de l'observer (si l'observation devient possible un jour, et s'il existe un véritable état initial, ce qui ne serait pas le cas si l'Univers avait toujours existé). Mais la radioastronomie nous a donné une image bien précise de l'état de l'Univers il y a plus de 13 milliards d'années, et cet état est un jalon précieux pour évaluer les modèles. Peu de temps après cette date reculée, les galaxies (et surtout les quasars) deviennent observables, et nous renseignent sur les états intermédiaires. Nous disposons donc d'une image bien précise de l'évolution de l'Univers, au moins sur cette longue période.

### 3.6 Temps cosmique

L'homogénéité de l'Univers (principe cosmologique) indique que la composition, la température, la pression, etc., sont les mêmes partout. On admet aussi que les lois de la physique sont universelles (dans l'espace et dans le temps). Alors, puisque tous les points de l'Univers étaient à l'origine dans le même état, et ont subi les mêmes lois, leur évolution a été la même. Ce qui revient à dire qu'ils partagent la même Histoire. L'Histoire se décrit en fonction du temps, et l'identité de l'Histoire implique l'identité du temps. Le *temps cosmique* ainsi défini est celui d'un quelconque observateur, choisi arbitrairement. Puisque l'évolution est la même pour tous, il est représentatif.

Ce temps n'est pas en contradiction avec la Relativité. Il décrit comment l'Univers a évolué en tout point, et ne définit aucune relation entre deux points différents. Alors que la Relativité nous dit comment on peut passer d'un point à un autre.

## *4 Mise en équation du problème*

Nous allons présenter un ensemble d'équations qui représente l'équilibre de l'Univers, et dont on pourra tirer les propriétés de ce dernier. Les méthodes utilisées sont les grandes lois de la physique, appliquées au cas particulier considéré. On peut utiliser pour cela soit les lois newtoniennes, soit les lois relativistes. Mais pour une représentation vraiment correcte, seules les lois relativistes sont pertinentes.

### 4.1 Coordonnées comobiles

Les coordonnées comobiles sont des coordonnées entraînées avec l'expansion de l'Univers, que l'on a définies à propos de la Relativité Générale. Etant donné que la Cosmologie utilise la Relativité Générale avec les métriques adaptées, les coordonnées comobiles s'imposent et seront d'usage courant.

Notons $r(t)$ la distance à l'instant t entre les deux galaxies, et $x$ la distance comobile entre elles. L'une varie, l'autre non. Notons $a(t)$ la proportion entre les deux :

$$r(t) = a(t)\, x$$

On appelle *facteur d'échelle* la fonction a(t). Elle décrit l'expansion de l'Univers en fonction du temps. *r(t)* et *x* sont des longueurs, donc *a(t)* n'a pas de dimensions.

> Si on suppose $a(t) = 1 + t$, on a $r(t) = (1 + t)\,x = x + t\,x$. Au temps $t = 0$, on trouve $r = x$. Au temps $t = 1$, $r = 2\,x$ ; à $t = 2$, $r = 3\,x$… Les distances augmentent donc linéairement en fonction du temps.

Le principe cosmologique, qui affirme l'homogénéité de l'Univers, rend le facteur d'échelle indépendant des coordonnées d'espace ! C'est pourquoi il a été noté seulement dépendant du temps.

### 4.2 L'équation de Friedmann

Friedmann a écrit une équation qui représente l'équilibre de l'Univers, considéré comme un gaz de galaxies. Cette approximation est communément utilisée depuis.

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{k c^2}{a^2}$$

Dans cette équation, a est le facteur d'échelle, la notation $\dot{a}$ représente la vitesse d'évolution du facteur d'échelle (c'est la dérivée de a par rapport au temps). Donc, $\dot{a}/a$ est la vitesse relative (en pourcentage). *G* est la constante newtonienne de la gravitation universelle, ρ la densité de matière (partout la même puisqu'on considère l'Univers homogène, d'après le Principe Cosmologique), enfin *k* est une constante.

Cette équation peut s'obtenir à partir de la théorie de Newton, aussi bien que de la Relativité Générale. La version relativiste peut toutefois contenir un terme supplémentaire, la fameuse constante cosmologique Λ :

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{k c^2}{a^2} + \frac{\Lambda}{3}$$

Dans l'équation de Friedmann, $8\,\pi\,G / 3$, $c^2$ et Λ sont des constantes. Elle relie donc le facteur d'échelle *a*, la densité ρ, et la constante *k*. Du fait de l'homogénéité de l'Univers, *k* est aussi une constante. Donc, il ne reste que deux variables : *a* et ρ. L'équation n'est pas suffisante, à elle seule, pour décrire complètement l'évolution de l'Univers (elle le serait si on connaissait l'évolution de ρ).

Il nous faudra donc au moins une nouvelle équation pour déterminer complètement le problème. Cette équation nous donnera l'état de la matière dans l'Univers.

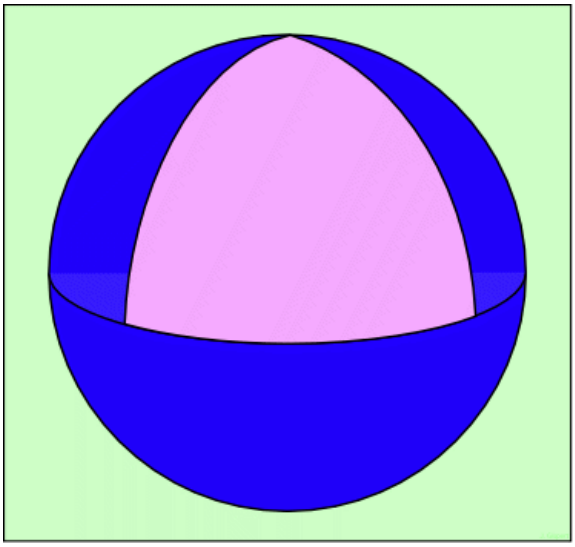
#### Interprétation

L'équation de Friedmann (sans constante cosmologique) s'obtient en physique newtonienne. Le terme de gauche dérive de l'énergie cinétique d'une particule, le premier terme de droite provient de l'énergie potentielle de la particule, et le dernier représente l'énergie totale. *k* n'a pas de signification particulière. L'équation de Friedmann s'obtient donc tout simplement en écrivant que l'énergie totale reste inchangée puisque l'Univers est un système fermé. C'est une application immédiate de la **conservation de l'énergie** en mécanique classique.

L'équation de Friedmann s'obtient aussi en Relativité Générale. L'équation des champs d'Einstein s'écrit $G^{\mu\nu} = -8$ pi G $T^{\mu\nu}$ où $G^{\mu\nu}$ représente la géométrie de l'espace-temps, et $T^{\mu\nu}$ son contenu en matière-énergie. C'est une équation tensorielle d'ordre 4 (les tenseurs sont des tableaux de nombres de 4 × 4). Le tenseur d'Einstein $G^{\mu\nu}$ est construit pour satisfaire à la conservation de l'énergie. Il n'est donc pas étonnant que l'équation non relativiste de Friedmann s'y retrouve, puisqu'elle a été produite sur les mêmes arguments. L'équation de Friedmann est le terme 00 de l'équation d'Einstein. La constante *k* représente alors la *courbure de l'espace-temps* :

- si $k = 0$, l'espace-temps est plat, c'est-à-dire euclidien, dans lequel la géométrie est celle que nous connaissons bien ;
- si $k > 0$, la géométrie est sphérique, et l'Univers est obligatoirement fermé ;
- si $k < 0$, la géométrie de l'espace est hyperbolique, et l'espace est ouvert.

Dans un espace à *géométrie euclidienne* (plat, k = 0), la somme des angles d'un triangle vaut deux droits (180°), et la circonférence vaut 2 π r.



géométrie sphérique

Mais dans une *géométrie sphérique*, la somme des angles d'un triangle excède 180° (prenez un triangle rectangle au pôle nord, et s'étendant jusqu'à l'équateur : il est également rectangle en ses deux sommets sur l'équateur, donc il possède trois angles droits). La circonférence est inférieure à $2 \pi r$.

Enfin, dans une *géométrie hyperbolique*, c'est tout le contraire : la somme des angles d'un triangle est inférieure à 180°, et la circonférence est supérieure à $2 \pi r$.

### 4.3 Equation du fluide

Pour obtenir l'équation du fluide, c'est-à-dire celle concernant l'évolution de la pression, on utilise tout simplement la **première loi de la Thermodynamique**. Celle-ci relie l'énergie interne d'un système, au travail des forces de pression, et à la quantité de chaleur échangée avec l'extérieur :

$$dE + p\,dV = T\,dS$$

où dE est la variation d'énergie interne, p la pression, dV la variation de volume, T la température, et dS la variation d'entropie.

Dans le cas de l'Univers, il n'y a pas d'extérieur, donc pas d'échange possible. Par conséquent, dS = 0, et il reste :

$$dE + p\,dV = 0$$

On considère que le volume est sphérique, de rayon a. Alors $V = 4/3\ \pi\ a^3$. On en déduit immédiatement $dV/dt = 4/3\ \pi\ 3\ a^2\ da/dt$.

D'autre part, en notant ρ la masse volumique, on peut écrire la masse $m = \rho\ V = 4/3\ \pi\ a^3 \rho$. En vertu de l'équation d"Einstein $E = m\ c^2$, on a donc :

$E = 4/3\ \pi\ a^3\ \rho\ c^2$

$dE/dt = 4/3\ \pi\ 3\ a^2\ da/dt\ \rho\ c^2 + 4/3\ \pi\ a^3\ c^2\ d\rho/dt$

En reportant les expressions de dE/dt et dV/dt dans l'équation de base on obtient :<:p>

$4/3\ \pi\ 3\ a^2\ da/dt\ \rho\ c^2 + 4/3\ \pi\ a^3\ c^2\ d\rho/dt + p\ 4/3\ \pi\ 3\ a^2\ da/dt = 0$

| | |
|---|---|
| On simplifie par $4/3\ \pi\ a^2$ : | $3\ da/dt\ \rho\ c^2 + a\ c^2\ d\rho/dt + p\ 3\ da/dt = 0$ |
| On divise tout par $c^2$ : | $3\ da/dt\ \rho + a\ d\rho/dt + p/c^2\ 3\ da/dt = 0$ |
| On met en facteur les deux termes contenant la dérivée de a : | $3\ (\rho + p/c^2)\ da/dt + a\ d\rho/dt = 0$ |

Enfin, on divise par a, et on remplace les dérivées par la notation en point :

$$3\frac{\dot{a}}{a}\left(\rho + \frac{p}{c^2}\right) + \dot{\rho} = 0$$

C'est l'équation du fluide, qui donne une relation entre le facteur d'échelle *a*, la pression *p* et la densité du milieu ρ.

### 4.4 Equation d'état

On peut s'assurer que l'équation de Friedmann et l'équation du fluide ne suffisent pas encore à déterminer totalement le problème. Pour cela, il

nous manque une contrainte entre la pression et la densité, ce qui s'appelle une *équation d'état*.

L'équation d'état dépend des conditions physiques qui règnent dans le milieu considéré. Précisément, on considère trois sortes de situations :

- prépondérance du rayonnement ;
- prépondérance de la matière ;
- prépondérance du vide.

L'équation d'état associée est :

| | |
|---|---|
| prépondérance du rayonnement | $p = 0$ |
| prépondérance de la matière | $p = \rho c^2 / 3$ |
| prépondérance du vide | $p = -\rho_\Lambda c^2$ |

Dans les circonstances générales, où aucun élément ne dominerait les autres, l'équation d'état à considérer est un mélange de toutes les contributions.

L'équation d'état du vide peut paraître bien surprenante. ρ y représente la densité d'énergie du vide qui correspond à la constante cosmologique. ρ est par conséquent aussi une constante.

Tant qu'on ne pense pas à l'expansion de l'Univers, pas de problème. Mais si on la considère, on remarque que, lorsque les dimensions doublent, les volumes sont multipliés par 8. Puisque la densité d'énergie est constante, chaque centimètre cube du volume dilaté contient la même énergie que chaque centimètre cube du volume original. Et comme il y a 8 fois plus de centimètres cube, il y a 8 fois plus d'énergie…

Une conséquence fondamentale de ceci est que, même très faible, la contribution de la constante cosmologique se multiplie en même temps que l'espace au cours de l'expansion, alors que les autres énergies se diluent… Et forcément, elle finira par devenir prépondérante.

### 4.5 Equations du problème

Selon les circonstances dans lesquelles nous considérerons le problème, nous devrons donc ajouter une telle équation adaptée pour pouvoir le résoudre totalement. Ainsi, l'étude des modèles cosmologiques se réduit à la résolution de trois équations :

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{k c^2}{a^2} + \frac{\Lambda}{3} \qquad 3\frac{\dot{a}}{a}\left(\rho + \frac{p}{c^2}\right) + \dot{\rho} = 0 \qquad p = f(\rho)$$

Nous reprendrons ces équations pour obtenir les modèles.

Nous allons détailler quelques situations particulière, la dernière seulement présentant une constante cosmologique non nulle.

### 4.6 Autre présentation de l'équation de Friedmann

La vitesse de récession est proportionnelle à la distance : $v = H r$, en conservant la notation $r$ pour la distance. On peut écrire d'autre part, puisque la vitesse est un vecteur :

$$\vec{v} = \frac{|\dot{r}|}{|r|}\vec{r} = \frac{\dot{a}x}{ax}\vec{r} = \frac{\dot{a}x}{ax}\vec{r} = \frac{\dot{a}}{a}\vec{r}$$

Avec $v = H r$ on déduit :

$$H = \frac{\dot{a}}{a}$$

En reportant dans l'équation de Friedmann, on obtient la nouvelle forme de cette dernière :

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{k c^2}{a^2}$$

### 4.7 Densité critique

On appelle *densité critique* de l'Univers celle pour laquelle il serait plat, sans courbure. D ; donc lorsque $k = 0$ dans l'équation de Friedmann. En faisant le calcul, on trouve :

$$\rho_c = \frac{3 H^2}{8 \pi G}$$

Faisant le calcul pour $H_0$ = 72 km $s^{-1}$ $Mpc^{-1}$, on obtient :

$\rho_c$ = 0,974 $10^{-26}$ kg $m^{-3}$, soit pratiquement **$10^{-26}$ kg $m^{-3}$**. C'est la valeur annoncée plus haut.

On peut voir cette valeur sous un angle différent, en changeant d'unités : au lieu des kg $m^{-3}$, passons à des masses solaires et des méga parsecs. Ces unités-là sont représentatives de l'Univers. La conversion donne :

$$\rho_c = 2{,}938\ 10^{11}\ M \quad Mpc^{-3}$$

Cette valeur est remarquable. Nous avons vu que la masse typique d'une galaxie est de l'ordre de l'ordre de $10^{11}$ M . Or les distances entre les galaxies sont de l'ordre du mégaparsec… Donc la densité de l'Univers est de l'ordre de 1 galaxie par $Mpc^3$, soit $10^{11}$ M $Mpc^{-3}$.

La densité mesurée de l'Univers est donc proche, à un petit facteur près, de la densité critique. On aurait très bien pu trouver une valeur 10.000 fois plus grande ou plus petite, et ce n'est pas le cas.

L'évaluation donnée est actuellement trop grossière pour conclure, les incertitudes trop grandes. Mais cette proximité de la densité critique ne peut être un hasard. Puisque la densité critique est celle d'un Univers plat, l'Univers réel doit être de courbure très faible…

#### 4.8 Importance de la densité critique

$\rho_{vis}$ = 0,27 $10^{-31}$ g $cm^{-3}$ ; $\rho_c$ = 0,974&6 $10^{-26}$ kg $m^{-3}$ = 0,974&6 $10^{-29}$ g $cm^{-3}$, la proportion de masse visible par rapport à la masse critique est :

$\Omega_{vis} = \rho_{vis} / \rho_c$ = 0,27 $10^{-31}$ g $cm^{-3}$ / 0,974 $10^{-29}$ g $cm^{-3}$ = 0,277 $10^{-2}$

La densité de matière visible n'est donc que de l'ordre de 0,3 % de la densité critique.

Dans ces conditions, l'expansion devrait largement l'emporter, et l'Univers devrait se diluer indéfiniment. En effet, la densité sépare les modèles d'univers selon leur courbure :

- à la densité critique, l'Univers est plat, sa courbure est nulle (on a déterminé la densité critique justement en posant $k = 0$).
- si la densité est supérieure à la densité critique, la courbure de l'Univers est positive ; nous avons vu que l'attraction gravitationnelle que les galaxies exercent les unes sur les autres est suffisante pour stopper l'expansion, puis entamer une contraction (qui se terminerait éventuellement par un *Big-Crunch*).
- si la densité est inférieure à la densité critique, l'Univers est ouvert, son expansion se poursuivra éternellement.

La densité critique est donc un point de repère important, qui permet de savoir, à condition de mesurer correctement la densité de l'Univers, quel sera l'avenir de celui-ci.

Au lieu de la densité visible, il faudra considérer la *densité totale* de l'Univers, comprenant la matière visible (celle qui rayonne), la matière sombre (matière ordinaire qui ne rayonne pas), la matière noire, et même la densité d'énergie. Puisque l'équation de la Relativité Restreinte $E = m c^2$ traduit l'équivalence entre la matière et l'énergie, l'énergie elle-même, celle des photons, intervient dans l'éventuel freinage de l'expansion.

On note $\Omega_T = \rho_T / \rho_c$ le rapport de la densité totale à la densité critique. L'avenir de l'Univers sera donc déterminé selon que $\Omega_T$ sera plus petit, égal ou plus grand que 1.

## *5 Modèles*

Résoudre directement l'équation de Friedmann est une tâche bien difficile dans toute sa généralité, car les termes décrivant le contenu de l'Univers produisent des variations d'importance différente, et même parfois de sens opposé. La situation serait bien simplifiée si certains termes n'étaient pas présents. On ne peut évidemment pas les supprimer sans trahir l'interprétation physique de cette équation. Mais on peut envisager des circonstances particulières dans lesquelles, éventuellement, certain(s) terme(s) pourrai(en)t avoir une valeur très petite, négligeable devant celle d'un autre. Alors, on pourrait, sans faire une erreur grossière, négliger ce(s) terme(s).

Justement, les trois situations évoquées plus haut, définies par l'équation d'état, sont particulières en ce sens que l'une seulement des trois composantes de l'Univers y est importante, les autres négligeables. Pour la première, le rayonnement, c'est-à-dire les photons et les particules relativistes, domine la matière non relativiste et l'énergie du vide ; pour la deuxième, c'est la matière non relativiste qui domine ; la troisième enfin est applicable lorsque l'énergie du vide supplante la matière non relativiste et le rayonnement. Chacune de ces situations concerne une période de l'Univers, nous verrons plus loin dans quelles circonstances, et nous allons en étudier les principales propriétés.

Ces solutions sont intéressantes, en particulier lorsqu'on fait tendre t vers l'infini, car elles nous dévoileront ainsi le destin de l'Univers (à condition naturellement que les équations le décrivent correctement, et pour savoir cela, on s'appuie sur le passé).

### 5.1 Univers de matière

Ce premier cas décrit un univers dans lequel il n'y a pas de rayonnement, ou bien celui-ci est négligeable, et la constante cosmologique est nulle. Nous l'appliquerons dans deux situations :

1. l'Univers est constitué de gaz, à pression négligeable. Ce cas est réaliste assez longtemps après le Big Bang, lorsque l'expansion a suffisamment dilué la matière.
2. L'univers est constitué de galaxies, n'ayant pas d'interactions les unes avec les autres, et n'exerçant donc aucune pression.

Ces deux cas sont très semblables, et nous allons les étudier en considérant que k = 0, c'est-à-dire que l'Univers est plat (courbure nulle). Cette hypothèse est très proche de ce que nous connaissons à l'heure actuelle par les observations. Dans les deux cas, la pression est négligeable, et donc nous pourrons écrire l'équation d'état sous la forme vraiment simple : p = 0. Cette approximation est dite *poussière*, parce que la matière condensée en poussières présente une pression bien plus faible (voire nulle) que la même densité sous forme de gaz. Puisque l'énergie est basse, il s'agit de matière non relativiste.

| Equation de Friedmann | Equation du fluide | Equation d'état |
|---|---|---|
| $\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda}{3}$ | $3\frac{\dot{a}}{a}\left(\rho + \frac{p}{c^2}\right) + \dot{\rho} = 0$ | $p = 0$ |

L'équation du fluide se réécrit, puisque p = 0 : $\dot{\rho} + \frac{3\dot{a}}{a}\rho = 0$

C'est une équation à variables séparées, qui se met sous la forme : $\frac{\dot{\rho}}{\rho} = -3\frac{\dot{a}}{a}$

et dont la solution est : Log ρ = -3 Log a + Log k = Log ($k\ a^{-3}$), donc $\rho = k\ a^{-3}$

Lorsque t = 0, a = 1. Donc $\rho_0 = k$ et :

$$\rho = \frac{\rho_0}{a^3}$$

Ce résultat intermédiaire semble tout à fait évident : la densité baisse comme l'inverse du cube du rayon, c'est-à-dire comme l'inverse du volume de l'Univers.C'est tout à fait ce à quoi on aurait pu s'attendre.

Maintenant que nous avons l'expression de ρ, nous pouvons la reporter dans l'équation de Friedmann, avec toujours k = 0 et Λ = 0 :

$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\frac{\rho_0}{a^3}$ on en tire immédiatement : $\sqrt{a}\,\dot{a} = \sqrt{\frac{8\pi G\rho_0}{3}}$ qui s'intègre en : $a^{\frac{3}{2}} = \frac{3}{2}\sqrt{\frac{8\pi G\rho_0}{3}}\,t + cste$

On peut mettre cette solution sous une forme plus simple, en ignorant la constante ; puis on reporte le résultat dans l'expression de ρ, et enfin on détermine H :

$$a \propto \left(\frac{t}{t_0}\right)^{\frac{2}{3}} \qquad \rho_{mat} = \frac{\rho_0}{a^3} \propto \left(\frac{t_0}{t}\right)^2 \qquad H = \frac{\dot{a}}{a} = \frac{2}{3t}$$

Ces trois formules représentent donc le premier modèle résolu, dans le cas ou la pression est négligeable.

NB. Le symbole $\propto$ signifie : *proportionnel à*. Ainsi, a $\propto$ $(t / t_0)^{2/3}$ signifie : a est proportionnel à $(t / t_0)^{2/3}$, ou encore il suffit de multiplier toiutes les valeurs de $(t / t_0)^{2/3}$ par une même constante pour obtenir a. Cette notation évite simplement d'écrire la constante. Elle donne l'essentiel, qui est le comportement de la fonction.

### 5.2 Univers de rayonnement

Considérons maintenant le cas où l'Univers serait vide de matière non relativiste, et rempli seulement de rayonnement. La constante cosmologique sera encore nulle. Ici, le rayonnement englobe la matière relativiste, pour laquelle l'énergie cinétique est supérieure à l'énergie de masse. Dans ce cas, l'équation d'état adaptée est la même que pour le véritable rayonnement.

En considérant l'équation d'état appropriée pour le rayonnement, le système à résoudre est :

| Equation de Friedmann | Equation du fluide | Equation d'état |
|---|---|---|

$$\left(\frac{\dot a}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{k c^2}{a^2} + \frac{\Lambda}{3} \qquad 3\frac{\dot a}{a}\left(\rho + \frac{p}{c^2}\right) + \dot\rho = 0 \qquad p = \frac{\rho c^2}{3}$$

Faisant les mêmes calculs que précédemment, avec cette nouvelle équation d'état, en reportant la valeur de p dans l'équation du fluide, on arrive à : $\dot\rho + 4\frac{\dot a}{a}\rho = 0$

C'est une équation à variables séparées, qui s'intègre immédiatement en : Log ρ = -4 Log a + Log k = Log k $a^{-4}$ ρ = k $a^{-4}$

Ce résultat peut surprendre. Le volume augmente comme $a^3$, et la densité de rayonnement baisse comme $a^4$. Mais il faut comprendre qu'avec l'augmentation des longueurs, les longueurs d'onde aussi augmentent, et comme l'énergie d'un photon est proportionnelle à sa longueur d'onde, les photons perdent de l'énergie dans l'expansion. On a donc la contribution en $1/a^3$ pour l'augmentation de volume, et la contribution en 1/a pour la baisse d'énergie des photons. Le résultat, produit des deux, est explicable.

Reportant la valeur de ρ dans l'équation de Friedmann, on obtient l'équation : $a\dot a = \sqrt{\frac{8\pi G\rho_0}{3}}$

qui est à variables séparées, et s'intègre immédiatement. On en déduit le tableau des résultats, mis sous la même forme que précédemment :

$$a \propto \left(\frac{t}{t_0}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad \rho_{ray} = \frac{\rho_0}{a^4} \propto \left(\frac{t_0}{t}\right)^2 \qquad H = \frac{\dot a}{a} = \frac{1}{2t}$$

**Remarque** : ρ(t) a la même équation dans les deux cas, en $1 / t^2$.

### 5.3 Mélange

Considérer ensemble la matière et le rayonnement rend le système d'équations beaucoup plus difficile à résoudre, bien que la solution exacte existe. La densité s'écrit comme la somme des densités de matière et de rayonnement : $\rho = \rho_{mat} + \rho_{ray}$. Il n'y a cependant qu'une seule équation de Friedmann, qui fait intervenir la densité totale ρ. Pour obtenir des solutions simples, nous allons considérer que l'un des deux, matière ou rayonnement, domine l'autre. Le comportement du facteur d'échelle sera celui qui correspond au dominant, modifié d'une manière non significative par l'autre. Nous négligerons donc cette modification. Les équations pertinentes sont donc : $\rho_{mat}$ $1 / a^3$ et $\rho_{rad}$ $1 / a^4$.

**premier cas : domination du rayonnement**

Le rayonnement à dominé au début de l'Univers, lorsqu'il était très chaud. Nous avons vu que lorsque le rayonnement est seul, a(t) $t^{1/2}$. Il en sera approximativement de même ici, donc par substitution

$$\rho_{rad} \propto \frac{1}{a^4} \propto \frac{1}{t^2} \qquad \rho_{mat} \propto \frac{1}{a^3} \propto \frac{1}{t^{3/2}}$$

Observant les puissances de t pour les densités de matière et de rayonnement, on remarque que la densité de matière diminue moins vite (puissance 3/2 au dénominateur) que la densité de rayonnement (puissance 2). Ceci nous indique que, si le rayonnement est majoritaire au début, cette situation ne dure pas, car la densité de rayonnement baisse plus vite que celle de matière.

Cette simple constatation suffit pour comprendre que l'Univers à son début, très chaud, est dominé par le rayonnement, mais que par la suite, il sera dominé par la matière !

**second cas : domination de la matière**

C'est le cas lorsque l'Univers s'est suffisamment étendu pour que la densité du rayonnement soit tombée bien en-dessous de celle de la matière, avant la formation des grandes structures. C'est aussi le cas après la formation des galaxies et des amas, car les interactions entre les galaxies sont très faibles. La pression est alors nulle. Lorsque la matière est dominante, on a : a(t) $t^{2/3}$. Reportant cette valeur dans les formules qui donnent les densités, on obtient :

$$\rho_{rad} \propto \frac{1}{a^4} \propto \frac{1}{(t^{2/3})^4} = \frac{1}{t^{8/3}} \qquad \rho_{mat} \propto \frac{1}{a^3} \propto \frac{1}{(t^{2/3})^3} = \frac{1}{t^2}$$

On voit que la puissance qui gouverne la radiation est plus grande que celle qui gouverne la matière. Donc, là aussi, la radiation baisse plus vite que la matière. Nous avons supposé que la matière dominait dès le début ; cette domination s'amplifie donc au cours du temps. La domination de la matière est donc une situation stable, qui se renforce avec le temps.

### 5.4 Univers vide

Passons maintenant au cas où matière et rayonnement (ou matière relativiste) sont négligeables, mais dans lequel la constante cosmologique est non nulle. L'équation d'état liée à la constante cosmologique est $p = -\rho_\Lambda c^2$. Le problème est donc :

| Equation de Friedmann | Equation du fluide | Equation d'état |
|---|---|---|
| $\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda}{3}$ | $3\frac{\dot{a}}{a}\left(\rho + \frac{p}{c^2}\right) + \dot{\rho} = 0$ | $p = -\rho c^2$ |

La valeur de cette constante peut être très faible. Que se passe-t-il dans ce cas ? Nous avons vu ci-dessus que la contribution de la matière donne une variation de ρ en $1 / a^3$, et la contribution de rayonnement (ou matière relativiste) une variation en $1 / a^4$, ce qu'on a résumé par $\rho_{mat}$ $1 / a^3$ et $\rho_{rad}$ $1 / a^4$. Partant d'un état dans lequel la constante cosmologique est très petite, mais non nulle, l'Univers va évoluer par expansion, de telle sorte que le premier terme de l'équation de Friedmann, proportionnel à ρ, va tendre vers 0 en $1 / a^3$ ou $1 / a^4$, et le terme de courbure est divisé par $a^2$, donc tend vers 0 aussi. Par conséquent, les deux premiers termes seront négligeables au bout d'un certain temps. Par contre, la constante cosmologique, comme son nom l'indique, ne dépend pas de a, et sa valeur, même petite, deviendra forcément prépondérante au fil du temps.

Plaçons-nous donc dans cette perspective, où la constante cosmologique domine l'évolution de l'Univers. On considère donc que les deux premiers termes de l'équation de Friedmann sont nuls. Il reste :

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{\Lambda}{3}, \text{ ou } \frac{\dot{a}}{a} = \sqrt{\frac{\Lambda}{3}}$$

Λ doit être positive (elle est égale à un carré), donc elle contribue au taux d'expansion. Par conséquent, elle l'accélère.

C'est une équation à variables séparées, dont la solution s'obtient immédiatement :

$$\log a = \sqrt{\frac{\Lambda}{3}}\, t \quad \Rightarrow \quad a = \exp\left(\sqrt{\frac{\Lambda}{3}}\, t\right)$$

Le facteur d'échelle a est donc en croissance exponentielle $a = e^{kt}$, en posant k égal à la racine carrée. **C'est cette croissance qui représente l'inflation**. On définit l'inflation, de manière plus mathématique, comme *toute époque pour laquelle le facteur d'échelle croît de plus en plus vite*. Ceci signifie que la croissance s'accélère, et se traduit mathématiquement par la définition :

| inflation ä > 0 |
|---|

Même si la constante cosmologique est très petite, l'augmentation de a tend très rapidement vers l'infini.

**Exemple de croissance exponentielle** : la croissance économique.

Considérons une croissance de 10 % par an. La croissance exprimée en pourcentage est la variation du PIB par rapport au PIB lui-même. Le PIB p est analogue du facteur d'échelle a. Sa variation $\dot{p}$ correspond à la variation du facteur d'échelle $\dot{a}$. Et sa variation relative $\dot{p}/p$ est analogue de $\dot{a}/a$. Dans les deux cas, la variation relative est constante. Donc les solutions sont analogues :

$\dot{p}/p = 0{,}1$ $\quad p = \exp(0{,}1\, t) = e^{0{,}1\, t}$.

Au bout de 10 ans, p = 2,718 ; au bout de 20 ans, p = 7,38 ; au bout de 30 ans, p = 20 ; au bout de 40 ans, p = 55 ; au bout d'un siècle, p = 22.000…

Si vous avez placé 100 € en 1980 (ou l'équivalent…), vous aviez 272 € en 1990, 738 € en 2000, et 2.008 € en 2010. En 2080, vous totaliserez 22.026 €.

Naturellement, les ressources naturelles nécessaires pour assurer cette croissance sont exploitées au même niveau, alors que la planète est finie. Là où il y avait 100 voitures en 1980, il y en aura 22.000 en 2080…

Reprenant alors l'équation de l'accélération :

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}\left(\rho + \frac{3p}{c^2}\right)$$

a étant toujours positif, le terme $\ddot{a}/a$ est positif. Donc, le membre de droite doit l'être aussi. Puisqu'il est précédé du signe moins, et que les constantes devant la parenthèse sont positives, il faut que le terme entre parenthèses soit négatif aussi :

$$\rho + \frac{3p}{c^2} < 0 \quad \Rightarrow \quad p < \frac{-\rho c^2}{3}$$

La pression doit être négative ! Comment peut-on imaginer une pression négative ? La pression est la force appliquée par unité de surface. Mais on n'a jamais considéré qu'une force qui pousse… Si on envisage une force qui tire, elle est dans l'autre sens, donc négative. Une pression négative peut donc s'envisager.

L'inflation débute lorsque la constante cosmologique prend le dessus sur les deux autres termes dans l'équation de Friedmann. Elle produit une croissance exponentielle de l'Univers, de plus en plus rapide. Si elle avait duré jusqu'à maintenant, l'Univers serait infiniment plus dilué qu'il n'est. Ce qui prouve que l'inflation s'est arrêtée, et nous pose la question de savoir pourquoi et comment (tout comme se pose la question de savoir pourquoi et comment elle a débuté).

**Utilité de l'inflation**

L'inflation est une solution mathématique aux deux problèmes de la courbure et de l'horizon. En ce sens, elle est déjà intéressante. Elle est **autorisée** par les équations, mais **pas obligatoire**. Ceci lui donne donc un certain aspect *ad-hoc*. L'idéal serait de lui trouver maintenant une solide justification physique, qui la rendrait naturelle.

L'inflation étant définie par ä > 0, l'inflation provient de la constante cosmologique. Mais celle-ci n'a pas, pour l'instant, de justification physique. Historiquement, Einstein l'a introduite pour de mauvaises raisons, qu'il a regrettées par la suite : elle lui a permis de stabiliser artificiellement (et provisoirement) un Univers qui ne demande qu'à bouger. Plusieurs idées se font jour maintenant pour l'interpréter.

Tout d'abord, la valeur de la *constante* cosmologique **doit** varier ! Elle n'est constante que dans certaines tranches de temps bien définies… Cette variation permet de faire démarrer, puis d'arrêter l'inflation. Il nous faut donc trouver une interprétation qui provoque ces variations. Plusieurs voies s'ouvrent par des perspectives de physique théorique, mais cette physique n'est pas encore validée par les expériences, qui n'atteignent pas les niveaux d'énergie nécessaires. Aussi, les explications que l'on peut proposer restent encore spéculatives, mais sont des axes de recherche intéressants.

Une telle situation entraîne donc une augmentation des distances extrêmement rapide, beaucoup plus rapide que l'expansion normale. C'est cette propriété de l'inflation qui va permettre de résoudre plusieurs problèmes que pose le modèle standard cosmologique.

Pour résumer :

| | |
|---|---|
| domination du rayonnement | a $(t / t_0)^{1/2}$ |
| domination de la matière | a $(t / t_0)^{2/3}$ |
| domination de la constante cosmologique | a = exp(k t) |

**5.5 Equation des omégas**

La constante cosmologique a donc un effet semblable, mais opposé, à celui de la matière (qui relentit l'expansion alors que la constante cosmologique l'accélère). Il apparaît donc naturel, pour définir sa contribution, de lui faire correspondre un rapport $\Omega_\Lambda$ à la densité critique. Pour cela, considérons que la densité ρ et la courbure k sont nulles. Dans l'équation de Friedmann, il ne reste que $H^2 = \Lambda / 3$, c'est-à-dire $\Lambda / 3 H^2 = 1$. Si donc, la constante cosmologique était seule en cause, la densité de l'Univers serait critique, et s'exprimerait par cette valeur. On pose donc par définition $\Omega_\Lambda = \Lambda / 3 H^2$. Faisant de même pour le terme de courbure, l'équation de Friedmann se réduit à $H^2 = k / a^2$ ; d'où l'on tire : $k / a^2 H^2 = 1$. On en déduit la définition du rapport $\Omega_k = - k / a^2 H^2$.

En reprenant la valeur de Ω, on obtient successivement : $\Omega = \rho / \rho_c$ où $\rho_c = 3 H^2 / 8 \pi G$ ; donc $\rho = 3 H^2 / 8 \pi G \Omega$ ;

et en reportant ces valeurs dans l'équation de Friedmann, il vient :

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{k}{a^2} + \frac{\Lambda}{3} = \frac{8\pi G}{3} \times \frac{3H^2}{8\pi G}\Omega - \frac{-a^2 H^2 \Omega_k}{a^2} + \frac{3H^2\Omega_\Lambda}{3}$$

$H^2 = H^2 \Omega + H^2 \Omega_k + H^2 \Omega_\Lambda$

et l'équation de Friedmann donne tout simplement :

$$\Omega + \Omega_k + \Omega_\Lambda = 1$$

## *6 Une histoire thermique de l'Univers*

On parle d'histoire thermique parce que la température est décroissante au cours du temps, et qu'elle détermine les phénomènes physiques successifs qui peuvent se dérouler à chaque instant. Dans cette optique, la température est équivalente au temps.

Le début de l'Univers a été nommé *Big Bang* par Fred Hoyle et par dérision ! Fred Hoyle était partisan de la création continue, qui explique que les vides créés par l'expansion sont comblés par une création de matière, qui se produit en permanence. Il n'est pas nécessaire d'en créer beaucoup pour cela : le calcul donné plus haut de la vitesse d'expansion montre qu'un atome d'hydrogène par année-lumière, de temps en temps, suffit amplement. Mais cette théorie n'a pas un support observationnel suffisant, et elle est abandonnée par l'immense majorité des chercheurs. Mais Fred Hoyle, au cours d'une émission de radio et voulant se moquer de Georges Lemaître créateur de la théorie concurrente, a inventé le terme de Big Bang qui a fait florès.

Nous allons donc décrire ce qui s'est passé, si la théorie fondée sur le Big Bang est correcte, au moins en grande partie. Et le tout début pose déjà problème : en effet, la densité et la température de l'Univers étaient alors si élevées, que la physique que nous connaissons ne peut pas suivre. Nos connaissances proviennent d'expériences faites dans les grands accélérateurs de particules, le LHC atteignant aujourd'hui les 7 TeV (il doit passer à 14 TeV bientôt). Ceci correspond à une température de l'ordre de 8 $10^{16}$ K soit 80 millions de milliards de degrés ! C'est une température impressionnante, mais tout de même, en remontant le temps, elle a dû être dépassée. On ne peut pas faire d'expériences, à l'heure actuelle, à des températures plus élevées. On est donc incapable de dire ce que pouvait être l'état de l'Univers lorsque sa température était plus élevée que cette limite.

Résumé sous forme de tableau

| **événement** | **énergie** | **température** | **z** | **date** |
|---|---|---|---|---|
| ère de Planck | | | | 0 |
| temps de Planck | $10^{28}$ eV | $10^{32}$ K | $10^{32}$ | $10^{-43}$ s |
| transition de phase Grande Unification | $10^{23}$ eV | $10^{27}$ K | $10^{27}$ | $10^{-35}$ s |
| transition rayonnement-matière | | | | |
| quarks | $10^{21}$ | $10^{25}$ | $10^{15}$ | $10^{-11}$ s |
| baryogénèse | $> 10^{9}$ | 12.000 milliards de K | | $< 4\ 10^{-6}$ s |
| formation des hadrons (transition QCD) | $4\ 10^{8}$ eV | 4.640 milliards de K | | $4\ 10^{-6}$ s |
| annihilation des électrons | $10^{6}$ eV | 11,6 milliards de K | $10^{10}$ | 1 s |
| nucléosynthèse | $6\ 10^{4}$ eV | 0,69 milliards de K | $10^{5}$ | 3 min |
| prépondérance de la matière | 0,8 eV | 9.280 K | | 50.000 ans |
| recombinaison | 0,26 eV | 3.000 K | 1.100 | 500.000 ans |
| découplage | | | 1.100 | en fin de recombinsaison |
| formation des structures | $10^{-3}$ eV | 12 K | 10 ? | 1 milliard d'années |
| aujourd'hui | $2{,}349\ 10^{-4}$ eV | 2,725 K | 0 | 13,7 milliards d'années |

La première ligne, coloriée en violet, indique que la physique nécessaire pour décrire l'Univers est encore inconnue.

### 6.1 Le modèle de Big Bang de base

A partir de l'hypothétique Big Bang, l'expansion commence, et la température baisse, à partir d'une valeur éventuellement infinie, pour atteindre sa valeur actuelle. Pour expliquer l'évolution de l'Univers, nous avons recours à des expériences qui nous permettent de reproduire en laboratoire des conditions proches de celles qui régnaient à certaine époque dans l'Univers. Mais nos expériences sont limitées, et ne peuvent prétendre atteindre les conditions initiales. Relativement à nos moyens physiques, nous pouvons diviser l'histoire thermique de l'Univers en trois époques :

- la période récente, où l'énergie ambiante ne dépasse pas celle que l'on peut produire dans nos instruments, et où le *Modèle Standard* de la théorie des particules est bien validé. En utilisant donc la Relativité Générale et le Modèle Standard, nous pouvons produire une théorie cosmologique bien assise sur les expériences ;
- la période intermédiaire, où l'énergie disponible surpasse tout ce qu'on peut réaliser dans les accélérateurs les plus puissants, mais pour laquelle on peut extrapoler le Modèle Standard de manière assez fiable, ou utiliser des théories qui s'appuient sur lui mais vont plus loin, enrichies de principes élargis ou nouveaux, comme par exemple les *théories supersymétriques*. La Relativité Générale garde sa pertinence ;
- la période plus ancienne, où l'énergie disponible est très élevée, et où la théorie actuelle ne permet même pas de s'aventurer. Dans ce domaine, la densité de l'Univers est si élevée, que la gravité prend un rôle de premier plan. Il est donc indispensable d'utiliser une théorie la décrivant correctement. Malheureusement, il faut également considérer le comportement des particules, qui est régi par la Mécanique Quantique. Et actuellement, nous ne disposons pas d'une théorie quantique de la gravitation, malgré presque un siècle de recherches…

Les théories supersymétriques supposent, et posent donc comme principe fondateur, que chaque boson possède un fermion associé et réciproquement. On dit que ce sont des *partenaires supersymétriques*. Elles englobent le modèle standard, dont elles reprennent donc les résultats, mais vont plus loin. Les partenaires supersymétriques des particules connues ne sont pas des particules connues, c'est un premier résultat de ces théories. Il faudrait donc découvrir de nombreuses particules nouvelles, ce qui n'a pas été le cas jusqu'à présent. Ceci, soit parce que ces particules n'existent pas -la théorie étant basée sur un mauvais principe-, soit parce que ces particules sont trop massives pour que les

accélérateurs utilisés jusqu'à maintenant aient pu les mettre en évidence. Beaucoup de physiciens penchent pour cette seconde hypothèse, mais ceci ne suffit pas pour valider la théorie ! Ces théories sont spéculatives.

Même si les théories supersymétriques sont invalidées par des expériences futures, les physiciens gardent une bonne confiance dans l'unification des forces, qui s'esquisse dans les résultats actuels.

Les caractéristiques globales de l'Univers qui se conservent sont : **la charge électrique, la charge leptonique, et la charge baryonique**. La charge électrique globale était nulle, puisqu'elle se conserve, et qu'elle est nulle aujourd'hui. La charge leptonique est la différence entre le nombre de leptons et le nombre d'anti-leptons. Il en est de même de la charge baryonique. Ces particules se créant par paires, ces deux charges sont également nulles. Toutefois, il est possible que les particules et les antiparticules correspondantes n'aient pas exactement la même probabilité de se désintégrer (se désintégrer signifie se transformer en d'autres particules, ne pas confondre avec l'annihilation particule-antiparticule). Si ces probabilités diffèrent, il y aura un excès de la particule (resp. antiparticule) si elle se désintègre moins facilement que l'antiparticule (resp. particule).

### 6.2 Le tout début : ère de Planck

Immédiatement après le Big Bang, si celui-ci a un sens, la densité est telle que la gravitation est très forte, et la description de l'Univers ne pourrait se faire qu'à l'aide d'une théorie quantique ET relativiste, qui n'existe pas encore. Avant le temps de Planck, soit $10^{-43}$ s, c'est donc l'inconnu.

Les théories spéculatives actuelles prévoient que toutes les interactions s'unifient (*Théorie de Grande Unification*). Elles ont donc la même intensité (l'interaction faible ne mérite plus son nom…). La gravitation, si faible actuellement, aurait pu être de même intensité que l'interaction électromagnétique. En ces temps reculés (une infime fraction de seconde après la singularité), l'Univers observable (ce qualificatif n'ayant alors guère de sens) était de l'ordre de grandeur de la taille d'une particule…

A ce niveau de température, l'énergie suffisante pour créer des paires particule-antiparticule est disponible. Même le champ gravitationnel intense aurait pu en engendrer. De très nombreuses particules diverses (électrons, muons, quarks, divers hadrons, divers mésons…) peuvent être créées ainsi, leur masse le permet. Mais les hadrons et les mésons sont formés de quarks. Et les quarks ont la propriété de liberté asymptotique, c'est-à-dire que plus ils sont proches, plus faible est la force les liant. Dans les conditions de densité qui nous intéressent, les quarks sont extrêmement compressés, et par conséquent libres. Donc les hadrons et mésons ne peuvent être stables, et le contenu de l'Univers est constitué uniquement de photons, de leptons (électrons, muons, neutrinos, et leurs antiparticules), et de quarks.

Actuellement, les neutrinos interagissent très peu avec les autres particules. La moitié d'un flux de neutrinos pourrait ressortir après avoir traversé une année-lumière de plomb ! Mais dans les conditions de l'immédiat après Big Bang, la densité est telle que même les neutrinos interagissent énormément avec les autres particules. On est donc en présence d'une relation d'équilibre thermique : toutes les particules sont à la même température, ce qui signifie qu'elle vont toutes à la même vitesse moyenne. A ce niveau d'énergie, elles sont bien sûr relativistes, et se comportent comme un rayonnement.

Il se crée en permanence des paires, et toutes les particules interagissent, se désintègrent éventuellement, et s'annihilent.

### 6.3 Transition de phase Grande Unification

Un peu plus tard, à une énergie de $10^{24}$ eV ($10^{28}$ K), la gravitation se découple des autres interactions. On le sait par l'extrapolation des courbes connues actuellement, qui montrent que les forces doivent s'équilibrer à ce niveau d'énergie. Son intensité va diminuer au fil de l'expansion, pour arriver aujourd'hui à un niveau extrêmement bas par rapport aux autres interractions.

Les forces forte, faible et électromagnétique sont encore unifiées. Elles se séparent à une énergie d'une centaine de GeV, accessibles à nos instruments.

Le décrochage de la gravitation des quatre autres interactions, avec la baisse de température, est analogue d'un gel : avant, il y avait une grande symétrie entre les particules ; un grand désordre règne. Après, un état plus lisse, plus ordonné le remplace. Dans le gel de l'eau en glace, les molécules d'eau (qui ne sont pas symétriques) sont libres de prendre n'importe quelle position et n'importe quelle orientation avant, puis sont figées dans un réseau cristallin orienté après. Peut-être s'est-il passé quelque chose de ce genre, si ces théories sont représentatives, et si rien n'a empêché d'atteindre de telles densités et températures.

### 6.4 Ere des quarks : plasma quarks-gluons

Lorsque la température de l'Univers était de plusieurs dizaines de milliards de degrés, les chocs entre nucléons auraient été tellement violents, qu'ils n'auraient pu être stables. La théorie des particules élémentaires nous indique que l'Univers devait donc être rempli d'un plasma quarks-gluons : les quarks sont les constituants des nucléons, dans lesquels ils sont confinés par l'interaction forte ; les particules médiatrices de cette interaction sont les gluons.

Lorsque la densité augmente fortement, les quarks sont forcés de se rapprocher. Or l'interaction forte entre deux quarks est d'autant plus forte qu'ils sont plus éloignés (contrairement au comportement des autres forces, qui faiblissent avec la distance croissante). Donc, lorsque les quarks se rapprochent, ils gagnent en liberté. On parle de liberté asymptotique. Les quarks qui constituent les nucléons ne sont plus liés, les nucléons n'ont donc plus d'existence propre. Les gluons qui collaient les quarks sont eux-mêmes libres, et l'ensemble forme un plasma quarks-gluons.

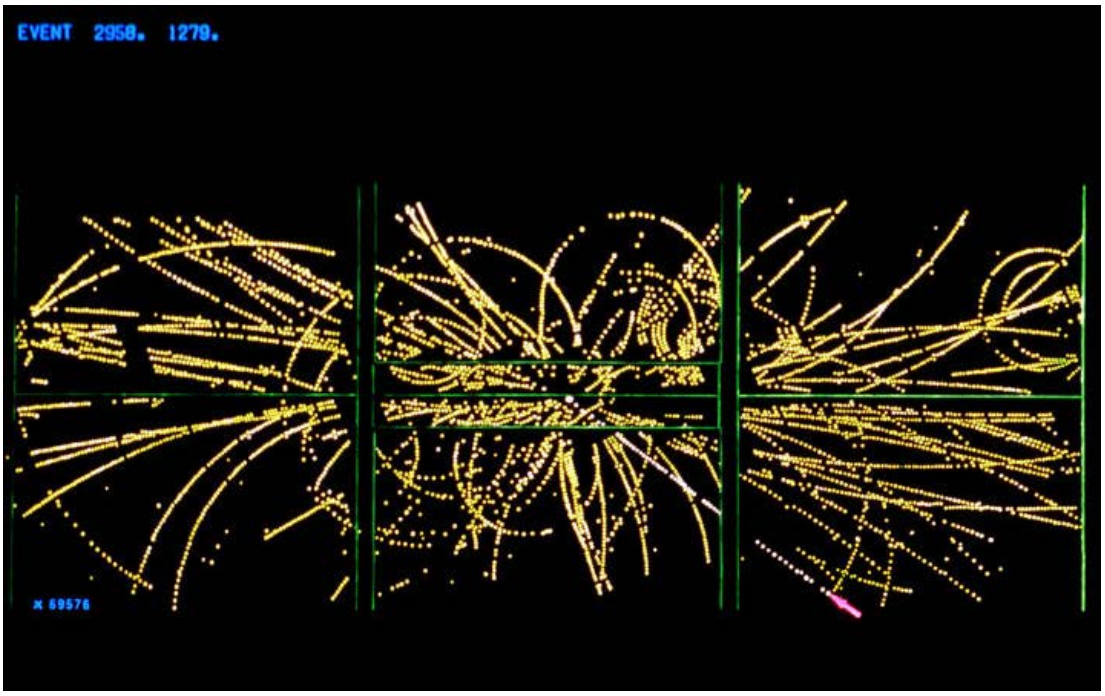
La preuve expérimentale d'existence de ce plasma est récente. La première a été réalisée au CERN en février 2000, avec des noyaux de plomb accélérés à 33 TeV, soit une température de l'ordre de 1.500 milliards de degrés. Depuis, l'expérience a été refaite aux Etats-Unis, et maintenant au CERN à nouveau, avec des noyaux de plomb à haute énergie (5 GeV $fm^{-3}$, alors que le seuil est de 3 GeV $fm^{-3}$).

La preuve expérimentale est donnée par deux événements permettant de tracer la création du plasma. Lorsque les quarks sont ainsi libres, les c et c' ne forment plus le J / Ψ, mais restent séparés. L'absence de J / Ψ est donc un signe de la formation du plasma, et a été observée dans les collisions réalisées au CERN. D'autre part, lorsque le plasma se détend, sa densité baisse, et les quarks s'éloignent et perdent leur liberté. Ils sont alors obligés de se regrouper pour former des hadrons. Or l'énergie disponible avant la détente a permis la formation de quarks lourds, les quarks étranges (s). On devrait donc observer la formation de hadrons étranges, combinaisons de ces quarks. L'expérience WA97 a ainsi mis en évidence un taux multiplié par 50 de la production des particules Ω (formées de trois quarks sans u ni d), et de leurs antiparticules Ω' (formées des antiquarks correspondants).

Pendant les quelques 20 à 30 micro-secondes qui suivirent le Big Bang, l'Univers devait donc être formé de ce plasma quarks-gluons. A ce stade, il ne contient, outre les quarks et gluons, que des leptons (électrons et positrons, neutrinos et anti-neutrinos), et bien sûr des photons. Les particules composites (nucléons, mésons…) ne peuvent se former, car l'énergie disponible est supérieure à l'énergie de liaison de leurs constituants. De plus, toutes ces particules sont en équilibre thermique. L'équilibre thermique est réalisé lorsque toutes les particules ont la même vitesse moyenne. Pour cela, il faut que leurs interactions soient très fréquentes, pour qu'elles échangent de l'énergie cinétique.

On sait que les neutrinos interagissent extrêmement peu avec les autres particules. Mais à cette époque, la densité était tellement élevée, que même les neutrinos subissaient d'incessantes collisions, qui égalisaient leur énergie avec celle des particules qu'ils rencontraient. Ainsi, l'équilibre thermique était réalisé entre toutes les espèces de particules. Une seule température était suffisante pour décrire l'Univers.

Pour se faire une idée un peu plus précise de ce que pouvait être l'Univers dans ces conditions, on peut regarder une photo prise à l'aide d'un accélérateur de particules.




Découverte du boson W au Super synchrotron à protons (SPS) du CERN en 1983, équipe expérimentale UA1, dirigée par Carlo Rubbia

Cette image peut donner une idée de ce que doit être le plasma quarks-gluons. Ici, deux particules se sont heurtées, et ont donné naissance à toutes les autres. Les trajectoires courbées indiquent la charge électrique des particules, déviées dans le champ magnétique de l'instrument. Dans l'Univers primordial, ce genre d'événement devait se produire à tout instant et en tout lieu…

### 6.5 Découplage des neutrinos

Cet équilibre thermique a une conséquence importante : il a effacé toutes les propriétés antérieures de l'Univers. Ce qui nous permet de parler de la suite avec assez d'assurance, même dans l'ignorance où nous sommes des premiers instants de l'Univers ! Cet équilibre ne pouvait durer. Avec l'expansion, la densité chutait rapidement, et elle s'est trouvée bientôt trop faible pour maintenir un taux élevé de collisions des neutrinos. Alors, ceux-ci se sont découplés des autres particules (photons compris), à la température courante du milieu, et ont commencé à se refroidir en fonction de l'expansion. Par découplage, on entend que les interactions entre ces deux types de particules cessent, et donc que les vitesses moyennes de chaque classe deviennent indépendantes. Par conséquent, leurs températures peuvent se différencier.

Les neutrinos se sont découplés lorsque la température est tombé en-dessous de 4 MeV, soit en-dessous de 50 milliards de degrés Kelvin (1 eV correspond à 11.600 K, donc $T = 11.600 \times 4\ 10^6$ K = $46{,}4\ 10^9$ K). Ceci s'est passé au temps $t = (1\text{ MeV} / T)^2$ s = $(1\text{ MeV} / 4\text{ MeV})^2$ s = 0,625 s

Les neutrinos ont alors pris leur indépendance, conservant leur profil d'équilibre thermique, et se refroidissant en fonction de l'expansion. Nous verrons que les photons ont été réchauffés par la suite. Mais les neutrinos n'en ont pas profité. Aussi, leur température aujourd'hui est-elle plus basse que celle des photons, dans un rapport 0,71, ce qui fait $T_\nu = 2{,}725 \times 0{,}71 = 1{,}934$ K.

Les neutrinos primordiaux constituent donc un fond cosmologique de même nature que les photons. Mais étant donné la faible probabilité d'interaction des neutrinos, et leur basse température, il faudra améliorer fortement nos moyens de détections si on veut un jour les observer. Leur observation sera donc l'un des grands enjeux de la cosmologie future.

### 6.6 Formation des baryons (baryogénèse)

La température est suffisamment descendue pour que les quarks commencent à ressentir l'interaction forte, puisque la densité plus faible leur permet de s'éloigner un peu. Protons et neutrons se forment donc, ainsi que leurs antiparticules antineutrons et antiprotons. Aussitôt, lorsque des protons rencontrent des antiprotons, les paires commencent à s'annihiler, mais ceci n'est pas instantané. Il s'établit donc une réaction d'équilibre, qui permet de maintenir une proportion de ces particules.

A ce stade, l'Univers contient des neutrons, antineutrons, protons, antiprotons, électrons positrons, neutrinos et antineutrinos. Toutes ces particules sont libres, car l'énergie encore disponible ne leur permet pas de s'assembler.

### 6.7 Annihilation des protons

Lorsque la température est tombé en-dessous de l'énergie suffisante pour créer des paires proton-antiproton et neutron-antineutron, cette création cesse. Et l'annihilation continue… Puisque ces particules se sont formées pas paires, on penserait qu'il y en ait exactement le même nombre : autant de protons que d'antiprotons, et ils devraient s'anihiler en totalité ; l'Univers serait vide… Mais une légère brisure de symétrie (différence entre le nombre de protons et le nombre d'anti-protons à leur formation) permet à un proton sur un milliard de subsister.

Ce phénomène de brisure de symétrie n'est pas totalement compris actuellement, et les recherches continuent pour lui trouver une explication vraiment satisfaisante.

### 6.8 Annihilation des électrons

On passe maintenant en-dessous de la température (énergie) nécessaire pour créer des paires électron-positron. La création est en panne, mais l'annihilation continue. Puisqu'à chaque électron créé correspond un positron, il y a le même nombre de chaque. Ce qui veut dire qu'ils vont maintenant se retrouver et s'annihiler. Il ne devrait donc plus rester le moindre électron…

Pourtant, on en observe aujourd'hui. Pour jusitifer cette présence, il faut considérer que l'annihilation n'a pas été parfaite. Mais s'il avait subsité autant de positrons que d'électrons, on verrait aujourd'hui encore des annihilation, qui s'accompagneraient d'émission de lumière (deux fois l'énergie de masse de l'électron). Et ce n'est pas le cas. Donc il ne reste plus aujourd'hui que des électrons, et point de positrons. Il faut admettre qu'il y a eu là aussi une brisure de symétrie, phénomène qui a favorisé les électrons par rapport à leurs antiparticules. Le calcul montre qu'il suffit d'une disymétrie de $10^{-9}$ pour assurer la quantité d'électrons observés actuellement. Il faut dire qu'au début de l'expansion, l'énergie était telle qu'une quantité énorme de paires électron-positron a été créée. Autant que de photons.

Et aujourd'hui, il reste exactement autant d'électrons que de protons, puisque l'Univers est globalement neutre. Si ce n'était pas le cas, l'Univers aurait une charge électrique, positive si les protons l'emportaient numériquement sur les électrons, négatives dans le cas contraire.

### 6.9 Nucléosynthèse

Un petit calcul très simple est édifiant. Considérons la quantité de lumière émise par une galaxie ; elle correspond à l'énergie produite par fusion de l'hélium (les autres fusions sont moins énergétiques, et durent bien moins longtemps, donc sont négligeables). Supposons que les étoiles de cette galaxie existent toutes depuis l'origine de l'Univers, soit 10 milliards d'années. Calculons combien d'hélium elles ont produit :

> Considérons la quantité L de lumière émise par une galaxie typique, par fusion de l'hydrogène en l'hélium. Elle est de l'ordre de $L = 4\ 10^{36}$ W $= 4\ 10^{36}$ J $s^{-1}$. Une année *a* représente $a = 3\ 10^7$ s. Calculons la masse d'hélium produite pendant A = 10 milliards d'années ($A = 10^{10}\ a = 3\ 10^{17}$ s). On sait que la fusion d'un kilogramme d'hydrogène produit une énergie de $\varepsilon = 6\ 10^{14}$ J. Le taux d'énergie par kilogramme est donc $\tau = 6\ 10^{14}$ J $kg^{-1}$. Donc : $M_{He} = L\ A / \varepsilon = 4\ 10^{36}$ J $s^{-1} \times 3\ 10^{17}$ s / $6\ 10^{14}$ J $kg^{-1} = 2\ 10^{39}$ kg.

La masse typique d'une galaxie est de l'ordre de $3\ 10^{41}$ kg. Donc la masse d'hélium produite par les étoiles ne représente que la fraction $2\ 10^{39}$ kg / $3\ 10^{41}$ kg, soit à peu près 1 % de la masse de la galaxie. Ceci ne peut **en aucun cas** justifier les 24 % observés, d'autant plus que l'hélium produit reste confiné à l'intérieur de l'étoile, sauf si celle-ci explose, ce qui n'est le cas que pour les plus massives, donc une faible proportion d'entre elles. Ceci diminue d'autant la quantité d'hélium stellaire présente dans l'Univers.

Un argument supplémentaire s'ajoute : si l'hélium observable dans l'Univers provenait des étoiles, il s'accompagnerait d'autres éléments, produits aussi en abondance. La proportion de carbone et d'oxygène, éléments les plus légers produits par les étoiles après l'hélium, serait bien plus forte que ce qui est observé. Donc, l'hélium présent actuellement dans l'Univers ne provient que pour une infime partie de la fusion stellaire.

Il faut donc invoquer un autre mécanisme pour expliquer l'abondance d'hélium. Revenant aux observations, on peut aussi constater que la proportion d'hélium est pratiquement la même dans les objets très vieux (amas globulaires) et jeunes. Donc, l'hélium est présent depuis la formation de l'Univers, il est primordial en très grande partie.

Le modèle du Big Bang chaud permet d'expliquer cela. En effet, l'Univers était très chaud et dense au début, ce qui représente des conditions proches de celles que l'on rencontre aujourd'hui au cœur des étoiles. Les mêmes causes produisant les mêmes effets, la fusion de l'hydrogène s'y est réalisée pareillement.

Georges Gamow a pensé qu'avec le refroidissement, les protons ont capturé des neutrons, et que certains de ces derniers, par décroissance béta, se sont transformés en protons. Il croyait expliquer ainsi **tout** ce qu'on voit aujourd'hui.

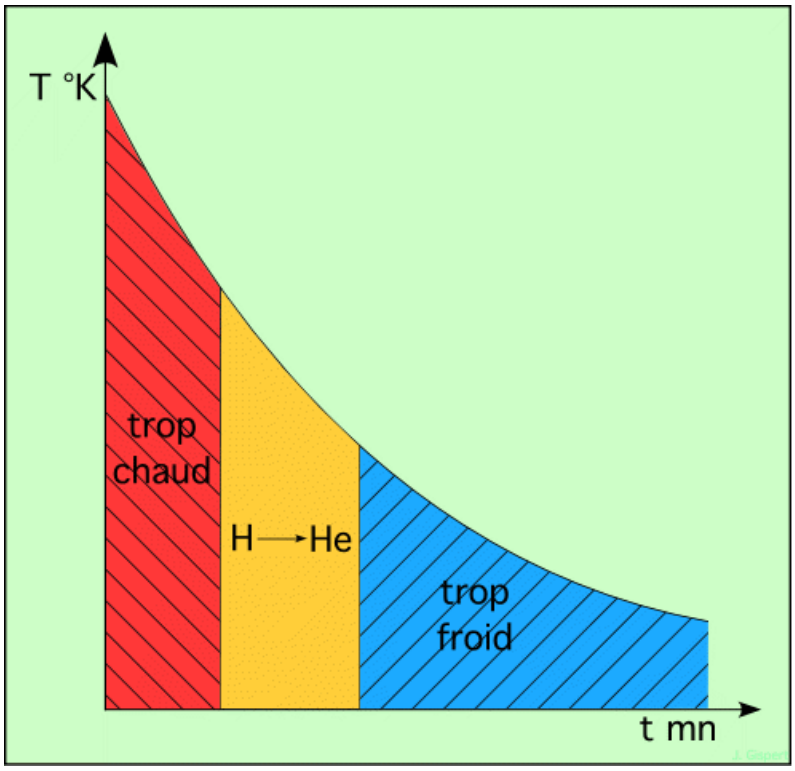
Mais ceci ne peut pas se produire, tout simplement parce que la température a baissé trop vite. Après formation de l'hélium, et d'un peu de lithium, il ne restait plus assez d'énergie pour former les éléments plus lourds.

> La température de l'Univers n'a fait que décroître. Lorsqu'elle était très élevée, il n'y avait que de l'hydrogène, rien d'autre à fusionner. Il a fallu attendre que la température baisse suffisamment pour former de l'hélium. Lorsque celui-ci a été présent, la température était devenue trop basse pour qu'il fusionne à son tour… C'est pourquoi l'Univers primordial ne pouvait contenir que de l'hydrogène, une proportion forte (1/4) d'hélium, et des traces de lithium, de deutérium.

Il a fallu trouver un autre (ou plusieurs) mécanisme(s) pour expliquer tout ce qui est plus lourd que le lithium, c'est-à-dire la quasi-totalité des éléments chimiques naturels.

Dans une étoile, les conditions sont stables. Le milieu est en équilibre. Par contre, l'Univers primordial était en expansion rapide, et par conséquent les conditions thermodynamiques y changeaient rapidement. Il a été d'abord si chaud que le rayonnement de corps noir qu'il produisait détruisait tout atome composé qui aurait tenté de se former. Impossible d'avoir quoi que ce soit d'autre que de l'hydrogène (proton seul). Puis, la température a baissé, et les photons étaient donc un peu moins énergétiques. Jusqu'à ce qu'ils ne le soient plus assez pour briser un atome d'hélium. Ceux-ci se formaient toujours, mais n'étaient plus détruits. Donc ils commençaient à s'accumuler. Jusqu'à quand ?

La température baisse toujours. On sait bien que dans les étoiles, elle doit être au-dessus de 10 millions de degrés pour permettre la fusion de l'hydrogène. Donc, lorsque la température est tombée en-dessous de cette valeur approximative, la fusion de l'hydrogène en hélium s'est achevée, et le taux d'hélium produit s'est donc figé.




Figure&1.1: Evolution de la température en fonction du temps

La figure 1.1 représente la baisse de température T en fonction du temps t. Dans la partie en rouge, l'Univers était trop chaud, les photons trop énergétiques, et les noyaux juste formés étaient immédiatement brisés. Dans la partie jaune, le taux de destruction baisse, et donc de plus en plus de noyaux subsistent. Enfin, dans la partie bleue, il faut trop froid pour autoriser la fusion, et donc la création s'arrête.

Par conséquent, la phase de production de l'hélium (et avec lui d'un peu de deutérium, de lithium et d'hélium 3) n'a duré que peu de temps, et cette durée correspond à la proportion de ces éléments que l'on observe aujourd'hui. Par conséquent, ces proportions nous donnent un critère important pour déterminer pendant combien de temps la température est resté dans la fourchette permettant une production d'hélium. On estime que la nucléosynthèse s'est terminée 100 s après le Big Bang.

L'excellente identité entre le taux calculé et le taux mesuré est un des grands arguments en faveur des théories de Big Bang.

## *7 Transition rayonnement-matière*

La densité de l'univers était telle, jusqu'à cette étape, que le rayonnement et la matière étaient en équilibre thermique. Les particules de matière elles-mêmes étaient tellement énergétiques (vitesses relativistes), que leur onde quantique était prépondérante, et qu'elles se comportaient comme un véritable rayonnement. Cette période de l'Univers est nommée *ère du rayonnement*. Elle a pris fin lorsque les électrons ont été désactivés en s'associant avec les protons. Ceci les a privés de leurs interactions avec les photons, et a donc rompu le mécanisme d'équilibrage thermique.

### 7.1 Recombinaison

Après la nucléosynthèse, les noyaux atomiques existaient, mais les électrons ne leur étaient pas liés, la température étant trop forte. Dès qu'une capture avait lieu, un photon ou un choc venait fournir l'énergie d'ionisation, et l'électron était libéré. Donc, la matière était totalement ionisée. Ceci jusqu'au moment où la température est tombé assez bas pour ne plus pouvoir ioniser les atomes. On peut définir le temps de survie d'un électron lié à un noyau. Ce temps de survie était très bref à haute température, mais avec la baisse de température il augmentait progressivement.

Le nombre d'atomes neutres (ayant leur cortège électronique), partant de 0 %, a donc monté progressivement, pour atteindre presque 100 % lorsque la température a été assez basse. Cette capture des électrons par les noyaux est nommée *recombinaison*, terme particulièrement mal adapté puisqu'avant, électrons et noyaux n'avaient jamais été couplés, la température étant bien trop haute pour cela. Mais le terme est consacré… L'association des électrons négatifs avec les noyaux positifs forme des atomes neutres.

La recombinaison n'a pas été instantanée.

### 7.2 Découplage et Surface de dernière diffusion

Considérons le même phénomène, mais en s'intéressant maintenant à la lumière. Avant la recombinaison, les photons se déplacent dans un milieu constitué d'un gaz de noyaux et d'électrons. Tous les électrons sont libres, et exercent pleinement leur champ électromagnétique. Tout photon qui passe à proximité d'un électron est diffusé par diffusion Thomson. Il change donc de trajectoire, et reste piégé dans le gaz. Sur sa nouvelle trajectoire, il ne tarde pas à rencontrer un autre électron, qui le diffuse à nouveau. Par conséquent, le libre parcours moyen du photon (longueur du trajet qu'il peut accomplir en ligne droite entre deux diffusions successives), est très court. Ils tournent en rond. Mais à mesure que les électrons sont capturés par les noyaux, leur influence électrique est neutralisée par celle, de signe opposé, du noyau, et l'électron n'agit plus sur les photons. Les photons ont de plus en plus de chances de passer, donc leur libre parcours moyen augmente, tout en restant fini.

Lorsqu'il ne reste pratiquement plus d'électrons libres, le libre parcours moyen des photons devient infini. Cette libération des photons est nommée *découplage*.

Ceci se produit lorsque la température est de l'ordre de 3.000 K, au même moment (dans le temps cosmique) partout dans l'Univers. Donc, vu de la Terre, tous ces photons viennent de la même distance, et tous les points d'émission que nous voyons aujourd'hui forment donc une sphère centrée sur nous. Bien sûr, il ne s'agit que d'une apparence, qui serait identique vue d'une autre galaxie. Cette sphère est nommée *surface de dernière diffusion*, nom qui apparaît naturel au vu des explications qui précèdent.

Le décalage spectral, au moment du découplage, est de l'ordre de z = 1.100.

L'histoire ci-dessus montre que la recombinaison précède juste le découplage, qui se produit lorsqu'elle se termine, quelques 380.000 ans après le Big Bang.

Après le découplage, les photons peuvent enfin parcourir l'Univers. Mais ce voyage va être long ! Plus de dix milliards d'années… Et pendant ce temps, l'Univers est en expansion, donc les longueurs augmentent entre deux points quelconques. Par conséquent, les longueurs d'onde aussi : elles ont été multipliées par 1.100. C'est pourquoi nous observons aujourd'hui ce rayonnement à une grande longueur d'onde, correspondant à une température de seulement 2,725 K (3.000 K / 1.100 = 2,727 K). Evidemment, la surface de dernière diffusion est celle qu'on voit en observant le fond diffus cosmologique !

Une conséquence importante du découplage est qu'il a mis fin à l'équilibre thermique entre la matière et les photons. Cet équilibre était produit par les incessantes interactions entre les deux ; mais puisque les interactions cessent, il n'y aura plus d'équilibre, et matière et rayonnements vont pouvoir évoluer indépendamment l'un de l'autre.

### 7.3 Formation des structures

Les infimes fluctuations de température que l'on voit aujourd'hui dans le rayonnement cosmologique montrent des différences de densité correspondantes. Par conséquent, ces zones sont gravitationellement un peu plus attractives que les zones voisines. Donc, elle vont croître. Et plus elles croissent, plus elles attirent… Un mécanisme d'effondrement est donc à l'œuvre, qui va donner les galaxies et les amas. Cette formation est traitée ans le chapitre sur les galaxies.

### 7.4 Ages sombres

Après la recombinaison, l'Univers était transparent, les photons le traversaient sans interactions. Mais rien ne produisait plus de nouveaux photons. Avec l'expansion, les longueurs d'ondes augmentaient comme le facteur d'échelle, et donc produisaient un déclage vers le rouge. Dans ces conditions, la lumière ambiante rougissait de plus en plus, pour finalement passer dans l'infrarouge. A ce moment-là, l'Univers est devenu noir ! Le ciel ne brillait absolument plus, puisqu'aucun photon visible n'était plus produit, et que les photons de la recombinaison étaient devenus infrarouges. C'est pour cette raison que l'on appelle cette période les *âges sombres*.

Aujourd'hui, le ciel nocturne est toujours noir, mais le Soleil et les étoiles nous montrent bien qu'il existe des sources de lumière visible. Donc, les âges sombres ont pris fin. Quand ?

Pour terminer cette période, il faut une source de photons visibles. Après la recombinaison, l'Univers était rempli des éléments produits pendant la nucléosynthèse, hydrogène, hélium, un peu de deutérium, de lithium, d'hélium 3. Que pouvaient devenir ces nuages ? Soit ils restaient tels, auquel cas l'Univers serait encore aujourd'hui dans cet état, soit ils devaient se condenser pour former des objets plus denses. C'est bien sûr cette seconde possibilité qui a été en œuvre, et qui a donné les premières étoiles. Pour en arriver là, il faut qu'il y ait dans l'Univers après la recombinaison de petites fluctuations de densité, suffisantes pour produire des germes de condensation. Un tel germe devenant plus dense, produit une gravité plus importante, et donc attire encore plus la matière environnante. Ce qui fait grossir le germe, et augmente sa gravité.

Lorsque ce mécanisme a réussi à condenser une étoile, qui s'allume, des photons sont produits, et l'Univers s'illumine à nouveau.

#### 7.5 Réionisation

Les étoiles qui viennent de se former sont de métallicité nulle, puisque la nucléosynthèse n'a produit aucun élément plus lourd que le lithium. Or la théorie des étoiles indique que leur masse maximale est fonction de la métallicité : plus faible est la métallicité, plus massive sont les étoiles. Par conséquent, de nombreuses étoiles massives ont dû se former à peu près au même moment.

Or les étoiles massives, pour maintenir leur équilibre, doivent produire énormément d'énergie, et par conséquent être très chaudes. Par suite, elles émettent beaucoup de photons de grande énergie, ultraviolets. Ces photons étaient suffisamment énergétiques pour ioniser tout atome qu'ils rencontraient. Ce qui fait que l'Univers, ionisé après le Big Bang, puis devenu neutre par manque d'énergie, se retrouve ionisé par l'action des premières étoiles.

La date de cette *réionisation* est très incertaine. Elle est notée par le décalage spectral correspondant, qui est estimé entre 6 et 16. Une belle marge… Cette incertitude est liée, évidemment, à celle qui pèse sur l'âge des premières étoiles, que l'on n'a pas encore observées.

## *8 Au-delà du modèle de base*

#### 8.1 Matière noire

Quelle est la matière noire ? Elle est détectée par ses effets gravitationnels seulement, donc elle n'interagit pas avec la lumière. Mais il y a plusieurs explications possibles :

**Naines brunes** Ce sont des étoiles de très faible masse, trop faible pour assurer la fusion de l'hydrogène, mais assez pour entraîner celle du deutérium (l'isotope de l'hydrogène qui est produit par la première réaction dans la fusion de l'hydrogène normale). Leur faible masse leur confère un petit diamètre (un peu plus de 100.000 km, soit un peu plus gros que Jupiter). Elles ne rayonnent que par leur énergie gravitationnelle de formation, se refroidissant sans cesse. Leur très faible éclat les rend très difficiles à imager, et la première n'a été découverte qu'à la fin des années 90. Leur masse relativement grande et leur discrétion en font des candidats envisageables pour la matière noire.

**Naines blanches** Les naines blanches sont les restes d'étoiles de faible masse, après la fin de la fusion (de l'hydrogène pour les moins massives, de l'hélium pour les autres). Très condensées, elles sont de faible diamètre (10.000 km pour une masse solaire). Comme le rayonnement émis est proportionnel à la surface émissive, elles rayonnent très peu, donc sont d'éclat si faible qu'elles sont très difficiles à voir. D'autre part, toujours à cause de cette petite surface, elles n'arrêtent pas la lumière des astres situés derrière. Elles restent donc invisibles, et peuvent contribuer à cette masse inconnue.

**Etoiles à neutrons** La situation est très semblable à celle des naines blanches, avec une concentration encore plus grande de la matière (pour une masse solaire, le diamètre se réduit à 10 km). Bon candidat potentiel donc.

**WIPMS** Ce joli sigle vient de l'anglais *Weakly Interactive Massive Particules*. On considère qu'il puisse exister des particules massives (pour expliquer la gravité), mais qui n'interagissent que gravitationnellement (pour expliquer qu'elles ne soient pas détectées).

La recherche de ces objets a été tentée par divers moyens. Pour les objets compacts, nous avons constaté qu'ils étaient invisibles, au sens propre. Il faut donc trouver un moyen de les détecter indirectement. Ce moyen nous est donné par la Relativité Générale, avec le phénomène de lentille gravitationnelle. Lorsqu'un objet compact passe devant un objet brillant, il dévie sa lumière autour de lui, et la concentre un peu comme le ferait une lentille optique. L'objet apparaît donc un peu plus brillant. Si on est capable de mesurer cette augmentation d'éclat, on pourra en déduire que quelque chose l'a produite. Il restera à éliminer d'autres causes, et pour cela la durée du phénomène et la forme de la courbe de lumière sont déterminants. Des satellites ont été expédiés dans l'espace pour réaliser ce programme de recherche. Les deux plus importants ont été **EROS** (Expérience de Recherche d'Objets Sombres) et **MACHO** (Massive Compact Halo Objects). Ces deux sondes ont trouvé des objets, mais en très petit nombre. Aussi, la matière sombre ne peut être composée d'objets compacts que dans la limite de 15 % au maximum. La chasse au reste est toujours ouverte…

Une autre idée concerne des nuages d'hydrogène qui seraient invisibles même en raie à 21 cm (transition de spin). De tels nuages devraient se trouver loin de toute source d'énergie, sinon ils seraient visibles par les moyens traditionnels. Toutefois, la théorie de la nucléosynthèse primordiale met une barrière à la quantité de matière normale qui pourrait ainsi nous échapper. La solution correspondante ne peut être que vraiment partielle, il faut encore chercher ailleurs.

Les WIMPS ne sont pour l'instant que des particules hypothétiques. On les imagine pour résoudre le problème. Mais cette approche n'est pas ridicule, elle a déjà été utilisée avec succès : la découverte du neutrino a été bien précédée de sa description théorique. Elle a été imaginée pour résoudre un problème de masse manquante (tiens, justement !) dans une réaction nucléaire. De plus, les théories physiques évolués (entendez par là : celles qui n'ont pas encore été validées par l'expérience) en prévoient plusieurs : il y a le choix. Il est question de neutrinos, de neutralinos (théories supersymétriques) et autres axions. Aucune expérience ne les a encore mises en évidence, mais le LHC pourrait apporter sa pierre à cet édifice.

#### 8.2 Accélération

La présence de masses dans l'Univers, s'attirant mutuellement, est de nature à relentir cette expansion. Aussi, les cosmologistes ont toujours (depuis qu'on étudie la cosmologie) pensé que l'expansion ralentissait dans le temps, jusqu'à s'arrêter peut-être un jour, et même repartir en contraction (Big Crunch), mais cette vision a été contredite récemment.

Les super-novæ sont des étoiles massives qui explosent en fin de vie, en produisant pendant un temps bref autant d'énergie qu'une galaxie

entière ! Aussi sont-elles visibles de très loin, plusieurs milliards d'années-lumière. Or on peut observer deux paramètres des super-novæ lointaines : le décalage spectral z, et la magnitude apparente m.

Lorsqu'une étoile émet de la lumière, celle-ci se répand dans tout l'espace autour d'elle. Il s'ensuit que son rayonnement se dilue, et que l'intensité baisse en fonction de la distance. La relation entre magnitude absolue, magnitude apparente et distance nous l'indique :

$$m - M = 5 \log d - 5$$

Or l'étude des super-novæ de type SN Ia proches a montré qu'elles présentent toutes la même magnitude absolue, de l'ordre de -19,3, c'est-à-dire qu'elles produisent toutes la même quantité d'énergie. Ces explosions sont produites par l'accrétion de matière à une naine blanche, qui lui font atteindre la masse limite de Chandrasekhar. La matière provient d'un compagnon. Ainsi, toutes les SN Ia explosent avec exactement la même masse, ce qui explique l'identité des énergies, et en fait des chandelles standards.

Si on remplace M par -19,3 dans l'équation ci-dessus, on obtient une relation entre la magnitude apparente et la distance. Puisque la magnitude apparente est observable, on en déduit la distance que nous appellerons *astrophysqiue* (puisque définie à l'aide des propriétés astrophysiques des étoiles) $d_A = \exp((m - M + 5) / 5)$, pour les SN Ia $d_A = \exp((m + 24,3) / 5)$.

D'autre part, on peut mesurer le décalage spectral z (soit en prenant directement un spectre, soit en photographiant derrière trois filtres de couleurs différentes, et en comparant les résultats avec un spectre de corps noir). La loi dite de Hubble donne alors :

$H_0 d_C = c z$

en nommant $d_C$ la distance cosmologique de la SN. $H_0$ et c sont des constantes, z est mesuré. Donc $d_C$ est connue.

Le problème qui apparaît alors est que ces deux distances ne sont pas compatibles ! Mesurées sur de nombreuses SN, les résultats sont têtus : ils diffèrent.

Pour expliquer cela, deux solutions sont envisageables. La relation entre magnitude apparente et magnitude absolue ne peut être mise en cause, c'est de la physique fondamentale. Alors, soit la magnitude absolue des SN Ia varie avec la distance (pour faire correspondre avec la distance cosmologique), soit c'est la distance cosmologique qui est en défaut, et la vitesse d'un objet ne serait pas une relation linéaire de sa distance.

On ne voit aucune raison pour admettre la première hypothèse. En effet, toute l'étude de l'Univers et toute la physique, sont basées sur le principe selon lequel les lois de la Nature sont les mêmes partout et en tout temps. Ce postulat est d'ailleurs bien vérifié par toutes les observations astrophysiques faites par ailleurs.

On est alors conduit à admettre que la relation n'est plus linéaire et qu'à grande distance, c'est-à-dire il y a longtemps, la valeur de H était plus petite. Donc, l'expansion s'accélère.

Cette conclusion est en contradiction avec tout ce qu'on pensait il y a quelques années. Elle met un terme à l'interrogation sur le devenir de l'Univers : il n'y aura pas de relentissement de l'expansion, qui se continuera éternellement, et de plus en plus rapide. L'Univers est destiné à se dissoudre dans l'espace, sa densité tendant vers 0. Mais ceci en moyenne seulement, car les condensations locales (galaxies, amas de galaxies), fortement liées par la gravité, sont destinées au contraire à se condenser de plus en plus. Lorsqu'il n'y aura plus de gaz libre, la formation de nouvelles étoiles s'arrêtera, et petit à petit l'univers deviendra froid et obscur… Mais nous avons encore quelques milliards d'années devant nous !!

### 8.3 Quelques problèmes du modèle de base

Le décor est maintenant planté. Dans ses grandes lignes, l'histoire de l'Univers est simple : après une phase extrêmement chaude et dense, il se refroidit et les phénomènes physiques qui se déroulent sont déterminés par la température et la densité toutes deux décroissantes. Cependant, le modèle simple que l'on envisage ainsi pose quelques problèmes, que nous allons voir maintenant.

#### 8.3.1 Problème de la platitude

L'Univers aujourd'hui nous apparaît pratiquement plat, c'est-à-dire que $\Omega_{tot} = 1$, aux erreurs de mesure près. Or cette valeur est instable ! En effet, si $\Omega_{tot}$ est légèrement supérieur à 1, la densité de matière, donc la gravité, est trop forte, et l'Univers entre en contraction. Plus il se contracte, plus sa densité et sa gravité augmentent. Donc, la contraction s'accélère. De manière symétrique, si $\Omega_{tot}$ est légèrement inférieur à 1, la gravité est trop faible, et l'Univers entre en expansion. Plus il se dilue, plus la gravité baisse, et donc l'expansion s'accélère. Comment comprendre alors que notre Univers soit actuellement si proche de la densité critique ? Depuis le Big Bang, il a eu le temps de mettre en œuvre cette instabilité, et de quitter définitivement cette valeur particulière. Pour que la valeur actuelle soit atteinte, il faudrait que $\Omega_{tot}$ ait été égal à 1, à $10^{-5}$ près, 300.000 ans après le Big Bang, à $10^{-18}$ près une seconde après le Big Bang… et bien mieux encore plus avant.

Ceci nous rappelle que le destin de l'Univers est extrêmement sensible à sa densité initiale. Une variation de $10^{-24}$, vraiment infinitésimale, suffit à passer d'une expansion éternelle à une recontraction (Big Crunch). Comment se fait-il que l'Univers soit si vieux, puisque un infime excès par rapport à cette valeur aurait entraîné il y a longtemps la contraction ? C'est un premier problème des modèles de Big Bang. Il se traduit aussi en terme de courbure : un univers de densité critique est plat. C'est pourquoi on le nomme *problème de la platitude*(ou de la courbure nulle).

#### 8.3.2 Problème de l'horizon

Il y a un autre problème. Très chaud au début, l'Univers était totalement ionisé lorsque les noyaux atomiques ont pu se former. Ils ont fini par capturer les électrons pour devenir neutres. C'est ce moment qui est visible dans le rayonnement de fond cosmologique.

En regardant à quelle époque la recombinaison a eu lieu, on trouve quelques 380.000 ans après le Big Bang, à une température de l'ordre de

3.000 K. Ceci correspond à un décalage spectral z = 1.100. Or les longueurs d'onde s'allongent proportionnellement au facteur d'échelle. Donc, celui-ci devait être 1.100 fois plus petit qu'aujoud'hui. Il est actuellement de 1 (par choix). Donc il était alors de a(t) = 1 / 1.100 = 0,0009.

L'Univers observable aujourd'hui a une taille de quelques 14 $10^9$ AL. Puisqu'au moment de la recombinaison, il était 0,0009 fois plus petit, cette portion d'Univers faisait à l'époque 14 $10^9$ AL × 0,0009 = 12,6 $10^6$ AL. Or l'Univers avait 380.000 ans. En 380.000 ans depuis le Big Bang, la lumière n'avait pu parcourir que 380.000 AL. Donc, la portion d'Univers qui a donné notre Univers observable aujourd'hui était considérablement plus grande (33 fois) que l'Univers observable de l'époque.

> **Explication informelle** : on a deux coureurs, l'un va à la vitesse de la lumière (l'Univers observable), l'autre beaucoup moins vite (l'expansion). Dans un temps donné, le plus rapide parcours une distance bien plus grande que l'autre. Pour qu'ils arrivent au même point au même moment, il faut que le plus rapide rende de la distance à l'autre (parte d'un point plus éloigné du but).

Au moment de la recombinaison, l'Univers observable était donc bien plus petit qu'aujourd'hui. Si petit en fait, que la lumière n'a pas pu aller très loin depuis le Big Bang. Alors, puisqu'aucune information n'a pu traverser tout l'Univers (observable aujourd'hui), comment se fait-il qu'à cette époque la température soit la même partout à $10^{-6}$ près ? Ce problème n'a pas de solution dans le modèle de Big Bang standard. C'est le *problème de l'horizon*.

## *8.4 L'inflation*

**Reprenons deux des caractéristiques de l'Univers, proche de ses débuts :**

1. La très grande homogénéité du CMB, qui montre qu'à cette époque où matière et rayonnement étaient en équilibre thermique, la matière était donc très homogène.
2. L'univers observable, à la même époque, était bien trop petit pour que les diverses régions aient eu le temps de communiquer de l'information, c'est-à-dire d'équilibrer leur température.

Si on veut rendre compatibles ces deux caractéristiques, il faut admettre qu'avant l'époque du CMB, toutes les parties de l'Univers observable avaient été bien plus proches que ce qu'elle apparaissent alors. Donc, il faut admettre que l'expansion ait été bien plus rapide dans les premiers instants de l'univers. Voilà l'idée de base.

**Epoque de l'inflation**

L'inflation doit s'être produite après la brisure de symétrie de Grande Unification, c'est-à-dire lorsque l'énergie était de l'ordre de $10^{15}$ GeV. En effet, avant cette brisure, l'énergie ambiante était suffisante pour créer de nombreuses paires particules-antiparticules, incluant des particules lourdes nommées *monopôles magnétiques*. Ces particules n'ont jamais été observées (le magnétisme se manifeste toujours par des dipôles, ayant un pôle nord ET un pôle sud). Les théories indiquent que beaucoup de monopôles très massifs ont dû être créés, et il devrait en rester aujourd'hui. Le fait qu'on n'en détecte pas entre en contradiction avec ces théories. Sauf, si on suppose que l'inflation s'est produite **après** la brisure de symétrie qui a interdit la création des monopôles, et donc que presque tous les monopôles se sont anihilés avec leurs antiparticules. Alors, l'inflation a dilué l'espace très rapidement, faisant ainsi chuter la densité de monopôles à une valeur si faible que la probabilité d'en observer un aujourd'hui est suffisamment basse pour être compatible avec les observations.

L'un des problèmes, et non des moindres, consiste à trouver un moteur à cette inflation. Produite mathématiquement par la constante cosmologique, comment peut-on intrepréter cette dernière ?

Les idées actuelles consistent à imaginer un champ nouveau, dont le potentiel varierait. Ses variations expliqueraient le départ et l'arrêt de l'inflation. Mais il reste du travail avant d'avoir une idée claire de tout cela.

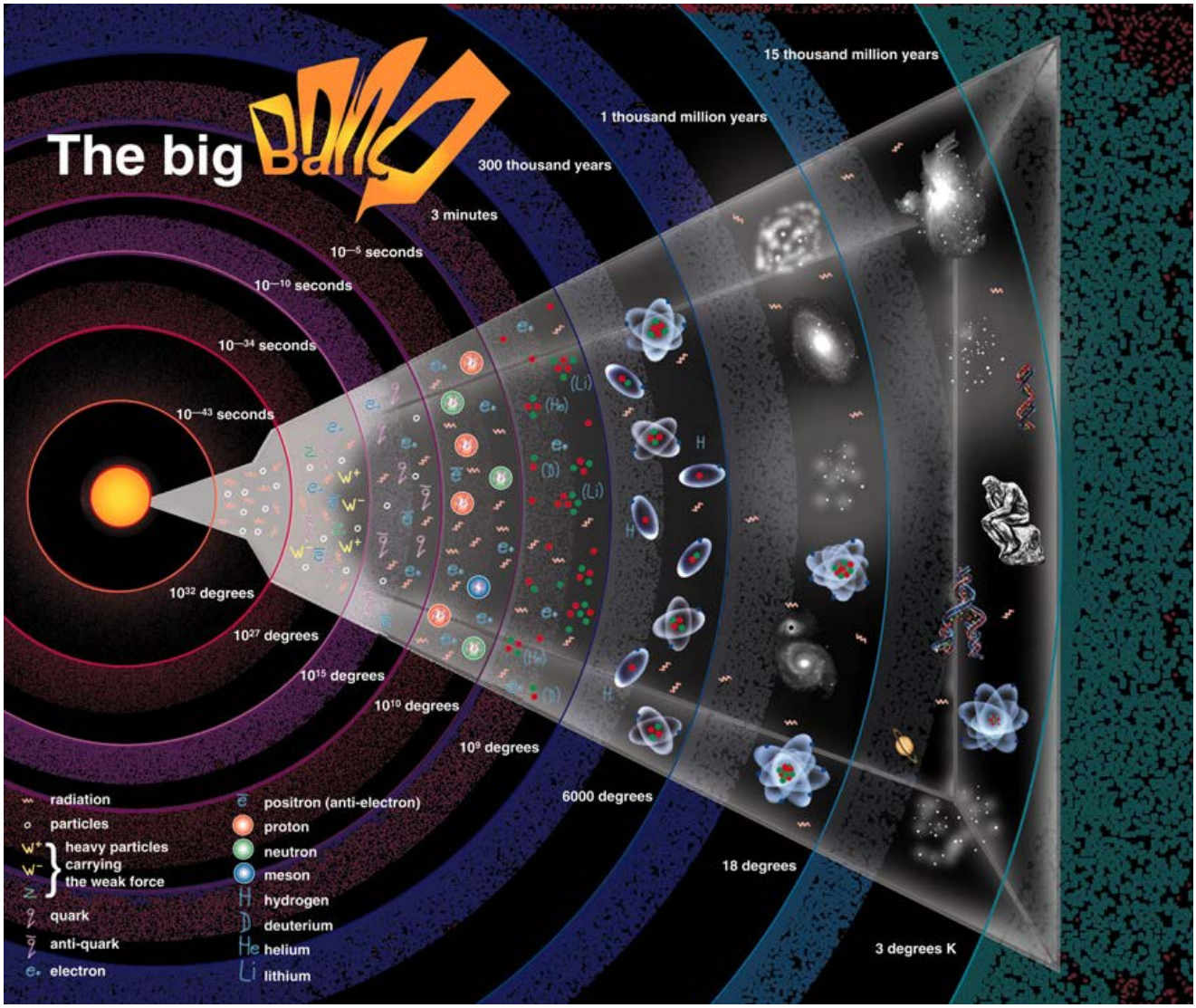



schéma utilisé provisoirement source ipnweb.in2p3.fr

### 7.7 Taille de l'Univers observable

Quelle est la taille de l'Univers observable aujourd'hui ? Autrement dit, à quelle distance se trouvent aujourd'hui les objets les plus lointains que nous voyons ?

Une réponse naturelle serait de dire que, puisque l'Univers a 13 milliards d'années, son rayon est de 13 milliards d'années-lumière. Mais cette valeur ne tient pas compte de l'expansion, et se trouve bien fausse. En effet, pendant les 13 milliards d'années qui se sont écoulés **depuis l'émission du signal**, les distances se sont allongées. Et par conséquent, la distance entre le point d'émission et le point de réception (nous) aujourd'hui, est plus grande. Il suffit de comprendre que ce que nous voyons maintenant, c'est l'emplacement où **était** la galaxie lorsqu'elle a émis la lumière qui nous arrive enfin. Depuis, elle s'en est éloignée, ce qui fait qu'elle est plus loin que ce que le trajet de la lumière laisse penser.

Pour déterminer dans quelles proportions, utilisons la métrique de Robertson-Walker, qui est adaptée au problème, dans le cas particulier de la lumière, donc avec ds = 0 :

$$ds^2 = -c^2\,dt^2 + a(t)^2\left[\frac{dr^2}{1-k\,r^2} + r^2\,\left(d\theta^2 + sin^2\theta\,d\phi^2\right)\right] = 0$$

Considérons le cas d'un univers de courbure nulle (k = 0), ce qui ne saurait être très loin de la réalité. Puisque l'Univers est isotrope, on peut faire le calcul dans une direction particulière, le résultat sera le même dans toutes les autres. Choisissons donc dθ = 0 et dφ = 0. Il vient :

$$c^2\,dt^2 = a(t)^2\,dr^2$$

ou bien : $c\,dt / a(t) = dr$

Cette égalité s'intègre, entre 0 et $t_0$ pour le terme de gauche, ce qui correspond à 0 et $r_0$ pour celui de droite :

$$\int_0^{t_0} \frac{c\,dt}{a(t)} = \int_0^{r_0} dr = r_0$$

La seconde intégrale est évidente, elle donne $r_0$. Pour la première intégrale, considérons que l'Univers est dominé par la matière. Alors, comme nous l'avons vu plus haut : $a(t) = (t / t_0)^{2/3}$. Reportant cette valeur dans l'intégrale, celle-ci devient facilement calculable :

$$r_0 = \int_0^{t_0} \frac{c\,dt}{\left(\frac{t}{t_0}\right)^{2/3}} = \int_0^{t_0} \frac{t_0^{2/3}\,c\,dt}{t^{2/3}} = c\,t_0^{2/3} \int_0^{t_0} \frac{dt}{t^{2/3}} = c\,t_0^{2/3} \left[3\,t^{1/3}\right]_0^{t_0} = 3\,c\,t_0$$

Donc, le point d'émission se trouve aujourd'hui à une distance trois fois supérieure à ce que l'on pourrait croire sans calcul. La taille de l'Univers aujourd'hui est donc de l'ordre de $13 \times 3 \approx 40$ milliards d'années-lumière, ou 13 Mpc.

---=OO=---




- Température superficielle du Soleil

  Le rayonnement du corps noir a un profil en cloche. La longueur d'onde du maximum dépend de la température, selon la loi de Wien :

  $$\lambda_m = 2.898 / T \quad K\ \mu m^{-1}$$

  où T est en degrés Kelvin, et $\lambda_m$ en micromètres.
  Pour le Soleil, on observe par des moyens photoélectriques que le maximum est à $\lambda_m$ = 0,5 µm.
  Calculez la température de surface du Soleil.

- Températures de Mercure et Vénus

  Pourquoi Vénus est-elle plus chaude que Mercure, alors qu'elle est plus loin du Soleil ?
  Quelle est la température au sol de Vénus ?
  La pression ?
  Quel est le constituant principal de son atmosphère ?
  De quoi sont faits les nuages ?
- Mêmes questions pour Mars.
- Volcans

  Où trouve-t-on des volcans dans le système solaire ?
  Pourquoi Mars possède-t-elle un volcan plus grand que toutes les montagnes terrestres, alors que la planète est plus petite ?
  Quel est son nom ?
- Système solaire

  En combien de catégories classe-t-on les planètes du système solaire ?
  Sur quels critères ?
  Quelles planètes n'ont pas de satellites ?
  Etablissez la loi de Bode.
  Quelle est la structure interne de Jupiter ?
  De quoi sont faits ses nuages ?
  Pourquoi sont-ils orangés ?
  Qu'est-ce que la Tache Rouge ?
  Qui a découvert les premiers satellites de Jupiter ?
  Quelle a été l'importance de cette découverte ?
  Quelle est la mase du cœur rocheux de Jupiter ?
- Voie Lactée

  Si vous représentez une étoile par une bille de 1 mm de diamètres, à quelle distance les placez-vous l'une de l'autre à la même échelle ?
- Soleil

  Qui a découvert les taches du Soleil ?
  Quelle a été l'importance de cette découverte ?

---=OO=---




Pour les observations sur le terrain, consultez la fiche consacrée aux objets les plus marquants.

L'astronomie est une science d'observation, non une science expérimentale. La connaissance que nous avons de l'Univers provient de l'interprétation des messages qu'il nous envoie. Ces messages étaient constitués uniquement d'images jusqu'à une époque très récente. Ce chapitre est destiné à faire le point sur les phénomènes physiques exploitables dans ce sens.

La source d'information la plus évidente, car nos sens nous permettent d'y accéder, est la lumière. Mais la lumière est une onde électromagnétique, et nos yeux ne captent qu'une toute petite partie de ces rayonnements, celle dite pour cela *visible*. Notre peau nous permet de ressentir une partie des rayonnements infrarouges (chaleur). Nous restons insensibles à tout le reste du spectre : ondes radio, rayons ultraviolets, rayons gamma, rayons X (bien que certains aient un effet biologique : bronzage, induction de cancers...).

Les théories physiques récentes ont mis en évidence d'autres phénomènes intéressants : les neutrinos, qui sont des particules élémentaires sans charge électrique, sont produits dans les réactions nucléaires (plus précisément désintégrations béta) qui se produisent dans les étoiles.

La théorie de la Relativité Générale, théorie géométrique de la gravitation, explique que l'espace-temps est déformé par la présence des masses. Les planètes (par exemple) suivent simplement les déformations, comme un bobsleigh suit sa piste.

Nous sommes maintenant capables de capter toutes ces sources d'information :

- **la lumière visible**, qui nous donne les images habituelles. Remarquez qu'elle est émise majoritairement par des astres chauds, à des températures de l'ordre de celle qui règne à la surface du Soleil.
- **l'infrarouge**, qui est émis par des corps à température beaucoup plus basse, de l'ordre de celle de la Terre. Une image en infrarouge montre donc des astres beaucoup moins chauds.
- **les ondes radio millimétriques** ; prolongement de l'infrarouge vers les énergies plus basses, elles permettent de détecter des corps encore plus froids.
- **les ondes radio plus longues** ; elles permettent de détecter des objets par ailleurs très discrets, comme par exemple les nuages d'hydrogène qui peuplent les espaces interstellaires, et donnent naissance à de nouvelles étoiles.
- **l'ultraviolet** ; à l'opposé de ce que nous venons de voir, les ultraviolets sont plus énergétiques, et donc prodiuits par des objets plus chauds. Les phénomènes qui les produisent nécessitent des énergies plus élevées.
- **les rayons X** ; encore plus énergétiques, les rayons X ne sont produits que par des phénomènes très violents, et caractérisent des objets possédant une source d'énergie supérieure à celle qui fait briller les étoiles.
- **les rayons gamma** ; ce sont les plus énergétiques des rayonnements electromagnétiques. Ils sont produits dans des circonstances assez exceptionnelles, lors de phases cataclismiques de l'évolution des étoiles. Ils sont donc irremplaçables pour étudier cette évolution. Tout ce qui précède est de même nature électromagnétique, avec des niveaux d'énergie divers. Ce qui suit est profondément différent.
- **flots de particules** accélérées par divers mécanismes physiques : protons, électrons, produits par le vent solaire ou stellaire, rayons cosmiques.
- **neutrinos** ; particules de masse extrêmement faible, et électriquement neutres, qui n'interagissent presque pas avec la matière. Les neutrinos sont capables de traverser le Soleil de part en part comme s'il n'existait pas. Ces particules fantôme sont produites tranquillement dans le cœur des étoiles, et violemment lors de l'effondrement d'une étoile.
- **ondes gravitationnelles** ; ces ondes sont prédites par la Relativité Générale, exactement de la même manière que les équations de Maxwell pour l'électromagnétisme prédisent les ondes électromagnétiques. L'existence des ondes électromagnétiques, et l'invariance de la vitesse de la lumière qui lui est associée, ne peuvent plus être mises en doute. Aussi, les onde gravitationelles existent sans doute. Mais on ne les a jamais observées, car leur détections est extrêmement difficile.

**Les messages des photons**

Les renseignements que l'on peut obtenir des photons sont de 4 sortes :

- **direction** : imagerie ;
- **énergie et fréquence** : spectroscopie ;
- **polarisation** : polarimétrie ;
- **comptage** : photométrie.

Lorsqu'on ne considère que la direction dans laquelle les photons arrivent, on construit une image. C'est tout naturellement le cas dans le visible avec nos yeux, mais les instruments que nous fabriquons maintenant sont également capables de construire des images avec d'autres rayonnements :

- photographies infrarouge avec des pellicules spéciales (certaines sont disponibles dans le commerce );
- images radio, reconstruites en fausses couleurs à partir des ondes reçues par les radiotélescopes (la couleur correspond à un glissement en

longueur d'onde) ;
- on réalise de même des images à partir des rayons X ou gamma observés par certains satellites.

**Les neutrinos**

Très difficiles à capturer, les neutrinos sont surveillés depuis quelques années par divers détecteurs de par le monde : dans le Dakota aux Etats Unis, au Gran Saso en Italie, à Kamioka au Japon. Ces détecteurs ont à leur actif une formidable découverte : ils ont enregistré la bouffée de neutrinos produite par l'explosion de la supernova SN 1987 A, confirmant ainsi les modèles théoriques.

Un nouvel instrument, *ANTARES* (Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental RESearch), est en cours de construction au large de Toulon, par le laboratoire *CPPM* de Marseille associé au *LAM* (Laboratoire d'Astrophysique de Marseille), au *COM* (Centre d'Océanologie de Marseille), et à de nombreux autres laboratoires européens. Cet instrument doit détecter des neutrinos de haute énergie produits par les noyaux actifs de galaxie, les sursauts gamma, les microquasars.

**Les ondes gravitationnelles**

La gravitation est de très très loin la plus faible de toutes les forces de la Nature. Ce qui fait sa grande importance est sa propriété additive : les attractions produites par plusieurs sources additionnent leurs effets, et sa portée infinie. L'union faisant ainsi la force, à l'échelle de l'Univers, elle est la force dominante.

Expliquant le débordement d'énergie des quasars, dans des objets extrêmement massifs et compacts que sont les trous noirs, elle ne rayonne que très peu d'énergie dans les situations courantes. C'est ce qui fait la très grande difficulté de réalisation d'un détecteur d'ondes gravitationnelles. Le détecteur *VIRGO* est installé à Cascina, près de Pise en Italie. Il a été inauguré le 23 juillet 2003. On en attend la détection des ondes gravitationnelles émise lors d'événement cataclismiques dans l'Univers : collision de deux étoiles à neutrons, ou de deux trous noirs massifs. Deux autres détecteurs sont en cours de développement aux Etats Unis, il constituent le projet *LIGO*. Les trois détecteurs devront réunir leurs observations, afin de déterminer la direction des événements enregistrés. Ne connaissant rien aujourd'hui des ondes gravitationnelles, il n'est pas impossible qu'elles nous apportent des surprises extraordinaires en dehors des domaines prévus. On a toujours eu de telles surprises en inaugurant de nouveaux types de détecteurs...

---=OO=---




Nombre d'entrées : 1652 chercher

| | |
|---|---|
| **2M1207** | Naine brune possédant une planète (découverte en 2004). Elle se trouve dans le Centaure, à 170 AL de nous. La faible luminosité de la naine brune a permi de photographier, en IR, le couple. Le contraste entre les deux astres n'est que de 100 fois. |
| **51 Peg** | 51 Pegasi, étoile 51 de la constellation de Pégase. Etoile de type solaire autour de laquelle a été découverte en 1995, à l'Observatoire de Haute Provence, la première planète extrasolaire, ou exoplanète, nommée 51 Peg B. |

# A

B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z

| | |
|---|---|
| **AAA** | Astéroïdes des familles Amor, Aten, Apollo. Ce sont des géocroiseurs. |
| **aberration** | • Défauts d'un système optique. Les principales aberrations sont :<br>◦ l'*aberration de sphéricité* (miroirs de télescopes non parabolisés) ;<br>◦ l'*aberration chromatique* (lunettes) ;<br>◦ *la coma* (du grec *coma* = chevelure ; qui rend l'image d'une étoile semblable à une petite comète en dehors de l'axe d'un instrument).<br>• Déplacement de la position d'une étoile, due à la vitesse finie de la lumière. |
| **ablation** | Perte de matière produite à la surface d'une météorite par le frottement de l'air, lors de la traversée de l'atmosphère. La rentrée dans l'atmosphère à grande vitesse produit un échauffement intense, qui fond la croûte de la météorite. La perte est de l'ordre de quelques millimètres par seconde. |
| **abondance** | Proportion d'un élément chimique dans un corps, par rapport à sa proportion soit dans l'Univers, soit dans le Soleil. Dans ce dernier cas, on parle d'*abondance solaire*. |
| **abondances chimiques** | Proportions des divers éléments chimiques dans l'Univers. On note généralement X la proportion d'hydrogène, Y celle d'hélium, et Z celle de tous les autres éléments confondus. Voir : abondance. |
| **absorption** | Raies sombres dans le spectre d'un corps céleste. La lumière est absorbée par un gaz situé entre la source et l'observateur. Les raies indiquent la composition chimique de ce gaz. |
| **accélérateur de particules** | Machine permettant d'amener un paquet de particules chargées (électrons, protons), à une vitesse proche de celle de la lumière. Ces particules sont ensuite projetées contre une cible, ou les unes contre les autres (flots inverses). L'énergie cinétique acquise entraîne des interactions dont les conséquences permettent de remonter à la composition des particules. |
| **accélération** | Variation de la vitesse, considérée comme un vecteur. La longueur du vecteur (son module) mesure la célérité (en km/h ou m/s). Une accélération est donc produite par tout changement soit de la *célérité* (passer de 50 à 100 km/h en ligne droite), soit de la direction (tourner autour d'une planète à 28.000 km/h), soit d'une combinaison des deux. Voir : célérité. |
| **accrétion** | Capture gravitationnelle des poussières et petits astéroïdes par un astéroïde plus gros. L'accrétion est le mécanisme qui explique la formation des planètes. On parle aussi d'accrétion lorsqu'un objet massif (naine blanche...) reçoit de la matière en provenance d'un compagnon, ou encore lorsqu'un trou noir est alimenté par de la matière (nuage, étoiles) qui lui tourne autour. Si c'est un nuage, il forme un disque d'accrétion. |
| **achondrite** | Météorite pierreuse provenant de la croûte d'une planète détruite par choc. Les achondrites ne contiennent naturellement pas de chondres. Voir aussi : *achondrite*. |
| **achromatique** | Qualité d'un instrument d'optique qui se comporte de la même manière pour toutes les couleurs. |
| **acidophile** | Voir : bactérie acidophile. |
| **active** | Optique active : méthode permettant de conserver la forme parfaite d'un miroir, en paliant à la souplesse d'un verre mince par des corrections actives, effectuées par des vérins. |
| **adaptative** | Optique adaptative : méthode de même principe que l'optique active, mais qui s'applique au miroir secondaire. Elle corrige la turbulence atmosphérique, et permet aux grands télescopes d'atteindre leur pouvoir séparateur théorique. |
| **addition des vitesses** | Loi physique qui représente la composition des vitesses de trois mobiles. Elle donne la vitesse de C par rapport à A, connaissant celle de B par rapport à A et celle de C par rapport à B. Elle a deux variantes : en Mécanique Classique, et en |

| | |
|---|---|
| | Relativité. Voir aussi : *Relativité Galiléenne*, *Relativité Restreinte*. |
| **adiabatique** | Du grec *a* privatif, *dia* à travers, *bainô* passe (qui ne passe pas à travers). En thermodynamique, transformation qui se fait sans échange de chaleur avec le milieu extérieur, c'est-à-dire sans traverser la frontière avec le milieu extérieur. |
| **Adrastée** | (mythologie grecque : nymphe chargée par Rhéa de veiller sur Zeus enfant) Satellite de Jupiter n° XV, de 200 km approximativement, orbitant à 129 000 km de la planète dans le sens direct, en 7 h 12 mn. Découvert par Jewitt en 1979. |
| **Aédé** | (mythologie grecque : muse du chant, fille de Zeus et de Mnémosyne) Satellite de Jupiter n° XLI, de 4 km approximativement, orbitant à 23 981 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 2 ans 31 j. Découvert par Sheppard en 2003. Groupe de Pasiphaé |
| **aérolithe** | Littéralement, pierre qui tombe du ciel. Se dit d'une météorite. |
| **aérosol** | Un aérosol est une suspension, dans un gaz (en particulier l'atmosphère), de particules solides ou liquides. Ils ont beaucoup d'importance, car ils servent de germes pour la constitution des gouttes de pluie ou des cristaux de neige, mais ils jouent également un rôle sur l'albédo des planètes. |
| **afterglow** | Voir : rémanence. |
| **âge de l'Univers** | Dans les théories de Big-Bang, l'Univers a eu un début. Son âge est donc le temps écoulé depuis ce commencement, qui correspond avec l'hypothétique singularité initiale. |
| **AGN** | ***A**ctive **G**alactic **N**ucleus*. Noyau Actif de Galaxie. |
| **Aitné** | (mythologie grecque : nymphe sicilienne, fille d'Ouranos et de Gaïa, conquête de Zeus) Satellite de Jupiter n° XXXI, de 3 km approximativement, orbitant à 23 229 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 2 ans. Découvert par Scott en 2001. Groupe de Carmé. |
| **Alamo** | Cratère d'impact. Voir : Woodleigh. |
| **Alba Patera** | Le plus vaste volcan du système solaire, au nord du plateau de Tharsis sur Mars. Olympus Mons est plus élevé, mais moins large à la base. |
| **albédo** | Fraction de la lumière du Soleil réfléchie par une planète ou un satellite. Un albedo de 1 correspondrait à une planète parfaitement réfléchissante. |
| **Albiorix** | (mythologie celtique : géant, roi du monde ; c'est l'équivalent de Toutatis) Satellite de Saturne n° XXVI, de 26 km approximativement, orbitant à 16 400 000 km de la planète dans le sens direct, en 2 ans 36 j 13 h. Découvert par Holman en 2000. |
| **Albor Tholus** | Volcan martien, petit par rapport à Olympus Mons et Alba Patera, mais grand comparé aux volcans terrestres. Il est situé dans la plaine d'Elysium, près d'Elysium Mons. Voir : Elysium. |
| **Algol** | β Persei. Etoile type des variables à éclipses. |
| **algue bleue** | Voir : cyanobactérie. |
| **ALH** | Désignation abrégée des collines Allan Hills en Antarctique, où l'on trouve des météorites. En particulier, la météorite ALH84001 provient de Mars, et contient des structures qui ressemblent à des bactéries fossiles. |
| **ALH 84001** | Désignation d'une météorite provenant de Mars, et contenant des structures évoquant des bactéries fossiles. Cette découverte, annoncée par la NASA comme preuve d'une vie martienne, a été peu après démentie par divers laboratoires. Voir : ALH. |
| **alizé** | Vent assez constant soufflant dans les régions intertropicales de la Terre. La chaleur excédentaire de l'équateur provoque une montée d'air chaud, qui s'échappe vers chacun des pôles. En redescendant, soumis à la force de Coriolis, ils sont déviés vers l'ouest (resp. l'est) dans l'hémisphère nord (resp. sud). Voir : force de Coriolis. |
| **Allan Hills** | Colines situées en Antarctique, qui barrent l'accès à la mer d'un grand glacier. Les météorites qui tombent sur ce glacier s'y concentrent, et c'est donc un endroit idéal pour les rechercher (sauf pour le climat, bien entendu). |
| **allemande** | Monture d'instrument astronomique, dans laquelle le tube optique est équilibré par un contrepoids. Voir : monture. Voir aussi : *instruments : monture*. |
| **Allen** | Auteur du livre "Allen's Astrophysical quantities", donnant toutes les constantes nécessaires en astronomie. C'est la référence, dans sa quatrième édition de 2000. |
| **Allende** | Chondrite carbonée, la plus grosse connue. |
| **ALMA** | ***A**tacama **L**arge **M**illimeter **A**rray*. Très grand interféromètre de 64 antennes de 12 m de diamètre (ESO, NFS (USA), Japon), plus 8 antennes de 8 m. Avec une ligne de base de 14 km, il devra observer avec une très bonne résolution (0,1") les objets froids (-260° à -170° C). La première image a été obtenue le 3 octobre 2011. |
| **Almageste** | Titre arabe de l'œuvre majeure de Claude Ptolémée. Il résume l'ensemble des connaissances de la Grèce antique, et il a été la base de toutes les connaissances astronomiques pendant tout le Moyen Age. |
| **almanach** | Mot d'origine arabe (*al* article, *man* probablement racine signifiant *lune*), qui désigne un petit livret associant au calendrier, divers conseils d'ordre pratique (jardinage), ou météorologique. Il est le descendant des parapegmes grecs. |
| **altitude** | Troisième coordonnée géographique, permettant de mesurer l'éloignement d'un point par rapport à une surface de référence (niveau de la mer sur Terre, altitude à laquelle la pression atmosphérique est de 6,10 millibars sur Mars). |
| **aluminium 26** | Isotope radioactif de l'aluminium, de période 720.000 ans. Il est formé dans l'explosion de supernovæ et projeté dans les nuages alentour. Il était présent lors de la formation du système solaire, et a participé par sa radioactivité au chauffage des planètes en formation. |
| | Opération permettant de déposer, à la surface polie d'un miroir de télescope, une couche de quelques atomes d'aluminium, |

| | |
|---|---|
| **aluminiure** | destinée à le rendre réfléchissant en conservant la forme donnée au verre. |
| **Amalthée** | (mythologie grecque : chèvre qui allaita Zeus enfant. Origine de la constellation du Capricorne, et donne aussi son nom à Capella = α Aur) Satellite de Jupiter n° V, de 200 km approximativement, orbitant à 181 000 km de la planète dans le sens direct, en 12 h. Découvert par Barnard en 1892. |
| **amas** | Voir : amas d'étoiles, amas de galaxies. |
| **amas de Coma** | Vaste amas de galaxies, situé dans la constellation de Coma Berenices (chevelure de Bérénice). |
| **amas de galaxies** | Concentration de galaxies, liées par la gravité. Ils contiennent de quelques centaines à quelques milliers de membres. Ils atteignent quelques Mpc de diamètre, avec une forte condensation centrale. Virgo et Coma sont parmi les plus riches. |
| **amas globulaire** | Ensemble d'étoiles, en grand nombre (quelques dizaines de milliers à quelques millions), et qui montrent une forme sphérique évidente. |
| **amas local** | Groupe de plus de 25 galaxies, dont 13 elliptiques, 4 irrégulières, et 3 spirales. La Voie Lactée, Andromède, M33 (le Triangle), le Grand Nuage de Magellan en font partie. Il occupe une sphère de 4 millions d'AL. |
| **amas ouvert** | Ensemble d'étoiles, en petit nombre (quelques centaines au maximum), et sans structure apparente. |
| **amas Virgo** | Amas de galaxies situé dans la constellation de la Vierge. |
| **Amazonien** | Ere géologique martienne, dans l'ancienne classification basée sur le comptages de cratères. C'est la plus récente, s'étendant d'aujourd'hui à 3 milliards d'années. Voir : Noachien, Hespérien. |
| **ammonite** | Mollusques céphalopodes marins ayant vécu au Secondaire, et disparus en même temps que les dinosaures, peut-être pour la même cause. |
| **Amor** | 1221 Amor est une petite planète, ou astéroïde, dont l'orbite est extérieure à celle de la Terre, et s'en approche sans la couper. C'est un géocroiseur. Amor est le type d'une famille d'astéroïdes d'orbites semblables. Eros en est un autre, qui a été visité par la sonde NEAR. Les Aten et les Apollo s'approchent aussi de la Terre. Tous ensemble, ils sont nommés AAA. Voir : Apollo, Aten, AAA. |
| **Ananké** | (mythologie grecque : déesse incarnant le destin. Avec Chronos, elle marque le début du cosmos) Satellite de Jupiter n° XII, de 30 km approximativement, orbitant à 21 200 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 631 j. Découvert par Nicholson en 1951. Groupe d'Ananké |
| **ancien style** | Dénomination utilisée pour le calendrier julien, dont dérive le calendrier grégorien, qualifié de *nouveau style*. Cette appellation montre clairement la parenté entre ces deux calendriers. |
| **Andromède** | Nom d'une constellation, qui contient la seule galaxie visible à l'œil nu de l'hémisphère nord. Lorsqu'il n'y a pas d'ambiguité, la "galaxie d'Andromède" est parfois nommée "Andromède". |
| **angle horaire** | Voir : coordonnées horaires. |
| **angrite** | Achondrite (météorite) riche en calcium et en pyroxène calcique. |
| **anihilation** | Transformation en énergie, de la masse d'une particule et de son antiparticule, selon la fameuse équation d'Einstein $E = m c^2$ |
| **anneau** | • Anneau de matière en orbite autour d'une planète. Les anneaux sont constitués de myriades de minuscules satellites.<br>• Anneaux de diffraction : anneaux lumineux autour de l'image d'une étoile.<br><br>Voir aussi : *seeing*, *anneaux de diffraction*, *anneau planétaire*. |
| **année** | Année calendaire, celle qui ramène l'équinoxe de printemps à date fixe. C'est une approximation de l'année tropique. |
| **année anomalistique** | Intervalle de temps entre deux passages successifs de la Terre au périhélie. |
| **année bissextile** | Année de 366 jours, dans les calendriers julien et grégorien. Plus longue que l'année commune de 365 jours, elle permet de rattraper la dérive du calendrier due à une année plus courte que l'année des saisons. Bissestile vient du latin *bis sextius*, car ce jour redoublait le sixième (*sextius*) avant les calendes. |
| **année commune** | Année de base, dans un calendrier dont les années peuvent être de longueur variable. Dans les calendriers julien et grégorien, l'année commune compte 365 jours. |
| **année de confusion** | Année 708 de Rome, au cours de laquelle César imposa le calendrier julien. Pour rattraper les dérives passées, il l'allongea à 455 jours, et de plus, ramena le début de l'année du 1er mars au 1er janvier. Ceci justifie amplement le qualificatif donné à cette année. |
| **année sidérale** | Temps que met la Terre, dans son mouvement autour du Soleil, pour revenir en face de la même étoile. Voir aussi : *année sidérale*. |
| **année tropique** | Intervalle de temps entre deux équinoxes de printemps successifs. Voir aussi : *année tropique*. |
| **année-lumière** | Unité de mesure des distances, égale à la distance parcourue par la lumière en une année ; 1 AL = $10^{13}$ km. Voir : parsec. |
| **anomalie** | En Mécanique Céleste, ce terme désigne curieusement un angle... C'est un angle, compté à partir du périhélie, qui permet de positionner une planète sur son orbite. |
| **anomalie excentrique** | Angle, mesuré depuis le centre de l'ellipse, que fait la direction du périhélie avec la contre-projection de la planète sur le cercle circonscrit à son orbite (cercle principal). |
| **anomalie moyenne** | Angle géométriquement identique à l'anomalie excentrique, mais parcouru d'un mouvement uniforme. L'anomalie excentrique se déduit de l'anomalie moyenne par l'équation de Kepler. |

| | |
|---|---|
| **anomalie vraie** | Angle, mesuré depuis le foyer, entre la direction du périhélie et le rayon-vecteur d'une planète (ligne foyer-planète). |
| **Antarctique** | Continent glacé situé au pôle sud de la Terre. On y installe actuellement des télescopes, car le seeing y est exceptionnel, et qu'on peut observer 24 h / 24 le soleil en été, le ciel nocturne en hiver. L'étendue glacée est aussi favorable à la recherche des météorites, qui de plus se concentrent près des nunataks. |
| **ANTARES** | Appareil sous-marin de détection des neutrinos, conçu au CPPM de Marseille-Luminy, et installé dans la rade de Toulon. Constitué d'un ensemble de scintillateurs-photomultiplicateurs, il observe les particules produites dans les sédiments marins, par les neutrinos venant de l'espace. La Terre le protège des parasites. |
| **Anthée** | (mythologie grecque : Alcyonides, fille du géant Alcyonée) Satellite de Saturne n° XLIX, de 2 km approximativement, orbitant à 197 700 km de la planète dans le sens direct, en 1 j 10 mn. Découvert par Porco en 2007. |
| **anti-proton** | Anti-particule du proton, c'est-à-dire ayant les mêmes propriétés (masse, nombre baryonique…) sauf la charge électrique qui est égale mais de signe opposé. La rencontre d'un proton et d'un anti-proton les anihile, et donne leur énergie de masse sous forme d'un photon. |
| **antiparallèle** | Se dit de l'état de l'électron, dans l'atome d'hydrogène, dont le spin est d'orientation opposée à celle du proton. Contraire : parallèle. |
| **Antu** | Nom de l'UT1 du VLT. Il signifie "le Soleil" dans la langue Mapuche des indiens de la région. Antu a été terminé en 1998. |
| **apesanteur** | Terme signifiant absence de pesanteur. Il est maintenant remplacé par impesanteur. Voir : impesanteur. |
| **APEX** | *Atacama Pathfinder EXperiment*. Radiotélescope submillimétrique, installé sur le plateau de Chajnantor au Chili, depuis fin 2005. Il est constitué d'une antenne de 12 m de diamètre, et observe entre 0,2 et 1,5 mm, ce qui lui permet d'observer l'Univers entre 10 et 100 K. Collaboration avec MPIfR et OSO. |
| **aphélie** | Du grec *apo* = loin de, *hélios* = Soleil. Point de son orbite où une planète est au plus loin du Soleil. |
| **Aphrodite** | Nom grec de Vénus. |
| **Aphrodite terra** | Vaste zone équatoriale de Vénus, comprenant Ovda Regio, Thetis Regio, et Atla Regio. On y trouve les volcans Ozza Mons, Sapas Mons et Maat Mons, et les grandes failles Artemis Chasma, Diana Chasma et Dali Chasma. |
| **aplatissement** | Déformation d'une planète due à sa rotation, qui provoque un renflement à l'équateur et un aplatissement aux pôles. |
| **apoastre** | Point de son orbite où un objet est au plus loin de l'astre autour duquel il est en orbite. |
| **apogée** | Point de son orbite où un satellite de la Terre est au plus loin de celle-ci (du grec *apo* = loin de, *geo* = Terre) ; s'applique bien sûr à la Lune, mais aussi aux satellites artificiels. |
| **Apollinaris Patera** | Volcan martien, situé au sud de la plaine d'Elysium, près des hautes terres de l'hémisphère sud |
| **Apollo** | 1862 Apollo est un astéroïde géocroiseur, type d'une famille. L'orbite des Apollo est extérieure à celle de la Terre, sauf au voisinage du périhélie qui est un peu plus proche du Soleil. De ce fait, ils coupent deux fois l'orbite de la Terre au cours de leur révolution. Les autres astéroïdes qui approchent la Terre sont les Amor et les Aten. Ensemble, ils sont nommés AAA. Voir : Amor, Aten, AAA. |
| **aposélénée** | Point de son orbite où un satellite de la Lune est au plus loin de celle-ci (du grec *apo* = loin de, *sélénée* = Lune) |
| **arachnoïde** | Fracture de la croûte de Vénus, présentant des failles radiales entourant d'autres failles circulaires. |
| **Arché** | (mythologie grecque : muse des origines, fille de Zeus et de Mnémosyne) Satellite de Jupiter n° XLIII, de 3 km approximativement, orbitant à 22 931 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 1 an 359 j. Découvert par Sheppard en 2002. Groupe de Carmé. |
| **Arecibo** | Plus grand radiotélescope du monde, avec une parabole de 300 m de diamètre, mais fixe, installée au fond d'un cratère naturel. |
| **Arès** | Nom grec de Mars. |
| **argument du périhélie** | Distance angulaire entre le nœud ascendant et le périhélie d'une planète. |
| **Ariel** | (mythologie : génie dans une pièce de Shakespeare) Satellite d'Uranus n° I, de 1 158 km de diamètre, orbitant à 191 000 km de la planète dans le sens direct, en 2 j 12 h 29 mn. Découvert par Lassel en 1851. Recouvert d'une croûte de glace, parsemée de rifts. Des tâches claires indiquent une glace jeune. |
| **Aristarque** | Voir : Aristarque de Samos. |
| **Aristarque de Samos** | (310-230 av. J.C.) Astronome et mathématicien grec qui a, le premier, proposé un système du monde héliocentrique. La Terre tourne autour en 1 an, et sur elle-même en 24 h. Un mouvement circulaire uniforme n'expliquant pas correctement les mouvements, ce système a été rejeté. |
| **armalcolite** | Premier minéral découvert sur la Lune par l'équipage d'Apollo 11 en 1969, dans la Mer de la Tranquilité. C'est un oxyde de titane, fer et magnésium. Il a depuis été trouvé sur Terre. Son nom est formé à partir des noms des trois astronautes de la mission : **Arm**strong **Al**drin **Col**lins. |
| **aromatique** | Qualificatif de nombreuses molécules qu'on trouve dans le milieu interstellaire. La définition exacte est complexe, mais pour simplifier, les molécules aromatiques comprennent un ou plusieurs cycles de type benzène ($C_6H_6$). |
| **Arsia Mons** | Volcan martien, sur le plateau de Tharsis, et à l'extrémité de Valles Marineris. Voir : mons. |
| **ascension droite** | Voir : coordonnées équatoriales. |
| **Ascraeus Mons** | Volcan martien du plateau de Tharsis, au nord de l'extrémité de Valles Marineris. Voir : mons. |

| | |
|---|---|
| **asphérique** | Se dit, en optique, d'une surface qui s'écarte de la sphère. Normalement, les surfaces optiques sont sphériques. Mais certaines, comme la lame de fermeture d'un télescope de Schmidt, doivent avoir une surface plus complexe. |
| **association** | Petit groupe d'étoiles qui se sont formées ensemble. Elles apparaissent dans certaines nébuleuses. Par exemple le trapèze d'Orion. |
| **assombrissement au bord** | Absorption de la lumière émise par le Soleil, qui traverse une plus grande épaisseur d'atmosphère solaire au bord qu'au centre. |
| **astérisme** | Figure dessinée sur le ciel par les étoiles ; la définition est la même que pour les constellations, mais ces dernières sont définies une fois pour toutes, alors qu'on peut désigner par astérisme tout groupement d'étoiles. Une constellation est un astérisme, alors que tout astérisme n'est pas une constellation. |
| **astéroïde** | Du grec *aster* astre, et *eidos* forme. Corps rocheux circulant autour du Soleil entre Mars et Jupiter. Les plus gros ont été appelés *petites planètes*. Voir aussi : *Liste des petites planètes*. |
| **asthénosphère** | Couche de roche, à l'intérieur de la Terre, assez souple pour maintenir l'équilibre hydrostatique. |
| **astroblème** | Du grec *astro* = astre et *blema* = blessure. Blessure faite à une planète par le choc d'une grosse météorite. Un astroblème est un cratère très ancien creusé à la surface de la Terre par la chute d'un astéroïde, et qui a résisté jusqu'à maintenant à l'érosion. |
| **astronomie** | • Science de l'étude des astres (du latin *aster* = étoile).<br>• *Astronomie de position* : branche qui étudie la position des astres.<br>• *Astrophysique* : branche qui étudie le fonctionnement des astres.<br><br>Toutes les sciences sont mises à contribution : mathématiques, toutes les branches de la physique, géologie, météorologie... Ceci ne simplifie pas la tâche pour un étudiant en astronomie ! |
| **astroparticule** | Nouvelle discipline physique mélangeant la physique des particules et l'astrophysique. Initiée par Victor Hess dans l'analyse des rayons cosmiques, elle prend aujourd'hui son essor car les accélérateurs de particules atteignent leurs limites, largement dépassées en énergie par les particules naturelles du rayonnement cosmique. |
| **astrophysique** | Science qui étudie les propriétés physiques des astres, leur formation, leur fonctionnement, leur évolution. |
| **Atalanta** | *Atalanta Planitia* est une plaine de Vénus, proche du pôle nord. C'est la plaine la plus basse de Vénus. Elle est traversée par un plissement qui continue à travers la région polaire nord. |
| **ataxite** | Météorite de type sidérite (ferreuse), dont la teneur en nickel dépasse les 16 %. Les figures de Widmanstätten ne sont plus visibles qu'au microscope. |
| **Aten** | 2062 Aten est un astéroïde géocroiseur. Son orbite est intérieure à celle de la Terre, sauf au voisinage de l'aphélie. Ainsi, il coupe l'orbite de la Terre deux fois au cours de sa révolution. Il est le type d'une famille d'astéroïdes partageant ces caractéristiques orbitales. Il partage aussi cette proximité périodique de la Terre avec les Apollo et les Amor. Ensemble, ils sont dénommés AAA. Voir : Apollo, Amor, AAA. |
| **Atlas** | (mythologie grecque : géant qui soutenait les cieux sur ses épaules) Satellite de Saturne n° XV, de dimensions 42×36×18 km, orbitant à 138 000 km de la planète dans le sens direct, en 14 h 24 mn. Découvert par Terrile en 1980. Comme dans la mythologie, Atlas est berger de l'anneau A, dont il marque le bord. |
| **atmosphère** | Enveloppe gazeuse qu'on trouve autour de certaines planètes et de quelques satellites ; on nomme aussi atmosphère la partie la plus externe d'une étoile (bien que celle-ci soit gazeuse en totalité). |
| **atmosphère primitive** | Première atmosphère de la Terre, juste après sa formation. Elle devait avoir la même composition chimique que la nébuleuse protosolaire à partir de laquelle elle s'est constituée. Cette atmosphère a dû disparaître, par suite des impacts météoritiques, et de la température qui lui a permis de s'échapper. |
| **atome** | Du grec *a* : privatif, et *tomein* : couper. Particule formée d'un noyau chargé positivement, et d'un cortège d'électrons négatifs. Il est normalement neutre. |
| **atome d'hydrogène** | Atome le plus simple, dont le noyau est constitué d'un seul proton. Le cortège électronique qui l'entoure est donc aussi réduit à un seul électron. Les niveaux d'énergie sont assez simples à calculer, et modélisent très bien le spectre de l'hydrogène. Voir : atome de Bhor. |
| **atome de Bhor** | Modèle de l'atome d'hydrogène, dans lequel le noyau (un proton) est le centre, et l'électron tourne autour à la manière d'une planète autour du Soleil, mais les orbites ne sont pas quelconques, on les dit quantifiées. Ce modèle planétaire est adapté à une explication simple, mais il est en contradiction avec la Mécanique Quantique, qui substitue des orbitales aux orbites. |
| **ATST** | ***A**dvanced **T**echnology **S**olar **T**elescope*. Télescope de nouvelle génération qui devait être achevé en 2010, 2012. Première lumière reportée à 2018. Il comporte un miroir de 4 m. Il devrait permettre de mesurer très précisément le champ magnétique du Soleil. |
| **attachée** | Couple d'étoiles si proches l'une de l'autre, que leurs enveloppes se touchent. |
| **aubrite** | Météorite de type achondrite, de couleur claire, formée de silice (oxyde de silicium) et de magnésie (oxyde de magnésium) en parts égales. Elle ne contient pas de calcium. |
| **aurore** | Phénomène lumineux produit par les chocs des particules du vent solaire sur la haute atmosphère d'une planète. |
| **aurore polaire** | Phénomène de luminescence produit dans la haute atmosphère d'une planète par l'énergie déposée par le vent solaire, piégé dans le champ magnétique de la planète. Connues sous le nom d'aurores boréales sur Terre, on les a observées en tant qu'aurores australes également, puis sur Jupiter et Saturne. |
| **australite** | Tectite provenant d'Australie, associée à un cratère probablement en Antarctique et âgées de seulement 700.000 ans. Voir : tectite. |

| | |
|---|---|
| **autogravitation** | Attraction qu'un ensemble de particules produit sur lui-même. Les étoiles sont des objets en autogravitation, car la gravité les maintient réunies, malgré les effets de l'énergie produite en leur sein, qui tend à le disperser. |
| **autogravité** | Voir : autogravitation. |
| **Autonoé** | (mythologie grecque : maîtresse de Zeus, mère d'Euphrosyne) Satellite de Jupiter n° XXVIII, de 4 km approximativement, orbitant à 24 046 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 2 ans 30 j. Découvert par Scott en 2001. Groupe d'Ananké |
| **avance du périhélie de Mercure** | Lente rotation du grand axe de l'orbite de Mercure, produite par deux effets différents : les perturbations newtoniennes des planètes (essentiellement Jupiter et Saturne), et un effet relativiste. Ce dernier a été l'un des premiers tests de la Relativité Générale, qui a réussi à expliquer précisément la différence entre les observations et les effets newtoniens. Voir aussi : *avance du périhélie de Mercure*. |
| **azimut** | Voir : coordonnées horizontales. |
| **azimutale** | Voir : monture. |
| **azote** | Gaz incolore et inodore, chimiquement peu actif. Il est le gaz majoritaire de l'atmosphère terrestre, et se trouve en plus faibles proportions dans d'autres atmosphères, en particulier celle de Titan. |
| **atmosphère stellaire** | Partie externe d'une étoile, qui se caractérise par sa transparence. Elle est juste au-dessus de la chromosphère. Elle n'est pas en équilibre thermodynamique, ce qui en rend la théorie difficile. |

A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z

| | |
|---|---|
| **bactérie acidophile** | Adjectif qualifiant certains organismes monocellulaires qui vivent dans un milieu acide. On les trouve principalement dans les milieux soufrés : sources chaudes, lacs volcaniques acides. Elles font partie des extrêmophiles. Voir : bactérie extrémophile. |
| **bactérie barophile** | Bactérie vivant dans un milieu de haute pression. Des modifications de la membrane cellulaire permettent cette adaptation. Desulfovibrio profundus a été isolée dans des sédiments profonds de la mer du Japon. Ces bactéries font partie des extrêmophiles. Voir : bactérie extrêmophile. |
| **bactérie endogée** | Bactérie vivant dans le sous-sol, à 1.000 ou 2.000 m de profondeur, et tirant son énergie des roches elles-même. Elles utilisent le gaz carbonique dissous dans la roche. |
| **bactérie extrêmophile** | Ensemble de bactéries vivant dans des milieux de caractéristiques extrêmes. Elles comprennent les halophiles, les thermophiles, les barophiles, las psychrophiles. Elles prouvent que la Vie, très résistante, peut s'adapter à des environnements très variés. |
| **bactérie halophile** | Bactérie vivant dans un milieu riche en sel (mer Morte par exemple). Elles ne peuvent vivre à moins de 60 g de sel par litre. Elles font partie des extrêmophiles. Voir : bactérie extrêmophile, bactérie extrémophile. |
| **bactérie psychrophile** | Bactérie vivant dans un milieu très froid. Ce sont des organismes qui ne peuvent vivre au-dessus de 15° C. Ils font partie des extrêmophiles. Voir : bactérie extrêmophile. |
| **bactérie thermophile** | Bactérie qui vit dans un milieu chaud. écouverte dans les sources chaudes du Yellowstone, entre 50 et 70° C. Les hyperthermophiles vivent jusqu'à 110°. On en trouve près des fumeurs océaniques. Les thermophiles font partie des extrêmophiles. Voir : bactérie extrêmophile. |
| **Balmer** | (Jean-Jacques, 01/05/1825 - 12/03/1898) Mathématicien et enseignant suisse, il a enseigné à l'Université de Bâle. Il est surtout connu pour avoir trouvé la formule qui décrit les longueurs d'onde des raies spectrales visibles de l'hydrogène. A partir de cette formule a été bâti le modèle planétaire de l'atome de Bohr. Voir : série de Balmer. Voir aussi : *séries de raies*. |
| **bande d'absorption** | Dans le cas des molécules, les mécanismes quantiques sont si complexes, que les raies d'émission ou d'absorption se tranforment en bandes de largeur significative, cumulant les effets de l'ensemble des électrons de la molécule. |
| **bande de Möbius** | Bande de papier dont on colle les deux extrémités, après avoir vrillé la bande d'un quart de tour. Dessinant un trait sur la face du ruban, on s'aperçoit que l'on revient à son point de départ, après avoir parcouru toute la bande. Le ruban de Möbius n'a donc qu'une seule face. De la même manière, on peut se persuader qu'il n'a qu'un seul bord. C'est un exemple classique de topologie non euclidienne à deux dimensions. Voir aussi : *bande de Möbius*. |
| **barkhane** | Dunes arrondies, en forme de croissant, produites dans les milieux où le vent a une direction dominante. On en trouve sur Mars. |
| **Barlow** | (Peter, 13/10/1776, 01/03/1862) Physicien anglais, inventeur de la *roue de Barlow*, premier moteur électrique, et de la *lentille de Barlow*. Voir : lentille de Barlow. |
| **barophile** | Voir : bactérie barophile. |
| **barre** | Partie de certaines galaxies spirales, formant une concentration linéaire d'étoiles passant par le centre. La barre englobe le bulbe, et les bras spiraux en sont issus à ses extrémités. |
| **barrière coulombienne** | Répulsion électromagnétique ressentie par un proton (positif) en s'approchant d'un noyau (positif lui aussi). Voir : barrière de potentiel. |
| **barrière de potentiel** | Répulsion électromagnétique agissant sur deux particules de même charge. Elle s'oppose à la fusion de deux noyaux d'hydrogène. Voir : effet tunnel. |
| | Formation des baryons après le Big Bang, lorsque la température était assez basse pour que ces particules (protons et |

| | |
|---|---|
| **baryogénèse** | neutrons essentiellement) ne se détruisent plus par chocs. |
| **baryogénèse** | Formation des baryons après le Big Bang, lorsque la température était assez basse pour que ces particules (protons et neutrons essentiellement) ne se détruisent plus par chocs. |
| **baryon** | (du grec *barys*, lourd). Nom collectif des particules formées de 3 quarks. Le neutron et le proton en sont les principaux représentants. |
| **bassin d'impact** | Cratère de très grandes dimensions creusé à la surface d'une planète par une météorite. Les mers lunaires sont des bassins d'impact, mais on en trouve de semblables sur Mercure, et sur des satellites des planètes gazeuses. Sur la Terre, il y a eu de grands cratères d'impacts peu après sa formation, mais la présence d'une atmosphère épaisse, qui produit de l'érosion, ainsi que la transformation de la croûte par la tectonique, les a effacés. |
| **bâtonnets** | Cellules de la rétine sensibles à la lumière, mais pas à la couleur. Plus sensibles que les cônes (autres cellules de la rétine), ce sont celles qui servent la nuit. En contrepartie de leur sensibilité, elles ne permettent pas de voir les couleurs ; c'est pourquoi *la nuit, tous les chats sont gris* ! |
| **BATSE** | Instrument gamma, placé sur le satellite américain CGRO (***C**ompton **G**amma **R**ay **O**bservatory*), qui a établi une carte générale des sursauts gamma. Cette carte a montré leur répartition sur tout le ciel, excluant une origine galactique. |
| **Bebhionn** | (mythologie celtique : géante renomée pour sa beauté) Satellite de Saturne n° XXXVII, de 6 km approximativement, orbitant à 17 120 000 km de la planète dans le sens direct, en 2 ans 104 j. Découvert par Sheppard en 2004. |
| **Bedout** | Ville du nord de l'Australie. Un cratère d'impact de 200 km de diamètre y a été découvert par des recherches pétrolières. On y recherche des quartz choqués pour apporter la preuve de l'impact. Il date de la fin du Permien, et pourrait expliquer les extinctions de la limite Permien-Trias |
| **Belinda** | (mythologie : personnage de Pope) Satellite d'Uranus n° XIV, de 90 km approximativement, orbitant à 75 260 km de la planète dans le sens direct, en 14 h 58 mn. Découvert par Synnott en 1986. Orbite très proche de celle e Cupid, avec lequel une collision est possible. |
| **Beppo-SAX** | Satellite Italien, avec une participation Hollandaise. Ce satellite regroupait un détecteur gamma qui couvrait tout le ciel, et un télescope gamma à masque codé. Il a réussi à transmettre au sol une position précise d'un sursaut gamma très rapidement, grâce à laquelle, pour la première fois, la contrepartie optique a été observée. C'est ce qui a permis de résoudre le problème posé par ces sursauts. |
| **berceau** | Voir : monture. |
| **Bergelmir** | (mythologie scandinave : géant de glace, fils d'Ymir) Satellite de Saturne n° XXXVIII, de 6 km approximativement, orbitant à 19 340 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 2 ans 275 j. Découvert par Sheppard en 2004. |
| **Bestla** | (mythologie scandinave : géante, mère d'Odin) Satellite de Saturne n° XXXIX, de 7 km approximativement, orbitant à 20 130 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 2 ans 353 j. Découvert par Sheppard en 2004. |
| **Béta Pictoris** | Etoile, située à 60 AL de nous, âgée de 20 millions d'années, encore entourée de son disque d'accrétion. On y a détecté des millions de comètes, qui tombent sur les planétésimaux ou l'étoile, et s'évaporent. |
| **Beta regio** | Forme, avec Ishtar et Aphrodite terra, le troisième massif montagneux de Vénus, et le moins important. Il se situe au nord de l'équateur, et forme une chaîne avec Phoebe regio et Themis regio dans l'hémisphère sud. |
| **biais de Malmquist** | Défaut des obervations faites à la limite d'un instrument astronomique, qui favorise, à une distance donnée, les objets les plus brillants comme seuls accessibles. Ils apparaissent donc plus nombreux dans un échantillon non corrigé. |
| **Bianca** | (mythologie : personnage de Shakespeare) Satellite d'Uranus n° VIII, de 50 km approximativement, orbitant à 59 200 km de la planète dans le sens direct, en 10 h 26 mn. Découvert par Smith en 1986. |
| **Biblis Patera** | Volcan martien du plateau de Tharsis, présentant une belle caldera de 53 km de diamètre, et de 4.500 m de profondeur. Voir : Tharsis. |
| **BIF** | (*Banded Iron Formation*). Formations ferrifères rubanées. Ce sont des dépôts alternés de couches respectivement riches en fer, et riches en silice. La différence de couleur de ces deux dépôts donne l'aspect. Ce fer n'a pu se déposer que dans un environnement réducteur (qui assure la mobilité du fer), mais dans des poches où de l'oxygène était présent (produit par la vie ?). |
| **Big Bang** | Terme utilisé par dérision par Fred Hoyle, passé dans le langage courant. Désigne l'instant 0, où toute la matière de l'Univers aurait été concentrée dans un volume nul. Les abords de cette singularité sont attestés par de nombreuses observations, mais la singularité elle-même (densité infinie) pose de nombreux problèmes théoriques. |
| **binaire** | Voir : étoile double. |
| **binaire à éclipses** | Voir : double à éclipses. |
| **bissextile** | Adjectif, du latin "*bis sextius...*" ("double sixième..."), qualifiant le jour ajouté au mois de février tous les 4 ans (calendrier julien) pour corriger l'erreur d'une année de 365 jours. Le calendrier grégorien réforme légèrement la règle d'ajout. Le jour bissextil procède de la même idée que les anciens mois épagomènes grecs. |
| **Bizeneuille** | Cratère d'impact. Voir : Rochechouart. |
| **BL Lac** | Noyau actif de galaxie, confondu au début avec une étoile variable, et classé comme tel. Voir : blazar. |
| **blazar** | Acronyme provenant de *BL Lac* et *star*. Les objets de type BL Lac (BL Lacertæ) sont des noyaux de galaxies actives. Ceux-ci émettent des polaires jets symétriques. Lorsque l'un des jets est dirigé vers la Terre, c'est un blazar. La puissance du jet est renforcée par la focalisation. Voir : BL Lac. |
| **blazard** | Objet de type AGN, dont le nom provient de BL Lac, qui était considéré comme étoile variable. C'est un noyau actif dont le jet est dirigé vers nous. |

| | |
|---|---|
| **Bode** | Loi de Bode. Loi empirique donnant les distances des planètes au Soleil. |
| **bolide** | Objet de taille moyenne qui se brise en heurtant l'atmosphère de la Terre. |
| **bombardement tardif** | Chute nourrie de météorites sur les planètes telluriques, il y a 3,9 milliards d'années. On en trouve des traces sur la Lune. La cause serait une déstabilisation gravitationnelle d'un réservoir de planétésimaux, suite à une migration des planètes gazeuses. Voir : migration. |
| **boson** | Particule obéissant à la statistique de Bose-Einstein. Ceci signifie que ces particules se placent de préférence toutes dans le même état quantique. |
| **boule de neige sale** | Caractérisation des comètes, due à Fred Whipple en 1950, pour signifier qu'elles sont composées majoritairement de glace d'eau, contenant beaucoup de poussières. |
| **bouteille de Klein** | Surface fermée sans bord et non orientable. Elle n'a donc ni intérieur ni extérieur. Il n'est pas possible de la plonger dans l'espace de dimension 3, aussi est-il difficile de se la représenter. Voir aussi : *bouteille de Klein*. |
| **Bracket** | (Frederick, 01/08/1896–28/01/1988) Physicien américain ayant découvert la série de raies de l'hydrogène portant son nom. Voir : série de Bracket. |
| **Brahé** | (Tycho Brahé, 14/12/1546-24/10/1601) Astronome danois, meilleur observateur à l'œil nu. Il a laissé les meilleures tables de positions de Mars, qui ont servi de base à Kepler pour établir les trois lois du mouvement des planètes. Son rôle dans ces études est donc capital. |
| **branche asymptotique** | Ligne, dans le diagramme Hertzprung-Russel, que les étoiles parcourent après la fusion de l'hélium. Elle les fait passer de la branche des géantes à celle des supergéantes. Voir : diagramme Hertzprung-Russel. |
| **branche des géantes** | Ligne, dans le diagramme Hertzprung-Russel, sur laquelle se trouvent les étoiles géantes (qui fusionnent l'hélium en carbone et oxygène). Voir : diagramme Hertzprung-Russel. |
| **branche horizontale** | Ligne, dans le diagramme Hertzprung-Russel, que les étoiles parcourent pendant la fusion de l'hélium, et sur laquelle l'équilibre est instable. Voir : diagramme Hertzprung-Russel. |
| **bras spiraux** | Bras des galaxies spirales, qui sont particulièrement brillants car ils contiennent de nombreuses étoiles jeunes, massives et chaudes. Les bras spiraux sont des ondes de densité dans le disque de la galaxie. |
| **brehmsstrahlung** | Rayonnement de freinage. Connu aussi sous le nom anglais *free-free*. Interaction de deux particules chargées sans contact. Elle se traduit par un changement de direction, et un transfert d'énergie. Si l'une des particules est beaucoup plus lourde que l'autre (proton et électron), la plus légère est freinée. |
| **bulbe** | Partie centrale, renflée, d'une galaxie spirale ou lenticulaire. |

A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z

| | |
|---|---|
| **cœlestat** | Accessoire optique permettant de diriger le faisceau lumineux issu d'un astre vers une direction fixe. |
| **cœur** | Zone centrale du Soleil, et par extension d'une étoile. C'est là que se réalise la fusion nucléaire, au moins au début de la vie de l'étoile. |
| **CAI** | Ca Al Inclusions. Inclusions réfractaires figurant dans la matrice des chondrites, ainsi nommées car elles sont constituées de grains clairs très riches en calcium et aluminium. On les trouve presque exclusivement dans les chondrites carbonées. |
| **caldeira** | Portuguais *caldeira* = chaudron. Cuvette large, produite par l'effondrement du sommet d'un volcan à la suite d'une éruption. On donne ce nom lorsque le diamètre fait plus de 1.500 mètres. On trouve des caldeiras au sommet des volcans hawaïens sur Terre, et au sommet des volcans de Mars. |
| **Calé** | (mythologie grecque : une des Grâces, fille de Zeus et d'Euryméduse) Satellite de Jupiter n° XXXVII, de 2 km approximativement, orbitant à 23 217 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 1 an 364 j. Découvert par Scott en 2001. Groupe de Carmé. |
| **calendes** | Premier jour du mois, dans le calendrier romain. Le nom provient de *calare* appeller, car le calendier était lunaire, donc non prédictible, et le grand prêtre appellait le peuple pour lui signifier le début du nouveau mois. |
| **calendrier** | Système de division du temps. L'établissement d'un calendrier a été un problème difficile, qui a permis certaines avancées en astronomie, en permettant de dater précisément certains événements. |
| **calendrier chaldéen** | Calendrier empirique, remontant à 3.800 ans avant notre ère, il était défini au jour le jour, non prédictif. Comprenant des mois de 29 et 30 jours, il totalisait 354 jours dans l'année. Pour recadrer avec les saisons, les babyloniens ajoutaient un mois lorsque le besoin se faisait sentir. Il est donc lunaire, avec ajustement solaire irrégulier. |
| **calendrier chinois** | Vieux de plus de 4.000 ans, c'est un calendrier lunaire comprenant 12 mois de 29 et 30 jours alternativement. L'accord avec les saisons était approximativement obtenu par ajout empirique d'un mois. Dès 1600 avant J.C., les chinois connaissaient la durée de l'année 365,25 jours. Aucune chronologie n'est possible avec ce calendrier, mais les chinois ont utilisé un autre calendrier, basé sur un cycle de 60, non astronomique. Celui-ci, non sujet aux saisons, permet de dater sur une période de plus de 3 millénaires. |
| **calendrier égyptien** | L'Egypte a eu plusieurs calendriers. Le calendrier primitif comportait 12 mois de 30 jours, soit 360 jours dans l'année. Il a été remplacé par le calendrier *vague*, qui ajoutait 5 jours épagomènes. Bien que l'année vague soit trop courte, les égyptiens ont gardé scrupuleusement ce calendrier pendant plus de 4.000 ans, nous donnant ainsi une chronologie parfaite sur toute cette période. |
| | Forme de calendrier, dit aussi *positiviste*, dans lequel l'année est divisée en 13 mois de 28 jours (4 semaines exactement). |

| | |
|---|---|
| **calendrier fixe** | Le dernier jour de l'année est blanc (sans nom). Toutes les années sont rigoureusement identiques. Cette solution serait parfaite si le nombre 13 ne portait pas tant de superstitions, et si d'autre part il n'était pas premier (semestres et trimestres n'existent pas)... |
| **calendrier grec** | Calendriers légèrement différents selon les cités-états, et ayant subi des évolutions. Sur une base de 354 jours, l'année était ajustée empiriquement par ajout de mois embolismiques. Les Grecs ont défini l'octaétéride, période de 8 ans, comprenant 5 années normales et 3 années de 13 mois. Bonne approximation pour les saisons, l'octaétéride est mauvaise pour les lunaisons (1,5 jour d'erreur sur une seule période). Enfin, la découverte du cycle de Méton a résolu le problème. |
| **calendrier grégorien** | C'est le calendrier en usage dans la plupart des pays du monde. Il a été instauré en 1582 par le pape Grégoire XIII pour remédier aux défauts du calendrier julien. |
| **calendrier hébreu** | Hérité des Babyloniens, ce calendrier est lunaire, avec ajustement solaire. Pour des question de tradition, il comportait 6 sortes d'années, de durée comprise entre 353 et 385 jours. La fête de Pessah (Pâques) se célébrait à la pleine lune (15 Nisan). |
| **calendrier juif moderne** | Issu du calendrier hébreu ancien, il utilise le cycle de Méton depuis le 4$^{e}$ siècle de notre ère. Il compte 6 années de 13 mois dans un cycle de 19 ans. Aujourd'hui, les phases calculées de la lune sont utilisées. L'ère débute en 3761 avant J.C. |
| **calendrier julien** | Calendrier défini par Jules César, et utilisé jusqu'en 1582. Ce calendrier a donné le Jour Julien, utilisé pour les datations de longues périodes en astronomie. |
| **calendrier lunaire** | Calendrier basé sur les phases de la lune, et dont l'année comporte 12 mois. Elle ne totalise donc que 354 jours, et il manque 11 jours pour faire une année solaire approximative. Un tel calendrier dérive donc de 11 jours par an par rapport aux saisons. Les premiers calendriers ont presque tous été lunaires. |
| **calendrier musulman** | Calendrier lunaire. Il dérive d'un ancien calendrier, modifié par le trisaïeul de Mahomet. A l'apparition de l'Islam, on tenta de le stabiliser par ajout d'un mois. Mais ce fut mal fait, et Mahomet interdit de continuer cet ajout. Le calendrier est donc redevenu purement lunaire. C'est pourquoi le mois de Ramadan tourne rapidement dans l'année. |
| **calendrier républicain** | Calendrier de la Révolution Française, qui n'a eu qu'une existence éphémère. Les magnifiques noms de mois n'ont de sens que pour le nord de la France, ce qui lui ôte toute prétention à s'imposer hors de son pays d'origine. La Révolution, qui a atteint l'universalité avec le système métrique, a bien échoué sur le plan du calendrier. |
| **calendrier romain** | Calendrier en usage à Rome, depuis sa fondation en 753 avant J.C., et important pour nous par la définition des noms des mois. |
| **calendrier solaire** | Calendrier dont le Soleil constitue la base. Ignorant la Lune, un tel calendrier s'attache à suivre au mieux les saisons. La difficulté d'observer les saisons a fait préférer la solution lunaire à la plupart des peuples de l'Antiquité. |
| **calendrier vague** | Ancien calendrier égyptien, exclusivement solaire, relativement mauvais (année fixe de 365 jours), mais particulièrement fiable, qui de ce fait permet de dater précisément de nombreux événements. |
| **Caliban** | (mythologie : personnage de Shakespeare) Satellite d'Uranus n° XVI, de 70 km approximativement, orbitant à 7 231 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 1 an 214 j. Découvert par Gladman en 1997. |
| **Callichore** | (mythologie grecque : muse, fille de Zeus) Satellite de Jupiter n° XLIV, de 2 km approximativement, orbitant à 24 043 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 2 ans 34 j. Découvert par Sheppard en 2003. Groupe de Carmé. |
| **Callirrohé** | (mythologie grecque : océanide, fille d'Océan et de Téthys) Satellite de Jupiter n° XVII, de 9 km approximativement, orbitant à 24 103 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 2 ans 28 j. Découvert par Spacewatch en 1999. Groupe d'Ananké |
| **Callisto** | (mythologie grecque : nymphe, maîtresse de Zeus, transformée en ourse par Héra, tuée par Artémis, fut catastérisée par Zeus en la Grande Ourse) Satellite de Jupiter n° IV, de 4 800 km de diamètre, orbitant à 1 882 000 km de la planète dans le sens direct, en 16 j 16 h 34 mn. Découvert par Gallilée en 1610. Presque de la taille de Mercure, c'est un mélange de roches et de glace, peu dense. Beaucoup de cratères d'impact, dont Valhalla (4.000 km) et Asgard (1.600 km). |
| **Caloris** | Grand bassin d'impact sur Mercure, un peu analogue aux mers lunaires. L'impact qui a provoqué ce bassin a été si violent, que des ondes se sont propagées sur la planète, et focalisées aux antipodes, où l'on voit leurs traces. |
| **calotte polaire** | Zone circulaire entourant les pôles de certaines planètes ou satellites, et couverte de matériaux gelés. |
| **Calycé** | (mythologie grecque : fille d'Eole, et maîtresse de Zeus) Satellite de Jupiter n° XXIII, de 5 km approximativement, orbitant à 23 566 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 2 ans 12 j. Découvert par Sheppard en 2000. Groupe de Carmé. |
| **Calypso** | (mythologie grecque : nymphe de la mer, une des Océanides, maîtresse d'Ulysse) Satellite de Saturne n° XIV, de dimensions 30×23×14 km, orbitant à 294 660 km de la planète dans le sens direct, en 1 j 21 h 36 mn. Découvert par Pascu en 1980. Calypso est au point de Lagrange L5 de Téthys (Télesto est au point L4) |
| **calystène** | Métal imaginaire que le professeur Hippolyte Calys aurait découvert dans le spectre d'une météorite, selon Hergé dans l'album "l'étoile mystérieuse". Cette découverte romanesque fait référence à la découverte, tout à fait réelle, de l'hélium dans le spectre du Soleil |
| **Cambrien** | Plus ancienne subdivision de l'ère géologique Paléozoïque, autrefois nommée Secondaire. Le Cambrien s'étend de 542 à 490 Millions d'années. On y a décrit *l'explosion cambrienne*, apparition subite (à l'échelle géologique) de nombreuses espèces multicellulaires. |
| **canal** | Canaux d'irrigation creusés par les martiens pour arroser leur planète en voie d'assèchement... croyait-on jusqu'au début du XX$^{e}$ siècle. Ce n'étaient que des illusions d'optique. Curieusement, de tels canaux existent, mais sur Terre, au cœur du Sahara : ce sont les *fogaras*, creusées vers l'an mille pour lutter (vainement) contre l'assèchement. Elles irriguent toujours certaines oasis, comme Timimoun (Sahara central). |
| **canale** | Voir : canal. |

| | |
|---|---|
| **canaux** | Voir : canal. |
| **Cancer** | Tropique du Cancer. Ligne imaginaire à la surface de la Terre, qui marque les points les plus éloignés au nord de l'équateur, où le Soleil passe au zénith certains jours de l'année. |
| **Capricorne** | Tropique du Capricorne Ligne imaginaire à la surface de la Terre, qui marque les points les plus éloignés au sud de l'équateur, où le Soleil passe au zénith certains jours de l'année. |
| **capture de neutrons** | Réaction nucléaire par laquelle un noyau s'alourdit en capturant un neutron. La capture de neutrons est facile, car il n'y a pas de répulsion électromagnétique. |
| **Carbonifère** | En géologie, cinquième période de l'ère Paléozoïque (autrefois nommée Primaire). Le Carbonifère s'étend de 360 à 300 millions d'années. Il se caractérise par une luxuriance de la végétation, qui a produit les gisements de charbon (d'où le nom de la période) |
| **Carlina** | Projet d'hypertélescope imaginé par Antoine Labeyrie. Il consiste en un miroir primaire composite formé de petits miroirs disposés au sol sur une surface sphérique, le secondaire étant placé dans une nacelle supportée par un ballon captif. |
| **Carmé** | (mythologie grecque : nymphe, maîtresse de Zeus) Satellite de Jupiter n° XI, de 40 km approximativement, orbitant à 22 600 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 692 j. Découvert par Nicholson en 1938. Groupe de Carmé. |
| **Carpo** | (mythologie grecque : une des Heures, divinités des saisons, fille de Zeus) Satellite de Jupiter n° XLVI, de 3 km approximativement, orbitant à 16 989 000 km de la planète dans le sens direct, en 1 an 91 j. Découvert par Sheppard en 2003. |
| **Cassegrain** | (Laurent, 1629-31/08/1693) Astronome et opticien français, qui a conçu un type de télescope. |
| **Cassini-Huyghens** | Sonde à destination de Saturne (Cassini, NASA) et de Titan (Huyghens, ESA). Lancée le 15/10/1997, la sonde Cassini étudie Saturne et ses satellites depuis le 01/07/2004. A son arrivée, elle a largué le module européen Huyghens qui a été le premier engin spatial à se poser sur un objet plus lointain que Mars. Voir : Titan. |
| **catena** | Mot latin, pluriel *catenæ*. Dénomination d'une structure géologique dans le système solaire, signifiant "chaîne de cratères". Voir aussi : *liste des formations géologiques*. |
| **cavus** | Mot latin, pluriel *cavi*. Dénomination d'une structure géologique dans le système solaire, signifiant "creux, dépressions irrégulières.". Voir aussi : *liste des formations géologiques*. |
| **CCD** | ***C**harge **C**oupled **D**evice*. Dispositif électronique récent, utilisé dans les appareils photo numérique, et basé sur des principes quantiques. Alors qu'une pellicule photographique ne retient qu'un photon sur cent, un capteur CCD pourrait théoriquement en retenir 99 %. |
| **cD** | Voir : cluster dominant. |
| **CDM** | ***C**old **D**ark **M**atter*. Matière sombre froide, c'est-à-dire qui se déplace à des vitesses non relativistes. |
| **ceinture de Kuiper** | Réservoir des comètes périodiques, proche du plan de l'écliptique, et situé au-delà de Neptune. Découverte par Gerard Kuiper. |
| **ceinture de Van Allen** | Ceinture de radiations découverte par le premier satellite américain (Pamplemousse). Elle entoure la Terre, et doit son existence au champ magnétique terrestre. |
| **ceinture des astéroïdes** | Ou *ceinture principale*, située entre Mars et Jupiter. C'est un anneau de petits corps, allant du gravier à un objet de 1.000 km de diamètre. Les plus gros astéroïdes sont numérotés, et leurs orbites bien déterminées. On en connait aujourd'hui plusieurs centaines de milliers. Ils sont classés selon leur composition, et selon leurs orbites. |
| **ceinture principale** | Ceinture d'astéroïdes, la première découverte, située entre les orbites de Mars et de Jupiter. Les silicates sont les composants essentiels de ces objets. |
| **célérité** | Mesure de la vitesse d'un mobile, indépendamment de la direction de son mouvement. Deux voitures qui roulent à 100 km/h en sens inverse ont des vitesses opposées, mais la même célérité. C'est pourquoi on note c la 'vitesse de la lumière', qui est en fait une célérité (elle est la même dans toutes les directions). |
| **Cénomanien** | Etage du Crétacé Supérieur, entre 100 et 94 millions d'années. Le Crétacé est la troisième et dernière période du Mésozoïque (autrefois Secondaire). C'est l'époque à laquelle se sont développés les serpents et les lézards. |
| **Cénozoïque** | Ere géologique qui correspond aux anciens Tertiaire et Quaternaire. Le Cénozoïque s'étend de 65 millions d'années à 12.000 ans. Le Cénozoïque débute avec l'extinction des dinosaures, des ammonites et de bien d'autres espèces. Il voit le développement des mammifères, qui étaient autrefois dominés par les dinosaures. Les angiospermes et les oiseaux se développent également. |
| **Centaure** | Les Centaures sont des astéroïdes qui orbitent entre Jupiter et Neptune. Le premier découvert est Chiron, qui dans la mythologie est un Centaure, d'où leur nom. Les principaux sont : Chariklo, Pholus, Chiron. La proximité des planètes géantes rend leurs orbites assez instable sur une grande durée. |
| **Céphéide** | Etoile variable périodique, de période stable, et liée à la luminosité. Cette relation permet de les utiliser comme indicateurs de distance. Les mesures de l'Univers sont basées sur ce principe, découvert par Miss H. Leavitt. Voir aussi : *les variations*. |
| **cercle dans le ciel** | Si la topologie de l'Univers était multiconnexe, et si la cellule de base était plus petite que l'horizon cosmologique, on pourrait voir les mêmes galaxies sur deux cercles conjugués dans le ciel. Voir aussi : *topologie*. |
| **Cercle magique** | Dénomination due à Eddington, pour qualifier le rayon de Schwarzschild d'un trou noir. Les coordonnées utilisées pour décrire le phénomène produisaient une singularité au niveau de l'horizon, ce qui a donné cette idée à Eddington. Georges Lemaître a exhibé un autre système, dans lequel la singularité n'existe pas, prouvant ainsi qu'elle était factice. |
| | Lunette placée dans une monture qui la bloque dans le plan méridien du lieu. Elle était destinée à mesurer les positions |

| | |
|---|---|
| **cercle méridien** | des étoiles : l'instant de passage d'une étoile dans le méridien, observé grâce à un réticule, donnait l'ascension droite, et la hauteur mesurée lors du passage donnait la déclinaison, connaissant la latitude du lieu. |
| **cercle oculaire** | Image de l'objectif donnée par l'oculaire. La lumière provenant des astres passe forcément par là. C'est l'endroit où la luminosité est maximale. Si la pupille est placée au cercle oculaire, le champ est maximum. |
| **cercle polaire** | Les cercles polaires sont des lignes imaginaires à la surface de la Terre, au-delà desquelles le Soleil ne se couche pas, au moins quelques jours par an. |
| **cercles homologues** | Voir : cercle dans le ciel. |
| **Céres** | (mythologie latine : Déesse de l'agriculture, de la fécondité, analogue de Déméter) Planète naine de 487 km de diamètre, orbitant à 3 UA du Soleil, en 4,599 ans. Découverte par Piazzi en 1801. Objet de la ceinture principale, Céres est classée aujourd'hui comme *planète naine*. Première petite planète découverte, elle comblait le trou dans la loi de Bode. |
| **chaîne proton-proton** | Ensemble de réactions nucléaires aboutissant à la synthèse de l'hélium, dont le rendement est important à basse température (au-dessous de 18 millions de degrés). Voir aussi : *détails*. |
| **Chaldéné** | (mythologie grecque : conquête de Zeus, mère de Solyme) Satellite de Jupiter n° XXI, de 4 km approximativement, orbitant à 23 100 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 1 an 358 j. Découvert par Sheppard en 2000. Groupe de Carmé. |
| **chambre à brouillard** | Appareil de mesure matérialisant le passage d'une particule chargée par l'ionisation qu'elle produit dans une atmosphère saturée en humidité. Une brusque détente provoque la formation de micro-bulles sur le passage de la particule, permettant de mesurer sa masse et son énergie. Voir : chambre de Wilson. |
| **chambre de Wilson** | Autre nom de la chambre à brouillard, inventée par Charles Wilson en 1911. Voir : chambre à brouillard. |
| **champ** | Entité physique emplissant l'espace, ayant une valeur déterminée en chaque point. L'exemple naturel est la température : elle a une valeur (scalaire) en chaque point. Un autre exemple est le vent, représenté en chaque point par un vecteur. |
| **champ magnétique** | Magnétisme produit par un mécanisme de dynamo à l'intérieur des planètes et des étoiles. Il existe aussi un champ magnétique interplanétaire, et galactique. Voir aussi : *champ magnétique solaire*. |
| **champ scalaire** | Champ dont les valeurs en chaque point de l'espace-temps, sont des scalaires (nombres purs). Voir : champ. |
| **champ tensoriel** | Champ dont les valeurs en chaque point sont des tenseurs. De tels champs complexes sont nécessaires par exemple pour décrire la géométrie de l'espace-temps en relation avec son contenu en matière-énergie. Voir : champ. |
| **champ vectoriel** | Champ dont les valeurs en chaque point sont des vecteurs. Le champ magnétique en est un exemple. Voir : champ, champ magnétique. |
| **chandelle standard** | Objet lumineux (étoile particulière, galaxie, quasar...) dont certaines propriétés sont facilement observables, et permettent de calculer la luminosité absolue. A partir de cette dernière, et de la luminosité apparente, on peut obtenir la distance, qui est le but du jeu. |
| **Chandrasekhar** | (Subrahmanyan, 19/10/1910 - 21/08/1995)Astrophysicien Indien, naturalisé américain, prix Nobel de physique 1983 pour la structure et l'évolution des étoiles. Il a expliqué l'équilibre des naines blanches. Il est le neveu de Chandrasekhara Venkata Raman, lui aussi prix Nobel. Voir : masse de Chandrasekhar, Raman. |
| **chaos** | Mot latin. Dénomination d'une structure géologique dans le système solaire, signifiant "zone de terrain fracturé". Voir aussi : *liste des formations géologiques*. |
| **Chappe** | (Jean-Baptiste Chappe d'Auteroche 23/03/1728-01/08/1769), astronome français, membre de l'Académie des Sciences. Il fit deux voyages pour observer des passages de Vénus devant le Soleil, afin d'en déduire la parallaxe du Soleil : le premier en Sibérie, le second en Californie. Ses observations ont été fructueuses, mais il mourut sur place après la seconde. |
| **Charon** | (mythologie grecque : passeur des Enfers, transportant les damnés sur le Styx dans son bateau) Satellite de Pluton n° I, de 1 207 km de diamètre, orbitant à 19 600 km de la planète dans le sens direct, en 6 j 9 h 36 mn. Découvert par Christy en 1978. De taille comparable à celle de Pluton (1/2), c'est un corps glacé encore peu connu. |
| **chasma** | Mot latin, pluriel *chasmata*. Dénomination d'une structure géologique dans le système solaire, signifiant "dépression profonde, allongée, à forte pente". Voir aussi : *liste des formations géologiques*. |
| **Chassigny** | Village proche de Dijon, où s'est écrasée une météorite le 3 octobre 1815. Composée presque exclusivement d'olivine, elle montre donc une origine volcanique. Ce qui indique une origine dans un corps de grande taille. Il a été montré par la suite qu'elle provient de Mars. Voir : Nakhla, Shergotty, SNC. |
| **Chicxulub** | Cratère d'impact en grande partie sous-marin, situé au nord de la péninsule du Yucatan (Mexique). Daté de 65 MA, il pourrait bien expliquer l'extinction des espèces à cette date (en particulier les dinosaures). Thèse appuyée par la présence de quartz choqués, de brèches, et d'une couche d'argile à iridium tout autour de la Terre. Voir : MA. |
| **Chladni** | (Ernst 30/11/1756-03/04/1827) Physicien allemand () qui a admis le premier, contre les opinions répandues, que les météorites étaient bien des objets provenant de l'espace. Il a écrit un traité : "Dissertation sur les météores et les aérolithes", dans lequel il indique que les météorites proviennent du système solaire, et sont capturées par le champ gravitationnel de la Terre |
| **chondre** | Globules ignés millimétriques, constituants caractéristiques des chondrites. Voir aussi : *chondre*. |
| **chondrite** | Météorite très vieille, constituée lors de la formation du système solaire, et n'ayant pratiquement pas subi de transformations depuis. Elles se caractérisent par la présence de petit globules appelés *chondres*. Voir aussi : *chondrite*. |
| **chondrite à enstatite** | Chondrite particulière constituée essentiellement de pyroxène et de plagioclase (l'enstatite est un pyroxène). |

| | |
|---|---|
| **chondrite carbonée** | Type le plus primitif de météorites. Leur composition est très proche de celle de la nébuleuse solaire. Outre l'olivine, le pyroxène et le plagioclase, elles contiennent du carbone sous forme organique. |
| **chondrite ordinaire** | Les chondrites ordinaires sont la majorité des chondrites (80 %). Leur composition est complexe : olivine, bronzite, clinopyroxène, plagioclase... |
| **chromosphère** | Très fine couche de l'atmosphère du Soleil, qui se trouve entre la photosphère et la couronne. Son nom vient du grec *chromos* (couleur), à cause de sa couleur rose dûe à la raie Hα. |
| **chtonien** | Adjectif construit à partir du grec χθων = Terre. Les divinités chtoniennes sont les divinités primitives, dont les Titans (Chronos par exemple). Voir : planète chtonienne. |
| **chute** | On nomme ainsi une météorite qu'on a observée pendant sa chute. Cette observation est déjà assez rare, et il est encore moins fréquent de pouvoir retrouver les débris. Les chutes sont donc peu nombreuses. Voir : trouvaille. |
| **chute libre** | Mouvement d'un corps dans un champ de gravitation, auquel aucune force ne s'oppose. Sur Terre, la chute libre n'est rigoureusement pas possible, car la résistance de l'air s'y oppose. C'est pourquoi une plume tombe moins vite qu'une bille. Mais sur la Lune, l'absence d'atmosphère permet la chute libre. |
| **circulation méridionale** | Dans une sphère fluide (étoile ou atmosphère planétaire), ce sont les déplacements le long des méridiens, c'est-à-dire nord-sud ou sud-nord. Elle assure le transfert d'énergie équateur-pôles dans les atmosphères planétaires. Elle apparaît aussi parfois dans certaines étoiles, par exemple lors de la formation des étoiles à neutrons. |
| **classe de luminosité** | Classification des étoiles selon leur luminosité, liée à leur taille (la luminosité provient d'une plus ou moins grande surface émissive) : classe I : supergéantes ; classe II : géantes lumineuses ; classe III : géantes normales ; classe IV : sous-géantes ; classe V : naines. Le Soleil est une naine. |
| **classique** | Voir : objet classique. |
| **cluster dominant** | Nom générique de galaxies elliptiques géantes (atteignant 100 fois la masse de la Voie Lactée), qui se trouvent au centre de certains amas. Il est probable qu'elles se soient formées par coalescence de galaxies plus petites. |
| **CMB** | *Cosmic Microwave Background* ; Fond diffus de rayonnement cosmologique. Découvert par Penzias et Wilson en 1965, ce rayonnement avait été prévu bien avant par G. Gamow. Il est actuellement à 3° K, et a été émis lorsque l'Univers est devenu transparent, lui permettant de se propager, affecté par l'augmentation des longueurs produites par l'expansion. Cette allongement refroidit le rayonnement. |
| **CNO** | Voir : cycle du carbone. |
| **COBE** | ***CO****smic* ***B****ackground* ***E****xplorer*. Sonde spatiale qui a mesuré l'intensité du rayonnement de fond du ciel, à la température de 3 K. Il a trouvé des fluctuations légères dans la température en fonction de l'angle d'observation, qui montre que l'Univers, au moment ou il est devenu transparent, présentait déjà une structure, avec des variations de température. |
| **coelestat** | Instrument à miroir destiné à renvoyer l'image d'un astre dans une direction fixe. Il permet d'observer à l'aide d'un instrument fixe. Il est formé par un miroir fixé sur un axe parallèle à l'axe du monde. |
| **coésite** | Quartz (oxyde de silicium) transformé par une très forte pression. Caractérise les roches ayant reçu un choc extrêmement violent (cratères météoritiques). Associée à la Stishovite. |
| **Colette Patera** | Caldeira située sur la plateau Lakshmi Planum sur Vénus, près du pôle nord. Colette est une caldeira complexe, formée en plusieurs phases. |
| **colles** | Mot latin. Dénomination d'une structure géologique dans le système solaire, signifiant "petites collines ou mamelons". Voir aussi : *liste des formations géologiques*. |
| **Columbia** | Supercontinent qui s'est formé vers 1,8 Ga et s'est fragmenté vers 1,5 Ga. |
| **coma** | • enveloppe gazeuse d'une comète produite par sublimation de la glace au soleil, atmosphère transitoire.<br>• aberration optique donnant, d'une étoile hors de l'axe, une image en forme de comète.<br><br>Voir : aberration. Voir aussi : *coma (partie d'une comète)*. |
| **comète** | Boule de neige sale (constituée essentiellement de glace d'eau et de poussières) ; elle se déplace sur une orbite excentrique, et lorsqu'elle est près du Soleil, la glace se sublime, libère les poussières et les gaz inclus. Poussières et gaz, poussés par le vent solaire, forment le bel astre que l'on peut admirer. |
| **composition des vitesses** | Si un mobile se déplace à l'intérieur d'un autre, à quelle vitesse le voit-on se déplacer depuis un référentiel fixe ? Galilée a répondu *la somme des vitesses*. Einstein a montré que ce n'était pas possible pour les grandes vitesses, et remplacé l'addition par une formule plus complexe qui limite le résultat. |
| **comput ecclésiastique** | Du latin *computare* compter. Règles de calcul, dans les calendriers julien et grégorien, permettant de prévoir les phases de la lune, et par là la date de Pâques, et des fêtes qui lui sont liées. Il est basé sur le cycle de Méton, représente bien les phases sur de longues durées, mais est parfois en désaccord avec l'astronomie. La base de ces calendriers est purement solaire. |
| **conduction** | Transfert de chaleur par contact direct entre atomes. Les métaux ont un excellent coefficient de conduction, en particulier le cuivre. |
| **cône de lumière** | Cône dont le sommet représente un lieu et un instant particulier (événement). L'axe vertical représente le temps ; les plans perpendiculaires représentent l'espace, à un instant donné. Le demi-cône inférieur représente le passé, et le suprérieur représente l'avenir. |
| **cônes** | Cellules de la rétine, sensibles à la couleur. |
| **conique** | Courbe fermée ou ouverte, obtenue par l'intersection d'un cône par un plan. Les coniques sont l'*ellipse*, la *parabole* et l'*hyperbole*. |

| | |
|---|---|
| **conjonction** | Du latin *cum* = avec, se dit lorsqu'une planète est dans la même direction que le Soleil. Si c'est une planète inférieure, on parle de **conjonction inférieure** lorsqu'elle est devant le Soleil (distance minimale, mais inobservable), de **conjonction supérieure** dans le cas contraire. Pour une planète supérieure, la conjonction ne peut se produire que derrière le Soleil, on ne mentionne donc aucun qualificatif. |
| **constante cosmologique** | Constante qui apparaît dans l'équation d'Einstein décrivant la gravité. On peut l'interpréter comme une énergie du vide, ce qui expliquerait l'accélération constatée de l'expansion. |
| **constante de Hubble** | Notée $H_0$, où le 0 représente l'instant présent. Elle donne la vitesse à laquelle semble s'éloigner une galaxie située à 1 mégaparsec de nous. Elle se mesure en kilomètres / seconde / mégaparsec. |
| **constante de Rydberg** | Constante apparaissant, en particulier, dans la formule des raies de l'hydrogène. |
| **constante solaire** | Quantité d'énergie reçue sur Terre en provenance du Soleil, sur un mètre-carré perpendiculaire à la direction des rayons. Elle n'est constante que de réputation, puisque le Soleil augmente régulièrement sa brillance depuis sa formation, et fluctue légèrement autour d'une valeur moyenne. |
| **constellation** | Figure géométrique dessinée sur le ciel par des étoiles conventionnellement associées ; les constellations fixées par les astronomes sont celles dérivant des antiquités grecque et latine (tout au moins pour l'hémisphère nord). D'autres peuples ont défini des constellations parfois différentes (par exemple les Touaregs). Voir aussi : *Liste des constellations*. |
| **continuum** | Partie d'un spectre montrant une continuité de la lumière, par opposition aux raies. |
| **contraction des indices** | Opération mathématique transformant un tenseur d'ordre n en un tenseur d'ordre n-2. Le produit scalaire de deux vecteurs (considérés comme des tenseurs) fait passer de l'ordre 2 (les composantes des deux vecteurs) à l'ordre 0 (un scalaire). Le produit scalaire est un cas particulier de contraction des indices. |
| **convection** | Mouvements de matière à l'intérieur d'une planète ou d'une étoile, produit par des différences de température et donc de densité. La convection est aussi le mouvement turbulent de l'eau en ébullition dans une casserole. |
| **coordonnée** | Chacun des nombres qui situent un point sur une surface ou dans un volume, par rapport à un système de référence. |
| **coordonnées comobiles** | Coordonnées, permettant de repérer un point dans l'espace-temps, de manière indépendante de l'expansion. On peut imaginer l'espace-temps comme un tissu élastique quadrillé. Des graduations inscrites dessus s'étendent avec l'expansion, et les galaxies conservent toujours donc les mêmes coordonnées comobiles. |
| **coordonnées de Gauss** | Système de coordonnées curvilignes, adapté à l'espace-temps déformable de la Relativité Générale. |
| **coordonnées équatoriales** | Système de coordonnées utilisant **l'équateur** comme plan de référence. La première coordonnée est nommée *ascension droite*, elle positionne la projection de l'astre sur l'équateur. Elle est donnée par un angle compté de 0 à 24 heures, dans le sens des aiguilles d'une montre. La seconde coordonnée est la *déclinaison*, distance angulaire de l'astre à l'équateur. Les deux coordonnées sont fixes. |
| **coordonnées galactiques** | Système de coordonnées utilisant **le plan de la Galaxie** comme plan de référence. La première coordonnée est nommée *longitude galactique*, elle positionne la projection de l'astre sur le plan de la Galaxie. La seconde coordonnée est la *latitude galactique*, distance angulaire de l'astre au plan de la Galaxie |
| **coordonnées horaires** | Système de coordonnées utilisant **l'équateur** comme plan de référence. La première coordonnée est nommée *angle horaire*, elle positionne la projection de l'astre sur l'équateur. Elle est donnée par un angle compté de 0 à 24 heures, dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. La seconde coordonnée est la *déclinaison*, distance angulaire de l'astre à l'équateur. La déclinaison d'une étoile est fixe, son angle horaire augmente au cours du temps. |
| **coordonnées horizontales** | Système de coordonnées utilisant **l'horizon** du lieu comme plan de référence. La première coordonnée est nommée *azimut*, elle positionne la projection de l'astre sur l'horizon. Elle est donnée par un angle compté de 0 à 360°, compté dans le sens des aiguilles d'une montre. La seconde coordonnée est la *hauteur*, distance angulaire de l'astre à l'horizon. Ce système est différent pour chaque observateur. |
| **copernicanisme** | Description du Monde selon Copernic, et adhésion à ce principe. Le copernicanisme de Képler est dynamiste (il met l'accent sur les mouvements des planètes), celui de Galilée est tourné vers l'homogénéité du ciel et de la Terre, formés des mêmes éléments. |
| **copernicien** | Voir : système copernicien. |
| **Coralie** | Spectrographe, identique à Elodie (OHP), et destiné à l'Observatoire de La Silla (Chili). Voir : Elodie. |
| **Coravel** | (CORelation VELocity) Spectrographe réalisé par André Baranne et Michel Mayor pour l'OHP. Très bien adapté à la mesure des vitesses radiales des étoiles, il est l'ancêtre d'Elodie, le spectrographe qui a détecté la prem!ère exoplanète. |
| **Cordélia** | (mythologie : fille du roi Lear) Satellite d'Uranus n° VI, de 40 km approximativement, orbitant à 50 000 km de la planète dans le sens direct, en 8 h. Découvert par Terrile en 1986. Confine, de l'intérieur, l'anneau ε |
| **Coré** | (mythologie grecque : autre nom de Perséphone, épouse d'Hadès, déesse des Enfers) Satellite de Jupiter n° XLIX, de 2 km approximativement, orbitant à 24 011 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 2 ans 49 j. Découvert par Sheppard en 2003. Groupe d'Ananké |
| **Coriolis** | (Gaspard de Coriolis, 21/05/1792-19/09/1843) Ingénieur français, connu surtout pour la découverte de la force fictive qui porte son nom. Voir : force de Coriolis. |
| **corona** | Mot latin, pluriel *coronæ*. Dénomination d'une structure géologique dans le système solaire, signifiant "formation de forme ovoïde". On trouve des coronæ sur Vénus, décrites par les chercheurs soviétiques. Elles sont typiques du relief vénusien. Voir aussi : *liste des formations géologiques*. |
| **coronium** | Elément chimique hypothétique, décrit d'après les raies spectrales observées dans la couronne du Soleil. Le coronium |

| | |
|---|---|
| | n'existe pas, ces raies sont des raies interdites. |
| **coronographe** | Sorte de lunette modifiée, difficile à construire, qui permet l'observation de la couronne du Soleil en dehors des éclipses totales. Créé par Bernard Lyot. |
| **coronographie interférométrique** | Méthode complémentaire de l'interférométrie. On mélange la lumière de deux télescopes, mais après avoir inversé la phase de l'un des faisceaux. On produit donc une interférence destructrice, et l'étoile disparaît. Mais une planète autour d'elle, légèrement décalée, est amplifiée, et bien visible. Correspond au terme anglais *nulling interferometry*. |
| **corotation** | Dans une galaxie subissant une perturbation gravitationnelle, la zone de corotation est le cercle centré sur le centre de la galaxie, où la période orbitale des étoiles est égale à la période de la perturbation. |
| **corps noir** | Corps idéal, imaginé par les physiciens, et qui absorberait parfaitement toutes les radiations. Son spectre ne dépend strictement que de sa température. Le meilleur corps noir qu'on ait observé est l'Univers lui-même. |
| **corps parent** | Astéroïde de taille assez importante, qui a subi un violent impact au cours duquel une partie de sa matière a été perdue. Continuant son périple autour du Soleil, il arrive que certains fragments tombent sur Terre sous forme de météorites. L'astéroïde est le corps parent de ces météorites. |
| **cosmogonie** | Etude de la formation du système solaire. |
| **cosmogonie catastrophique** | Théorie de la formation du système solaire, à partir d'une catastrophe, événement improbable. De ce fait, la formation des planètes serait tout à fait exceptionnelle. L'existence de très nombreuses exoplanètes invalide ce type de théories. |
| **cosmogonie évolutionniste** | Théorie de la formation du système solaire, à la suite d'une évolution de la matière qui en est à l'origine. Ce type de théories correspond à une formation naturelle, qui se produirait partout où les conditions sont réunies. Ces théories sont validées par la découverte de très nombreuses exoplanètes, qui confirme l'aspect normal de la formation des planètes. |
| **cosmologie** | Etude de la formation et de l'évolution de l'Univers pris dans son ensemble. La cosmologie n'est possible que depuis la Relativité Générale. Voir aussi : *cosmologie*. |
| **cosmologie newtonienne** | Cosmologie déduite de la théorie de Newton de la gravitation universelle. Bien que cette théorie ne décrive pas parfaitement la Nature, elle prédit l'évolution de l'Univers de façon assez correcte, et proche des conclusions relativistes. |
| **cosmonaute** | Terme russe désignant une personne ayant fait un voyage dans l'espace. Les termes correspondants sont : spationaute (français), astronaute (américain), taïkonaute (chinois). |
| **cosmos** | • Mot grec désignant le monde comme un tout ordonné, par opposition au chaos (désordre).<br>• Nom générique, fourre-tout, donné à la plupart des sondes spatiales soviétiques. La série comprenait tout autant des engins militaires, que des sondes scientifiques ou techniques.<br><br>Voir : cosmologie. |
| **couche KT** | Couche d'argile de quelques millimètres d'épaisseur, observée dans de nombreux sites mondiaux. Elle est riche en iridium, métal rare dans la croûte terrestre, et d'origine météoritique. Elle signe probablement la mort des dinosaures. |
| **couche renversante** | Limite supérieure de la photosphère. La raie Hα est en absorption en-dessous, en émission au-dessus. |
| **coucher** | Passage d'un astre par l'horizon, avec la hauteur décroissante. |
| **Coudé** | Nom d'un montage de télescope : le faisceau lumineux est renvoyé à travers l'axe de déclinaison d'où il peut être dirigé vers le sous-sol de l'observatoire. Ainsi rendu fixe, le faisceau peut en particulier être analysé par un spectrographe à très grande dispersion (très lourd, impossible à fixer au télescope), pour produire des spectres très fins. |
| **coupure GZK** | Phénomène nommé d'après les physiciens Greisen, Zatsepin et Kuzmin qui l'ont prédit. Les protons de grande énergie (> $5\ 10^{19}$ eV) du rayonnement cosmique peuvent interagir avec les photons du fond cosmologique micro-onde. Les protons d'énergie supérieure ne devraient pas exister. |
| **courant de Magellan** | Pont de matière s'étendant du Grand Nuage de Magellan à notre Galaxie. |
| **courbe de lumière** | Courbe montrant l'évolution dans le temps de la luminosité d'une étoile variable. Voir aussi : *variable à éclipse*, *céphéide*. |
| **courbe de rotation** | Courbe déterminant la vitesse de rotation des étoiles, en fonction de leur distance au centre de la galaxie. Au-delà du disque brillant, les étoiles devraient avoir des vitesses képlériennes. Ce n'est pas le cas, et ceci pose le problème de la masse cachée. |
| **courbure** | Voir : courbure de l'espace-temps. |
| **courbure de l'espace-temps** | La géométrie de l'espace-temps n'est pas forcément euclidienne, et elle peut admettre une courbure, un peu comme la surface d'une sphère. La courbure de l'espace-temps, au moins locale, explique les mouvements des corps en Relativité Générale. |
| **couronne** | Partie la plus externe de l'atmosphère du Soleil. |
| **crater** | Mot latin, pluriel *craters*. Dénomination d'une structure géologique dans le système solaire, signifiant "dépression circulaire". Voir aussi : *liste des formations géologiques*. |
| **cratère** | Formation géologique à peu près circulaire, ayant deux origines possibles :<br><br>• volcanique, construit par accumulation de laves ;<br>• collisionelle : produit par l'impact d'une météorite.<br><br>Nombreux cratères d'impact sur la Lune, Mercure et Mars. Quelques uns sont encore visibles sur Terre. Le comptage des |

| | |
|---|---|
| | cratères d'impact permet de dater les surfaces planétaires. Voir aussi : *cratères d'impact terrestres*. |
| **cratère d'impact** | Voir : cratère. |
| **cratérisation** | Abondance des cratères visibles à la surface d'une planète. Un nombre élevé de cratères traduit un grand âge de la surface, puisqu'ils ont été produits par des impacts répartis dans le temps. Un remodelage ultérieur du terrain a effacé les anciens cratères, trahissant un terrain plus jeune. |
| **Cressida** | (mythologie : personnage de Shakespeare) Satellite d'Uranus n° IX, de 80 km approximativement, orbitant à 62 000 km de la planète dans le sens direct, en 11 h8 mn. Découvert par Synnott en 1986. |
| **Crétacé** | En géologie, troisième et dernière période de l'ère Mésozoïque (autrefois nommée Secondaire). Le Crétacé s'étend de 146 à 100 millions d'années. Il se caractérise par les abondants dépôts de craie qui lui ont donné son nom. Sa fin est marquée par la disparition des dinosaures, des ammonites et de bien d'autres espèces. |
| **crise PTr** | Grande extinction à la limite entre le Permien et le Trias, il y a 250 millions d'années. 90 % des espèces ont disparu, en particulier de nombreux amphibiens et reptiles. |
| **croûte** | Partie externe solide d'une planète. La croûte est constituée de matériaux légers, ayant surnagé lors de la différenciation de la planète, alors que les matériaux lourds plongeaient pour constituer le noyau, et les matériaux intermédiaires formaient le manteau. |
| **croûte terrestre** | Partie externe solide de la Terre. Avec le manteau supérieur, elle forme la *lithosphère*. Elle est constituée de matériaux légers. On distingue la croûte continentale, et la croûte océanique, qui est plus dense. |
| **crown** | Verre ordinaire, d'indice de réfraction faible. On en fait des lentilles convergentes, associées à des lentilles divergentes de flint dans les doublets achromatiques. |
| **Cruithne** | Astéroïde lié à la Terre. Il parcourt, vue de la Terre, une orbite en fer à cheval : parfois il se trouve sur une orbite un peu plus proche du Soleil, donc se déplace plus vite que la Terre, qu'il rattrape. L'attraction de celle-ci le propulse alors sur une orbite plus élevée, sur laquelle il va moins vite, et c'est alors la Terre qui le rattrape, et le propulse sur une orbite plus basse. Et le cycle recommence |
| **cryoclastie** | Processus de dégradation physique des roches par le gel de l'eau infiltrée dans des fissures. Synonyme de *gélifraction*. Sur Terre, elle se produit quotidiennement en haute montagne. |
| **CTA2** | Sigle désignant le livre "Construction du télescope d'amateur" de Jean Texereau, seconde édition. Bien qu'ancien, il reste la référence pour construire un télescope, surtout pour la partie optique. Il est accessible sur Internet. |
| **cubewano** | Objet de la Ceinture de Kuiper. Le premier trouvé était nommé provisoirement 1992 QB1. Les objets ayant des orbites semblables ont été nommés en épelant ce sigle en anglais : "Q, B, one". On les nomme plus généralement *objets classiques*. |
| **Cupid** | (mythologie : personnage de Shakespeare) Satellite d'Uranus n° XXVII, de 18 km approximativement, orbitant à 74 800 km de la planète dans le sens direct, en 14 h 50 mn. Découvert par Showalter en 2003. Orbite proche de celle de Belinda, probablement instable, et collision possible. |
| **Curiosity** | Rover américain à 6 roues déposé sur Mars le 6 août 2012, dans le cratère Gale. Le site a été choisi pour la présense d'hématite grise, minéral qui se forme généralement dans l'eau. Le but de cette sonde est la recherche de traces de vie, présente mais plus probablement passée, par des méthodes physico-chimiques essentiellement. |
| **cyanobactérie** | Bactérie photosynthétique, de couleur vert-bleu, qui a transformé l'atmosphère terrestre. Nommée familièrement *petite algue bleue*. |
| **cyanogène** | Gaz incolore, très toxique, que l'on trouve dans certaines atmosphères planétaires. Formule chimique : $C_2N_2$. CN est le *radical cyanogène*. |
| **cyanophycée** | Voir : cyanobactérie. |
| **cycle CNO** | Voir : cycle du carbone. |
| **cycle de Bethe** | Voir : cycle du carbone. |
| **cycle de Méton** | Période de 19 années, découverte par Méton en 430 avant J.C., et indiquant que 19 ans = 235 lunaisons. C'est la base du calendrier Grégorien dans sa partie lunaire. |
| **cycle de Wilson** | Le cycle de Wilson est l'évolution d'un océan, depuis la fragmentation d'un continent, l'ouverture de l'océan, puis sa disparition par subduction (tectonique des plaques). La croûte océanique se forme dans la dorsale, se déplace, et disparaît dans le manteau par subduction. Durée du cycle : 60 MA en moyenne. |
| **cycle du carbone** | Ensemble de réactions nucléaires conduisant à la fusion de l'hélium, et dont le rendement est important à haute température (plus de 18 millions de degrés). |
| **cycle solaire** | • Cycle de 11 ans, au cours duquel les taches solaires, précédemment absentes, apparaissent à haute latitude, puis se forment de plus en plus près de l'équateur, puis disparaissent. D'un cycle au suivant, la polarité des taches change.<br>• *Cycle solaire* désigne également le produit (28) des 7 jours de la semaine, par les 4 années séparant deux ajouts de jours bissextils consécutifs. Il indique que le premier janvier revient au même jour de la semaine au bout de 28 ans.<br><br>Voir aussi : *cycle solaire*. |
| **Cyllèné** | (mythologie grecque : naïade, fille de Zeus) Satellite de Jupiter n° XLVIII, de 2 km approximativement, orbitant à 23 951 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 2 ans 22 j. Découvert par Sheppard en 2003. Groupe d'Ananké |

A B C E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z

# D

| | |
|---|---|
| **Danu Montes** | Chaine montagneuse de l'hémisphère nord de Vénus, qui borde le plateau Lakshmi au sud. |
| **Dao Vallis** | Vallée de débâcle sur Mars, qui se jette dans Hellas Planitia. Elle suit un cours nord-est-sud-ouest depuis les flancs du volcan Hadriaca Patera et, avec Niger Vallis, s'étend sur 1.200 km de longueur. La chaleur produite par le volcan est sans doute à l'origine de l'eau qui l'a creusée. |
| **Daphnis** | (mythologie grecque : berger, poète, fils d'Hermès et frère de Pan) Satellite de Saturne n° XXXV, de 7,8 km approximativement, orbitant à 136 500 km de la planète dans le sens direct, en 14 h 15 mn. Découvert par Porco en 2005. |
| **date de Pâques** | Date de la fête de Pâques dans les calendriers julien et grégorien. Elle est définie sur la base du calendrier juif d'origine, et s'adapte aux changements de structure de l'année imposés par ces calendriers. D'origine lunaire, son calcul est difficile, et fait l'objet du *comput ecclésiastique*. |
| **décalage anormal** | Il s'agit d'un décalage spectral de galaxie, qui semble en contradiction avec l'expansion de l'Univers. Par exemple, une galaxie et un quasar angulairement proches, et de décalages très différents. Il est difficile de tous les ignorer… Voir : décalage spectral. |
| **décalage spectral** | Déplacement des raies d'absorption ou d'émission d'un spectre, dû en général à un mouvement de la source par rapport à l'observateur. La mesure du décalage spectral d'une galaxie permet d'apprécier sa distance. |
| **décalage vers le rouge** | Glissement de toutes les ondes lumineuses vers le côté des grandes longueurs d'onde, qui produit un effet de rougissement dans la partie visible. Le décalage peut être produit par l'expansion de l'Univers, par effet Doppler, ou par effet gravitationnel. |
| **décan** | Etoile dont le lever rythmait les heures de nuit à Babylone. |
| **déclinaison** | Voir : coordonnées équatoriales. |
| **découplage** | Au moment de la recombinaison, les électrons sont piégés par les noyaux atomiques. Les photons qui interagissaient avec eux avant, sont maintenant libres. On dit qu'ils sont *découplés*. Le découplage des photons et des électrons rend l'Univers transparent. |
| **déférent** | Cercle principal de l'orbite d'une planète, dans la théorie d'Aristote. Le vrai mouvement n'étant pas uniforme, il a fallu ajouter un second cercle, l'épicycle, dont le centre est animé du mouvement uniforme du déférent. La combinaison des 2 mouvements uniforme explique les rétrogradations. Voir : épicycle. |
| **dégazage primordial** | Par extrapolation des rejets gazeux des volcans actuels, on suppose que la jeune Terre s'est constitué une atmosphère primitive en rejetant intensément des gaz de composition analogue ($H_2O$, $CO_2$, CO, $H_2S$...). |
| **dégénérescence** | Etat de la matière dans laquelle les particules occupent tous les états d'énergie possibles. Contrairement à la matière dans un état normal, l'augmentation de température n'entraîne pas une augmentation de pression. Ceci a des conséquences critiques dans certaines phases de l'évolution des étoiles, et dans l'équilibre de certaines. |
| **degré** | Degré d'arc : unité de mesure d'angle, notée ° ; le cercle est divisé en 360°. |
| **degré absolu** | Appellation différente du degré Kelvin. |
| **degré Celsius** | Unité de température usuelle, notée ° ; son origine 0° C est la température d'un mélange d'eau et de glace pilée (qui est en équilibre, et dont la température est donc constante). La graduation 100° correspond à la température de l'eau en ébullition, qui est un autre équilibre entre l'eau et la vapeur. |
| **degré Centigrade** | Appellation différente du degré Celsius, qui rappelle sa division en 100 degrés. |
| **degré Kelvin** | Unité scientifique de mesure de température, notée K ; elle ne diffère de l'échelle Celsius que par la position de l'origine : le 0 K correspond à un état théorique de la matière totalement figé, où les atomes ne s'agitent plus du tout. Il correspond à -273,15° C. |
| **Deimos** | (mythologie grecque : fils d'Ares et d'Aphrodite, frère de Phobos. Son nom signifie *terreur*) Satellite de Mars n° II, de dimensions 15×12×11 km, orbitant à 23 460 km de la planète dans le sens direct, en 30 h. Découvert par Hall en 1877. C'est probablement un astéroïde capturé par Mars. Il est plus loin que l'orbite synchrone, et donc s'éloigne lentement de Mars. |
| **demi grand-axe** | Longueur de la moitié du plus grand des axes d'une ellipse. |
| **dénomination de Bayer** | Système de définition de noms pour les étoiles, défini par l'astronome allemand Bayer en 1603. Par exemple α UMi pour l'étoile polaire (α = la plus brillante ; UMi = Ursæ Minoris = Petite Ourse). Il a publié ce travail dans "l'Uranométria". Voir aussi : *dénomination de Bayer*. |
| **densité** | Rapport de la masse volumique d'un corps divisée par la masse volumique de l'eau. La densité n'a donc **pas** d'unité ! |
| **dérive des continents** | Théorie due à Wegener, dont l'origine est la ressemblance de forme entre Afrique et Amérique. Elle justifie la similitude des fossiles des deux côtés de l'océan, des ressemblances géologiques, et l'évolution du climat Antarctique. Mais à l'époque de Wegener, aucun mécanisme connu ne pouvait la justifier. Voir : tectonique des plaques. |
| **dérivée** | Fonction mathématique qui représente la variation d'une valeur. Par exemple, la vitesse est la fonction dérivée de la fonction distance parcourue. Si la dérivée d'une fonction est nulle en un point, cela signifie que la fonction ne varie pas en ce point, donc que sa courbe est horizontale. |
| **Desdémone** | (mythologie : personnage de Shakespeare) Satellite d'Uranus n° X, de 64 km approximativement, orbitant à 62 700 km de la planète dans le sens direct, en 11 h 22 mn. Découvert par Synnott en 1986. |
| | (mythologie grecque : nymphe, fille de Poséïdon et de Déméter) Satellite de Neptune n° V, de dimensions 180×150×130 |

| | |
|---|---|
| **Despina** | km, orbitant à 52 526 km de la planète dans le sens direct, en 8 h 2 mn. Découvert par Synnott en 1989. Despina orbite à l'intérieur de l'orbite synchrone, et tombe lentement vers la planète. |
| **détaché** | Se dit d'un couple d'étoiles dont les membres sont éloignés, et n'ont aucun contact. |
| **détonation de l'oxygène** | Explosion, semblable à la détonation du carbone, qui se produit dans le cœur d'une étoile massive au moment de l'allumage de la fusion du carbone. |
| **détonation du carbone** | Explosion qui se produit dans le cœur d'une étoile massive au moment de l'allumage de la fusion du carbone. Si elle se produit dans une matière dégénérée, elle est assez violente pour détruire l'étoile. |
| **deutérium** | Atome d'hydrogène dont le noyau est formé d'un proton et d'un neutron. Sa masse est à peu près double de celle de l'hydrogène ordinaire. |
| **Dévonien** | En géologie, quatrième période de l'ère Paléozoïque (autrefois nommée Primaire). Le Dévonien s'étend de 416 à 375 millions d'années. Il se caractérise par l'apparition des premiers vertébrés terrestres et des premières plantes à graines, ainsi que des premiers arbres. |
| **diagramme de Feynman** | Schéma représentant une interaction entre des particules. A gauche se trouvent les particules interagissant, et à droite les particules produites. Le temps s'écoule donc de gauche à droite, et se représente par des flèches. Mais les antiparticules sont représentées comme des particules remontant le temps (flèches inversées). |
| **diagramme de Wolf** | Diagramme permettant de déterminer l'extinction interstellaire des nébuleuses obscures. Il se base sur le comptage des étoiles visibles, pour une magnitude donnée, à l'intérieur et aux abords de la nébuleuse. |
| **diagramme Hertzprung-Russel** | Diagramme mettant en relation la température effective d'une étoile et sa luminosité. Le diagramme HR est l'outil de base de l'astrophysique. Il en existe plusieurs variantes : la température effective est équivalente à la couleur, au type spectral, et à la masse ; la luminosité est équivalente à la magnitude absolue. Le diagramme HR permet de classer les étoiles, d'expliquer leur évolution, de déterminer l'âge d'un amas... |
| **diagramme HR** | Voir : diagramme Hertzprung-Russel. |
| **diagramme papillon** | Schéma qui retrace l'historique des taches solaires, soumises au cycle de 11 ans. Le diagramme ressemble aux ailes d'un papillon. |
| **diapason de Hubble** | Graphique à une tige et deux branches, évoquant la forme d'un diapason, créé par Hubble pour définir l'évolution des galaxies. Il est admis maintenant que cette classification n'a rien à voir avec l'évolution des galaxies. |
| **différenciation** | Tri gravitationnel des matériaux en fonction de leur densité à l'intérieur d'une planète en formation, très chaude, donc liquide. Les éléments lourds (fer, nickel...) tombent vers le centre et vont constituer le noyau ; les silicates de magnésium plus légers forment le manteau ; les silicates d'aluminium, plus légers encore, forment l'écorce ; les volatils s'échappent (volcanisme) et constituent l'atmosphère primitive (l'eau des océans terrestres provient en partie de là). Voir aussi : *différenciation*. |
| **diffraction** | Perturbation d'une onde lumineuse passant au voisinage d'un objet matériel. A cause de la diffraction, l'image d'une étoile n'est pas un point, mais une tache. |
| **diffusion** | Eparpillement d'une onde lumineuse par interaction avec la matière. Selon la taille des particules, on distingue diffusion de Rayleigh et diffusion de Mie. Les diffusions sont importantes dans les atmosphères.<br>La diffusion décrit également le changement de direction d'une particule projectile, lorsqu'elle heurte une particule cible. |
| **diffusion de Mie** | Dispersion de la lumière par des particules de taille supérieure à la longueur d'onde. Elle est inversement proportionnelle à cette longueur d'onde, et donc à peu près du même ordre pour toutes les longueurs d'onde visibles. C'est elle qui donne leur couleur grise aux nuages. |
| **diffusion de Rayleigh** | Diffusion de la lumière sur des particules de taille inférieure à la longueur d'onde de cette lumière. La diffusion de Rayleigh dépend très fortement de la longueur d'onde (le bleu est 16 fois plus diffusé que le rouge). |
| **diffusion raman** | Diffusion inélastique (avec échange d'énergie) d'un photon par un milieu. L'échange d'énergie produit un changement de fréquence (de couleur) du photon. La diffusion élastique est la *diffusion de Raleygh*. |
| **dinosaure** | Reptile du Secondaire, dont la disparition brutale est expliquée par la chute d'une météorite. |
| **diogénite** | Météorite de type achondrite, pauvre en calcium. Ce sont des basaltes, provenant de la croûte de Vesta. |
| **Dioné** | (mythologie grecque : fille d'Océan et de Téthys) Satellite de Saturne n° IV, de 1 123 km de diamètre, orbitant à 377 400 km de la planète dans le sens direct, en 2 j 16 h 48 mn. Découvert par J.D. Cassini en 1684. Dioné contient beaucoup de glace d'eau, mais un peu plus de silicates que les autres satellites. |
| **direct** | Qualifie un mouvement qui s'effectue dans le sens trigonométrique (sens inverse des aiguilles d'une montre), vu du côté nord. |
| **dispersion** | Qualité d'un prisme ou d'un réseau de diffraction à disperser la lumière. Elle indique l'intervalle de longueur d'onde par millimètre de spectre. |
| **disque** | Le disque est l'ensemble d'une galaxie spirale, à l'exception du bulbe. C'est dans le disque que se forment les bras spiraux. |
| **division** | Lacune sombre dans un système d'anneaux autour d'une planète géante. Les lacunes sont généralement produites par les perturbations produites par un satellite, nommé parfois pour cela "satellite chien de berger". |
| **division d'Encke** | Lacune sombre dans les anneaux de Saturne, découverte par Encke. Voir : division. |
| **division de Cassini** | Lacune sombre dans les anneaux de Saturne, découverte par Cassini. Voir : division. |
| | Mot latin, pluriel *dorsa*. Dénomination d'une structure géologique dans le système solaire, signifiant "crête (dos d'un |

| | |
|---|---|
| **dorsum** | animal)". Voir aussi : *liste des formations géologiques*. |
| **double à éclipses** | Etoile double physique (composantes liées par la gravité), dont le plan de l'orbite contient approximativement la Terre. De ce fait, les deux étoiles passent l'une devant l'autre au cours de leur mouvement orbital, et l'intensité lumineuse que nous en recevons varie du fait des éclipses. |
| **double astrométrique** | Etoile double dont on ne voit qu'une seule composante, l'autre étant détectée par le mouvement qu'elle lui impose. |
| **double optique** | Fausse étoile double, due à la perspective. On dit aussi *double visuelle*. |
| **double photométrique** | Etoile double, non résolue, détectée par les variations de sa luminosité. Voir aussi : *variable à éclipse*. |
| **double spectroscopique** | Etoile double, non résolue, détectée par les variations de son spectre. |
| **doucissage** | Opération réduisant les inégalités produites par la taille à la surface d'un miroir en cours de réalisation. |
| **draconitique** | De *draco*, dragon. Dans certaine mythologie, lors d'une éclipse, le Soleil était dévoré par un dragon. L'adjectif draconitique s'applique à tout ce qui a rapport aux éclipses. |
| **dynamo** | L'effet dynamo est la production d'un champ magnétique par la rotation d'une masse chargée électriquement. |
| **double** | Voir : étoile double. |

A B C D **E** F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z

| | |
|---|---|
| **étoile double** | Etoile qui semble être composée de deux étoiles. Une étoile double peut être réelle, composée de deux étoiles en orbite commune, ou un simple effet de perspective. Voir : binaire à éclipses, double spectroscopique, double photométrique, double astrométrique. |
| **éclipse** | Interception de la lumière provenant d'un astre par un autre passant devant. Soit l'astre est brillant par lui-même (étoile) et il est caché par un autre venant se mettre devant lui ; soit il ne brille pas par lui-même (planète, satellite) et il passe dans l'ombre d'un autre astre (ombre de la Terre quand il s'agit de la Lune). |
| **éclipse annulaire** | Eclipse de Soleil qui se produit lorsque la Lune est proche de son apogée, et la Terre proche de son périhélie. La Lune est alors à son minimum de diamètre angulaire, le Soleil à son maximum. Il n'est donc pas caché entièrement et un anneau brillant déborde autour de la Lune. |
| **éclipse partielle** | Eclipse de Soleil, dans laquelle la Lune ne couvre le Soleil qu'en partie du fait d'un mauvais alignement, ou bien de Lune lorsqu'elle ne passe pas par le centre de l'ombre de la Terre. |
| **éclipse totale** | Eclipse de Soleil, dans laquelle la Lune le couvre totalement, ou bien éclipse de Lune, dans laquelle celle-ci est totalement plongée dans l'ombre de la Terre. |
| **écliptique** | Plan de l'orbite terrestre autour du Soleil ; c'est dans ce plan que se produisent les éclipses, d'où le nom. |
| **écorce** | Partie superficielle solide d'une planète. |
| **EELT** | ***E**uropean **E**xtremely **L**arge **T**elescope*. Sa construction a été décidée lors d'une conférence internationnale tenue à Marseille en novembre 2005. Le miroir doit mesurer 42 mètres de diamètre, et sera composite. Ce sera le premier hypertélescope. |
| **Effelsberg** | Radiotélescope orientable, situé en Allemagne, dont la parabole mesure 100 mètres de diamètre. |
| **effet de serre** | Réchauffement du sol d'une planète par absorption atmosphérique du rayonnement infrarouge qu'elle devrait rayonner dans l'espace. Il est responsable de la température infernale de Vénus. |
| **effet Doppler-Fizeau** | L'effet Doppler est la variation de la hauteur d'un son avec le mouvement de la source par rapport à l'observateur. L'effet Fizeau est la variation de longueur d'onde d'une lumière en fonction de ce même mouvement. On a pris l'habitude de réunir les deux. |
| **effet photoélectrique** | Création d'un courant électrique, induit par l'éclairement d'une plaque métallique. Ce phénomène, avec le rayonnement du corps noir, est à la base de la Mécanique Quantique. |
| **effet Poynting-Robertson** | Une petite particule orbitant autour du Soleil (poussière), absorbe le rayonnement solaire du côté éclairé, et le restitue en réémettant de l'infra-rouge. La réémission se fait de manière isotrope dans le référentiel de la poussière, mais du fait de son mouvement, la force produite est un peu plus forte vers l'avant. Ceci freine la poussière, qui petit à petit tombe vers le Soleil. |
| **effet raman** | Voir : diffusion raman. |
| **effet Sunayev-Zel'dovitch** | Effet compton inverse, d'interaction entre le fond diffus cosmologique et les électrons rapides produits par certaines galaxies. Il pourrait déterminer si le fond microonde est bien de nature cosmologique. |
| **effet Tcherenkov** | Production de lumière par une particule se déplaçant à une vitesse supérieure à la vitesse de la lumière, dans un milieu matériel (vitesse inférieure à c). On la voit dans les anciennes *piles piscine*, premiers réacteurs nucléaires ; on la voit aussi dans les piscines où l'on entrepose les barres de combustible usagées. Elle est produite dans de nombreuses situations astronomiques. |
| **effet tunnel** | Franchissement d'une barrière de potentiel par une particule insuffisament énergétique, comme si elle creusait un tunnel dans la barrière. C'est cet effet qui permet les réactions de fusion dans le Soleil. |

| | |
|---|---|
| **effet Zeeman** | Effet électromagnétique, qui se manifeste par un dédoublement des raies spectrales dans un champ magnétique. |
| **effondrement** | Chute libre de la matière d'une étoile vers son centre, dans le temps caractéristique de chute libre. L'effondrement se produit lorsqu'il n'y a plus de production d'énergie centrale. |
| **Egéon** | (mythologie Gréco-romaine : géant à 100 mains, fils d'Ouranos et de Gaïa) Satellite de Saturne n° LIII, de 0,5 km approximativement, orbitant à 167 500 km de la planète dans le sens direct, en 19 h 24 mn. Découvert par Porco en 2008. En résonance avec Mimas. |
| **Eistla** | Eistla Regio est une plaine vénusienne, ornée de collines, en prolongement d'Aphrodite Terra. Elle recèle les grands volcans Sif Mons et Gula Mons, et la caldeira Sappho Patera |
| **Elara** | (mythologie grecque : fille du roi Orchomène, maîtresse de Zeus, mère de Tityos) Satellite de Jupiter n° VII, de 76 km approximativement, orbitant à 11 737 000 km de la planète dans le sens direct, en 260 j. Découvert par Perrine en 1905. |
| **élargissement** | Elargissement des raies spectrales. Lorsque la lumière émise par un astre traverse un milieu en mouvement, les raies sont déplacées par effet Doppler. Si le milieu traversé n'a pas une vitesse homogène, une raie est décalée de plusieurs façons différentes, qui conduisent à produire une raie plus large. La mesure de la largeur permet de retrouver les vitesses du gaz traversé. |
| **élargissement naturel** | Elargissement d'une raie spectrale lié à la durée de vie de l'état d'énergie dont provient l'électron. Le principe d'incertitude indique que plus l'état est stable, plus son énergie est précise, plus fine est la raie. |
| **électromagnétisme** | Théorie unifiée de l'électricité et du magnétisme, due à Maxwell. Elle se résume à 4 équations, nommées *équations de Maxwell*. Ces équations ne sont pas invariantes par la transformation de Galilée, et portent en germe les bases de la Relativité. |
| **électron** | Particule élémentaire, deux mille fois moins massive que le proton, et portant une charge électrique négative minimale. L'électron assure la neutralité des atomes, en compensant la charge positive des protons du noyau. Libre, il interagit fortement avec les photons. Il est de ce fait à l'origine de l'opacité des couches internes du Soleil, et de l'Univers peu après le Big Bang. |
| **éléments orbitaux** | Ensemble de six nombres décrivant l'orbite d'une planète. Ce sont : le *demi grand-axe*, l'*excentricité*, l'*inclinaison*, la *longitude du nœud ascendant*, l'*argument du périhélie*, l'*instant de passage au périhélie*. A cause des perturbations infligées par les autres planètes, ces éléments sont lentement variables dans le temps. Voir : longitude du nœud ascendant, argument du périhélie, instant de passage au périhélie. |
| **éléments osculateurs** | Eléments orbitaux d'une planète à un instant donné, décrivant une orbite képlérienne, non perturbée, et valable pendant une brève période de temps. Après quoi, on doit calculer une nouvelle orbite, légèrement différente. On approche donc l'orbite réelle par une succession d'orbites képlérienes. |
| **ellipse** | Courbe fermée, qu'on peut obtenir en aplatissant un cercle. Le cercle est une ellipse non aplatie. Il est entièrement défini par son rayon. Pour définir une ellipse, il faut donner deux valeurs : le demi grand axe et le demi petit axe. |
| **ellipsoïde** | Volume qu'on peut obtenir en aplatissant une sphère. Un ballon de rugby est un ellipsoïde. Généralisation à trois dimensions de l'ellipse, il faut trois axes pour définir un ellipsoïde. Une planète ou une étoile, normalement sphérique, prend la forme d'un ellipsoïde lorsqu'elle tourne. |
| **elliptique** | Voir : galaxie elliptique. |
| **ELODIE** | Spectrographe conçu et installé à l'Observatoire de Haute Provence, et qui a permi la découverte de la première exoplanète. |
| **élongation** | Angle que font les directions d'une planète et du Soleil, vus depuis la Terre. |
| **Elysium** | Second site volcanique martien en importance. Il comprend 3 grands volcans : Elysium Mons, Hecates Tholus et Albor Tholus. L'âge est inférieur à 2 milliards d'années. Au sud se trouvent des terrains très récents. Voir : Elysium Mons. |
| **Elysium Mons** | Plus grand volcan du plateau d'Elysium sur Mars. Il culmine à 14.000 m. Il est entouré de graben (Stygis Fossae, Zephirus Fossae) produits par les déformations de la croûte lors de sa surrection. |
| **émission** | Les raies d'émission sont des couleurs émises par les éléments chimiques dans certaines conditions physiques. Chaque élément possède son propre spectre d'émission, qui le distingue de tous les autres. Voir : absorption. |
| **Encelade** | (mythologie grecque : géant, fils de Gaïa et d'Ouranos) Satellite de Saturne n° II, de 504 km de diamètre, orbitant à 238 020 km de la planète dans le sens direct, en 1 j 8 h 53 mn. Découvert par Herschel en 1789. Encelade montre une activité sous la forme de geysers. La surface semble recouverte d'une épaisse couche de neige. |
| **énergie** | Capacité d'un système matériel à produire de la chaleur, du mouvement, ou de la lumière. L'énergie se présente donc sous des formes diverses, convertibles les unes en les autres. On considère que la chaleur est la forme dégradée de l'énergie. |
| **énergie de première ionisation** | Energie juste nécessaire pour enlever le premier électron à un atome neutre. Plus le noyau est lourd, plus elle est élevée. Pour l'hydrogène, elle est de 13,6 eV. |
| **énergie du vide** | Le principe d'incertitude interdit au vide d'être au niveau d'énergie 0. L'énergie du vide est l'énergie minimale qu'il permet. |
| **énergie gravitationnelle** | Forme d'énergie qui se produit par action de la gravité. Lorsqu'un corps tombe sur un autre, attiré par lui, il produit des effets mécaniques (brisure) et thermiques (élévation de la température). Ces effets sont des manifestations de l'énergie dégagée par la gravitation. |
| **énergie noire** | Forme d'énergie à pression négative, dont le rôle est d'accélérer l'expansion de l'Univers. Sa nécessité est apparue lorsqu'on a décidé d'après l'observation des supernovæ Ia, que l'expansion était accélérée. Elle est totalement |

| | |
|---|---|
| | hypothétique. |
| **Ensisheim** | Chondrite tombée le 16 novembre 1492 à Ensisheim. Observée par de nombreuses personnes, c'est la première chute a être reconnue comme provenant de l'espace. Des fragments sont conservés sur place. |
| **Eocène** | Seconde époque du Paléogène (première période du Cénozoïque). L'Eocène s'étend de 56 à 34 millions d'années. Il se caractérise par l'apparition de nouvelles espèces de petits mammifères, qui sont les premiers mammifères modernes. La fin est marquée par une extinction massive, peut-être due à l'impact d'une météorite en Sibérie. |
| **épacte** | Elément remplaçant le nombre d'or dans le comput, lors de la réforme grégorienne, afin de mieux représenter les phases de la lune en accord avec l'année solaire. |
| **épagomène** | (grec épagoména : supplémentaire). Un jour *épagomène* est un jour ajouté à l'année, pour la faire cadrer à peu près avec les saisons. Plusieurs calendriers les ont utilisés, pour palier aux défauts de conception. L'ajout de jours épagomènes était souvent empirique, effectué *a posteriori*. La trace de ces ajouts étant souvent perdue, toute chronologie sérieuse est impossible. |
| **épars** | Voir : objet épars. |
| **épicycle** | Petit cercle dont le centre est placé sur le déférent et tourne avec lui, permettant de moduler le mouvement circulaire uniforme obtenu par le déférent seul, et qui représente mal le mouvement réel des planètes. Voir : déférent. |
| **Epiméthée** | (mythologie grecque : fils de Japet et de Thémis) Satellite de Saturne n° XI, de dimensions 138×110×110 km, orbitant à 151 000 km de la planète dans le sens direct, en 16 h 48 mn. Découvert par Walker en 1966. Petit satellite, grossièrement sphérique, dont l'orbite est très proche de celle de Janus. Tous les 4 ans, ils les échangent. |
| **équateur** | Grand cercle à la surface d'une planète ou d'une étoile, perpendiculaire à l'axe de rotation. |
| **équation d'Einstein** | En Relativité Générale, l'équation d'Einstein exprime l'équivalence entre la répartition de masse-énergie d'une part, et la géométrie de l'espace-temps d'autre part. Ainsi, tout déplacement de masse déforme l'espace-temps, et réciproquement toute déformation de l'espace-temps produit un déplacement des masses (ou de l'énergie). |
| **équation d'état** | Equation physique représentant le lien entre la pression et la densité d'un milieu. Essentielle en thermodynamique, elle joue un rôle de premier plan en cosmologie. |
| **équation de Dirac** | Forme relativiste de l'équation de Schrödinger, valable pour les fermions (particules de spin demi-entier). Elle a été définie par Paul Dirac en 1928. Voir : équation de Schrödinger. |
| **équation de Friedmann** | Equation fondamentale de la cosmologie, qui décrit les variations du facteur d'échelle en fonction de la densité (contenu de l'Univers en matière-énergie). Couplée à l'équation du fluide et à une équation d'état, elle permet de résoudre le problème cosmologique. Elle contient le facteur de courbure de l'espace-temps, ainsi que la constante cosmologique. Elle est à la base des modèles d'Univers de Friedmann-Lemaître, dont dérivent les modèles actuels. Voir aussi : *équation de Firedmann*. |
| **équation de Kepler** | L'équation de Kepler est une équation mettant en jeu une fonction sinus. Elle permet de déterminer l'anomalie excentrique d'une planète à un instant donné. L'anomalie excentrique donne immédiatement l'anomalie vraie, donc la position de la planète sur son orbite. |
| **équation de Klein-Gordon** | Equation relativiste, généralisant l'équation de Schrödinger, et applicable aux bosons (particules de spin entier). Voir : équation de Schrödinger. |
| **équation de Schrödinger** | Equation non relativiste donnant, en mécanique quantique, le comportement d'une particule. Elle met en jeu le Hamiltonien de la particule. Elle explique la quantification des états par un spectre de valeurs propres. |
| **équation du fluide** | Seconde équation de la cosmologie, reliant le facteur d'échelle à la densité et à la pression. Avec l'équation de Friedmann et une équation d'état, elle permet de résoudre le problème cosmologique (évolution de l'Univers). |
| **équation du temps** | Différence entre le temps solaire moyen et le temps solaire vrai. Elle s'annule aux équinoxes, elle est maximale aux solstices. Elle est due à la vitesse variable de la Terre sur son orbite (équation du centre), et à l'inclinaison de l'axe sur l'écliptique. |
| **équations de Maxwell** | Ensemble d'équations décrivant l'interaction électromagnétique. Leur solution contient les ondes électromagnétiques, et la constance de la vitesse de la lumière. |
| **équatoriale** | Voir : monture. |
| **équilibre hydrostatique** | Equilibre, dans une planète ou une étoile, entre la gravitation et la pression interne. Cette pression peut être de diverses natures. |
| **équilibre par la pression** | Equilibre des galaxies elliptiques et des amas globulaires. Dans ces objets, les étoiles tournent autour du centre selon des orbites quelconques, et on peut modéliser leur ensemble ststistiquement, un peu comme les molécules d'un gaz. C'est pourquoi on parle de pression. |
| **équilibre par la rotation** | Equilibre dynamique des galaxies disques (spirales et lenticulaires). Toutes leurs étoiles tournent sur des orbites approximativement circulaires, et cette marche d'ensemble maintient l'équilbre. |
| **équilibre thermodynamique local** | C'est un équilibre entre les atomes d'un gaz et les photons qu'il produit et absorbe selon sa température. C'est cet équilibre qui permet de définir une température ! On considère qu'il est réalisé dans les étoiles, mais pas toujours dans leurs atmosphères. Il permet d'utiliser les lois de la thermodynamique. |
| **équinoxe** | L'un des points d'intersection de l'écliptique et du plan de l'équateur terrestre ; le Soleil se déplaçant sur l'écliptique (mouvement apparent), traverse l'équateur deux fois par an. Quand il passe de l'hémisphère sud à l'hémisphère nord, c'est l'*équinoxe de printemps* ; quand il passe de l'hémisphère nord à l'hémisphère sud, c'est l'*équinoxe d'automne*. Equinoxe vient du latin *æque nox = nuit égale* (au jour). Voir aussi : *équinoxe*. |
| **équinoxe de** | Instant où le soleil, dans son mouvement apparent annuel autour de la Terre, traverse l'équateur pour passer de |

| | |
|---|---|
| **printemps** | l'hémisphère sud à l'hémisphère nord. C'est la période où le jour est égal à la nuit. L'équinoxe d'automne est l'instant symétrique où le soleil passe de l'hémisphère nord à l'hémisphère sud. |
| **ère** | Division du temps sur de très grandes périodes. |
| **ère julienne** | L'ère Julienne, marquée par l'apparition du calendrier julien, débute le 1er janvier de l'an 45 avant notre ère. |
| **ergosphère** | Un trou noir en rotation rapide (trou noir de Kerr) entraîne l'espace-temps autour de lui dans sa rotation (effet *Lense-Thirring*). Comparable à un maelström, ce mouvement de rotation emporterait tout objet qui lui serait soumis. Ainsi, aucun vaisseau spatial ne saurait se maintenir immobile au-dessus d'un tel trou noir. L'*ergosphère*, zone dans laquelle ce phénomène se fait sentir, est limitée par un ellipsoïde entourant l'horizon du trou noir, et tangent en ses pôles. Cet ellipsoïde est la *limite statique* |
| **Erinomé** | (mythologie grecque : fille de Célès, maîtresse de Zeus) Satellite de Jupiter n° XXV, de 3 km approximativement, orbitant à 23 196 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 1 an 363 j. Découvert par Sheppard en 2000. Groupe de Carmé. |
| **Eris** | (mythologie grecque : Déesse de la discorde) Planète naine de 1 160 km de diamètre, désignation provisoire 2003 UB313, orbitant à 68 UA du Soleil, en 557 ans. Découverte par Brown en 2003. Objet épars de la ceinture de Kuiper, Eris possède un satellite nommé *Dysnomia*. Voir : ceinture de kuiper. |
| **Eros** | (mythologie grecque : Dieu de l'amour) Astéroïde de dimensions : 33×13×13 km, désignation provisoire 1898 DQ, orbitant à 1 UA du Soleil, en 1,76 ans. Découverte par Witt en 1898. Objet de la ceinture principale, Eros est de type S, de la famille Amor. C'est un NEA. La sonde NEAR s'est mise en orbite le 14 février 2000, puis s'est posée le 12 février 2001. |
| **érosion** | Attaque chimique ou mécanique, par l'eau, le vent, les variations de température, du sol d'une planète. L'érosion transforme les roches volcaniques en roches sédimentaires. Elle modèle le relief en nivelant les montagnes. Voir aussi : *érosion*. |
| **Errapio** | Satellite de Saturne n° XXVIII. Dimension de l'ordre de 4 km. |
| **Erriapus** | (mythologie celtique : géant) Satellite de Saturne n° XXVIII, de 10 km approximativement, orbitant à 17 300 000 km de la planète dans le sens direct, en 2 ans 146 j 2 h. Découvert par Gladman en 2000. |
| **éruption solaire** | Ejection brutale de gaz, produite par la reconnexion magnétique dans la basse couronne. |
| **ESA** | European Space Agency, Agence spatiale européenne. L'ESA travaille dans tous les domaines du spatial, et a à son actif des sondes de premier plan : Hipparcos, IUE, Giotto, Ulysses, ISO, SMART-1, Huygens, XMM-Newton, Cluster, Integral, Hubble et SOHO (avec la NASA), Mars Express, Rosetta, Venus Express, Herschel, Planck. |
| **ESO** | *European Southern Observatory*. Organisme européen gérant de nombreux télescopes, à La Silla (NTT), au Paranal (VLT et instruments annexes), au plateau de Chajnantor (APEX, ALMA), au Cerro Armazones (EELT en construction). Voir : NTT, APEX, ALMA, EELT. |
| **espace des phases** | Espace vectoriel associant les trois coordonnées d'espace d'une particule, à ses trois coordonnées d'impulsion (l'impulsion est le produit de la masse par la vitesse). Un point de l'espace des phases est noté (x, y, z, $p_x$, $p_y$, $p_z$). |
| **espace-temps** | Espace mathématique de dimension 4, mélangeant la coordonnée de temps à celles d'espace. Il a été rendu nécessaire dès la Relativité Restreinte, dans laquelle il conserve une existence propre. Dans la Relativité Générale, il n'existe qu'en relation avec la matière-énergie. |
| **ETL** | Voir : équilibre thermodynamique local. |
| **étoile** | Sphère de gaz auto-gravitante, en équilibre hydrostatique entre la gravité et la pression interne. Dans la vie normale de l'étoile, cette pression est due à l'énergie produite au centre. Dans les naines blanches et les étoiles à neutrons, c'est la pression de Fermi. |
| **étoile à hadrons** | Le modèle d'Oppenheimer-Volkoff pour les étoiles à neutrons ne prend pas en compte les interactions forte et faible. Leur introduction oblige à considérer d'autres hadrons dans ces étoiles. Ce nom généralise donc celui d'étoile à neutrons. |
| **étoile à neutrons** | Cœur d'une étoile de 3 à 8 fois la masse du soleil, effondré après la fin des fusions. Tous les atomes le constituant ont été brisés, et protons et électrons ont réagi pour former des neutrons, qui sont presque les seuls constituants. La pression de Fermi des neutrons maintient un équilibre définitif avec la gravitation. |
| **étoile artificielle** | Méthode permettant d'illuminer à l'aide d'un laser une toute petite portion du ciel, pour simuler une étoile. Ceci permet de piloter l'optique adpatative d'un télescope. |
| **étoile double** | Voir : binaire à éclipses, double spectroscopique, double photométrique, double astrométrique. |
| **étoile du berger** | La planète Vénus ; ce n'est en rien une étoile, mais ce nom est une appellation populaire. Il provient du fait que Vénus est visible le soir, lorsque les bergers rentrent les bêtes, ou bien le matin lorsqu'il les sortent. |
| **étoile filante** | Poussière, généralement perdue par une comète, qui vient percuter brutalement l'atmosphère de la Terre, et y produit une ionisation, source de la trace lumineuse. |
| **étoile invitée** | Joli nom donné par les Chinois aux novæ. |
| **étoile symbiotique** | Voir : variable symbiotique. |
| **étoile variable** | Voir : variables. |
| **étoile Wolf-Rayet** | Etoile massive, au-dessus de 30 masses solaires lors de sa formation, dans laquelle le vent stellaire est assez fort pour chasser l'enveloppe. Ce très fort vent stellaire est optiquement épais. Le cœur de l'étoile est presque à nu, et donc sa surface visible est très chaude. On y voit des raies d'émission. On les subdivise en WC (raies de He et N) et WN (raies de He, C et O). La plus connue des étoiles Wolf-Rayet est P Cygni. |

| | |
|---|---|
| **Euanthé** | (mythologie grecque : une des Grâces, fille de Zeus et d'Euryméduse) Satellite de Jupiter n° XXXIII, de 3 km approximativement, orbitant à 20 797 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 1 an 255 j. Découvert par Scott en 2001. Groupe d'Ananké |
| **eucrite** | (grec *eukritos* facile à différencier) Météorites basaltiques provenant de la croûte de Vesta. Certaines sont des brèches. |
| **Eukéladé** | (mythologie grecque : muse, fille de Zeus) Satellite de Jupiter n° XLVII, de 4 km approximativement, orbitant à 23 661 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 2 ans 16 j. Découvert par Sheppard en 2003. Groupe de Carmé. |
| **Euporie** | (mythologie grecque : une des Heures (divinités des saisons) fille de Zeus) Satellite de Jupiter n° XXXIV, de 2 km approximativement, orbitant à 19 304 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 1 an 185 j. Découvert par Sheppard en 2001. Groupe d'Ananké |
| **Europe** | (mythologie grecque : princesse phénicienne, fille du roi Agénor et de Téléphassa, séduite par Zeus sous la forme d'un taureau blanc) Satellite de Jupiter n° II, de 3 122 km de diamètre, orbitant à 671 100 km de la planète dans le sens direct, en 3 j 13 h 12 mn. Découvert par Galillée en 1610. Europe est l'un des 4 satellites galiléens de Jupiter, le quatrième par la taille. Il est essentiellement glacé, couvert d'une banquise extrêmement lisse. Il doit contenir un océan dans lequel la vie aurait pu apparaître. |
| **Eurydomé** | (mythologie grecque : fille de Zeus et d'Euryméduse) Satellite de Jupiter n° XXXII, de 3 km approximativement, orbitant à 22 865 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 1 an 352 j. Découvert par Scott en 2001. Groupe d'Ananké |
| **évasion** | Perte d'une atmosphère, par une planète trop peu massive et/ou trop chaude. La gravité retient les gaz, la chaleur leur donne une vitesse, qui peut dépasser la vitesse d'évasion. |
| **événement** | Indication de la position et de l'instant concernant toute chose pertinente dans l'espace-temps de la Relativité. Dans la vie courante, un rendez-vous est un événement : il concerne un lieu et un instant particuliers. Le temps et l'espace étant inséparables en Relativité, parler de l'un indépendamment de l'autre n'a pas de sens. C'est ce qui a nécessité la notion d'événement. |
| **excentricité** | Aplatissement d'une ellipse. Se définit aussi pour les autres coniques (parabole et hyperbole), d'une manière moins simple. |
| **exobiologie** | Etude d'une hypothétique vie en dehors de la Terre. Aucune trace n'en a encore été trouvée, mais de multiples lieux, dans notre système solaire ou autour d'autres étoiles, offrent des conditions physico-chimiques propices à l'apparition de la vie. L'exobiologie envisage les possibilités raisonnables d'existence de vie ailleurs que sur Terre. |
| **exoplanète** | Planète tournant autour d'une étoile autre que le Soleil. La première découverte est 51 Peg B, qui a été détectée à l'Observatoire de Haute Provence en 1995, grâce au spectrographe Elodie. |
| **expansion** | Expansion de l'Univers, augmentation au fil du temps, des distances entre deux galaxies typiques. Elle implique une vitesse apparente d'éloignement croissant avec la distance, et produisant un effet de décalage vers le rouge de toutes les longueurs d'onde. Cet effet permet, en retour, d'obtenir une évalutation de la distance pour les objets très lointains. |
| **expérience** | Manipulation à faire subir à un système physique, afin de vérifier l'exactitude d'une loi, ou au contraire de l'invalider. |
| **expérience de pensée** | Expérience de physique, que l'on ne réalise pas. Par exemple, A. Einstein a envisagé un ascenseur en chute libre. Les objets qui y sont contenus flottent dans la cabine. |
| **expérience Urey-Miller** | Expérience consistant à enfermer dans un tube une atmosphère censée reproduire l'atmosphère primitive de la Terre, et à l'exciter par des décharges électriques simulant des orages. Cette méthode a produit de nombreux composés organiques, dont des acides aminés. Elle concours à expliquer l'émergence de la vie. |
| **explosion cambrienne** | Apparition rapide de tous les embranchements actuels d'animaux pluricellulaires. La vie antérieure était essentiellement monocellulaire, et bien moins diversifiée. |
| **extinction** | Affaiblissement de la lumière lorsqu'elle traverse un milieu non totalement transparent. L'extinction interstellaire est très importante vers le centre de la Voie Lactée. |
| **extinction de l'Ordovicien** | Première crise d'extinction de la vie, qui a eu lieu à la fin de l'Ordovicien, et marque le début du Silurien, il y a 440 millions d'années. La vie était encore exclusivement marine, et trilobites, planctons et coraux ont fortement souffert. |
| **étoile Be** | Etoile de type spectral B avec raies d'émission. Les raies d'émission se forment probablement dans des disques de matière éjectés à l'équateur de l'étoile, ayant une température de l'ordre de 10.000 K. |

A B C D E **F** G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z

| | |
|---|---|
| **facteur d'échelle** | En Relativité Générale et Cosmologie, le facteur d'échelle est une fonction du temps, qui représente la variation des distances. Il relie les coordonnées instantanées (distance à l'instant t), aux coordonnées comobiles qui ne changent pas au cours du temps. Si le facteur d'échelle double, toutes les distances dans l'Univers doublent, alors que les distances comobiles ne changent pas. |
| **facula** | Mot latin, pluriel *faculæ*. Dénomination d'une structure géologique dans le système solaire, signifiant "tache brillante". Voir aussi : *liste des formations géologiques*. |
| **facule** | Plages de la photosphère du Soleil légèrement plus brillantes que le reste. Leur température est de l'ordre de 1.000 K supérieure à celle de la photosphère. |
| **famille de Hirayama** | Une famille est un ensemble d'astéroïdes qui partagent des caractéristiques orbitales communes. En calculant leurs positions anciennes, Hirayama a constaté que les membres d'une famille se regroupent. Ceci semble indiquer qu'un objet brisé est à leur origine. |

| | |
|---|---|
| **Farbauti** | (mythologie scandinave : géant des tempêtes, père de Loki) Satellite de Saturne n° XL, de 5 km approximativement, orbitant à 20 390 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 2 ans 355 j. Découvert par Sheppard en 2004. |
| **farrum** | Mot latin, pluriel *farra*. Dénomination d'une structure géologique dans le système solaire, signifiant "structure en forme de crêpe, ou alignement de telles structures". Voir aussi : *liste des formations géologiques*. |
| **fenêtre** | Zone du spectre électromagnétique, pour laquelle l'atmosphère terrestre est transparente. On distingue la fenêtre visible, de 0,4 à 0,8 µm ; la fenêtre infra-rouge qui s'étend jusqu'à 1,3 µm ; et la fenêtre radio de 1 mm à 20 m. |
| **Fenrir** | (mythologie scandinave : loup géant, fils de Loki et de la géante Angurboda) Satellite de Saturne n° XLI, de 4 km approximativement, orbitant à 22 450 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 3 ans 164 j. Découvert par Sheppard en 2004. |
| **Ferdinand** | (mythologie : personnage de Shakespeare) Satellite d'Uranus n° XXIV, de 20 km approximativement, orbitant à 20 900 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 7 ans 249 j. Découvert par Holman en 2001. |
| **fermi** | Unité de distance pertinente à l'intérieur de l'atome. Un fermi vaut $10^{-13}$ cm, et le diamètre d'un noyau atomique se mesure par un petit nombre de fermis. |
| **fermion** | Particule obéissant à la statistique de Fermi, ce qui signifie que deux d'entre elles ne peuvent pas être dans le même état quantique. C'est de là que vient l'équilibre des naines blanches et des étoiles à neutrons. Les particules se séparent en fermions et bosons. Les fermions sont les particules constituant la matière, les bosons sont les particules d'interaction. Voir : boson. |
| **figure de Widmanstätten** | Dessin que l'on peut faire apparaître à la surface d'une sidérite coupée et polie. Les figures de Widmanstätten sont formées par l'entrelacement de deux types de cristaux différents, la kamacite et la taénite. Voir aussi : *reconnaître une météorite*. |
| **filament** | Ligne courbe noire qui apparaît sur la photosphère du Soleil. C'est une protubérance vue de dessus. |
| **filamenteuse** | Qualificatif d'une galaxie présentant l'apparence d'une spirale, mais sans bras continus. Elles ne montrent que des arcs de spirale. Ceci s'eplique par une formation continue d'amas d'étoiles, qui s'étirent en arc par la rotation différentielle. |
| **finitude de l'espace** | C'est la propriété de l'espace d'être fini. Un espace euclidien est infini, alors qu'un espace sphérique est fini. Notez que l'on parle ici de la finitude de l'espace seul, sans considérer le temps. Un espace sphérique, fini, peut très bien être infini dans le temps (exister toujours). |
| **fission** | Réaction nucléaire dans laquelle un noyau plus lourd que le fer se brise en noyaux plus léger, avec dégagement d'énergie (centrales nucléaires actuelles). |
| **flash de l'hélium** | Explosion, qui se produit au centre d'une étoile au moment de l'allumage de la fusion de l'hélium dans un cœur dégénéré. L'augmentation de température ne provoque pas une augmentation de pression, ce qui a pour effet d'emballer les réactions, d'où l'explosion. |
| **flash de l'oxygène** | Voir : détonation du l'oxygène. |
| **flash du carbone** | Voir : détonation du carbone. |
| **flexus** | Mot latin. Dénomination d'une structure géologique dans le système solaire, signifiant "crête courbe très basse, festonnée". Voir aussi : *liste des formations géologiques*. |
| **flint** | Verre composé de silice, potasse et oxyde de plomb, d'indice de réfraction élevé. C'est celui qui est utilisé en cristallerie, pour ses propriétés de dispersion de la lumière. En optique, on en fait une lentille divergente, associée à une lentille convergente en crown. |
| **fluctus** | Mot latin. Dénomination d'une structure géologique dans le système solaire, signifiant "terrain d'écoulement". Voir aussi : *liste des formations géologiques*. |
| **fluorescence** | Emission de rayonnement électromagnétique, immédiatement après l'excitation qui en est la cause. C'est une forme de luminescence. Voir : luminescence. |
| **fond diffus cosmologique** | Rayonnement micro-onde provenant de tout l'espace, et issu d'une période très ancienne de l'Univers, lorsque la chute de température a permis l'association des électrons et des noyaux atomiques, rendant l'espace transparent. |
| **force de Coriolis** | Force fictive, résultant de la rotation d'une planète. En s'éloignant (resp. s'approchant) de l'axe de rotation en ligne droite, on tourne à droite (resp. à gauche) par rapport à la planète. C'est l'origine des vents alizés. Voir : Coriolis. |
| **forêt de Lyman** | Dans le spectre de certains quasars, la raie Lyman α apparaît en de multiples exemplaires, serrés les uns contre les autres, à des décalages spectraux différents, produit par des nuages de gaz différents. Chaque nuage se déplace à la vitesse correspondant à sa distance par rapport à nous. On appelle cet ensemble de raie la forêt Lyman α. Voir aussi : *forêt Lyman alpha*. |
| **forêt Lyman alpha** | Voir : forêt de Lyman. |
| **Fornjot** | (mythologie scandinave : géant des tempêtes, père de Kari, Ægir et Loge) Satellite de Saturne n° XLII, de 6 km approximativement, orbitant à 23 070 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 3 ans 217 j. Découvert par Sheppard en 2004. |
| **Fortuna tessera** | Plateau fracturé selon deux directions perpendiculaires, au nord de Vénus, et situé au pied des monts Maxwell. Les tesseræ sont des structures particulières à la planète Vénus. Fortuna est, avec ses 2.000 km d'extension, la plus grande d'entre elles. Voir : tessera. |
| **fossa** | Mot latin, pluriel *fossæ*. Dénomination d'une structure géologique dans le système solaire, signifiant "dépression longue et étroite, peu profonde". Voir aussi : *liste des formations géologiques*. |

| | |
|---|---|
| **Foucault** | (Léon Foucault, 18/09/1919 - 11/02/1868) Physicien français à qui l'on doit de multiples inventions, dont le *pendule de Foucault*, qui a démontré la rotation de la Terre. Son œuvre la plus importante en astronomie est la technique de taille, de polissage et d'argenture des miroirs de télescope en verre, matière bien supérieure au bronze utilisé avant lui. Le premier grand télescope à miroir de verre, construit par lui, a été installé à l'Observatoire de Marseille où il est visible. |
| **foucaultmètre** | Instrument d'optique permettant de visualiser précisément les défauts éventuels d'un miroir de télescope, inventé par Léon Foucault. |
| **fovea** | Partie de la rétine la plus sensible, en particulier aux couleurs, située exactement au centre de l'œil. C'est par la fovea que nous regardons directement. |
| **foyer** | Point où convergent les rayons lumineux dans un instrument d'optique. |
| **Francisco** | (mythologie : personnage de Shakespeare) Satellite d'Uranus n° XXII, de 22 km approximativement, orbitant à 4 276 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 267 j. Découvert par Homman en 2001. |
| **Frasnien** | Etage du Dévonien supérieur (Paléozoïque), qui s'étend de 385 à 375 millions d'années. Un probable réchauffement climatique a entraîné une montée des océans, et un apport de matière organique. La dégradation de cette matière a provoqué une diminution de l'oxygène dissous, qui a son tour a fait disparaître de nombreuses espèces marines. |
| **free-free** | Voir : freinage. |
| **freinage** | *Rayonnement de freinage*. Connu sous le nom allemand de *bremsstrahlung* ou anglais de *free-free*. Interaction de deux particules chargées sans contact, qui se traduit par un changement de direction, et un transfert d'énergie. Si l'une des particules est beaucoup plus lourde que l'autre (proton et électron par exemple), la plus légère est freinée. |
| **Friedmann** | (Alexandre, 16/06/1888 - 16/09/1925). Physicien Russe, il a le premier montré en 1922, que la Relativité Générale pouvait s'appliquer à la modélisation de l'Univers. Il en a obtenu des solutions montrant que celui-ci était soit en expansion, soit en contraction. Il a défini les modèles de Friedmann-Lemaître. |
| **fusion** | Réaction nucléaire dans laquelle des noyaux plus légers que le fer s'unissent pour former un noyau plus lourd. Elle s'accompagne d'un dégagement d'énergie. C'est la source d'énergie des étoiles. Voir aussi : *fusion de l'hydrogène*. |

A B C D E F **G** H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z

| | |
|---|---|
| **GA** | Abbréviation de *Giga Années*, soit milliard d'années. Par ailleurs, million d'années se note *MA*. |
| **Galatée** | (mythologie grecque : Néréide, nymphe marine, fille de Nérée et de Doris) Satellite de Neptune n° VI, de dimensions 204×184×144 km, orbitant à 61 593 km de la planète dans le sens direct, en 10 h 18 mn. Découvert par Synnott en 1989. Galatée orbite à l'intérieur de l'orbite synchrone, et tombe lentement vers la planète. |
| **galaxie** | Du grec *galactos* = lait, puisque les galaxies sont semblables à la Voie Lactée. Systèmes d'étoiles liées par la gravité. Les masses des galaxies vont de quelques millions de masses solaires pour les galaxies naines, à quelques centaines de milliards pour les plus grosses. |
| **galaxie à coquille** | Galaxie elliptique entourées de coquilles formées d'étoiles. Vues de la Terre, les coquilles formes des arcs entourant la galxies. Les coquilles, très faibles, ne sont que des condensations d'étoiles dues à la perspective. |
| **galaxie active** | Galaxie possédant un noyau actif, donc assez de matière centrale pour l'alimenter. Voir : Noyau Actif de Galaxie. |
| **galaxie bleue compacte** | (BCD Blue Compact Dwarf galaxy) Galaxies très compactes et à forte brillance de surface. Elle sont soutenues par la rotation. |
| **galaxie de Markarian** | Les galaxies de Markarian ont été découvertes et étudiées par Benyamin Markarian dans les années 70. Elles montrent un noyau très brillant, et sont de couleur anormalement bleue. Elles présentent de très intenses raies d'émission en ultraviolet. Ces raies peuvent avoir plusieurs explications physiques. Aussi, les galaxies de Markarian sont soit des galaxies de Seyfert, soit des galaxies à flambée d'étoiles. |
| **galaxie de Seyfert** | Type de galaxies découvert par Karl Seyfert en 1943, dont le noyau est aussi brillant qu'une galaxie normale entière, et dont le spectre présente de fortes raies d'émission. Les galaxies de Seyfert sont maintenant regroupées avec les radio-galaxies et les quasars dans un modèle unifié. |
| **galaxie elliptique** | Galaxies en forme d'ellipsoïde de révolution. Elles contiennent très peu de gaz, et sont formées d'étoiles vieilles. Il en existe de très massives dans certains amas. Voir : cluster dominant. |
| **galaxie irrégulière** | Petites galaxies ne présentant pas de forme bien définie. Les deux nuages de Magellan, sateliites de la Voie Lactée, en sont des représentants. Voir : galaxie naine. |
| **galaxie lenticulaire** | Galaxies de forme intermédiaire entre les spirales et les elliptiques. Elles présentent un gros bulbe, plus développé que dans les spirales, et sont globalement en forme de disque. |
| **galaxie naine** | Galaxies de masse 1000 fois plus faible que les normales. Elles comprennent les galaxies naines magellaniques (type Im), et les galaxies bleues compactes (type BCD). |
| **galaxie spirale** | Galaxie disque, présentant des bras spiraux continus, depuis le bulbe jusqu'à la périphérie. La Voie Lactée est une spirale. Certaines ont une barre centrale (spirales barrées). |
| **galaxie spirale barrée** | Galaxie spirale dont les bras spiraux sont issus des extrémités d'une barre rectiligne passant par leur centre. |
| **galaxie-disque** | Galaxie lenticulaire ou spirale, dont la forme générale est celle d'un disque. |
| | Physicien et astronome italien, né à Pise. Il est l'un des fondateurs de la méthode expérimentale. Après les hollandais, il |

| | |
|---|---|
| **Galilée** | construisit une lunette et la tourna vers le ciel. Il découvrit ainsi les satellites de Jupiter, qui tournaient autour d'un autre corps que la Terre. La preuve était donc faite que la Terre n'est pas le centre de l'univers. Pour échapper au bûcher, il dut abjurer ses théories. |
| **Galle** | (Johann Gottfried, 09/06/1812 - 10/07/1910) Astronome allemand de l'observatoire de Berlin. Il a découvert Neptune sur les indications de Le Verrier, qui en avait calculé la position en résolvant les perturbations d'Uranus. |
| **Gamma Ray Burst** | Voir : sursaut gamma. |
| **Gamow** | (Georges, 04/03/1904-19/08/1968) Physicien russe, né à Odessa. Il a travaillé sur la radioactivité et la physique nucléaire. Il est à l'origine de la compréhension du fonctionnement des étoiles. Il a également fondé la théorie de la nucléosynthèse primordiale. |
| **Ganymède** | (mythologie grecque : prince troyen, fils de Tros fondateur de Troie, et de la nymphe Callirrhoé) Satellite de Jupiter n° III, de 5 262 km de diamètre, orbitant à 1 070 000 km de la planète dans le sens direct, en 7 j 3 h 50 mn. Découvert par Galilée en 1610. Plus gros que Mercure, formé en même temps que Jupiter, ce satellite est constitué de glaces et roches en proportions égales. Il possède probablement un noyau métallique (champ magnétique). 40 % de la surface sont sombres et couverts de cratères, le reste est rainuré (rainures de 700 m de hauteur, plusieurs centaines de km de longueur). |
| **Gaspra** | (Nom d'une ville de Crimée) Astéroïde de dimensions : 19×12×11 km, désignation provisoire 1955 MG1, orbitant à 2 UA du Soleil, en 3,28 ans. Découverte par Neujmin en 1916. Objet de la ceinture principale, Gaspra est de classe S de la ceinture principale. Il a été survolé par la sonde Galiléo le 29 octobre 1991. |
| **gauchissement** | Déformation d'une galaxie disque par interaction gravitationnelle avec une autre. Le disque se tord en deux points diamétralement opposés, au-dessus du disque moye d'un côté, en-dessous de l'autre côté. Cette déformation est persistante (en anglais *warp*). |
| **géante** | *A priori*, étoile dont le diamètre est supérieur à la normale. La 'normale', c'est la fusion de l'hydrogène (Séquence Principale), et ces étoiles sont nommées naines. Les géantes sont d'autant plus grosses que leur masse est plus grande ; elles fusionnent l'hélium. |
| **géante bleue** | Etoile géante qui brûle l'hélium. Elle a éjecté son enveloppe d'hydrogène, et son cœur d'hélium est nu. Sa température très élevée lui donne une couleur bleue. |
| **géante rouge** | Etoile ayant épuisé son hydrogène central, et continuant en fusionnant l'hélium. Pour atteindre les 100 millions de degrés nécessaires, le coeur a dû se contracter, chauffant davantage l'enveloppe qui s'est dilatée et a rougi. |
| **gedanken experiment** | Locution allemande, très utilisée par A. Einstein. Depuis, elle est souvent employée en français. Voir : expérience de pensée. |
| **gegenshein** | Nom allemand donné à la faible lumière que l'on peut aperçevoir après le coucher du Soleil ou avant son lever, et dans la direction opposée. C'est la lumière du Soleil reflétée sur les poussières interplanétaires. Voir : lumière zodiacale. |
| **gélifraction** | Voir : cryoclastie. |
| **Géminides** | Pluie d'étoiles filantes annuelle, qui semble provenir de la constellation des Gémeaux. |
| **genre espace** | Caractéristique d'un quadrivecteur, qui se dessine à l'extérieur du cône de lumière de son origine. Un événement à son extrémité ne peut être en relation causale avec son origine, puisqu'il faudrait pour cela dépasser la vitesse de la lumière (la pente du quadrivecteur mesure la vitesse). |
| **genre temps** | Caractéristique d'un quadrivecteur, qui se dessine à l'intérieur du cône de lumière de son origine. L'événement que représente son extrémité peut très bien être en relation causale avec son origine. C'est donc une trajectoire permise à un mobile réel. |
| **géocentrique** | Système Géocentrique : représentation du système solaire dans laquelle la Terre est placée au centre, le Soleil, la Lune et les planètes lui tournent autour. Vision erronée propagée, à partir de Claude Ptolémée, pendant tout le Moyen Age en Europe. |
| **géocroiseur** | Astéroïde dont l'orbite coupe celle de la Terre. Les principaux sont les AAA. Voir : AAA. |
| **géodésique** | Ligne de plus court chemin entre deux points donnés d'un espace. Dans l'espace euclidien de la géométrie ordinaire, les géodésiques sont des droites. Dans un espace sphérique (surface de la Terre par exemple), les géodésiques sont des arcs de grand cercle. |
| **géoïde** | Solide qui représente le plus fidèlement possible la forme de la Terre, en lissant les montagnes. En première approximation, c'est un ellipsoïde. |
| **géologie** | Discipline scientifique étudiant les roches, leur formation, leur évolution, ainsi que les processus qui les gouvernent. La géologie est devenue planétaire grâce à l'exploration robotisée des planètes telluriques (Lune, Vénus et Mars). |
| **géométrie** | Du grec *Geo*, Terre, et *metron*, mesure. Science de la mesure de la Terre. Géométrie d'Euclide enseignée à l'école. Au XX$^{e}$ siècle, Riemann et Lobatchevsky ont développé des géométries sur des espaces courbes. Einstein les a utilisées pour créer la Relativité Générale. |
| **géométrie euclidienne** | C'est la géométrie enseignée à l'école. Fondée sur 5 postulats, le cinquième indiquant que deux droites parallèles ne se rencontrent pas. Ce postulat est indépendant des autres ; en le remplaçant par d'autres, on obtient les géométries non euclidiennes : riemanienne, lobatchevskienne. Ces dernières sont utilisées en Cosmologie. |
| **géométrie hyperbolique** | Géométrie non euclidienne, qu'on peut se représenter par une forme de selle de cheval. Les deux courbures impliquent que par un point extérieur à une droite passe une infinité de parallèles à cette droite. |
| **géométrie sphérique** | Géométrie, analogue de la classique géométrie euclidienne, mais qui s'adapte à la surface d'une sphère. Par un point extérieur à une droite, on ne peut faire passer aucune parallèle à cette droite. |
| **glaces** | Eau à l'état solide, bien sûr ; mais on appelle aussi glace un autre composé à l'état solide : azote, oxydes de carbone, méthane, ammoniac... |

| | |
|---|---|
| **Gliese 229B** | Seconde naine brune découverte fin 1995, par une équipe américaine. Voir : Teide 1. |
| **globule de Bock** | Concentrations de matière dans certaines nébuleuses, de diamètre typique 1/2 année-lumière (du même ordre que le système solaire, nuage de Oort compris). |
| **globule de Bok** | Petite condensation sombre de gaz et de poussière à l'intérieur d'une nébuleuse brillante, d'une AL de diamètre, et de quelques masses solaires. Le globule se contracte lentement. Au terme de l'effondrement, ils doivent donner des étoiles. |
| **gluon** | Boson médiateur de l'interaction forte. |
| **GNM** | Voir : Grand Nuage de Magellan. |
| **Gondwana** | Supercontinent issu de la fragmentation de la Pangée au cours du Mésozoïque (l'autre fragment est la Laurasie). Il tire son nom d'une région de l'Inde, qui présente des terrains de cette époque. A partir du Jurassique supérieur, il se brise à son tour pour donner l'Afrique, l'Amérique du sud, l'Antarctique, l'Australie et l'Inde. |
| **graben** | Géologie (mot allemand signifiant : *fossé*). Terrain effondré entre deux failles, les failles étant produites par une extension de la croûte. Par opposition, la partie qui s'élève est nommée *horst*. Voir : horst. |
| **grain** | Voir : grain interstellaire. |
| **grain de Bailly** | Minuscules portions de la photosphère solaire qu'on voit dans les creux de la Lune, entre les montagnes, au cours de certaines éclipses de Soleil. Leur brillance est suffisante pour masquer la couronne |
| **grain de riz** | Petite zone brillante à la surface du Soleil, produite par la convection. La taille caractéristique d'un grain de riz est d'un millier de kilomètres. La photosphère en est couverte. |
| **grain interstellaire** | Particules du milieu interstellaire, de quelques dizaines à quelques centaines de nanomètres, formées d'un cœur réfractaire (silicates, carbone, métaux), d'un manteau organique et d'une enveloppe de glaces. Ils sont responsables de l'absorption de la lumière et de son rougissement, se chauffent par cette absorption, et rayonnent comme un corps noir dans l'IR lointain. |
| **graine** | Partie centrale du noyau de la Terre. La graine est solide, à cause de la très forte pression, alors que la partie externe du noyau est liquide. Elle représente 2 % de la masse de la Terre, est constituée de fer à peu près pur, et produit le champ magnétique. |
| **Grand Attracteur** | Probablement un super amas de galaxies, dont la masse est d'au moins une centaine de millions de masses solaires, et qui est situé juste derrière le centre de la Voie Lactée. Il est de ce fait inobservable directement, et on le détecte par la vitesse du Groupe Local dans sa direction. |
| **grand cercle** | Plus grand cercle possible sur une sphère. Il partage la sphère en deux demi-sphères égales. Pour aller d'un point à un autre à la surface d'une sphère, le plus court chemin est l'arc de grand cercle qui passe par ces deux points. |
| **Grand Débat** | Controverse générale qui s'est déroulée dans les années 1920 au sujet de la nature des *nébuleuses*. Sont-elles des groupements d'étoiles non résolues, ou des nuages de gaz et de poussières ? Il a pris fin lorsque le télescope de 2,5 m du Mont Wilson a permi de séparer les étoiles des spirales proches |
| **Grand Nuage de Magellan** | L'une des galaxies irrégulières satellites de la Voie Lactée, visible de l'hémisphère sud. Il est situé à 170.000 AL, dans la constellation de la Dorade, et s'étend sur 14.000 AL. Il contient la nébuleuse de la Tarentule, région de formation d'étoiles, et la supernova SN1987A. |
| **Grande Tache Rouge** | Tache ovale rouge, plus ou moins colorée, visible à la surface des nuages de Jupiter depuis l'invention de la lunette. Il s'agit d'un cyclone et non d'une formation solide (Jupiter est gazeuse). La permanence de la Tache Rouge n'est pas expliquée. |
| **granulation** | Aspect de la surface du Soleil dû à la convection qui agite la surface. |
| **granule** | Voir : grain de riz. |
| **gravitation universelle** | Théorie de la gravitation due à Newton, dans laquelle deux corps matériels s'attirent en fonction de leurs masses et en fonction inverse du carré de leurs distances. Elle est dite universelle car elle s'applique à tout corps massif, quelle que soit sa composition. |
| **gravité newtonnienne** | Théorie de la gravitation sous sa forme newtonnienne, décrite comme une force agissant à distance, et instantanément. Elle s'oppose à la théorie relativiste, dans laquelle les mouvements sont dus à des déformations de l'espace-temps, qui se propagent à la vitesse de la lumière. |
| **graviton** | Boson médiateur de l'interaction gravitationnelle. Il n'a pas encore été observé. |
| **GRB** | Voir : sursaut gamma. |
| **great oxidation event** | L'atmosphère primitive de la Terre était réductrice (BIF). Elle est devenue oxydante assez rapidement entre 2,4 et 2 Ga. L'oxygène était déjà produit par la vie bien avant, mais divers mécanismes le détruisaient à mesure. Voir : BIF. |
| **Gregory** | (James, 11/1638-10/1675) Astronome anglais qui a construit un télescope semblable au Schmidt-Cassegrain, mais dont le secondaire est elliptique. Voir : télescope de Gregory. |
| **Greip** | (mythologie scandinave : géante qui eut le dos brisé par Thor) Satellite de Saturne n° LI, de 6 km approximativement, orbitant à 18 210 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 2 ans 157 j. Découvert par Sheppard en 2006. |
| **grossissement** | Pouvoir d'un instrument d'optique de faire apparaître une image sous un angle supérieur à la réalité. Rapport de la focale de l'objectif à la focale de l'oculaire, il ne caractérise pas un instrument, mais l'ensemble instrument + oculaire. |
| **grossissement résolvant** | Plus petit grossissement permettant de séparer deux étoiles, donc donnant un angle entre elles de l'ordre d'une minute d'arc. Voir : grossissement. |
| **groupe de taches** | Groupe de taches solaires, qui indiquent la présence de perturbations magnétiques dans la photosphère. |

| | |
|---|---|
| **Groupe Local** | Voir : amas local. |
| **Gubbio** | Ville d'Italie centrale, où l'on trouve la couche KT, limite entre le Crétacé et le Tertiaire. |
| **Guinevere** | Guinevere planitia, plaine vénusienne, située entre les volcans d'Alpha Regio et le groupe d'Eistla Regio. On y trouve de grandes coronæ. |
| **Gula Mons** | Gula Mons est un grand volcan de Vénus situé dans Eistla Regio, proche de l'équateur. |
| **gypse** | Minéral, constitué de cristaux de sulfate de calcium hydraté, servant à faire le plâtre par dessication. On en a trouvé sur Mars. |
| **GZK** | Voir : coupure GZK. |

A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z

| | |
|---|---|
| **hadrosaure** | Dinosaure à bec de canard, largement répandu au Crétacé supérieur. Les hadrosaures étaient des herbivores, issus des Iguanodontidés du Jurassique et du début du Crétacé. |
| **Halimède** | (mythologie grecque : une des Néréides, fille de Néreus et Doris) Satellite de Neptune n° IX, de 60 km approximativement, orbitant à 15 728 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 5 ans 53 j . Découvert par Holman en 2002. |
| **halophile** | Voir : bactérie halophile. |
| **Harpalycé** | (mythologie grecque : Fille de Clyménos) Satellite de Jupiter n° XXII, de 4 km approximativement, orbitant à 20 858 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 1 an 258. Découvert par Sheppard en 2000. Groupe d'Ananké |
| **Hati** | (mythologie scandinave : loup géant, fils de Fenrir et frère de Skoll) Satellite de Saturne n° XLIII, de 6 km approximativement, orbitant à 19 860 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 2 ans 308 j. Découvert par Sheppard en 2004. |
| **Hauméa** | (mythologie hawaïenne : déesse de la fertilité) Planète naine de dimensions : 2000×1000×1200 km, désignation provisoire 2003 EL61, orbitant à 43 UA du Soleil, en 248,76 ans. Découverte par Ortiz en 2004. Astéroïde classique de la ceinture de Kuiper, Hauméa possède deux satellites : *Hi'iaka* et *Namaka* nommés d'après les filles de Hauméa. Voir : ceinture de kuiper. |
| **hauteur** | En astronomie, coordonnée locale correspondant à l'angle que fait la direction d'une étoile avec la direction de l'horizon (toutes deux relatives à l'observateur). Voir : coordonnées horizontales. |
| **Hayashi** | (Chushiro, 25/07/1920 - 28/02/2010) Astronome japonais qui a étudié la théorie du Big Bang, ainsi que les transformations des étoiles naissantes à température constante. Voir : trajet de Hayashi. |
| **HDM** | **Hot D/strong>ark Matter. Matière noire chaude, c'est-à-dire qui se déplace à des vitesses relativistes.** |
| **Hecates Tholus** | Volcan martien, situé au nord-est du grand volcan Elysium Mons. Voir : Elysium. |
| **HED** | sigle pour 'Howardites, Eucrites, Diogénites'. Groupe de météorites achondrites proviennant très probablement de 4 Vesta. Ce sont des météorites différenciées, éjectées par un impact violent il y a un peu moins d'un milliard d'années. Les éjectas sont les astéroïdes de type V. |
| **Hégémone** | (mythologie grecque : une des Grâces, fille de Zeus et d'Euryméduse) Satellite de Jupiter n° XXXIX, de 3 km approximativement, orbitant à 23 947 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 2 ans 9 j. Découvert par Sheppard en 2003. Groupe d'Ananké |
| **Hégire** | Nom de l'ère musulmane, dont l'origine est le départ de Mahomet de Médine vers la Mecque, où il arriva la vendredi 16 juillet 622 (julien). C'est pour cela que le vendredi est le jour de la grande prière. |
| **Heisenberg** | (Werner, 05/12/1901-01/02/1976) Physicien allemand qui a découvert le principe d'incertitude en Mécanique Quantique. Il a développé la formulation matricielle, et reçu le prix Nobel de physique en 1933. |
| **Hélène** | (mythologie grecque : fille de Zeus et de Léda, épouse de Ménélas ; elle provoqua la guerre de Troie) Satellite de Saturne n° XII, de dimensions 36×32×30 km, orbitant à 377 000 km de la planète dans le sens direct, en 2,7 j. Découvert par Laques en 1980. Petit satellite qui partage l'orbite de Dioné, dont il occupe le point L4. |
| **Hélicé** | (mythologie grecque : muse, fille de Zeus) Satellite de Jupiter n° XLV, de 4 km approximativement, orbitant à 21 263 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 1 an 270 j. Découvert par Sheppard en 2003. Groupe d'Ananké |
| **héliocentrique** | Adjectif signifiant "avec le Soleil pour centre". Il vient du grec *Helios* = Soleil. Cet adjectif s'applique au système solaire décrit par Copernic, dans lequel toutes les planètes tournent autour du Soleil. |
| **héliosismologie** | Observation des vibrations de la photosphère, montrant les propriétés sonores du Soleil. Analogue de la sismologie terrestre, elle permet de sonder l'intérieur du Soleil. |
| **héliostat** | Accessoire optique permettant de diriger le faisceau lumineux issu d'un astre vers une direction fixe. Voir aussi : *cœlestat*. |
| **hélium** | Gaz rare, le plus léger d'entre eux, et qui a été découvert par ses raies spectrales dans le soleil. Il a ensuite été isolé sur Terre. Il est le second plus abondant élément de l'Univers, après l'hydrogène. Il est produit à partir de l'hydrogène dans les réactions nucléaires de fusion de l'hélium (séquence principale). |
| **hématite** | Minéral constitué d'oxyde de fer $Fe_2O_3$. Très courant sur Terre, on en trouve également sur Mars, où elle forme de petites sphère baptisées *myrtilles*, à cause de leur forme et de leur couleur. Voir aussi : *myrtille*. |
| **Herbig-Haro** | Voir : objet de Herbig-Haro. |
| **Hermippé** | (mythologie grecque : maîtresse de Zeus) Satellite de Jupiter n° XXX, de 4 km approximativement, orbitant à 21 131 000 |

| | |
|---|---|
| | km de la planète dans le sens rétrograde, en 1 an 269 j. Découvert par Scott en 2001. Groupe d'Ananké |
| **Hersé** | (mythologie grecque : fille du premier roi d'Athènes, prêtresse du premier temple l'Erechthéion) Satellite de Jupiter n° L, de 2 km approximativement, orbitant à 22 992 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 1 an 349 j. Découvert par Sheppard en 2003. Groupe de Carmé. |
| **Hespérien** | Ere géologique martienne, dans l'ancienne classification basée sur le comptages de cratères. C'est la seconde par ancienneté, et elle s'étend de 3 à 3,5 milliards d'années. Voir : Amazonien, Noachien. |
| **hexahédrite** | Météorite de type sidérite, dont la maille cristalline est un cube (hexahèdre). Ce sont les sidérites à plus faible teneur en nickel. |
| **HI** | Voir : région HI. |
| **hiérarchique** | Se dit de certains modèles dans lesquels un phénomène se reproduit sur des échelles de tailles différentes. Exemple : fragmentation hiérarchique d'un nuage d'hydrogène. Voir aussi : *masse de Jeans*. |
| **HII** | Voir : région HII. |
| **Himalia** | (mythologie grecque : nymphe de Rhodes) Satellite de Jupiter n° VI, de 186 km approximativement, orbitant à 11 480 000 km de la planète dans le sens direct, en 251 j. Découvert par Perrine en 1905. |
| **Hipparcos** | ***Hi**gh **P**recision **P**arallax **Co**llecting **S**atellite*. Comme son nom l'indique, Hipparcos a été construit pour améliorer d'un facteur 100 la précision des mesures de position pour les étoiles autour du Soleil. Ses résultats ont amené une révision de toutes les distances dans l'Univers. |
| **histogramme** | Graphique représentant, pour tout intervalle de valeurs d'une grandeur donnée, l'importance de la population qui possède ces valeurs. Il représente donc la répartition des membres de la population selon cette grandeur. |
| **Hoba** | La plus grosse météorite trouvée. Son nom provient de la localité de Namibie où elle est tombé. C'est une ataxite, variété de sidérite riche en nickel. Son poids est estimé à 70 tonnes. |
| **homogénéité** | se dit d'une propriété qui ne dépend pas de la position de l'observateur. Par exemple, l'Univers est homogène s'il présente le même aspect, quelle que soit la galaxie d'où on l'observe. |
| **horizon des événements** | Surface sphérique autour d'un trou noir, limitant la partie de l'espace (intérieur) dont la lumière ne peut plus s'échapper. |
| **horloge** | Objet habituel, qui donne l'heure. Mais une horloge est associée à tout référentiel en relativité. Puisque espace et temps sont mélangés, il est bien nécessaire de mesurer simultanément les coordonnées spatiales et temporelle. |
| **horloge sidérale** | Horloge à balancier, très précise (balancier à plusieurs métaux pour éviter la dilatation), qui se trouvait dans tous les observatoires, et qui était réglée sur le temps sidéral. |
| **horst** | Terme dérivé de l'allemand. Désigne la partie surélevée d'un terrain lorsqu'une faille d'extension se produit. Une partie s'effondre, c'est un *graben*, l'autre s'élève, c'est un *horst*. Voir : graben. |
| **howardite** | Achondrite (météorite) riche en calcium dont le minéral dominant est le plagioclase calcique. |
| **Hydra** | (mythologie grecque : serpent à 7 têtes, vivant dans le lac de Lerne aux portes des Enfers) Satellite de Pluton n° III, de dimensions 40 à 130 km, orbitant à 65 000 km de la planète dans le sens direct, en 38 j 4 h 48 mn. Découvert par Mutchler en 2005. Nix et Hydra sont sur des orbites très régulières, qui semblent indiquer une formation en même temps que Pluton. |
| **hydrogène métallique** | Hydrogène normal, mais dans un état de pression si élevée que l'électron se trouve libre, comme l'électron de conduction dans un métal. Vers le centre de Jupiter, l'hydrogène doit être dans l'état métallique. |
| **hydrogène neutre** | Hydrogène dans lequel l'électron reste attaché au noyau, et le neutralise. |
| **hydrosphère** | Partie d'une planète où l'on trouve de l'eau, sous forme solide (glace), liquide ou gazeuse. |
| **Hygiea** | (mythologie grecque : Déesse grecque de la santé, fille d'Asclépios) Candidate planète naine de 407 km de diamètre (approximativement sphérique), orbitant à 3 UA du Soleil, en 5,56 ans. Découverte par de Gasparis en 1849. Objet de la ceinture principale. |
| **hyperbole** | Courbe ouverte, ayant des propriétés semblables à celles de la parabole. L'hyperbole est la trajectoire d'un objet très rapide, trop pour rester prisonnier du Soleil. Forme, avec la parabole et l'ellipse, la famille des coniques. |
| **hypergéante** | Terme créé pour qualifier les étoiles les plus massives, qui sont aussi les plus lumineuses. Le critère de Keenan, aujourd'hui adopté, exige que la raie Hα en émission soit large, ce qui implique un vent stellaire très fort avec importante perte de masse. |
| **Hypérion** | (mythologie grecque : Titan de la lumière, fils de Gaïa et d'Ouranos) Satellite de Saturne n° VII, de dimensions 370×280×226 km, orbitant à 1 481 100 km de la planète dans le sens direct, en 21 j 7 h 12 mn. Découvert par Bond en 1848. Le plus gros corps du système solaire fortement non sphérique. Ilest probablement le résultat d'une violente collision. |
| **hypernova** | Explosion d'une étoile très massive, qui produit directement un trou noir. Ces phénomènes sont censés expliquer les sursauts gamma. Ils ne peuvent se produire que pour des étoiles de plus de 40 masses solaires. |
| **Hyrrokkin** | (mythologie scandinave : géante qui a mis à l'eau le bateau Hringhorni, portant le corps de Baldr) Satellite de Saturne n° XLIV, de 8 km approximativement, orbitant à 18 440 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 2 ans 201 j. Découvert par Sheppard en 2006. |

A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z

| | |
|---|---|
| **Ida** | (mythologie grecque : Nymphe à laquelle Rhéa a confié son fils Zeus en garde) Astéroïde de dimensions : 56×24×21 km, désignation provisoire 1988 DB1, orbitant à 3 UA du Soleil, en 4,84 ans. Découverte par Palisa en 1884. Objet de la ceinture principale, Ida est de classe S, appartenant à la famille de Coronis. Il a été survolé le 28 août 1993 par la sonde Galiléo. Ida possède un satellite nommé *Dactyl*. |
| **Ijiraq** | (mythologie inuit : Ijiraq est un croquemitaine qui enlève les enfants.) Satellite de Saturne n° XXII, de 12 km approximativement, orbitant à 11 120 000 km de la planète dans le sens direct, en 1 ans 87 j 16 h. Découvert par Gladman en 2000. |
| **impactite** | Les impactites sont constituées de matériaux terrestres, mais arrachés à la croûte par un impact, et projetés à distance parfois importante. Elles sont associées à des cratères d'impact. |
| **impesanteur** | Absence de pesanteur, ou mieux, de gravité. Ce terme remplace *l'apesanteur*, qui est phonétiquement identique à *la pesanteur*. |
| **impulsion** | Produit de la masse d'un mobile par sa vitesse. L'impulsion est un vecteur à trois composantes alignées avec celles de la vitesse. |
| **inclinaison** | En Mécanique Céleste, angle que fait une orbite avec le plan de l'écliptique. |
| **inclusion réfractaire** | Voir : CAI. |
| **indice de réfraction** | Propriété optique d'un milieu ; selon sa valeur, la lumière se déplace plus ou moins vite dans ce milieu ; il en résulte des changements de direction des rayons lumineux d'un milieu à un autre. |
| **indiction romaine** | Impôt perçu à Rome. L'indiction suit un cycle de 15 ans. Son utilisation dans le calendrier julien a maintenu sa présence dans le calendrier des postes, avec nombre d'or, épacte, cycle solaire et lettre dominicale. |
| **inertie** | Propriété des corps massifs, découverte par Galilée, et qui s'oppose à tout changement de mouvement. Un corps en mouvement ne change pas de vitesse (ni en grandeur ni en direction) s'il ne subit pas de force extérieure. |
| **inférieure** | Se dit d'une planète dont l'orbite est contenue à l'intérieur de celle de la Terre. *Inférieure* signifie plus proche du Soleil. Par opposition, les planètes dont l'orbite contient celle de la Terre (plus loin du Soleil) sont dites *planètes supérieures*. |
| **inflation** | Phase du début de l'Univers, dans les modèles de Big Bang, au cours de laquelle l'Univers s'est démesurément enflé en un temps très bref. |
| **infra-rouge** | Partie du spectre électromagnétique, située juste en-dessous du visible (et donc un peu moins énergétique). |
| **instant de passage au périhélie** | Date à laquelle une planète passe au point le plus près du Soleil. Cette date permet de déterminer la position de la planète sur son orbite à tout instant. |
| **interaction** | Nom moderne des forces de la Nature. Il en existe 4 : *interaction forte*, *interaction faible*, *interaction électromagnétique*, et *interaction gravitationnelle*. |
| **interaction électromagnétique** | Action qui s'exerce à distance sur les particules chargées, de portée infinie. Elle unifie les forces électrique et magnétique. |
| **interaction faible** | Interaction s'exerçant au niveau de l'atome, à très courte portée, responsable des transformations de particules, en particulier de neutrons en protons. |
| **interaction forte** | Interaction s'exerçant au niveau du noyau atomique, à très courte portée, responsable de la cohésion des noyaux atomiques. |
| **interaction gravitationnelle** | Interaction responsable de l'attraction des corps massifs, de portée infinie. Elle est de très loin la plus faible de toutes les interactions, mais elle est additive : l'union fait la force ! A l'échelle cosmologique, son caractère additif lui permet de l'emporter très largement sur les trois autres. |
| **interférométrie** | Méthode d'analyse et de synthèse d'images consistant à combiner les rayons lumineux provenant d'une même source, mais ayant parcouru des trajets optiques différents. Elle augmente considérablement le pouvoir séparateur. Elle a été utilisée pour la première fois sur le Télescope de Foucault à Marseille, puis développée et largement utilisée en radioastronomie. Elle est maintenant utilisée en optique grâce aux travaux d'Antoine Labeyrie. Voir aussi : *interférométrie*. |
| **interférométrie des tavelures** | Méthode de photographie, développée par Antoine Labeyrie, qui consiste à prendre une succession de clichés à très courte pose, figeant la turbulence. Voir : tavelure. |
| **intervalle d'univers** | En Relativité, distance entre deux événements. Les événements sont définis par 4 coordonnées, et la distance est définie par la métrique. Voir : métrique, événement. |
| **intervalle du genre espace** | Intervalle d'univers pour lequel il existe un référentiel dans lequel les deux événements coïncident dans le temps. Il ne sont donc séparés que par l'espace. |
| **intervalle du genre temps** | Intervalle d'univers pour lequel il existe un référentiel dans lequel les deux événements coïncident dans l'espace (ils ne sont donc séparés que par le temps). |
| **Io** | (mythologie grecque : Io était maîtresse de Zeus, qui la changea en génisse blanche lorsqu'elle fut découverte par Héra, sa femme) Satellite de Jupiter n° I, de 3 643 km de diamètre, orbitant à 421 800 km de la planète dans le sens direct, en 1 j 18 h 37 mn. Découvert par Galillée en 1610. L'un des principaux satellites galiléens de Jupiter. C'est le premier sur lequel on ait détecté des volcans actifs, en dehors de la Terre. Après avoir parlé de cryovolcanisme, on a observé des températures de lave bien supérieures à celles normalement observées sur Terre. Les marées dues à Jupiter sont responsables du chauffage du satellite. |
| **ionisation** | Arrachage d'un ou plusieurs des électrons périphériques d'un atome. De ce fait, l'atome devient positif. L'ionisation absorbe de l'énergie. |

| | |
|---|---|
| **ionosphère** | Couche de l'atmosphère terrestre, située à haute altitude, dans laquelle les atomes sont ionisés par le rayonnement ultraviolet du Soleil. Conductrice de l'électricité, cette couche se comporte comme un miroir pour les ondes radio et permet les communications à grande distance. |
| **IRAM** | (***I**nstitut de **RA**dioastronomie **M**illimétrique*, France, Espagne, Allemagne). L'IRAM s'est doté de deux instruments, celui du *Pico Veleta* en Espagne, et celui du *Plateau de Bure* en France. |
| **Iranom** | Iron Anomalous. Classe de météorites fer-nickel, qui ne rentrent pas dans 12 groupes définis. |
| **iridium** | Métal de la famille du platine, de densité 22,5 très élevée. De ce fait, il ne se trouve pas dans la croûte terrestre. Mais une couche d'argile de 5 mm d'épaisseur, entre le Crétacé et le Tertiaire, en contient beaucoup, ce qui atteste d'une origine extraterrestre. Voir : couche Kt. |
| **irrégulière** | Voir : galaxie irrégulière. |
| **Ishtar terra** | Grande zone géographique de Vénus, située autour du pôle Nord. Elle comprend des structures très importantes : les monts Maxwell, Lakshmi Planum et Fortuna tessera. |
| **Islande** | Ile proche du Gröenland, d'origine volcanique et située juste sur la dorsale atlantique nord. Il existe deux endroits sur Terre où une dorsale se trouve à l'air libre : en Islande et dans les Afar en Ethiopie. L'Islande présente un volcanisme très actif, avec en particulier de grands geysers. |
| **isobare** | En thermodynamique, se dit d'une transformation qui se fait à pression constante. |
| **Isonoé** | (mythologie grecque : une Danaïde, maîtresse de Zeus) Satellite de Jupiter n° XXVI, de 4 km approximativement, orbitant à 23 155 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 1 an 361 j. Découvert par Sheppard en 2000. Groupe de Carmé. |
| **isotherme** | • En thermodynamique, se dit d'une transformation qui se fait à température constante.<br>• Ligne isotherme : ligne à la surface d'une planète le long de laquelle la température garde une même valeur (*l'isotherme 0° est à 3.000 m*). |
| **isotope** | Noyau atomique ayant un même nombre de protons qu'un autre (ce qui fixe son espèce) mais un nombre de neutrons différent. Il possède exactement les mêmes propriétés chimiques. |
| **isotropie** | (du grec *iso* pareil, et *trepein* tourner). Se dit d'une propriété qui est la même dans toutes les directions, donc indépendante de l'angle d'observation. |
| **Itokawa** | (Itokawa était le père de l'astronautique japonaise) Astéroïde de dimensions : 607×287×264 m, désignation provisoire 1998 SF36, orbitant à 1 UA du Soleil, en 1,523 ans. Découverte par LINEAR en 1998. Objet de la ceinture principale, Itokawa a reçu la visite de la sonde japonaise Hayabusa, qui s'y est posée le 19 novembre 2005. Elle a ramené sur Terre des poussières de l'astéroïde. C'est le premier échantillon d'astéroïde récupéré sur Terre. |
| **ivoirite** | Tectite provenant de Côte d'Ivoire, associé au cratère Bosmtwi et âgé de 1,3 MA. Voir : tectite. |
| **Ixion** | (mythologie grecque : Prince qui assassina son beau-père, puis convoita Héra femme de Zeus. Grand-père des Centaures) Candidate planète naine de 760 km de diamètre (approximativement sphérique), désignation provisoire 2011 KX76, orbitant à 40 UA du Soleil, en 248,37 ans. Découverte par Millis en 2001. Plutino de la ceinture de Kuiper (en résonance 2:3 avec Neptune). Voir : ceinture de kuiper. |

A B C D E F G H I **J** K L M N O P Q R S T U V W X Y Z

| | |
|---|---|
| **Jamsaxa** | (mythologie scandinave : géante, maîtresse de Thor) Satellite de Saturne n° L, de 6 km approximativement, orbitant à 18 810 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 2 ans 234 j. Découvert par Sheppard en 2006. |
| **Jansky** | (Karl, 22/10/1905-14/02/1950) Inventeur de la radioastronomie. Ne réussissant pas à réduire le bruit capté par son antenne, supérieur au bruit thermique, il a montré, grâce à une antenne directionnelle, que la source était dans la Voie Lactée. Son nom a été donné à l'unité physique qui indique l'intensité d'un rayonnement radio. |
| **Janus** | (mythologie romaine : dieu du commencement et de la fin, aux deux visages. C'est le dieu de la paix, protecteur de Rome) Satellite de Saturne n° X, de dimensions 195×194×152 km, orbitant à 151 460 km de la planète dans le sens direct, en 16 h 41 mn. Découvert par Audoin Dollfus en 1966. Petit satellite, grossièrement rond, semblable à un astéroïde. Orbite très proche de celle d'Epiméthée ; ils les échangent tous les 4 ans. |
| **Japet** | (mythologie grecque : Titan, fils d'Ouranos et de Gaia) Satellite de Saturne n° VIII, de 1 471 km de diamètre, orbitant à 3 561 300 km de la planète dans le sens direct, en 79 j 7 h 55 mn. Découvert par Cassini en 1671. Troisième satellite de Saturne par la taille, il présente deux hémisphères très différents, et une crête équatoriale sur la moitié de sa circonférence. Il est formé essentiellement de glace d'eau. |
| **JCMT** | ***J**ames **C**leck **M**axwell **T**elescope*. Télescope millimétrique, de 15 mètres de diamètre, observant dans la gamme de 0,35 à 2 mm. |
| **Jocaste** | (mythologie grecque : épouse de Laïos, et mère d'OEdipe) Satellite de Jupiter n° XXIV, de 5 km approximativement, orbitant à 21 061 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 1 an 266 j. Découvert par Sheppard en 2000. Groupe d'Ananké |
| **jour** | Division du temps de courte durée, de définition fort variable quand à son commencement. La durée du jour est variable. On nomme maintenant *jour* la durée du jour solaire moyen, constante, mais en désaccord avec le Soleil selon la saison. |
| **jour blanc** | Jour hors semaine. L'année commune comptant 365 jours = 52 semaines + 1 jour, le premier janvier se décale par rapport à la semaine d'une année à l'autre. Si le 31 décembre était un jour blanc, toutes les années communes commenceraient par le même jour de la semaine. Le jour bissextil devrait également être un jour blanc. Mais une telle réforme risque de se heurter aux habitudes... |

| | |
|---|---|
| **jour julien** | Désignation d'un jour dans une séquence régulière de nombres. Par exemple, le 23 octobre 2008 à 22 h 35 est le JJ 2.454.804,44097222. La partie décimale donne l'heure. |
| **jour sidéral** | Intervalle de temps entre deux passages successifs d'une étoile au méridien. Le jour sidéral est plus court de 4 minutes que le jour solaire moyen. |
| **jour solaire** | • **Jour solaire vrai** : intervalle de temps, variable au cours de l'année, entre deux midis vrais (donnés par un cadran solaire).<br>• **Jour solaire moyen** : utilisé par nos montres, il est la moyenne, sur toute l'année, du jour solaire vrai. |
| **joviennes** | Qualificatif appliqué aux 4 planètes géantes, gazeuses, du système solaire, semblables à Jupiter (*Jovis* en latin). Les recherches sur des planètes extra-solaires ne permettaient au début de découvrir que des planètes joviennes. Mais maintenant, on est capable de détecter des planètes de quelques masses terrestres. |
| **Juliette** | (mythologie : personnage de Shakespeare) Satellite d'Uranus n° XI, de 94 km approximativement, orbitant à 64 400 km de la planète dans le sens direct, en 11 h 50 mn. Découvert par Synnott en 1986. |
| **Jupiter** | Cinquième planète du Soleil. Diamètre : 142.984 km, distance au Soleil : 778,412 millions de km, année : 11 ans 312,85 jours. Plus grosse planète du système solaire, elle est constituée essentiellement de gaz (H et He). Ses perturbations gravitationnelles sont très importantes. Ses phénomènes atmosphériques sont caractéristiques, en particulier la Grande Tache Rouge. |
| **Jupiter chaud** | Nom générique donné aux exoplanètes gazeuses, orbitant à moins de 0,5 UA de leur étoile. On explique leur présence par la migration. Voir : migration. |
| **Jurassique** | Seconde période du Mésozoïque. Il s'étend de 200 à 150 millions d'années. Il débute par la division de la Pangée en plusieurs blocs, et voit l'apparition des mammifères marsupiaux et des plantes à fleurs. Les dinosaures constituaient une part importante de la faune. |

A B C D E F G H I J **K** L M N O P Q R S T U V W X Y Z

| | |
|---|---|
| **kamacite** | Alliage de fer-nickel, à structure cristalline cubique centrée, contenant de 4 à 7,5 % de nickel. Composant des sidérites. |
| **Kari** | (mythologie scandinave : géant des vents) Satellite de Saturne n° XLV, de 7 km approximativement, orbitant à 22 120 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 3 ans 138 j. Découvert par Sheppard en 2006. |
| **Kasei** | Nom japonais de Mars. |
| **kaspu** | Division du jour en Chaldée. Le kaspu valait à peu près deux de nos heures. |
| **KBO** | **K**uiper **B**elt **O**bject. Objet de la Ceinture de Kuiper, en orbite autour du Soleil au-delà de Neptune. |
| **Keck** | Deux télescopes américains de 10 m, multimiroirs à 36 composantes, type Ritchey-Chrétien, visible et proche IR, installés au sommet du Mauna Kea (4.145 m), terminé en 1996. Pouvoir séparateur maximum 0,04 arcsec. Les deux télescopes fonctionnent en interféromètre : pouvoir séparateur 5 milli arcsec. |
| **Kelvin** | William Thomson, Lord Kelvin a créé une échelle de températures, nommée *échelle Kelvin*, ou *échelle absolue*, basée sur la définition statistique de la température. Voir : degré Kelvin. |
| **Kepler** | (Johannes, 27/12/1571-15/11/1630) Né le dans le Bade-Wurtemberg, il a montré que la planète Mars parcourait une orbite elliptique autour du Soleil, et trouvé la relation entre les périodes des planètes et leur distance au Soleil (lois de Képler). |
| **Kerberos** | (mythologie grecque : chien tricéphale gardant les Enfers, empêchant ceux qui y étaient entrés d'en ressortir) Satellite de Pluton n° IV, de dimensions 14 à 40 km, orbitant à 52 000 km de la planète dans le sens direct, en 32 j 2 h 24 mn. Découvert par HST en 2011. |
| **Kirchhoff** | (Gustav, 12/03/1824-17/10/1887) Physicien allemand à qui on doit de nombreux résultats sur le rayonnement, l'électrodynamique et la théorie de l'élasticité. Les *lois de Kirchhoff* sont la base de la spectroscopie, universellement utilisée en astronomie. Voir : lois de Kirchhoff. |
| **Kiviuq** | (mythologie scandinave : géant qui voyagea beaucoup et qui eut de nombreuses aventures.) Satellite de Saturne n° XXIV, de 16 km approximativement, orbitant à 11 100 000 km de la planète dans le sens direct, en 1 ans 84 j. Découvert par Gladman en 2000. Ses paramètres, inclinaison et excentricité, varient périodiquement. |
| **komatiite** | Laves terrestres ultrabasiques, abondante à l'époque archéenne, et résultant d'éruptions à haute température (1.500 à 1.650°). Elles présentent des cristaux en forme d'aiguille, produits par un refroidissement rapide. |
| **KREEP** | Composant des plateaux lunaires, probablement formé en profondeur dans la croûte, puis remonté par des impacts ou par le volcanisme. Le nom provient de la composition chimique : K (potassium), REE (*Rare Earth Element/em> = Terres Rares), P (phosphore).* |
| **kronien** | adjectif, signifiant "de Saturne", en raison de l'équivalence Saturne = Cronos. |
| **KT** | Sigle signifiant Crétacé-Tertiaire (K est mis pour Kreidezeit, nom allemand du Crétacé). Couche d'argile, présente partout dans le monde, qui marque la fin du Crétacé, avec la disparition, entre autres, des dinosaures. |
| **Kuyen** | Nom de l'UT2 du VLT. Il signifie "la Lune" dans la langue Mapuche des indiens de la région. Kuyen a été terminé en 1999. |

A B C D E F G H I J K **L** M N O P Q R S T U V W X Y Z

| | |
|---|---|
| **L'Aigle** | Localité française où est tombé une météorite pierreuse : chondrite à olivine. 40 kg de fragments ont été retrouvés. |
| **labes** | Mot latin. Dénomination d'une structure géologique dans le système solaire, signifiant "glissement de terrain". Voir aussi : *liste des formations géologiques*. |
| **Labeyrie** | Antoine, né en 1943. Il a construit les premiers interféromètres optiques sur le plateau de Calern, à Grasse. Il a ainsi développé et validé les techniques permettant de combiner la lumière de deux télescopes. Ses principes sont maintenant utilisées dans tous les grands observatoires (VLTI, projet OHANA). L'astéroïde 8788 porte on nom. |
| **labyrinthus** | Mot latin. Dénomination d'une structure géologique dans le système solaire, signifiant "complexe de plusieurs vallées qui se coupent". Voir aussi : *liste des formations géologiques*. |
| **Lacune de Hertzprung** | Zone du diagramme HR entre la Séquence Principale et la Branche des Géantes, où l'on observe très peu d'étoiles. Cette relative absence est due à la rapidité avec laquelle une étoile monte cette ligne. Elle y reste trop peu de temps pour avoir une chance significative d'y être observée. |
| **lacune de Kirkwood** | Zones annulaires dans la ceinture principale des astéroïdes, dans lesquelles les orbites sont instables à cause des perturbations de Jupiter. Elles sont analogues aux divisions de Cassini et d'Encke dans les anneaux de Saturne. |
| **lacus** | Mot latin. Dénomination d'une structure géologique dans le système solaire, signifiant "lac, petite plaine (sur la lune)". Voir aussi : *liste des formations géologiques*. |
| **Lada terra** | Vaste zone de Vénus située autour du pôle Sud. Elle est constituée de plaines sans structures particulières, mais une partie n'a pas encore été cartographiée. |
| **Lagrange** | (Joseph-Louis, 25/01/1736 - 10/04/1813) Grand mathématicien et mécanicien, auteur de travaux sur le calcul différentiel, et surtout d'un traité de mécanique analytique, toujours utilisé aujourd'hui. Il a créé un formalisme particulier appellé *formalisme lagrangien*. Voir : point de Lagrange. |
| **Lalande** | (Jérôme Lefrançois de Lalande, 11/07/1732-04/04/1807). Astronome français, membre de l'Académie des Sciences. Il a participé à la mesure de la parallaxe de la Lune, et organisé les expéditions de 1761 et 1769 pour observer les passages de Vénus devant le Soleil. Il a déduit des résultats, la parallaxe du Soleil, qui est restée longtemps la meilleure connue. Il a enfin publié un *Traité d'Astronomie* qui a fait autorité. |
| **Laomédie** | (mythologie grecque : une des Néréides, fille de Néreus et Doris) Satellite de Neptune n° XII, de 38 km approximativement, orbitant à 23 571 000 km de la planète dans le sens direct, en 8 ans 246 j. Découvert par Holman en 2002. |
| **Large Hadron Collider** | Voir : LHC. |
| **Larissa** | (mythologie grecque : petite-fille du roi d'Argos, épouse de Poséidon) Satellite de Neptune n° VII, de dimensions 216×204×164 km, orbitant à 73 548 km de la planète dans le sens direct, en 13 h 19 mn. Découvert par Reitsema en 1981. Larissa orbite à l'intérieur de l'orbite synchrone, et tombe lentement vers la planète. |
| **laser** | Acronyme pour le sigle LASER : *Light Amplification of Stimulated Emission of Radiation*. De l'énergie est apportée aux électrons d'un ensemble d'atomes, pour exciter ces électrons. On produit ensuite leur désexcitation cohérente, en utilisant les propriétés bosoniques des photons émis. |
| **latitude** | • **Géographique** : coordonnée nord-sud à la surface de la Terre, qui indique l'éloignement angulaire à l'équateur. Comptée positive vers le nord et négative vers le sud, elle est comprise entre -90° et +90°. La latitude de Marseille est +43° 18'. Au lieu d'indiquer le signe, on dit parfois *nord* ou *sud* : Marseille est à 43° 18' nord. Elle est associée à la longitude pour déterminer un point à la surface de la Terre.<br>• **Céleste**. Eloignement d'un point par rapport à l'écliptique.<br><br>Voir : longitude. |
| **Laurasie** | Supercontinent issu de la fragmentation de la Pangée au cours du Mésozoïque. L'autre fragment est le Gondwana. La Laurasie a ensuite éclaté pour former l'Eurasie et l'Amérique du nord, par la formation de l'Atlantique nord. Le nom a été formé à partir de deux régions de ces parties : les Laurentides pour l'Amérique du nord, et l'Asie pour l'Eurasie. |
| **LBV** | ***L**uminous **B**lue **V**ariable*. Variable Bleue Lumineuse, probablement des étoiles hypergéantes. |
| **Le Gentil** | (Guillaume Le Gentil de la Galaisière, 12/09/1725-22/10/1792). Astronome français, impliqué dans la détermination de la parallaxe du Soleil. Il partit vers Pondichéry pour observer le passage de Vénus de 1761, mais la malchance l'en empêcha. Il décida de rester sur place pour attendre celui de 1769, mais ne put l'observer à cause des nuages. Tempêtes et administrateurs locaux se sont ligués pour détruire ses espoirs. Il a cependant fait un travail scientifique exceptionnel, en cartographiant notamment les côtes de Madagascar, et échantilloné des espèces végétales et animales. |
| **leading** | Voir : structure précédente. |
| **Léda** | (mythologie grecque : mère d'Hélène, Castor et Pollux. Zeus, sous la forme d'un cygne, la séduisit) Satellite de Jupiter n° XIII, de 16 km approximativement, orbitant à 11 094 000 km de la planète dans le sens direct, en 239 j. Découvert par Kowal en 1974. |
| **Lemaître** | (Georges, 17/07/1894 - 20/06/1966). Prêtre belge, physicien, qui a résolu l'équation du champ d'Einstein. Il a montré que l'Univers devait être en expansion ou contraction. On lui doit les modèles de Friedmann-Lemaître. |
| **lenticula** | Mot latin, pluriel *lenticulae*. Dénomination d'une structure géologique dans le système solaire, signifiant "petites taches sombres sur Europe". Voir aussi : *liste des formations géologiques*. |
| **lenticulaire** | Voir : galaxie lenticulaire. |
| **lentille de Barlow** | Lentille divergente, placée avant l'oculaire d'un instrument astronomique, pour en allonger la focale résultante. On peut ainsi obtenir des grossissement plus importants, en perdant un peu de lumière, et en accroissant les aberrations. Utile en photographie planétaire. |

| | |
|---|---|
| **lentille gravitationnelle** | La Relativité Générale prévoit la déviation des rayons lumineux par les masses. Une lentille gravitationnelle est une grande masse, déviant les rayons issus d'un astre plus lointain à la manière d'une lentille optique. Elle en donne parfois des images multiples (croix d'Einstein). Voir aussi : *lentille gravitationnelle*. |
| **Léonides** | Pluie d'étoiles filantes, semblant provenir de la constellation du Lion. |
| **lepton** | Particule légère élémentaire. Les leptons sont l'*électron*, le *muon* et le *tau*. |
| **lettre dominicale** | Lettre indiquant quel jour de la semaine est le premier janvier. Les romains avaient pour habitude de mettre, dans le calendrier, une lettre en face de chaque jour pour indiquer sa position dans la semaine. Chaque année porte donc, pour lettre dominicale, celle de son 1er janvier. Lorsque l'année est bissextile, on donne une seconde lettre, valable pour la deuxième partie de l'année. |
| **lever** | Passage d'un astre par l'horizon, avec la hauteur croissante. |
| **lever héliaque** | Première apparition annuelle d'une étoile dans le ciel déjà clair juste avant le lever du Soleil. Elle se lèvera 4 minutes plus tôt le lendemain... |
| **LHC** | **L**arge **H**adron **C**ollider. Accélérateur de particule européen, installé à la frontière franco-suisse (Genève), le plus puissant du monde. Il a permi la découverte du boson de Higgs. On espère voir des informations sur l'hypothétique matière noire. |
| **libration** | Balancement apparent de la Lune dans le ciel, dû à la vitesse variable de la Lune autour de la Terre, et la combinaison de son mouvement avec le mouvement de la Terre. |
| **ligne d'univers** | Trajectoire, dans un diagramme figurant à la fois l'espace et le temps, qui relie deux événements. On peut toujours tracer une telle trajectoire, mais sa signification physique n'est pas toujours celle qui correspond à nos habitudes courantes. Voir : événement, genre espace, genre temps. |
| **ligne des nœuds** | Ligne d'intersection des orbites de la Terre autour du Soleil et de la Lune autour de la Terre. Ses deux extrêmités sont les nœuds. |
| **limite d'Eddington** | Lorsqu'une étoile se forme par accrétion de gaz, celle-ci est limitée par la pression de radiation lorsqu'une certaine masse est atteinte. Cette masse est la limite d'Eddington. Elle se situe autour de 120 à 150 masses solaires. |
| **limite de Chandrasekhar** | Voir : masse de Chandrasekhar. |
| **limite de Roche** | Distance minimale à laquelle un satellite peut orbiter autour de sa planète sans se rompre par les forces de marée. |
| **limite statique** | Ellipsoïde, autour d'un trou noir en rotation, qui limite la zone dans laquelle un véhicule ne pourrait pas être en vol stationnaire, mais dans laquelle il peut tourner autour du trou noir. Entre la limite statique et l'horizon des événements, se trouve l'ergosphère. |
| **linea** | Mot latin, pluriel *lineæ*. Dénomination d'une structure géologique dans le système solaire, signifiant "rayures allongées, claires ou sombres, droites ou courbes". Voir aussi : *liste des formations géologiques*. |
| **lithosphère** | Latin *lithos* = pierre. La lithosphère est constituée de la croûte et de la partie supérieure du manteau de la Terre, qui est rigide. Elle est divisée en plaques, et séparée du reste du manteau par la discontinuité de Mohorovicic (le Moho). Cette discontinuité se place là où l'olivine atteint le point de fusion, à peu près 1.300°. |
| **LMC** | Voir : Grand Nuage de Magellan. |
| **lobe de Roche** | Edouard Roche a calculé la surface d'équilibre entre la gravité de deux corps orbitant ensemble. Il a montré que c'était une sorte de 8 à lobes inégaux. Une étoile évoluée peut remplir son lobe de Roche, et déverser de la matière sur l'autre étoile. Voir aussi : *Nova*. |
| **Loge** | (mythologie scandinave : géant de feu, fils de Fornjot) Satellite de Saturne n° XLVI, de 6 km approximativement, orbitant à 23 070 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 3 ans 217 j. Découvert par Sheppard en 2006. |
| **loi** | Enoncé caractérisant le comportement d'un système physique, et qui doit être vérifié par **toutes** les expériences que l'on peut faire dans ce cadre. Exemple : la première loi de Kepler. Voir aussi : *lois de Kepler*. |
| **loi de Pogson** | La loi de Pogson indique que le flux lumineux émis par un astre se dilue dans l'espace en fonction inverse du carré de la distance. |
| **loi de Wien** | Loi donnant, en micromètres, la longueur d'onde dans laquelle un corps noir de température donnée rayonne le maximum de son énergie : $\lambda_m = 2.898 / T$. Pour le Soleil (T = 5.770 K), on voit que c'est vers 0,5 micromètres. |
| **loi des aires** | Seconde loi de Kepler, indiquant que le rayon-vecteur (ligne qui joint la planète au Soleil) décrit des aires égales en des temps égaux. Cette loi, trouvée empiriquement, est une conséquence de la conservation de l'énergie. |
| **lois de Képler** | Lois qui décrivent le mouvement d'une planète autour du Soleil, sans considérer les autres planètes. Déduites empiriquement à partir des excellentes observations de Tycho-Brahé, elles sont à la base de la loi de la Gravitation Universelle de Newton. |
| **lois de Kirchhoff** | Lois indiquant le comportement d'un rayonnement électromagnétique, depuis son émission thermique, jusqu'à son cheminement dans un milieu matériel. Elles décrivent les émissions et absorptions. |
| **longitude** | • **Géographique** : coordonnée est-ouest à la surface de la Terre indiquant l'éloignement au méridien de Greenwich. Positive vers l'est, elle est comprise entre -180° et +180°. On utilise parfois Est ou Ouest au lieu du signe : Marseille est à +5° 24' ou 5° 24' Est. Longitude et latitude déterminent un point à la surface de la Terre.<br>• **Céleste**. C'est une projection des coordonnées terrestres sur la sphère céleste, avec une origine différente. La longitude est utilisée pour le Soleil essentiellement.<br><br>Voir : latitude. |
| **longitude du** | Distance angulaire entre le point vernal et le nœud ascendant de l'orbite. Cette valeur permet de positionner l'orbite de la |

| | |
|---|---|
| **nœud ascendant** | planète par rapport à une direction fixe. |
| **LSP** | ***L**ightest **S**upersymetric **P**article*. Particule supersymétrique la plus légère. De ce fait, elle ne peut se désintégrer, elle est stable. Elle est prévue pas les théories incluant la supersymétrie. |
| **LSR** | ***L**ocal **S**tandard of **R**est*. Standard local de repos, ou centre local des vitesses. Il s'agit d'un référentiel ayant le Soleil pour origine, et corrigé des vitesses particulières des étoiles. Le mouvement de ce point n'est que la rotation autour du centre galactique. Voir aussi : *rotation de la Galaxie*. |
| **lumière exozodiacale** | Lumière zodiacale, produite par les poussières interplanétaires, dans un système planétaire différent du nôtre. Brillant en infrarouge, elle pourrait gêner la photographie des exoplanètes, qui devrait se faire en IR pour améliorer le contraste par rapport à l'étoile. |
| **lumière zodiacale** | Reflet du Soleil, sur les poussières interplanétaires, visible après le coucher du Soleil ou avant son lever, et dans la direction du Soleil. Le *gegenshein* est le même phénomène, mais à l'opposé du Soleil. |
| **luminescence** | Emission de rayonnements électromagnétiques par un mécanisme non thermique, après excitation. Selon le délai entre excitation et émission, on distingue *fluorescence* et *phosphorescence*. Voir : fluorescence, phosphorescence. |
| **lunaison** | Période de révolution de la Lune autour de la Terre. Elle vaut en moyenne 29 jours à peu près. Elle est à la base de la définition du mois. Voir aussi : *lunaison*. |
| **Lune** | Satellite de la Terre n° I, de 3 476 km de diamètre, orbitant à 384 000 km de la planète dans le sens direct, en 27 j 7 h 41 mn. Seul satellite naturel de la Terre, plus proche corps céleste, la Lune joue un grand rôle en équilibrant notre planète. Elle a servi historiquement à l'établissement de nombreux calendriers. La théorie de ses mouvements a amené de grands perfectionnements en mécanique et en mathématiques |
| **lunette** | Instrument d'optique pour l'observation des astres, constitué d'un objectif à lentille (doublet achromatique) et d'un oculaire. |
| **lunette méridienne** | Lunette montée sur un axe horizontal fixe, orienté pour qu'elle ne puisse observer que dans le méridien. Elle permettait de déterminer précisément l'instant de passage d'un astre au méridien, et d'en déterminer l'ascension droite précisément. |
| **luni-solaire** | Adjectif qui se dit d'un calendrier basé à la fois sur la lunaison (définition du mois) et sur l'année des saisons. |
| **Lyman** | (Theodore, (23/11/1874-11/10/1954) Physicien américain ayant travaillé sur la spectroscopie. Il a découvert les raies spectrale de l'hydrogène qui constituent la raie portant son nom. Voir : série de Lyman. |
| **Lysithéa** | (mythologie grecque : fille d'Océan et maîtresse de Zeus) Satellite de Jupiter n° X, de 36 km approximativement, orbitant à 11 720 000 km de la planète dans le sens direct, en 259 j. Découvert par Nicholson en 1938. |

A B C D E F G H I J K L **M** N O P Q R S T U V W X Y Z

| | |
|---|---|
| **MA** | Abbréviation très usitée de *Million d'Années*. A ne pas confondre avec *milliard d'années*, qui se note *GA*, pour *Giga* (milliard) années. |
| **Ma'adim** | Nom hébreu de Mars. |
| **Maat Mons** | Volcan situé dans Atla Regio sur Vénus. Il culmine à 8.000 m. Il a moins de 100 millions d'années (comptages de cratères), et pourrait même être contemporain. Il est couronné d'une caldeira de 30 km de diamètre. |
| **Mab** | (mythologie : personnage de Shakespeare) Satellite d'Uranus n° XXVI, de 25 km approximativement, orbitant à 97 730 km de la planète dans le sens direct, en 22 h 9 mn. Découvert par Showalter en 2003. Son orbite est dans l'anneau μ qu'il doit alimenter. |
| **macula** | Mot latin, pluriel *maculæ*. Dénomination d'une structure géologique dans le système solaire, signifiant "tache sombre, parfois irrégulière". Voir aussi : *liste des formations géologiques*. |
| **magnétar** | Etoile à neutrons dont la rotation rapide lors de la formation a multiplié le champ magnétique par 1.000. Les magnétars sont les objets les plus magnétisés connus à ce jour. |
| **magnétopause** | Limite extérieure de la magnétosphère. |
| **magnétosphère** | Sphère, entourant une planète, et dans laquelle le champ magnétique de la planète est prépondérant. Elle est très importante pour protéger la Terre du vent solaire. |
| **magnitude** | Mesure de l'éclat d'une étoile. Elle dérive de la notion de grandeur définie dans l'Antiquité Grecque. |
| **magnitude absolue** | Magnitude que présenterait une étoile si elle était située à 10 parsecs. Les magnitudes absolues sont donc comparables entre elles, puisqu'elles ne dépendent plus de la distance. |
| **magnitude apparente** | Magnitude réellement mesurée pour une étoile, fonction à la fois de son éclat intrinsèque et de sa distance. |
| **magnitude bolométrique** | Magnitude mesurée sur la totalité du spectre électromagnétique. Elle intègre la brillance en radio, en IR, en UV en X et en gamma. Elle mesure donc vraiment l'énergie produite par l'étoile. |
| **magnitude photographique** | Magnitude mesurée sur une plaque photographique. Celle-ci n'ayant pas la même réponse que l'œil en fonction de la longueur d'onde, la magnitude photographique diffère légèrement de la magnitude visuelle. |
| **magnitude visuelle** | Les astronomes ont longtemps comparé l'éclat des étoiles d'un champ, afin de les classer de la plus brillante à la moins brillante. Ce classement permettait de leur affecter une magnitude, dite visuelle, mais celle-ci dépendait de la sensibilité spectrale de l'œil. L'œil est beaucoup plus sensible dans le vert-jaune que dans le violet. |

| | |
|---|---|
| **Makémaké** | (mythologie rapanui : dieu créateur de l'île de Pâques) Planète naine de 1 500 km de diamètre, désignation provisoire 2005 FY9, orbitant à 46 UA du Soleil, en 308 ans. Découverte par Brown en 2005. Astéroïde classique de la ceinture de Kuiper. Voir : ceinture de kuiper. |
| **Maksutov** | (Dimitri, 23/04/1896-12/08/1964) Opticien soviétique, inventeur d'un type de télescope à grand champ construit avec des surfaces sphériques, bien plus faciles à tailler que les optiques de Schmidt. |
| **Manicouagan** | Nom d'une rivière canadienne sur laquelle a été édifié le grand barrage Daniel-Johnson. Les eaux de retenue font bien apparaître, sur les photographies aériennes, le grand cratère d'impact inondé sur le cours de la rivière. Ce cratère avait initialement un diamètre d'une centaine de kilomètres ; il est réduit aujourd'hui par l'érosion à 72 km seulement. C'est le cinquième plus grand cratère d'impact terrestre. Voir : Rochechouart. |
| **manteau** | Partie interne d'une planète, située entre le noyau et l'écorce. Il est constitué de silicates de magnésium lourds. |
| **marche aléatoire** | Marche au hasard, comme la marche d'un ivrogne sortant de son bar favori. Elle explique la propagation des photons dans la zone radiative du Soleil. Il est assez inquiétant d'apprendre que les cours de la Bourse suivent également une marche aléatoire... |
| **mare** | Mot latin. Dénomination d'une structure géologique dans le système solaire, signifiant "mer, grande plaine circulaire sur la lune". Voir aussi : *liste des formations géologiques*. |
| **marées** | Mouvements des océans, entraînés par l'attraction combinée de la Lune et du Soleil ; les continents aussi sont sensibles à cette attraction, et se soulèvent d'une trentaine de centimètres sur le passage de la Lune. |
| **Margarett** | (mythologie : personnage de Shakespeare) Satellite d'Uranus n° XXIII, de 20 km approximativement, orbitant à 14 345 000 km de la planète dans le sens direct, en 4 ans 226 j. Découvert par Sheppard en 2003. |
| **Mars** | Quatrième planète du Soleil. Diamètre : 6.794 km, distance au Soleil : 227,936 millions de km, année : 1 an 321,68 jours. Planète rocheuse, mal connue avant l'ère spatiale, Mars est un désert. L'hémisphère sud est de haute altitude et très cratérisé (vieux) ; l'hémisphère nord est fait de plaines (plus jeunes), et montre les plus grands volcans du système solaire. |
| **mascon** | ***MAS**s **CON**centration*. Concentration de masse dans le sous-sol de la Lune, détectée par les anomalies gravifiques ressenties pas les satellites artificiels en orbite autour d'elle. Les mascons sont probablement des météorites ayant percuté le sol de la Lune, et s'y étant enfoncées. |
| **MASER** | ***M**icrowave **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation* (semblable à *LASER*). Il existe des sources maser dans certains nuages interstellaires. |
| **masque codé** | Masque opaque placé à l'entrée d'un instrument de détection des rayons X ou gamma (haute énergie), percé de plusieurs trous (sténopées). Il permet de reconstruire une image nette, tout en augmentant la luminosité. |
| **masse atomique** | Nombre de nucléons (protons + neutrons) entrant dans la composition d'un noyau atomique. |
| **masse de Chandrasekhar** | Masse maximale d'une étoile lui permettant, après arrêt des réactions de fusion nucléaire, de maintenir un équilibre mécanique par la pression de Fermi des électrons. Les étoiles qui sont à ce stade sont les naines blanches. Leur équilibre est définitif, mais ne produisant plus d'énergie, elles se refroidissent lentement. L'existence de cette limite tient à la nature quantique de la pression qui équilibre la gravité : les électrons ne peuvent atteindre la vitesse de la lumière. |
| **masse de Hills** | Masse maximum d'un trou noir donnant l'effet quasar. Cet effet et dû au rayonnement de la matière qui tombe dans le trou noir. Lorsque la masse de celui-ci atteint 300 millions de masses solaires, une étoile peut y tomber sans être détruite, donc sans rayonner. Un tel trou noir ne produit pas de quasar. |
| **masse de Jeans** | Masse minimum d'un nuage de gaz qui conduit à l'effondrement initial (formation d'une étoile). |
| **masse dynamique** | Masse d'une galaxie, déduite de l'observation du mouvement des étoiles. L'application de la gravitation universelle indique quelle est la masse de la galaxie. Se dit aussi des masses des amas de galaxies (mouvement des galaxies). |
| **masse solaire** | Unité de masse en astrophysique, correspondant à la masse du Soleil. Elle vaut 2 $10^{30}$ kg. |
| **masse volumique** | Grandeur physique qui mesure la concentration de la matière. C'est le rapport de la masse sur le volume. Elle se mesure en général en grammes par centimètres cube. Ne pas la confondre avec la densité qui est un rapport et n'a pas d'unité. |
| **matière baryonique** | Matière habituelle, composée de quarks. Ce sont les protons, neutrons, et mésons. On l'oppose aujourd'hui à la matière non baryonique, ou matière noire (jamais détectée à ce jour). |
| **matière noire** | Matière supposée remplir l'Univers (pas forcément uniformément), de manière à expliquer les mouvements du gaz dans les galaxies, et des galaxies dans les amas. Une partie pourrait être de la matière ordinaire, mais obscure ; une autre partie serait d'une nature encore inconue (particules exotiques ?). |
| **matière non baryonique** | Matière hypothétique, nécessitée pour la pertinence du modèle de concordance, et qui devrait constituer 95 % de la matière de l'Univers. Indispensable à la cosmologie actuelle, et malgré plus de 30 ans de recherches, on ne l'a jamais détectée autrement que par son éventuelle action gravitationnelle. |
| **Maunder** | Voir : minimum de Maunder. |
| **MaVaNs** | (Mass Varying Neutrinos). Neutrinos hypothétiques à masse variable. Ils seraient censés justifier l'accélération de l'expansion. |
| **Maxwell** | James Clerk Maxwell (13 juin 1831 - 5 novembre 1879), physicien écossais, a découvert les équations (équations de Maxwell) qui décrivent l'interaction électromagnétique. Ses lois impliquent à la fois l'existence des ondes électromagnétiques, et la constance de la vitesse de la lumière. |
| **Maxwell Montes** | Massif montagneux vénusien, situé au pôle nord, et constituant un ensemble avec Lakshmi Planum et Fortuna Tessera. C'est le massif le plus élevé de Vénus : sa base est à 5.000 m, et il culmine à 11.000 m. Il est marqué par un cratère d'impact de 105 km de diamètre, nommé *Cleopatra*. |

| | |
|---|---|
| **Mayor** | (Michel, 12/01/1942) Astrophysicien à l'Observatoire de Genève. En 1995, avec Didier Queloz, il a découvert à l'Observatoire de Haute Provence, la première exoplanète autour d'une étoile de la séquence principale : 51 Pegasi b, une géante gazeuse. Il a aussi, deux ans plus tard, découvert la première planète de type terrestre : Gliese 581 c. |
| **mécanique** | Science des mouvements. La mécanique du point étudie les mouvements d'un point matériel, sans dimensions, dans un champ gravitationnel. |
| **mécanique céleste** | Application de la mécanique aux mouvements des astres. Le mouvement d'une planète supposée seule autour du Soleil possède une solution analytique : il existe des formules qui donnent la position de la planète à tout instant. Dès qu'il y a au moins trois corps, il n'existe plus de telle solution. On utilise alors des développements en série. |
| **Mécanique Quantique** | Science du comportement de la matière à l'échelle microscopique. Créée pour résoudre les problèmes posés par l'effet photoélectrique et le rayonnement du corps noir, elle permet de comprendre le fonctionnement des étoiles, ainsi que leur équilibre après cessation des réactions nucléaires. |
| **Mégaclité** | (mythologie grecque : maîtresse de Zeus, dont elle eut Thébé et Locros) Satellite de Jupiter n° XIX, de 5 km approximativement, orbitant à 23 493 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 2 ans 22 j. Découvert par Sheppard en 2000. Groupe d'Ananké |
| **Melipal** | Nom de l'UT3 du VLT. Il signifie "la Croix du Sud" dans la langue Mapuche des indiens de la région. Melipal a été terminé en 2000. |
| **mensa** | Mot latin, pluriel *mensæ*. Dénomination d'une structure géologique dans le système solaire, signifiant "montagne à sommet plat, et bordée de falaises". Voir aussi : *liste des formations géologiques*. |
| **mer** | • Etendue d'eau (actuelle sur Terre, éventuellement fossile sur Mars).<br>• Zone très plate sur la Lune, formée par épanchement de magma basaltique. |
| **Mercure** | Première planète du Soleil. Diamètre : 4.879,4 km, distance au Soleil : 57,909 millions de km, année : 87,9684 jours. Caillou difficile d'accès, Mercure a été peu étudiée, mais une sonde s'en approche. Son aspect rappelle la Lune : une surface parsemée de cratères d'impact. Un très grand bassin d'impact (Caloris), des fractures importantes, montrent que Mercure a eu une activité tectonique après sa formation. |
| **méridien** | Grand cercle passant par les pôles et par le zénith du lieu. Le Soleil traverse le méridien à midi locale. Les instants de passage au méridien sont des mesures importantes permettant de déterminer précisément les positions des étoiles. |
| **méridienne** | Lunette montée de façon à ne pouvoir observer que dans le méridien du lieu. Elle servait à déterminer l'heure, et à préciser les coordonnées des étoiles. |
| **méson** | Particule composée d'un quark et d'un antiquark. C'est un boson. Il en existe de multiples, selon leur composition. Les $\pi^+$, $\pi^-$ et $z^0$ en font partie. |
| **mésosidérite** | Météorite, mélange de ferro-nickel et de silicates en parties à peu près égales |
| **mesosphère** | Troisième couche de l'atmosphère terrestre, dans laquelle la température décroît avec l'altitude. Elle s'étend approximativement de 50 à 90 km d'altitude. A son sommet on trouve les températures les plus basses de l'atmosphère terrestre, soit -70°. |
| **métallicité** | Taux, dans la composition d'une étoile, des éléments plus lourds que l'hélium, qui ont été synthétisés par les étoiles. En explosant, une étoile les disperse, augmentant la métallicité du milieu interstellaire. |
| **métastable** | Se dit de certains états excités des atomes, qui ont une durée de vie longue, mais finie. Les états métastables sont à l'origine des raies interdites. |
| **métaux** | En chimie, un métal est un corps conducteur de l'électricité : fer, cuivre, zinc, aluminium... En astrophysique, ce terme désigne tout élément autre que l'hydrogène et l'hélium. Ainsi, le soufre, l'oxygène, le carbone... seront rangés sous ce vocable. |
| **métemptose** | Règle du calendrier grégorien qui consiste à retrancher 1 à l'épacte, à chaque année séculaire non bissextile. |
| **Meteor Crater** | Cratère d'impact en Arizona, situé dans une plaine triassique de 200 MA. On y a découvert deux formes de quartz choqués, la coésite et la stishovite, formés à une pression de 20.000 atmosphères. |
| **météore** | Phénomène atmosphérique quelconque, comme la pluie ou le vent ! Ne pas confondre avec météorite... La confusion vient du phénomène lumineux (météore) qui accompagne la chute d'une météorite. |
| **météorite** | Petit corps céleste tombant sur la Terre. Voir aussi : *météorite*. |
| **méthane** | Gaz organique, de formule $CH_4$, présent dans de nombreuses atmosphères planétaires. |
| **Méthone** | (mythologie grecque : l'une des 7 filles du géant Alcyonée) Satellite de Saturne n° XXXII, de 3,2 km approximativement, orbitant à 194 000 km de la planète dans le sens direct, en 1 j. Découvert par Charmoz en 2004. |
| **Métis** | (mythologie grecque : fille d'Océan et de Téthys, personnification de l'intelligence rusée) Satellite de Jupiter n° XVI, de 40 km approximativement, orbitant à 128 000 km de la planète dans le sens direct, en 7 h 6 mn. Découvert par Synnott en 1979. |
| **métrique** | Généralisation du théorème de Pythagore, la métrique est la fonction qui donne, dans l'espace-temps, la distance de deux points infiniment voisins. La métrique euclidienne s'exprime par : $ds^2 = c^2\,dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$. |
| **métrique de Bianchi** | Bianchi, bien avant la Relativité, a étudié mathématiquement des géométries non euclidiennes, et les a classées. Certains cosmologistes tentent de les utiliser pour résoudre certains problèmes liés au modèle de concordance. Voir : métrique. |
| **métrique de Minkowski** | Métrique la plus simple dérivant l'espace-temps dans la Relativité Générale. Voir : métrique. |

| | |
|---|---|
| **métrique FLRW** | Métrique de Friedman-Lemaître-Robertson-Walker. Du nom des 4 principaux chercheurs l'ayant étudiée. Friedman et Lemaître sont les premiers à l'avoir proposée, peu après la publication de la Relativité Générale. Voir : métrique. |
| **métrique inhomogène** | Les métriques inhomogènes sont les plus générales possibles. Aussi, les difficultés mathématiques sont-elles grandes pour les manipuler. C'est pourquoi le modèle de concordance de la cosmologie utilise des métriques bien plus simples, mais moins appropriées. Voir : métrique. |
| **micro-ondes** | Partie du spectre électromagnétique, située en-dessous de l'infra-rouge, donc encore moins énergétique. Les micro-ondes sont émises par des objets assez froids. |
| **micrométéorite** | Météorites de taille micrométrique, capables d'arriver jusqu'au sol sans brûler. Leur abondance en carbone est supérieure même à celle des chondrites carbonées. Elles proviennent à 90 % des comètes. Elles contiennent aussi plus d'acides aminés que les chondrites carbonées. |
| **microquasar** | Objet ayant la même structure qu'un quasar, mais animé par un trou noir de masse stellaire seulement. |
| **Mie** | (Gustav, 29/09/1869 - 13/02/1957) Physicien allemand, principalement auteur de la solution des équations de Maxwell pour la diffusion de la lumière sur une sphère métallique. Voir : diffusion de Mie. |
| **migration** | Théorie selon laquelle les planètes en formation pourraient se déplacer fortement par rapport à l'étoile, sous l'influence des forces gravitationnelles entre elles et le disque. Elle explique les systèmes exoplanétaires, et certaines caractéristiques du système solaire. |
| **milieu interstellaire** | Le milieu interstellaire est le contenu de l'espace situé entre les étoiles. Longtemps imaginé vide, cet espace est peuplé de quelques dizaines à quelques milliers d'atomes par $cm^3$. Il absorbe la lumière des étoiles situées derrière, notamment en direction du centre galactique. |
| **Mimas** | (mythologie grecque : géant) Satellite de Saturne n° I, de 396 km de diamètre, orbitant à 185 520 km de la planète dans le sens direct, en 22 h 37 mn. Découvert par Herschel en 1789. Son diamètre étant assez important, il est approximativement rond. |
| **minimum de Maunder** | Période de 1650 à 1700, pendant laquelle on n'a pratiquement pas observé de taches à la surface du Soleil. |
| **minimum de Spörer** | Période du $XV^e$ siècle, pendant laquelle on n'a pratiquement pas observé de taches à la surface du Soleil. |
| **minute d'arc** | Unité de mesure d'angle, notée ' ; le degré est divisé en 60'. |
| **minute de temps** | Notée mn ; l'heure de temps est divisée en 60 mn. |
| **Miocène** | Première période du Néogène (deuxième période du Cénozoïque, ancien Tertiaire), il s'étend de 23 à 7,3 millions d'années. C'est au cours de cette période que la lignée qui donnera les hommes se sépare de celle des chimpanzés. |
| **Mira Ceti** | *La Merveilleuse de la Baleine*. Etoile type de certaines variables. |
| **mirage** | Phénomène optique donnant d'un objet une image dans une direction différente. Le mirage se produit en général lorsque des couches d'air sont portées à des températures différentes (air chauffé au niveau du sol). C'est la réfraction qui courbe les rayons. Voir : mirage topologique, mirage gravitationnel. |
| **mirage gravitationnel** | Mirage produit dans l'Univers par la déviation des rayons lumineux par la présence d'une grande masse (amas de galaxies) sur le trajet des rayons lumineux. Ces mirages permettent d'évaluer la masse des objets qui les produisent. |
| **mirage topologique** | Multiplicité des images d'une galaxie, lorsque les rayons lumineux qu'elle émet peuvent utiliser des trajets différents pour atteindre l'observateur. Ceci pourrait se produire si l'Univers était multiconnexe. Voir : univers multiconnexe. |
| **Miranda** | (mythologie : personnage de Shakespeare) Satellite d'Uranus n° V, de 480 km de diamètre, orbitant à 129 390 km de la planète dans le sens direct, en 1 j 9 h 50 mn. Découvert par Kuiper en 1948. |
| **miroir dilué** | Miroir d'un hypertélescope, constitué d'un ensemble de petits miroirs cosphériques, et espacés les uns des autres. Cette solution, inventée et mise au point par Antoine Labeyrie, permet d'éviter les lignes à retard des interféromètres. Le pouvoir séparateur est lié à la distance maximale entre les miroirs. |
| **MIS** | Voir : milieu interstellaire. |
| **Mnémé** | (mythologie grecque : muse de la mémoire, fille de Zeus et de Mnémosyne) Satellite de Jupiter n° XL, de 2 km approximativement, orbitant à 21 069 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 1 an 255 j. Découvert par Sheppard en 2003. Groupe d'Ananké |
| **Modèle cosmologique** | En physique, un modèle est un ensemble d'équations qui permettent de représenter un phénomène. Un modèle cosmologique est donc une représentation mathématique de l'Univers, censée décrire sa constitution et son évolution (passé et avenir ; expansion). |
| **modèle de concordance** | Nom donné aujourd'hui au modèle standard de Big Bang, qui est censé concorder correctement avec les données observationnelles. En oubliant qu'on n'a toujours pas de moteur pour l'inflation, et qu'on n'a jamais détecté ni matière ni énergie noire. |
| **modèle inhomogène** | Modèle d'univers dans lequel la contrainte d'homogénéité est abandonnée. La résolution des équations est plus difficile, mais le modèle est plus proche de la réalité de l'Univers. |
| **modèles de Friedmann** | Modèles mathématiques, solution de l'équation d'Einstein, qui décrivent les évolutions envisageables de l'Univers. Celles-ci varient en fonction de la densité moyenne de l'Univers : trop forte, l'Univers devrait se recontracter après l'expansion, trop faible, il devrait grossir indéfiniment. A la limite, la vitesse d'expansion tendrait vers 0. |
| **module de** | Différence entre la magnitude visuelle et la magnitude absolue d'une étoile. Le module de distance permet très facilement |

| | |
|---|---|
| **distance** | d'obtenir la distance. |
| **moho** | Discontinuité de densité qui marque la limite entre le manteau et l'écorce terrestre. Abbréviation du nom du chercheur qui l'a mise en évidence : *Mohorovicic*. |
| **moldavite** | Tectite provenant de Bohème et de Moravie, associées au cratère de Riess (15 millions d'années). Voir : tectite. |
| **molécule interstellaire** | Molécule que l'on trouve dans le milieu interstellaire. Leur découverte a été surprenante, car on n'imaginait pas une chimie aussi active dans un milieu si froid. On y trouve de nombreux hydrocarbures. |
| **molécule interstellaire** | Molécule que l'on trouve dans le milieu interstellaire. Leur découverte a été surprenante, car on n'imaginait pas une chimie aussi active dans un milieu si froid. On y trouve de nombreux hydrocarbures. |
| **mollusque de référence** | Terme utilisé par Einstein pour qualifier, et concrétiser, les systèmes de coordonnées de Gauss, utilisés en Relativité Générale. Il désigne un corps pouvant se déplacer dans l'espace, tout en subissant des déformations quelconques |
| **MOND** | *MOdified Newtonian Dynamics*. Théorie non relativiste de la gravitation, dans laquelle la force faiblit un peu moins avec la distance que dans la théorie newtonienne. Voir : MOND-TeVes. |
| **MOND-TeVes** | Version relativiste de la théorie MOND de la gravitation. Elle a été obtenue par adjonction de trois champs, un tensoriel (Te), un vectoriel (Ve) et un scalaire (s). Voir : MOND. |
| **mons** | Mot latin, pluriel *montes*. Dénomination d'une structure géologique dans le système solaire, signifiant "montagne". Voir aussi : *liste des formations géologiques*. |
| **monture** | Support d'un instrument astronomique, lunette ou télescope, lui permettant de suivre la rotation apparente du ciel. |
| **mouvement** | Déplacement d'un objet ou d'un point dans un système de référence. |
| **mouvement inertiel** | Mouvement d'un corps qui ne subit aucune accélération, dans l'espace-temps. Si l'espace est euclidien, le mouvement inertiel est un mouvement rectiligne uniforme. Dans un espace-temps courbe, le mouvement inertiel suit une géodésique de l'espace-temps. |
| **mouvement képlérien** | Mouvement idéal d'un corps autour d'un autre plus massif, en considérant qu'il n'existe rien d'autre dans l'Univers. |
| **mouvement propre** | Mouvement d'une étoile par rapport aux autres, assez lointaines pour apparaître fixes. On détecte le mouvement propre des seules étoiles les plus proches. Le record du plus grand mouvement propre est détenu par l'étoile de Barnard. |
| **multiconnexe** | En topologie, se dit d'un espace dont certains points se correspondent. Dans le jeu *Pacman*, le mobile qui sort par la droite rentre pas la gauche. Les points du côté droit sont donc homologues de ceux du côté gauche. Voir : univers multiconnexe. |
| **multivers** | Mot formé de la contraction de *multiple* et *univers*. Une fluctuation quantique de l'espace-temps pourrait se détacher, et donner naissance à un univers complet. Notre Univers pourrait être né ainsi. Cette notion est hypothétique, mais raisonnable. |
| **Mundilfari** | (mythologie scandinve : géant, père du Soleil et de la Lune) Satellite de Saturne n° XXV, de 6 km approximativement, orbitant à 18 700 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 2 ans 219 j 4 h. Découvert par Gladman en 2000. |
| **muon** | Particule élémentaire ayant les mêmes caractéristiques que l'électron, mais une masse deux cents fois plus élevée. |
| **myrtille** | Nom donné pour cause de ressemblance, à des sphérules millimétriques trouvées sur Mars par le rover Opportunity. Elles sont constituées d'hématite ($Fe_2O_3$). Elles se sont très probablement formées en présence d'eau liquide. A mi-2012, Opportunity a trouvé d'autres sphérules, de composition différente. |

A B C D E F G H I J K L M **N** O P Q R S T U V W X Y Z

| | |
|---|---|
| **nœud** | Point d'intersection de deux orbites. Pour qu'une éclipse de Soleil puisse se produire, il faut que la Lune soit dans l'un des deux nœuds de son orbite. |
| **nœud ascendant** | Nœud où l'astre mobile passe en faisant croître sa déclinaison. Pour la Lune, c'est le passage du sud au nord de l'écliptique. |
| **nœud descendant** | Nœud où l'astre mobile passe en faisant décroître sa déclinaison. Pour la Lune, c'est le passage du nord au sud de l'écliptique. |
| **NAG** | Voir : Noyau Actif de Galaxie. |
| **Naïade** | (mythologie grecque : les naïades sont des Nymphes aquatiques, gardiennes des lacs, rivières et sources) Satellite de Neptune n° III, de dimensions 96×60×52 km, orbitant à 48 227 km de la planète dans le sens direct, en 7 h 3 mn. Découvert par Terrile en 1989. Naïade orbite à l'intérieur de l'orbite synchrone, et tombe lentement vers la planète. |
| **naine** | Etoile de la Séquence Principale, c'est-à-dire dans sa phase de fusion de l'hydrogène. Le Soleil est une naine. |
| **naine blanche** | Reste du cœur d'une étoile de faible masse (moins de 1,4 masses solaires après perte de masse), lorsque les réactions de fusion ont cessé. La naine blanche est en équilibre permanent par la pression de dégénérescence des électrons (pression de Fermi). |
| **naine brune** | Objet gazeux (hydrogène et hélium), de masse inférieure à 0,08 masses solaires ne lui permettant pas d'atteindre la température de fusion de l'hydrogène. C'est un objet intermédiaire, en masse, entre les étoiles et les planètes. Mais leur mode de formation les rapproche sans doute plutôt des étoiles. |
| **naine rouge** | Etoile de la Séquence Principale de très faible masse, juste au-dessus de 0,08 masses solaires. Plus petite véritable étoile, sa température de surface est faible, d'où sa couleur rouge. |

| | |
|---|---|
| **Nakhla** | Village d'Egypte où est tombée une pluie de météorites le 28 juin 1911. Toutes les météorites provenaient d'une même pierre, brisée dans l'atmosphère. Ces météorites sont originaire de Mars, comme celles tombées à Chassigny et Shergotty. Ensemble, elles sont désignées SNC. Voir : Chassigny, Shergotty, SNC. |
| **Nançay** | Important site radioastronomique français installé dans cette ville en Sologne. Il comprend un grand radiotélescope à miroir principal fixe, ainsi qu'un grand réseau interférométrique. De nouveaux instruments sont en cours d'installation, par exemple EMBRACE (réseau phasé). |
| **Narvi** | (mythologie scandinave : géant, fils de Loki) Satellite de Saturne n° XXXI, de 7 km approximativement, orbitant à 19 000 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 2 ans 292 j 5 h. Découvert par Sheppard en 2003. |
| **NASA** | National Aeronautics and Space Administration. Agence spatiale américaine. Elle est active dans tous les domaines spatiaux. Son plus grand titre de gloire est l'exploration lunaire humaine. Mais elle a de nombreux résultats dans l'exploration automatique du système solaire, depuis Mercure jusqu'à Pluton. Les principales sondes sont : Voyager, Viking, Magellan, Galileo, Cassini, Pathfinder, Spirit, Opportunity, Curiosity, Messenger… |
| **NEA** | **N**ear **E**arth **A**steroid. Astéroïde dont l'orbite voisine celle de la Terre. Il fait partie des NEO. Voir : NEO. |
| **Near Earth Asteroid** | Voir : NEA. |
| **Near Earth Object** | Voir : NEO. |
| **nébuleuse** | Nuage de gaz (hydrogène et hélium) et de poussières. Au début du XX$^{e}$ siècle, on nommait ainsi tous les objets paraissant nébuleux dans les instruments de l'époque, comprenant les galaxies alors non résolues. |
| **nébuleuse obscure** | Parties les plus denses du milieu interstellaire. Particulièrement étudiées par Barnard. |
| **nébuleuse par réflexion** | Nébuleuse proche d'une étoile brillante, qui réfléchit la lumière émise. Par diffusion, elles apparaissent en bleu sur les photos. |
| **nébuleuse planétaire** | Nébuleuse de petite taille, de forme globalement ronde, éjectée par les étoiles dans la phase qui suit la Séquence Principale. |
| **nébuleuse spirale** | Ancien nom des galaxies spirales. Au début du XX$^{e}$ siècle, les instruments ne permettaient pas de déterminer si les nébuleuses étaient faites de gaz ou d'étoiles. Lorsqu'on a montré que les spirales étaient constituées d'étoiles, on a nommé ces objets *galaxies*. |
| **nébulium** | Elément chimique hypothétique, découvert dans certains spectres stellaires. Le nébulium n'existe pas, les raies qu'on lui attribuait était des raies interdites de l'oxygène et de l'azote, alors encore inconnues. |
| **NEO** | **N**ear **E**arth **O**bject. Objet dont le périhélie est proche de l'orbite terrestre, et qui pourraient entrer en collision avec elle. Ils comprennent des astéroïdes (NEA), des comètes, et même des sondes en orbite solaire. Voir : NEA. |
| **Neptune** | Huitième planète du Soleil. Diamètre : 49.528 km, distance au Soleil : 4.498,253 millions de km, année : 163 ans 264,15 jours. Découverte par le calcul, elle marque la frontière du système solaire interne. Gazeuse, elle n'a été visitée que par une seule sonde, et reste assez mal connue. Des phénomènes atmosphériques de grande ampleur y sont toutefois suivis depuis la Terre. |
| **Néréide** | (mythologie grecque : nymphe marine, fille de Nérée et de Dioris) Satellite de Neptune n° II, de 340 km de diamètre, orbitant à 5 510 000 km de la planète dans le sens direct, en 360 j. Découvert par Kuiper en 1949. Petit objet lointain, non survolé de près, on sait peu de choses à son propos. |
| **Néso** | (mythologie grecque : une des Néréides, fille de Néreus et Doris) Satellite de Neptune n° XIII, de 60 km approximativement, orbitant à 48 387 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 25 ans 243 j. Découvert par Holman en 2002. |
| **neutralino** | Particule neutre, prédite par la supersymétrie. C'est un boson. Elle n'a jamais été observée. Elle pourrait constituer la matière noire. |
| **neutrino** | Particule élémentaire qui est produite par certaines réactions nucléaires, en particulier au centre du Soleil. Ces particules interagissent très peu avec la matière, et sont capables de traverser toute la Terre sans interaction... |
| **neutron** | Particule, semblable au proton, mais électriquement neutre (d'où son nom). C'est le second constituant du noyau atomique. Proton et neutron sont les nucléons, constitués de trois quarks. |
| **neutronisation** | Transformation des protons et électrons en neutrons, avec émission d'un neutrino électronique. Elle se produit lors de l'effondrement d'un cœur d'étoile massive, pour former une étoile à neutrons. |
| **Newton** | • Savant anglais qui a défini la loi de la gravitation universelle. Sa loi, qui permet de démontrer celles de Kepler, est utilisée pour tous les calculs de mécanique céleste.<br>• Nom d'un type de télescope, dont Newton est l'inventeur. |
| **niveau de référence** | Le niveau de référence est celui à partir duquel on compte les altitudes sur une planète. Pour la Terre, c'est le niveau de la mer (bien qu'il ne soit pas partout identique). Sur Vénus, c'est le niveau médian. Sur Mars, c'est le niveau où la pression atmosphérique vaut 6,1 mb. Voir aussi : *niveau de référence*. |
| **Nix** | (mythologie égyptienne : déesse de la nuit, mère de Charon) Satellite de Pluton n° II, de dimensions 40 à 130 km, orbitant à 49 000 km de la planète dans le sens direct, en 24 j 19 h 12 mn. Découvert par Mutchler en 2005. Nix et Hydra sont sur des orbites très régulières, qui semblent indiquer une formation en même temps que Pluton. |
| **Noachien** | Ere géologique martienne, dans l'ancienne classification basée sur les comptages de cratères. C'est la dernière par ancienneté, et elle s'étend de 3,5 à 4,6 milliards d'années. Voir : Amazonien, Hespérien. |

| | |
|---|---|
| **Noether** | (Emmy, 23/03/1882-14/04/1935) Grande mathématicienne allemande, qui a travaillé sur les structures algébriques, la théorie des idéaux, les algèbres non commutatives... Elle a énoncé et démontré le *théorème de Noether*, qui fait partie des fondements de la physique théorique moderne. |
| **nombre d'or** | Suite des dates des éclipses sur une période de 19 ans (Saros). Le nombre d'or d'une année est son rang dans la suite. Il caractérise les éclipses qui se produiront au cours de l'année. Voir aussi : *nombre d'or*. |
| **nombre de Wolf** | Nombre, calculé à partir des taches solaires et des groupes de taches, qui permet de suivre l'activité du Soleil depuis plusieurs siècles. Ce nombre est toujours utilisé. |
| **nombre quantique** | Nombre qui intervient dans la description de l'état d'une particule, ou plus généralement d'un système quantique. Ce sont : le nombre quantique principal *n*, le nombre quantique de moment angulaire *l*, le nombre quantique magnétique *m*, et le spin *s*. |
| **nombre quantique de moment angulaire** | Nombre quantique décrivant le moment angulaire de l'orbite, lui aussi quantifié. Il est noté *l*. |
| **nombre quantique magnétique** | Nombre quantique responsable de l'effet Zeeman de dédoublement des raies spectrales. Il est noté *m*. |
| **nombre quantique principal** | Nombre *n* qui apparaît dans la théorie de l'atome d'hydrogène de Bhor. Il décrit les niveaux d'énergie possibles. |
| **nouveau style** | Appellation alternative du calendrier grégorien, indiquant qu'il est la version moderne du calendrier julien. Ce dernier est qualifié d'*ancien style*. Ces dénominations rappellent la parenté entre les deux calendriers. |
| **nova** | Du latin *nova* = nouvelle. Etoile dont la luminosité est multipliée par 1 million. Pluriel : *novæ*. C'est une étoile double, formée d'un astre compact (naine blanche), qui accrète de la matière d'une géante rouge. Voir aussi : *nova*. |
| **nova naine** | Nova présentant des phénomènes de faible amplitude. |
| **nova récurente** | Etoile qui montre plusieurs fois le phénomène de nova. Ceci montre en particulier qu'il n'est pas destructeur. |
| **novoïde** | Variables éruptives plus calmes que les novæ. Elles forment une classe disparate. |
| **noyau** | • Partie centrale, de grande densité, d'une planète. Il est constitué de fer-nickel essentiellement.<br>• Partie permanente d'une comète. Il est constitué d'un mélange de glace d'eau et de silicates.<br>• Partie principale d'un atome, qui concentre presque toute sa masse. Il est formé de protons et neutrons liés par interaction forte.<br><br>Voir : proton, neutron, interaction forte. Voir aussi : *noyau d'une comète*, *globe terrestre*. |
| **Noyau Actif de Galaxie** | NAG. Un noyau actif de galaxie émet beaucoup d'énergie, produite par l'accrétion de matière dans le trou noir central. Selon l'orientation de la galaxie par rapport à nous, on le voit sous forme de quasar, de galaxie de Seyfert, de radiogalaxie. |
| **noyau atomique** | Partie centrale d'un atome. L'atome complet est constitué du noyau et de son cortège électronique. |
| **NTT** | *New Technology Telescope*. Télescope Ritchey-Chrétien de 3,6 m, démonstrateur de la technologie d'optique active. Il n'a pas d'optique adaptative, mais atteint le seeing du lieu grâce à une ventilation. Il est en monture altazimutale. Première lumière en 1989. En 1996, il a été entièrement rénové, et mis au standard du VLT. |
| **nuage** | Accumulation de gaz et poussières, dont la densité dépasse celle du milieu interstellaire. Ils peuvent être neutres ou ionisés. Ils donnent parfois naissance aux étoiles. Voir : nuage moléculaire. |
| **nuage de Oort** | Sphère de comètes entourant le système solaire à grande distance. Le nuage de Oort n'a pas encore été observé, les objets qui le composent étant trop petits et trop lointains. Il est au-delà de la ceinture de Kuiper, et s'étendrait jusqu'à une année-lumière du Soleil. Cette formation a été imaginée par Jan Oort d'après les orbites des comètes non périodiques. |
| **nuage moléculaire** | Nuage d'hydrogène de température suffisamment basse pour autoriser la formation de molécules $H_2$. |
| **nucléon** | Constituant du noyau atomique. Existe sous deux formes : chargé positivement, le proton, ou neutre, le neutron. Intéragit par interaction forte. |
| **nucléosynthése** | Synthèse des noyaux atomiques, à des températures et densités élevées. On distingue la nucléosynthèse primordiale, et la nucléosynthèse stellaire. Voir : nucléosynthèse primordiale, nucléosynthèse stellaire. |
| **nucléosynthèse** | La nucléosynthèse est la formation de noyaux atomiques par combinaison de noyaux plus légers. Elle se divise en nucléosynthèse primordiale, et nucléosynthèse stellaire. Voir : nucléosynthèse primordiale, nucléosynthèse stellaire. |
| **nucléosynthèse primordiale** | Les seuls noyaux disponibles après le Big Bang sont les noyaux d'hydrogène (protons), qui doivent se combiner pour former des noyaux plus lourds. La nucléosynthèse primordiale a commencé lorsque la température a été assez basse pour que les noyaux produits ne soient plus détruits, et encore assez haute pour la permettre. Cette durée détermine les proportions des éléments légers (He, D, Li). Voir : nucléosynthèse. |
| **nucléosynthèse stellaire** | Nucléosynthèse se produisant au centre des étoiles, où pression et température sont suffisantes. Elle produit presque tous les éléments, depuis l'hélium jusqu'au fer. Voir : nucléosynthèse. |
| **nulling interferometry** | Voir : coronographie interférométrique. |
| **numéro** | Nombre de protons entrant dans la composition du noyau d'un atome. C'est lui qui détermine les propriétés chimiques de |

| | |
|---|---|
| **atomique** | l'élément. |
| **nutation** | Mouvement de balancement de la Terre, produit par les effets cumulés de la Lune et du Soleil sur le bourrelet équatorial, de période 18 ans, et de faible amplitude. |
| **NWA 817** | Météorite martienne de type Nakhlite, mais contenant de l'eau, qui devrait provenir de l'intérieur de Mars. En effet, le rapport D/H (deutérium/hydrogène) de cette eau est le même que sur Terre. Par contre, en surface de Mars, l'hydrogène, deux fois plus léger que le deutérium, s'est échappé bien plus efficacement, ce qui augmente beaucoup le rapport D/H. |

A B C D E F G H I J K L M N **O** P Q R S T U V W X Y Z

| | |
|---|---|
| **obduction** | Chevauchement d'une plaque continentale par une plaque océanique plus dense. Normalement, c'est l'inverse qui se produit (subduction). On observe ce phénomène près de Briançon, dans le massif du Chenaillet : des laves en coussin formées à plus de 5.000 m de profondeur dans l'océan alpin se trouvent maintenant à 2.600 m d'altitude. |
| **Obéron** | (mythologie : roi des fées) Satellite d'Uranus n° IV, de 1 520 km de diamètre, orbitant à 583 500 km de la planète dans le sens direct, en 13 j 11 h 2 mn. Découvert par Herschel en 1787. |
| **objet classique** | Ce sont les objets de la ceinture de Kuiper, dont les orbites sont entre 42 et 48 UA du Soleil. Ils sont ainsi préservés des perturbations de Neptune, et leurs orbites sont stables sur une durée supérieure à l'âge du système solaire. |
| **Objet de Herbig-Haro** | Nébulosités de masse comprise entre 0,2 et 3 masses solaires, diamètre de 1 à 5 diamètres solaires. Peut-être des protoétoiles. |
| **objet épars** | Objet de la ceinture de Kuiper, dont le périhélie est autour de 35 UA, l'excentricité élevée, et l'inclinaison peut être assez forte (en anglais *scattered*). |
| **Observatoire de Haute Provence** | Voir : OHP. |
| **occultation** | Disparition momentanée d'une étoile cachée par une planète ou par la Lune ; on n'utilise pas le terme éclipse dans ce cas. |
| **océan magmatique** | Hypothèse selon laquelle la Terre, avant 4,4 Ga, était entièrement recouverte d'un océan de magma fondu. Cette hypothèse est étayée par une certaine analogie avec la Lune, mais les mécanismes de formation sont forcément différents puisque la gravité y est beaucoup plus faible. |
| **oceanus** | Mot latin. Dénomination d'une structure géologique dans le système solaire, signifiant "sur la lune, très grande zone sombre". Voir aussi : *liste des formations géologiques*. |
| **octaédrite** | Type le plus courant de sidérite (météorite), constituée de fer-nickel. Coupées et polies, elles montrent des figures de Widmanstäten caractéristiques. |
| **octaétéride** | Cycle de 8 années, dans le calendrier grec, dont les années 3, 5 et 8 avaient 13 mois. L'année moyenne compte ainsi 365,25 jours, comme dans le calendrier julien. Mais la Lune suit mal, car au bout de 80 ans (10 octaétérides) elle est en désaccord de 15 jours (pleine au lieu de nouvelle). |
| **oculaire** | Loupe placée derrière un objectif, et permettant d'agrandir l'image pour une observation plus confortable. |
| **OHP** | Observatoire de Haute Provence. Situé à Saint Michel de Provence, il abrite le télescope de 1,93 m avec lequel a été découverte la première exoplanète gravitant autour d'une étoile de la séquence principale. Il héberge aussi le prototype d'hypertélescope d'Antoine Labeyrie. |
| **Olympus Mons** | Volcan martien, le plus haut de tout le système solaire. Il est couronné d'une magnifique caldeira, formée en plusieurs épisodes bien visibles dans ses structures. |
| **ombre** | • Dans une éclipse de Lune, zone la plus sombre. De la zone d'ombre, sur la Lune, le Soleil est totalement éclipsé par la Terre.<br>• Dans une tache solaire, partie centrale la plus sombre. |
| **onde** | Modulation périodique d'une grandeur physique, qui se déplace dans un milieu matériel ou dans le vide. Voir aussi : *Animation*. |
| **onde de densité** | Théorie qui explique la permanence des bras spiraux des galaxies, qui ne peuvent être des objets matériels. |
| **onde gravitationnelle** | Déformations ondulatoires de l'espace-temps, produites par le mouvement de masses, qui les propage. Les ondes gravitationnelles n'ont jamais été observées directement, mais indirectement par le ralentissement du pulsar double. Des expériences en cours tentent de le faire (*VIRGO*, *LIGO*) |
| **ondes longues** | Partie du spectre électromagnétique radio à très grande longueur d'onde. Ces ondes sont arrêtées par l'atmosphère terrestre (ionosphère), et nécessiteraient des antennes kilométriques dans l'espace. |
| **ondes radio** | Partie du spectre électromagnétique à grande longueur d'onde, émise en particulier par les objets les plus froids de l'Univers observés à ce jour (raie à 21 cm de l'hydrogène neutre). |
| **ondes sismiques** | Ondes sonores qui se propagent dans la croûte terrestre, et qui sont produites par les tremblements de terre. On les utilise pour sonder les profondeurs de la Terre. |
| **Oort** | (Jan, 28/04/1900 - 05/11/1992) Astronome hollandais, qui a mis en évidence le réservoir de comètes lointaines à symétrie sphérique autour du Soleil (*nuage de Oort*). Les objets du nuage de Oort sont les plus lointains du système solaire. |
| **opacité** | Propriété d'un gaz, qui absorbe plus ou moins un rayonnement qui le traverse. Un gaz opaque gagne de l'énergie en |

| | |
|---|---|
| | absorbant, et donc s'échauffe. Cette propriété est très difficile à modéliser dans les atmosphères stellaires. |
| **Ophélia** | (mythologie : fille de Polonius) Satellite d'Uranus n° VII, de 43 km approximativement, orbitant à 54 000 km de la planète dans le sens direct, en 9 h 2 mn. Découvert par Terrile en 1986. Confine, de l'extérieur, l'anneau ε |
| **Opportunity** | Rover américain à 6 roues déposé sur Mars le 24 janvier 2004, sur Meridiani Planum. C'est l'un des deux *MER* (Mars Exploration Rover), l'autre étant Spirit. Le site a été choisi pour la présense d'hématite grise, minéral qui se forme généralement dans l'eau. Le but de cette sonde était la géologie martienne, particulièrement la recherche de traces d'eau, présente ou surtout passée. En septembre 2012, il est toujours actif |
| **opposition** | Position apparente d'une planète dans le ciel, à 180° du Soleil. Elle passe donc au méridien à minuit. Uniquement pour les planètes supérieures, c'est le meilleur moment pour leur observation, car elles sont alors, en plus, au plus près de la terre. |
| **optique active** | Technologie permettant, par des déformations contrôlées par ordinateur, de conserver constamment la forme parabolique d'un miroir de télescope, en dépit des mouvements et des contraintes extérieures. |
| **optique adaptative** | Technologie permettant d'annuler les effets de la turbulence atmosphérique. Celle-ci déforme le front d'onde produit par une étoile ; un miroir déformable piloté par ordinateur, et renseigné par un analyseur d'onde, produit des déformations opposées, ce qui conduit à rendre le front d'onde plat comme à l'origine. |
| **optique diluée** | Voir : miroir dilué. |
| **orage** | Phénomène électrique produit par des accumulations de charges jusqu'à la limite de claquage de l'atmosphère, qui se produit non seulement sur Terre, mais aussi dans les atmosphères de nombreuses planètes. |
| **orbitale** | Notion quantique correspondant à une orbite classique de l'électron autour du noyau. Mais en Mécanique Quantique, la position et la vitesse de l'électron ne pouvant être définies simultanément, une orbite classique n'est pas définie. |
| **orbite** | Trajectoire d'un corps céleste dans un champ de gravitation. L'orbite peut être fermée (cas des planètes et des satellites), ou ouverte. |
| **orbite képlérienne** | Orbite idéale, dans laquelle deux corps seulement sont en interaction. Alors, le moins massif effectue autour de l'autre un mouvement elliptique très simple, nommé *mouvement képlérien*. |
| **orbite synchrone** | Orbite d'un satellite dont la période est égale à la période de rotation de la planète. Il se trouve ainsi toujours au-dessus du même point (satellites géostationnaires). Les satellites qui obbitent plus près cèdent de l'énergie à la planète, et s'en rapprochent. Les plus lointains en gagnent et s'éloignent. |
| **Orcus** | (mythologie latine : divinité infernale romaine) Candidate planète naine de 946 km de diamètre, désignation provisoire 2004 DW, orbitant à 39 UA du Soleil, en 245 ans. Découverte par Brown en 2004. Plutino de la ceinture de Kuiper (en résonance 2:3 avec Neptune). Voir : ceinture de kuiper. |
| **Orthosie** | (mythologie grecque : une des Heures (divinités des saisons), fille de Zeus) Satellite de Jupiter n° XXXV, de 2 km approximativement, orbitant à 20 720 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 1 an 257 j. Découvert par Scott en 2001. Groupe d'Ananké |
| **ouverture** | Rapport F/D d'un instrument d'optique. Plus il est petit, plus l'instrument est lumineux, c'est-à-dire qu'il peut faire une photo à courte pose. |
| **ouverture diluée** | L'ouverture représente le diamètre d'un instrument d'optique, par où passe la lumière. Voir : miroir dilué. |
| **Ovda** | Ovda Regio est un massif montagneux vénusien, qui constitue la partie Est d'Aphrodite Terra. |
| **oxygène** | Gaz incolore et inodore, qui constitue le cinquième de l'atmosphère terrestre. Dans le système solaire, seule la Terre présente de l'oxygène libre dans son atmosphère. C'est la Vie (cyanobactéries) qui a transformé complètement l'atmosphère primitive, en supprimant le gaz carbonique et en injectant l'oxygène libre. La molécule d'oxygène triatomique est l'ozone. |
| **ozone** | Molécule triatomique de l'oxygène, de formule $O_3$. Les raies d'absorption de l'ozone pourraient être un traceur d'une éventuelle vie extraterrestre, sous réserve d'être trouvées dans le spectre d'une exoplanète. |

A B C D E F G H I J K L M N O **P** Q R S T U V W X Y Z

| | |
|---|---|
| **Paaliaq** | (mythologie inuit : chaman, personnage de Kusugak) Satellite de Saturne n° XX, de 22 km approximativement, orbitant à 15 200 000 km de la planète dans le sens direct, en 1 ans 321 j 10 h. Découvert par Gladman en 2000. |
| **PAH** | *Polycyclic Aromatic Hydrocarbon*. Hydrocarbure Aromatique Polycyclique. Les aromatiques contiennent au moins un cycle benzène ; les polycycliques sont ceux qui en contiennent plusieurs. On en trouve de nombreux dans le milieu interstellaire. Ce sont aussi des polluants de notre industrie. |
| **paires de cercles** | Voir : cercle dans le ciel. |
| **Paléocène** | Après la limite Crétacé-Tertiaire (limite KT, disparition des dinosaures), commence l'ère Cénozoïque. Le Paléocène en est le premier étage ; il s'étend de 65 à 59 millions d'années. Il comprend deux subdivisions : le Thanétien et le Danien. Les premiers primates apparaissent. |
| **Paléozoïque** | Ere géologique qui correspond à l'ancien Primaire. S'étend de 543 à 250 millions d'années. Le début est marqué par l'explosion cambrienne, qui a vu l'apparition de très nombreuses espèces. Le supercontinent Rodinia se fragmente, puis les morceaux se rassemblent pour former la Pangée. |
| | • Petite planète numéro 2, c'est la troisième par ordre de taille décroissante. Elle se caractérise par une forte excentricité (0,23) et une forte inclinaison (34°). Elle présente un spectre de chondrite carbonée. |

| | |
|---|---|
| **Pallas** | Naturaliste allemand qui a décrit la météorite de Krasnojarsk. Il l'a rapportée, et Chladni l'a étudiée. Pallas a donné son nom à ce groupe de météorites. |
| **Pallas** | (mythologie grecque : Déesse de la sagesse, protectrice des sciences et des arts) Candidate planète naine de dimensions : 570×525×482 km, orbitant à 3 UA du Soleil, en 4,62 ans . Découverte par Olbers en 1802. Objet de la ceinture principale, Pallas montre une surface semblable à celle des météorites carbonées. |
| **pallasite** | Météorite étudiée par le naturaliste allemand Pallas. Elle est constituée d'une matrice de ferro-nickel contenant des cristaux d'olivine. |
| **Pallène** | (mythologie grecque : l'une des 7 filles du géant Alcyonée) Satellite de Saturne n° XXXIII, de 4,5 km approximativement, orbitant à 212 280 km de la planète dans le sens direct, en 1 j 3 h 22 mn. Découvert par Charmoz en 2004. |
| **palus** | Mot latin. Dénomination d'une structure géologique dans le système solaire, signifiant "marais ; petite plaine (sur la lune)". Voir aussi : *liste des formations géologiques*. |
| **Pan** | (mythologie grecque : dieu campagnard, mi-homme mi-chèvre, protecteur des bergers et des troupeaux.) Satellite de Saturne n° XVIII, de 28 km approximativement, orbitant à 133 584 km de la planète dans le sens direct, en 13 h 48 mn. Découvert par Showalter en 1990. Il orbite dans la division d'Encke, c'est probablement lui qui la maintient. |
| **pancake** | Anglais *crêpe*. Formation circulaire, en faible relief, que l'on trouve en particulier sur Vénus. |
| **Pandore** | (mythologie grecque : première femme : sur demande de Zeus, Héphaïstos l'a faite avec de l'argile) Satellite de Saturne n° XVII, de dimensions 103×80×64 km, orbitant à 141 700 km de la planète dans le sens direct, en 14 h 43 mn. Découvert par Collins en 1980. Il orbite à l'extérieur de l'anneau F, dont il est chien de berger. C'est un petit corps glacé, probablement poreux. |
| **Pangée** | Supercontinent qui s'est formé vers 280 Ma (Permien) et s'est fragmenté vers 245 Ma (Trias). C'est le dernier supercontinent qui ait existé. |
| **papillon** | Voir : diagramme papillon. |
| **Pâques** | Fête chrétienne, qui dérive de Pessah dans la religion hébraïque. Pâques reprend les circonstances de la fête juive, ce qui produit son irrégularité dans le calendrier. Alors que le calendrier grégorien est solaire, Pâques et les fêtes qui lui sont associées, sont lunaires, et donc variables. |
| **parabole** | Courbe ouverte, ayant deux branches infinies, et un sommet à distance finie. Elle possède un foyer, proche du sommet, et un axe de symétrie. Un objet venant de très loin, et s'approchant du Soleil, peut se trouver sur une orbite parabolique ; après un passage rapproché, il repartira vers l'infini. |
| **paradoxe d'Olbers** | Si l'Univers est infini, où qu'on tourne son regard, on devrait rencontrer la surface d'une étoile. Par conséquent, le ciel nocturne devrait être aussi brillant que la surface du Soleil. |
| **parallaxe** | Effet de perspective qui montre un déplacement d'un objet devant un fond lointain, lorsque l'observateur se déplace. On en déduit une mesure de la distance des astres. |
| **parallèle** | Se dit de l'état de l'électron, dans l'atome d'hydrogène, dont le spin est de même orientation que celui du proton. Contraire : *antiparallèle*. |
| **parapegme** | Tables astronomiques, pour consigner la division du temps. Ils datent du 8$^{e}$ siècle avant JC, et repèrent les cultures par rapport aux étoiles. Des prévisions météorologiques, des prédictions sur les jours fastes s'y adjoignaient. |
| **parsec** | Unité de distance astronomique basée sur l'Unité Astronomique. Le parsec vaut 3,26 AL. Il est indépendant de la vitesse de la lumière. |
| **particule** | Par définition, plus petite quantité de matière possible. Une particule élémentaire ne peut (sauf découverte contradictoire) être brisée en plusieurs composantes (électron, quark…). Mais certaines particules sont composites (proton, neutron…). |
| **particule alpha** | Nom historique (radioactivité alpha, la première reconnue) donné au noyau d'hélium. |
| **Paschen** | (Friedrich, 22/01/1865-25/02/1947) Physicien allemand ayant travaillé sur les décharges électriques. Il a été le premier à observer la série infrarouge de l'hydrogène qui porte son nom. Voir : série de Paschen. |
| **Pasiphaé** | (mythologie grecque : fille d'Hélios et de Persé, épouse de Minos, et mère du Minotaure) Satellite de Jupiter n° VIII, de 50 km approximativement, orbitant à 23 500 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 735 j. Découvert par Melotte en 1908. Groupe d'Ananké |
| **Pasithée** | (mythologie grecque : une des Grâces, fille de Zeus et d'Euryméduse. Héra la promet à Hypnos, s'il accepte d'endormir Zeus) Satellite de Jupiter n° XXXVIII, de 2 km approximativement, orbitant à 23 004 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 1 an 354 j. Découvert par Scott en 2001. Groupe de Carmé. |
| **passage** | • Il arrive qu'une planète inférieure passe exactement devant le disque du Soleil, où elle apparaît comme un point noir mobile. Ces passages sont très rares, et ont été très utiles pour la mesure des distances dans le système solaire.<br>• Se dit aussi lorsqu'une étoile ou une planète traverse le méridien. Ce phénomène a été utilisé longtemps pour les mesures de position, et a donné des instruments spécialisés, nommés *instruments de passage*.<br><br>Voir aussi : *passages de Mercure*, *passages de Vénus*. |
| **patera** | Mot latin, pluriel *paterœ*. Dénomination d'une structure géologique dans le système solaire, signifiant "cratère irrégulier, ou cratère complexe à bords festonnés.". Voir aussi : *liste des formations géologiques*. |
| | recouvrement d'une surface par des motifs répétés. Le pavage ne doit ni se recouvrir, ni laisser des vides. Un carrelage |

| | |
|---|---|
| **pavage** | est un exemple de pavage. Seuls quelques motifs particuliers (s'ils sont tous identiques) sont possibles. On généralise avec des volumes pour paver l'espace. |
| **Pavonis Mons** | Volcan martien du plateau de Tharsis, situé entre Olympus Mons et l'extrémité ouest de Valles Marineris. Voir : mons. |
| **pelure d'oignon** | Structure en couches concentriques que prend une étoile massive avant d'exploser en supernova. Cette structure ne dure qu'une journée... |
| **pénombre** | Dans une éclipse de Lune, partie de la Lune partiellement éclairée. De la zone de pénombre sur la Lune, le Soleil est partiellement éclipsé par la Terre. |
| **Perdita** | (mythologie : personnage de Shakespeare) Satellite d'Uranus n° XXV, de 30 km approximativement, orbitant à 76 420 km de la planète dans le sens direct, en 15 h 19 mn. Découvert par Karkoshaska en 1986. |
| **pergélisol** | Couche superficielle de quelques décimètres à quelques mètres à la surface d'une planète, constituée de boue (mélange de sol et d'eau) gelée. On connait ce genre de sol sous le terme anglais *permafrost*. |
| **périastre** | Point de son orbite où un objet est au plus près de l'astre autour duquel il gravite. Si l'objet central est le Soleil, on préfère le terme *périhélie* ; si c'est la Terre, on parle de *périgée*. |
| **périgée** | Point de son orbite où un satellite est au plus près de la Terre (du grec *péri* = proche ; *Geo* = Terre) ; s'applique à la Lune et aux satellites artificiels. |
| **périhélie** | Point de son orbite où une planète est au plus près du Soleil (du grec *péri* = proche ; *Hélios* = Soleil). |
| **période** | • Lorsqu'un phénomène se reproduit régulièrement, à des intervalles de temps égaux, la durée de ces intervalles est la période.<br>• Pour un élément radioactif, la période est le temps au bout duquel la moitié d'une masse initiale de cet élément s'est transformée en un autre par radioactivité. |
| **période d'Hipparque** | Hiparque, en 130 après J.C., a découvert que l'année était plus courte que 365,25 jours. Il a regroupé 4 périodes de Callipe, en retranchant encore un jour. Il obtint une année moyenne de 365,2476 jours, encore trop longue de 6 minutes (un jour d'erreur au bout de 140 ans). Mais il a fait une erreur de moins d'une seconde sur la lunaison ! |
| **période de Callipe** | Période comprenant 4 cycles de Méton, moins un jour, définie vers 342 avant J.C.. Cette légère correction améliore la prévision des éclipses. L'année de Callipe moyenne dure exactement 365,25 jours, comme l'année julienne. L'erreur sur la lunaison est de 22 secondes par an. |
| **période de Scaliger** | Autre nom de la période julienne. |
| **période julienne** | Période de 7.980 ans imaginée par Joseph Scaliger en 1583. Basée sur le calendrier julien, elle commence le 1$^{er}$ janvier 4713 avant J.C. à midi. Sa durée est le produit de 28 x 19 x 15 des périodes du cycle dominical (28, qui ramène le dimanche à la même date), par le cycle de Méton (retour des éclipses), et par l'indiction romaine (15). En divisant la rang d'une année par 28, 19 et 15, les restes donnent le cycle solaire (ou dominical), le nombre d'or, et l'indiction romaine. Le début a été fixé à l'année la plus proche dans le passé où les trois nombres avaient la valeur 1 à l'origine. |
| **période Sothiaque** | Le calendrier vague des Egyptiens, créé en 4.230 avant J.C., définissait une année de 365 jours, trop courte d'un quart de jour. Au bout de 4 ans, le décalage atteignait un jour. Au bout de 1.461 ans (4 x 365 = 1.460), il atteignait ainsi un an tout juste, c'est-à-dire que l'accord sur les saisons se refit. Cette période de 1.461 ans est la *période sothiaque*, dont le nom vient de Sirius (Sothis dans la langue égyptienne), car son lever héliaque servait de référence. |
| **périsélénée** | Point de son orbite où un satellite de la Lune est au plus près (du grec *péri* = proche ; *Sélénée* = Lune). |
| **permafrost** | Nom d'origine anglaise. Voir : pergélisol. |
| **Perséides** | Pluie d'étoiles filantes d'été, semblant provenir de la constellation de Persée. |
| **perturbation** | Méthode mathématique consistant à modifier légèrement la solution d'un problème pour tenir compte d'influences légères. Par exemple, une planète est principalement attirée par le Soleil, et décrit autour de lui une orbite elliptique. Mais les autres planètes l'en écartent. Voir : éléments osculateurs. |
| **petit âge glaciaire** | Période froide s'étendant de 1400 à 1850, caractérisée par un refroidissement de 1 à 2° sur les températures moyennes. |
| **Petit Nuage de Magellan** | Galaxie naine satellite de la Voie Lactée, visible dans l'hémisphère sud, dans la constellation du Toucan. Il est à 210.000 AL de nous. Il contient du gaz interstellaire, où se forment des étoiles. |
| **Petit Optimum Médiéval** | Période chaude s'étendant de 900 à 1300, caractérisée par un réchauffement climatique. |
| **Pfund** | (August, 28/12/1879-04/01/1949) Physicien américain ayant découvert la série de raies de l'hydrogène qui porte son nom. Voir : série de Pfund. |
| **PGE** | Abbréviation de *plus grande élongation*. L'élongation est l'angle qui sépare le Soleil d'une planète dans le ciel, vus de la Terre. Pour une planète inférieure, l'élongation passe par un maximum qui permet de calculer sa distance au Soleil par rapport à celle de la Terre. Voir : plus grande élongation. |
| **phases** | Fraction d'une planète ou d'un satellite éclairée par le Soleil, selon la position de l'observateur. La Lune et les planètes présentent des phases. |
| **Phobos** | (mythologie grecque : fils d'Ares et d'Aphrodite, frère de Deïmos. Son nom signifie *peur panique*) Satellite de Mars n° I, de dimensions 27×21×19 km, orbitant à 9 377 km de la planète dans le sens direct, en 7 h 42 mn. Découvert par Hall en 1877. Plus proche satellite de Mars. De forme grossièrement sphérique, c'est probablement un astéroïde capturé par la planète. |
| **Phoebé** | Satellite de Saturne n° IX. Diamètre 214 km, orbite à 13 millions de km de la planète, dans le sens rétrograde, en 1,5 |

| | |
|---|---|
| | ans. Mythologie grecque : Titanide fille de Gaïa et d'Ouranos. |
| **phosphorescence** | Emission électromagnétique, produite longtemps (quelques dizaines de secondes à plusieurs jours) après l'excitation qui en est la cause. |
| **photodissociation** | Réactions nucléaires qui consistent à briser un noyau lourd par l'action de photons gamma très énergétiques. La photodissociation se produit dans des étoiles massives, à température élevée (2 milliards de degrés). |
| **photomultiplicateur** | Dispositif électronique, basé sur l'effet photoélectrique, qui permet de transformer un photon en un signal électrique détectable. |
| **photon** | Particule élémentaire, grain de lumière. Le photon est le boson qui porte l'interaction électromagnétique. |
| **photosphère** | Couche du Soleil qui nous envoie la lumière ; c'est elle qui nous donne l'impression de voir un disque. Son nom vient du grec *photos*, qui veut dire lumière. |
| **photosynthèse** | Utilisation de l'énergie solaire pour synthétiser des sucres à partir du carbone extrait du gaz carbonique. C'est la base du métabolisme des plantes, et de quelques bactéries dites photosynthétiques. |
| **Phyllosien** | Première ère géologique dans l'actuelle classification martienne. Elle est caractérisée par la formation des argiles, et s'étend du refroidissement de la croûte à 3,9 milliards d'années avant le présent. Voir : Theiikien, Sidérikien. |
| **Phœbé** | (mythologie grecque : Titanide, fille de Gaïa et d'Ouranos) Satellite de Saturne n° IX, de 214 km approximativement, orbitant à 13 000 000 km de la planète dans le sens retrograde, en 1 ans 183 j. Découvert par Pickering en 1899. Corps capturé par Saturne, Phœbé n'est pas en rotation synchrone avec son mouvement orbital. |
| **Planck** | Constante de Planck : noté *h*, c'est la quantité minimum d'action possible. |
| **planète** | Objet matériel de constitution variée, mais dont la masse est trop faible pour provoquer des réactions nucléaires, et donc de briller par elle-même. Pourtant, les planètes géantes (Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune) produisent par elle-mêmes un peu d'énergie dans l'infrarouge (par contraction gravitationnelle). Pour mériter ce nom, elles doivent avoir 'fait le ménage autour d'elles', c'est-à-dire éliminé par éjection ou capture, tous les petits corps gravitant à proximité. Cette définition exclu Cérès et Pluton, qui sont maintenant dénomées 'planètes naines'. |
| **planète chtonienne** | Planète gazeuse, si proche de son étoile que cette dernière aurait soufflé son atmosphère. Il ne resterait donc qu'un noyau rocheux, semblable à une planète tellurique. Il n'y en a pas dans le système solaire, et on n'a pas de certitude d'en avoir encore observé ailleurs. Voir : chtonien. |
| **planète géante** | Planète gazeuse, dont la taille justifie le qualificatif. Jupiter est la plus grosse d'entre elles, ce qui les fait appeller aussi *planètes joviennes*. |
| **planète inférieure** | Planète dont l'orbite est à l'intérieur de celle de la Terre (Mercure et Vénus). |
| **planète jovienne** | Voir : planète géante. |
| **planète supérieure** | Planète dont l'orbite contient celle de la Terre (Mars à Neptune). |
| **planète tellurique** | Planète de même nature que la Terre. Les planètes telluriques sont Mercure, Vénus, la Terre et Mars. |
| **planétésimal** | Caillou qui s'est aggloméré par accrétion lors de la formation du système solaire. Les planétésimaux se sont agglomérés à leur tour pour constituer les planètes. |
| **planétologie** | Etude des planètes elles-mêmes, en-dehors de leus mouvements. C'est essentiellement l'étude de la géologie et de l'atmosphère des planètes. Elle considère également l'évolution des planètes depuis leur formation. Elle est rendue possible par l'utilisation de robots expédiés en orbite, ou au sol des planètes étudiées. Concerne aussi les petits corps, satllites et astéroïdes. |
| **planitia** | Mot latin. Dénomination d'une structure géologique dans le système solaire, signifiant "petite plaine". Voir aussi : *liste des formations géologiques*. |
| **planum** | Mot latin. Dénomination d'une structure géologique dans le système solaire, signifiant "plateau ou grande plaine". Voir aussi : *liste des formations géologiques*. |
| **plaque** | Partie de l'écorce couvrant une certaine surface d'une planète. L'écorce terrestre comprend de nombreuses plaques ; Mars n'en compte très probablement qu'une seule. |
| **plasma** | Gaz porté à haute température, dont les atomes sont ionisés. |
| **Pléiades** | Le plus bel amas ouvert, visible à l'œil nu, dans la constellation du Taureau. |
| **plérion** | Reste de supernova, formant une coquille sphérique excitée par les particules de haute énergie émise par l'étoile à neutrons. Ce gaz de remplissage émet un rayonnement synchrotron qui caractérise ces objets. |
| **plus grande élongation** | ***PGE***. Elongation maximale d'une planète inférieure. C'est l'écart angulaire maximum au Soleil, moment le plus favorable pour l'observation (vrai surtout pour Mercure). Lorsque la planète se lève ou se couche avant le Soleil, c'est la *plus grande élongation Ouest*, sinon c'est la *plus grande élongation Est*. |
| **plutino** | Un *plutino* est un objet transneptunien, dont l'orbite est en résonnance 2/3 avec celle de Neptune (comme celle de Pluton). Ne pas confondre avec *plutoïde*, qui désigne les planètes naines transneptuniennes. |
| **plutoïde** | Par définition, c'est une planète naine transneptunienne. Cette appellation permet de les distinguer des planètes naines de la ceinture principale, Céres étant la seule reconnue actuellement. |
| **pluton** | Massif cristallin formé par un diapir dont la remontée s'est arrêtée, le laissant refroidir et cristalliser lentement. Les roches plutoniques s'opposent aux roches effusives, dont la remontée rapide en surface entraîne une cristallisation brève. Les roches plutoniques sont les granites et les gabbros. |
| | (mythologie latine : Dieu des enfers, correspondant au grec Hadès) Planète naine de 2 390 km de diamètre, orbitant à |

| | |
|---|---|
| **Pluton** | 39 UA du Soleil, en 248,857 ans. Découverte par Tombaugh en 1930. Plutino de la ceinture de Kuiper (en résonance 2:3 avec Neptune), Pluton est composé de roches, de glaces d'eau et de méthane. Il possède 5 satellites : Charon, Nix, Hydra, Styx, Kerberos, et sera survolé par la sonde New Horizon en été 2015. |
| **PNM** | Voir : Petit Nuage de Magellan. |
| **Pogson** | (Norman Robert, 23/03/1829-23/06/1891) Astronome Anglais. Il a réalisé un catalogue d'étoiles, découvert des astéroïdes, et il est connu pour la loi qu'il a établie sur les magnitudes. |
| **point chaud** | Point de la surface d'une planète situé sous un diapir. Lorsque le magma arrive à percer la croûte, il se forme un volcan. Sur Terre la tectonique, en déplaçant la croûte au-dessus du point chaud, produit des chaînes de volcans (îles Hawaï par exemple). Sur Mars, les volcans de Tharsis sont des volcans de point chaud, mais sans tectonique. |
| **point de Lagrange** | Point d'équilibre où la gravité de deux corps en rotation est égale. Il en existe cinq, certains stables, d'autres instables. |
| **point gamma** | Autre dénomination de l'équinoxe de printemps. |
| **point triple** | Couple de valeurs pression-température, qui permet à un élément d'exister sous les trois phases : solide, liquide et gaz. Les conditions thermodynamiques à la surface de la Terre correspondent à peu près au point triple de l'eau (d'où la présence de mer, de glaciers, et de brumes). Titan est au point triple du méthane. |
| **point vernal** | Autre dénomination de l'équinoxe de printemps. |
| **polarimètre** | Appareil destiné à mesurer la polarisation, linéaire ou circulaire, d'une onde électromagnétique. Certains phénomènes physiques produisent cette polarisation. Donc elle permet de préciser les conditions dans lesquelles la lumière a été émise et/ou s'est propagée. |
| **polarisation** | La lumière est une onde, dont la vibration est contenue dans un plan. Un faisceau lumineux contient de nombreuses vibrations différentes, chacune ayant son propre plan de vibration. On dit que la lumière est polarisée lorsqu'un plan unique est sélectionné (polarisation à 100 %), ou favorisé. Voir aussi : *polarisation*. |
| **polissage** | Opération permettant de supprimer, à la surface d'um miroir de télescope, les imperfections restant après le doucissage. |
| **Pollux** | (mythologie grecque : frère de Castor. Ensemble, ce sont les Dioscures, fils de Zeus et Léda) Satellite de Saturne n° XXXIV, de 2,6 km approximativement, orbitant à 377 200 km de la planète dans le sens direct, en 2 j 17 h 46 mn. Découvert par Porco en 2004. Co-orbitale à Dioné, elle se trouve à son point de Lagrange L5. |
| **population** | Caractérisation des étoiles dans un environnement, en fonction de leur âge. Les étoiles de *population I* sont des étoiles jeunes (disque des galaxies spirales) ; les étoiles de *population II* sont des étoiles âgées (amas globulaires) ; on distingue parfois la population III, formée d'étoiles encore plus vieilles. |
| **population III** | Ensemble des étoiles de métallicité nulle (formées à partir du gaz issu directement du Big Bang). On n'en a toujours pas observé. Ce seraient les plus vieilles étoiles. |
| **Portia** | (mythologie : personnage de Shakespeare) Satellite d'Uranus n° XII, de 135 km approximativement, orbitant à 66 100 km de la planète dans le sens direct, en 12 h 19 mn. Découvert par Synnott en 1986. Portia se trouve à l'intérieur de l'orbite synchrone, et se rapproche d'Uranus |
| **positron** | Antiparticule de l'électron. On la nomme parfois *positon*. |
| **poussières** | Matériaux constitués de grains microscopiques, et qu'on trouve un peu partout dans l'espace, entre les étoiles mais aussi entre les galaxies. Elles sont à l'origine des planètes. |
| **pouvoir séparateur** | Faculté d'un instrument d'optique à montrer deux images distinctes, là où il y a deux objets. Le pouvoir séparateur est proportionnel au diamètre de l'objectif. |
| **Praxidiké** | (mythologie grecque : déesse maîtresse de Zeus) Satellite de Jupiter n° XXVII, de 7 km approximativement, orbitant à 20 907 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 1 an 269 j. Découvert par Sheppard en 2000. Groupe d'Ananké |
| **précédente** | Voir : structure précédente. |
| **précession** | Mouvement de balancement d'un axe de rotation. La précession des équinoxes est un mouvement lent de l'axe de rotation de la Terre, qui lui fait décrire un cercle complet sur le ciel en 25.000 ans. Voir aussi : *précession*. |
| **pression de dégénérescence** | Pression produite par les fermions (électrons ou neutrons) dans un milieu extrêmement dense. Elle s'oppose à la contraction gravitationnelle. |
| **pression de Fermi** | Voir : pression de dégénérescence. |
| **Pribram** | Ville de Tchécoslovaquie où est tombé la première météorite dont la trajectoire exacte a pu être calculée. La chute a été observée par plusieurs caméras destinées au suivi des satellites artificiels, ce qui a permis de déterminer la trajectoire. |
| **principe cosmologique** | Principe fondamental qui exprime que l'Univers est homogène et isotrope. Lorsqu'Einstein l'utilisa, il n'y avait pas de support observationnel. Aujourd'hui, l'isotropie est très finement démontrée par les images du fond cosmologique à 2,7 K obtenues par COBE puis WMAP. De l'autre côté, l'homogénéité est expliquée par l'inflation. |
| **principe d'équivalence** | Principe énoncé par A. Einstein, qui étend l'équivalence entre masse inerte et masse pesante. Il stipule que *le résultat des expériences faites dans un référentiel en chute libre ne dépend pas de l'état de mouvement du référentiel*. Il produit de nombreuses conséquences en Relativité Générale. |
| **principe d'incertitude** | Principe énoncé au début du XX$^{e}$ siècle par Werner Heisenberg, et selon lequel la précision de mesure de la position et de la vitesse sont inverses l'une de l'autre : plus la position est précise, moins on connaît la vitesse (et inversement). D'autres couples de propriétés sont également soumis à ce principe. |
| **principe d'inertie** | Voir : inertie. |
| **principe de Mach** | Mach a réfléchi sur la nature de l'inertie d'un corps, et a conclu qu'elle provenait de la somme des influences de toutes |

| | |
|---|---|
| | les masses de l'Univers. Cette idée a été élevée en principe. |
| **principe de moindre action** | Principe énoncé par Maupertuis, qui stipule qu'un objet en mouvement prend la direction qui lui assure la moindre dépense d'énergie immédiate. |
| **prisme objectif** | Prisme placé devant l'objectif d'une lunette ou d'un télescope (d'où son nom), et permettant d'obtenir en une seule observation des spectres de tout un champ d'étoiles. Imaginé par K. Schwarzschild, il a été développé par C. Fehrenbach, à Marseille. |
| **probabilité** | Mesure des chances de réaliser un événement. Par exemple, la probabilité de tirer pile en jetant une pièce est 1/2, parce que si on le fait un grand nombre de fois, on obtiendra à peu près autant de fois pile que face. Les probabilités interviennent dans de nombreux problèmes physiques, économiques... |
| **processus r** | R pour *rapid*. Synthèse d'éléments lourds par capture de neutrons. Le flux de neutrons est très intense, et les neutrons ajoutés n'ont pas le temps de se désintégrer en protons. Le noyau s'alourdit progressivement sans se transformer : il se forme des isotopes de plus en plus lourds, jusqu'à rupture éventuelle par fission. Voir : processus s. |
| **processus s** | S pour *slow*. Synthèse d'éléments lourds par capture de neutrons. Le flux de neutrons est relativement faible, et le temps entre deux captures successives très long (jusqu'au millier d'années). Dans ces conditions, un neutron ajouté peut se désintégrer en proton par réaction béta, et produire un nouvel élément. Sur cet élément, la capture peut se reproduire. Certains éléments lourds sont ainsi synthétisés. Voir : processus r. |
| **proche** | S'applique aux rayonnements infra-rouge et ultraviolet, pour indiquer leur proximité du spectre visible. |
| **produit scalaire** | Le produit scalaire a été défini dans la géométrie euclidienne. Il est généralisé et défini comme *forme bilinéaire symétrique définie positive*. Il est très utilisé en géométrie, en physique, en cosmologie… |
| **Proemptose** | Règle du calendrier grégorien, qui consiste à ajouter 1 à l'épacte aux années séculaires, une fois tous les 300 ans, à partir de 1800. |
| **profil P Cygni** | Forme particulière des raies d'absorption dans un spectre stellaire, qui est produit par un vent stellaire dont les vitesses décalent les raies. |
| **projet Darwin** | Projet européen (ESA) d'interféromètre spatial, consistant en 3 ou 4 télescopes de 3 à 4 mètres de diamètre, et un laboratoire, l'ensemble satellisé au point de Lagrange L2 de la Terre. Le but est la recherche de planètes de type terrestre, les plus aptes semble-t-il à abriter la Vie. 1.000 étoiles seront surveillées. |
| **Prométhée** | (mythologie grecque : Titan, fils de Japet, qui a créé les hommes, et a volé le feu aux dieux pour le leur donner) Satellite de Saturne n° XVI, de dimensions 133×79×61 km, orbitant à 139 350 km de la planète dans le sens direct, en 14 h 42 mn. Découvert par Collins en 1980. Il est de forme allongée, et joue le rôle de chien de berger à l'intérieur de l'anneau F. Corps glacé probablement poreux. Orbite variable, selon les perturbations de Pandore. |
| **promontorium** | Mot latin. Dénomination d'une structure géologique dans le système solaire, signifiant "cap, promontoire, sur la lune". Voir aussi : *liste des formations géologiques*. |
| **proplyd** | ***Pro**to**pl**anetary **D**isk*. Disque de gaz entourant une étoile nouvellement formée (T Tauri), et dans lequel des planètes sont en formation. |
| **Prospero** | (mythologie : personnage de Shakespeare) Satellite d'Uranus n° XVIII, de 50 km approximativement, orbitant à 16 256 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 5 ans 152 j. Découvert par Holman en 1999. |
| **Protée** | (mythologie grecque : dieu marin fils de Poséidon, qui pouvait changer de forme) Satellite de Neptune n° VIII, de 418 km approximativement, orbitant à 117 647 km de la planète dans le sens direct, en 1 j 2 h 56 mn. Découvert par Synnott en 1989. |
| **protoétoile** | Stade antérieur, dans la formation d'une étoile, à l'allumage des réactions nucléaires centrales. |
| **proton** | Particule possédant une charge électrique unitaire positive, et constituant du noyau atomique avec le neutron. Le proton est constitué de trois quarks : u, u, d. |
| **protubérance** | Immense jet de plasma très chaud, émis par le Soleil, et qui s'élève dans la couronne à des altitudes dépassant parfois les 500.000 km. |
| **protubérance en boucle** | Protubérance guidée par le champ magnétique du Soleil, qui suit une ligne en boucle. |
| **protubérance éruptive** | Protubérance qui se produit lors d'une reconnexion magnétique. Le plasma situé au-dessus de la reconnexion est éjecté. |
| **protubérance quiescente** | Protubérance solaire qui se forme dans une zone calme, et qui peut persister jusqu'à plusieurs mois. |
| **protyle** | Le chimiste William Crookes a proposé que toute la matière de l'Univers provienne d'un élément nommé *protyle*, par désintégrations successives. Cette idée est basée sur les abondances des éléments, les plus lourds étant les plus rares. |
| **Psamathée** | (mythologie grecque : une des Néréides, fille de Néreus et Doris) Satellite de Neptune n° X, de 28 km approximativement, orbitant à 46 695 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 24 ans 350 j. Découvert par Sheppard en 2003. |
| **psychrophile** | Voir : bactérie psychrophile. |
| **Puck** | (mythologie celtique : personnage malicieux) Satellite d'Uranus n° XV, de 160 km approximativement, orbitant à 86 000 km de la planète dans le sens direct, en 18 h 17 mn. Découvert par Synnott en 1985. |
| **pulsar** | Etoile à neutrons qui émet deux jets de particules chargées le long de son axe magnétique, incliné par rapport à l'axe de rotation. Ces particules émettent un rayonnement synchrotron. Si la Terre se trouve sur le cône balayé par l'axe magnétique, elle reçoit à chaque tour de l'étoile un train d'onde. Vu de la Terre, ce rayonnement continu paraît donc |

| | |
|---|---|
| | pulsé. |

A B C D E F G H I J K L M N O P **Q** R S T U V W X Y Z

| | |
|---|---|
| **QCD** | *Quantum Chromo Dynamics* Chromodynamique Quantique. Théorie de l'interaction forte (ou force de couleur). Elle décrit les interactions entre protons et neutrons. |
| **QED** | *Quantum Electro Dynamics*, électrodynamique quantique. Théorie quantique de l'électromagnétisme. Elle explique les interactions entre les protons et les électrons, donc la stabilité des molécules, et par suite toute la chimie. |
| **QSO** | Voir : quasar. |
| **QSO** | Voir : quasar. |
| **quadrantides** | Pluie d'étoiles filantes dont le nom vient d'une ancienne constellation, non validée par l'UAI, et nommée Quadrant. Elle se situait dans la partie nord-est de l'actuel Bouvier. La comète qui a donné naissance à cet essaim a disparu. Les quadrantides sont donc vouées à disparaître à leur tour. |
| **quadrature** | Position d'une planète supérieure dans le ciel, telle que sa direction fasse un angle droit avec celle du Soleil. On parle de *quadrature Est* si la planète est au méridien au coucher du Soleil, et de *quadrature Ouest* si c'est au lever. |
| **quadripotentiel** | Quadrivecteur dont la première composante est le potentiel électrique (divisé par c), et les trois autres composantes celles du potentiel-vecteur magnétique. Il sert pour décrire l'électromagétisme relativiste (électrodynamique quantique QED). Voir : quadrivecteur. |
| **quadrivecteur** | Vecteur à quatre composantes (x, y, z, t), les trois composantes d'espace et une composante de temps. Les principes de la Relativité obligeant à mélanger temps et espace, il a été nécessaire de réécrire les lois de la physique à l'aide de quadrivecteurs. |
| **quadrivecteur impulsion-énergie** | L'impulsion, en mécanique non relativiste, est le produit de la masse par la vitesse. En Relativité, le quadrivecteur impulsion-énergie est défini comme le produit de $mc^2$ par le quadrivecteur vitesse (quadrivitesse). |
| **quadrivitesse** | Quadrivecteur qui représente la vitesse dans l'espace-temps à quatre dimensions. Voir : quadrivecteur. |
| **Quaoar** | Objet de la ceinture de Kuiper, découvert en 2002. Il dépasse Pluton en diamètre, mais est surpassé lui-même par Orcus, Sedna, Haumea, Makemake et Eris. Il porte le nom de l'esprit créateur dans la mythologie Tongva. Voir : ceinture de kuiper. |
| **Quaoar** | (mythologie tongva : esprit créateur (les Tongva sont un peuple amérindien, de la région de Los Angeles)) Candidate planète naine de 1 170 km de diamètre, désignation provisoire 2002 LM60, orbitant à 43 UA du Soleil, en 285,69 ans. Découverte par Trujillo en 2002. Astéroïde classique de la ceinture de Kuiper. Voir : ceinture de kuiper. |
| **quark** | Particule élémentaire, constituante des protons, neutrons et mésons. |
| **quartz choqué** | Cristal de quartz soumis à un choc violent, qui en garde la trace sous la forme de stries visibles en lumière polarisée. La présence de quartz choqué est une preuve d'un impact météoritique. |
| **quasar** | ***Quas****i Stell****ar*** *Radiosource*. Objet d'aspect télescopique quasi-stellaire, mais dont le spectre est fortement décalé vers le rouge, indiquant une vitesse de récession importante. Certains n'émettent pas en radio (*QSO*, ***Q****uasi* ***S****tellar* ***O****bject*). |
| **Quaternaire** | Ancienne dénomination qui désignait l'ère géologique la plus récente, en cours aujourd'hui. Le Quaternaire désigne maintenant la dernière période du Cénozoïque (qui a regroupé les ères Tertiaire et Quaternaire). Le Quaternaire commence il y a 2,6 millions d'années |
| **Queloz** | (Didier, 23/12/1966) Astronome suisse, travaillant à l'observatoire de Genève. Co-découvreur au cours de sa thèse, avec Michel Mayor son directeur, de la première exoplanète autour d'une étoile de type solaire : 51 Peg B. |
| **queue** | Traînée de gaz et de poussières qu'une comète abandonne sur son orbite. Les poussières étant bien plus grosses que les atomes de gaz subissent une poussée du vent solaire. Gaz et poussières se séparent donc, et forment deux queues distinctes de couleurs différentes. |

A B C D E F G H I J K L M N O P Q **R** S T U V W X Y Z

| | |
|---|---|
| **radiatif** | |
| **radioactivité** | • *Radioactivité alpha* : éjection d'un noyau d'hélium (particule alpha) par un noyau (interaction forte) ;<br>• *Radioactivité béta* : transformation réversible de proton en neutron, avec émission d'un électron ou positron (interaction faible) ;<br>• *Radioactivité gamma* : émission d'un photon gamma (interaction électromagnétique). |
| **radioastronomie** | Observation des astres dans la gamme des ondes radio, elle utilise des radiotélescopes. Première découverte par Jansky, premier radiotélescope construit par Grote Reber. |
| **radiogalaxie** | Galaxie dont l'émission radio est intense. Virgo A (M87) en est une. Leur image en radio est chaotique, alors que dans le domaine visible elles sont très régulières. Leur activité est probablement due à la présence d'un trou noir central. |
| **radiotélescope** | Instrument constitué d'un miroir et d'un récepteur radio. Il mesure l'intensité du signal dans la direction d'observation. En pointant successivment des points proches, on peut synthétiser une image radio du ciel. Les ondes concernées vont du |

| | |
|---|---|
| | métrique au millimétrique. |
| **raie** | Variation brutale, en plus ou en moins, de l'intensité lumineuse reçue d'un astre à une longueur d'onde particulière, par rapport aux longueurs d'onde voisines. Ceci signifie qu'une couleur est émise ou absorbée beaucoup plus que les couleurs qui l'entourent. Ces raies spectrales sont capitales dans l'étude des astres. |
| **raie à 21 cm** | Raie d'émission de l'hydrogène, à 21 cm de longueur d'onde, qui correspond à une très faible énergie de transition de spin de l'électron. |
| **raies de Fraunhofer** | Raies d'absorption découvertes par Joseph von Fraunhofer dans le spectre du Soleil. Il les a nommées avec une lettre latine. Par exemple, les raies H et K du calcium ionisé. Certaines d'entre elles sont produites dans l'atmosphère terrestre (raies telluriques) ; par exemple la raie A qui est une bande de l'oxygène. |
| **raies interdites** | Raies d'absorption qu'il est impossible de produire au laboratoire, et qu'on observe dans certains milieux extrêmement dilués. |
| **Raman** | (Chandrasekhara Venkata, 07/11/1888 - 21/11/1970) Physicien Indien, qui a découvert l'effet raman (choc non élastique entre un photon et une particule), découverte qui lui a valu le prix Nobel 1930. Il est l'oncle de Subrahmanyan Chandrasekhar, lui aussi prix Nobel. Voir : Chandrasekhar. |
| **rayonnement à 3 K** | Voir : fond diffus cosmologique. |
| **rayonnement de freinage** | Voir : bremsstrahlung. |
| **rayonnement fossile** | Voir : fond diffus cosmologique. |
| **rayonnement non thermique** | Rayonnement dont le spectre ne présente pas la forme caractéristique du rayonnement de corps noir. Cette expression permet d'exclure l'origine thermique, sans préjuger de la véritable source du rayonnement. |
| **rayonnement synchrotron** | Rayonnement découvert dans l'accélérateur nommé *Synchrotron*. Cet appareil accélère des particules chargées (électrons), en les plongeant dans un fort champ magnétique pour courber leurs trajectoires. On donne alors ce nom au rayonnement émis par des particules chargées se déplaçant dans un champ magnétique. |
| **rayonnement thermique** | Rayonnement produit par tout corps chauffé. S'il n'est pas perturbé, c'est un rayonnement de corps noir. |
| **rayons cosmiques** | Nom historique donné à une pluie de particules très énergétiques provenant de l'espace. On ignore encore exactement la nature exacte de ces particules, et leur origine (mécanisme d'accélération). |
| **rayons gamma** | Partie la plus énergétique du spectre électromagnétique. Les rayons gamma caractérisent les sources très violentes de l'Univers. |
| **rayons X** | Partie très énergétique du spectre électromagnétique, juste en-dessous des rayons gamma. |
| **réaction chimique** | Réaction transformant des molécules en d'autres molécules (constituées par l'interaction électromagnétique sur le cortège électronique). L'énergie typique d'une réaction chimique est de 1 eV. |
| **réaction nucléaire** | Réaction transformant des noyaux atomiques en d'autres noyaux (interaction forte et interaction faible). L'énergie typique d'une réaction nucléaire est de 1 MeV. |
| **réaction triple alpha** | Ensemble de deux réactions mettant en jeu trois particules alpha dans un temps très bref, aboutissant à la synthèse du carbone. |
| **recombinaison** | • Capture d'un électron par un atome ionisé. Elle s'accompagne d'une émission de lumière ;<br>• 380.000 ans après le Big Bang, la température de l'univers est tombée en-dessous de 3.000 K ; les électrons ont alors été capturés par les noyaux atomiques. C'est la *Recombinaison*, terme bien mal adapté puisqu'il n'y avait jamais eu de combinaison avant.<br><br>Voir aussi : *Recombinaison*. |
| **récurent** | Qui se répète. Se dit de certains phénomènes qui se reproduisent avec une périodicité plus ou moins régulière (explosions de certaines novæ, dites *novæ récurentes*). |
| **récursif** | Si vous savez, arrêtez-vous ;<br>sinon… Voir : récursif. |
| **redshift** | Voir : décalage vers le rouge. |
| **référentiel** | Système de coordonnées permettant de repérer un point dans l'espace, ou un événement dans l'espace-temps. Deux référentiels différents peuvent être en mouvement l'un par rapport à l'autre. Les théories de relativité définissent des lois identiques dans divers référentiels. |
| **réflexion** | Changement brusque de direction d'un rayon lumineux produit par un miroir, ou toute surface ayant les mêmes propriétés. |
| **réfractaires** | Matériaux à point de fusion élevé. Ils existent à l'état solide, même dans les régions proches d'une étoile. Voir : volatils. |
| **réfraction** | Phénomène produit par le passage de rayons lumineux dans des milieux d'indices différents. Elle est due à des vitesses différentes de la lumière dans les deux milieux. |
| **regio** | Mot latin, pluriel *regiones*. Dénomination d'une structure géologique dans le système solaire, signifiant "vaste région qui se distingue par sa couleur ou sa brillance". Voir aussi : *liste des formations géologiques*. |
| **région H I** | Nuage d'hydrogène atomique interstellaire froid (loin de toute étoile chaude), dans lequel les atomes sont neutres (non ionisés). Il est sombre, et difficile à observer. Cependant, la faible énergie disponible suffit à provoquer une transition de |

| | |
|---|---|
| | spin, qui en se désexcitant, donne la raie radio à 21 cm de longueur d'onde. Voir aussi : *H neutre*. |
| **région H II** | Nuage d'hydrogène interstellaire, proche d'une étoile chaude dont le rayonnement ultraviolet ionise les atomes (d'où le nom H II, le II signifiant *ionisé une fois*). La recombinaison des électrons produit une émission Hα très intense, qui donne une coloration rouge caractéristique à ces zones. |
| **règle de Hund** | Règle définissant le remplissage des couches électroniques dans les atomes. Elle s'énonce : *quand un niveau d'énergie est dégénéré, et que le nombre d'électrons est insuffisant pour le saturer, les électrons utilisent le maximum d'orbitales possibles, avec les spins non appariés parallèles.*. |
| **regmaglypte** | Trous aux formes arrondies, semblables à des empreintes de pouce dans de la pâte à modeler, présents à la surface de météorites ferreuses. En traversant l'atmosphère, ces météorites fondent en surface, et le frottement de l'air produit ces formes. |
| **régolithe** | Fine couche de poussière à la surface d'objets sans atmosphère, soumis directement au bombardement par les micrométéorites et par les particules du vent solaire. Ceci brise de minuscules fragments de roche, et forme, au fil des milliards d'années, une poussière à laquelle on a donné ce nom. Le régolithe a été étudié sur la Lune grâce aux échantillons rapportés par les missions Apollo ou par le robot Lunakhod. |
| **REL** | Voir : Résonance externe de Lindblad. |
| **relation de Faber-Jackson** | Relation analogue de la relation de Tully-Fisher, pour les galaxies elliptiques. Elle permet d'évaluer leur distance. Voir : relation de Tully-Fisher. |
| **relation de Karlsson** | Karlsson a montré en 1971 que les décalages spectraux des galaxies ne sont pas quelconques, mais se groupent par paquets, satisfaisant une relation simple. Cette relation n'a pas d'explication théorique actuellement. |
| **relation de Tully-Fisher** | Indicateur de distance pour les galaxies, reliant la luminosité absolue d'une galaxie à sa vitesse de rotation (mesurable par décalage des raies spectrales). |
| **relation masse-luminosité** | Relation observée, et justifiée théoriquement, entre la masse et la luminosité des étoiles de la Séquence Principale. Il y a en fait deux relations, adaptées aux étoiles de masse inférieure ou supérieure à celle du Soleil, dues à la prédominance de l'un ou l'autre cycle de fusion de l'hydrogène. |
| **relation période-luminosité** | Relation indiquant que la luminosité des Céphéides augmente avec leur période : les plus lentes sont les plus lumineuses. La période étant facile à observer, cette relation permet de déterminer la distance de l'étoile ; elle est à la base des mesures dans l'Univers |
| **relativiste** | Adjectif qualifiant la vitesse de propagation d'une particule. Celle-ci est dite *relativiste* si sa vitesse est grande devant celle de la lumière, *non relativiste* dans le cas contraire. De nombreux phénomènes physiques dépendent de cette caractéristique, par exemple l'équation d'état d'un gaz dégénéré. |
| **relativité galiléenne** | Galilée à imaginé le premier principe de relativité qui porte son nom. C'est l'invariance des lois de la physique pour des observateurs en mouvement de translation uniforme l'un par rapport à l'autre. Sa physique était limitée aux faibles vitesses. |
| **Relativité Générale** | Seconde théorie d'Einstein, qui tient compte des champs de gravitation et des accélérations. Confirmée tout d'abord par l'observation de l'éclipse totale de Soleil de 1919, puis par de multiples expériences depuis, elle sert de base à la Cosmologie. |
| **Relativité Restreinte** | Première théorie d'Einstein. Elle décrit comment divers observateurs, en mouvement rectiligne uniforme l'un par rapport à l'autre, peuvent échanger leur connaissances physiques. |
| **rémanence** | A propos des sursauts gamma, la rémanence est l'ensemble des rayonnements X et visibles présents après l'extinction des rayons gamma eux-mêmes. Ils ont permi de déterminer le décalage spectral des sursauts. |
| **réseau *ou* réseau de diffraction** | Morceau de verre optique dont une surface est rayée de traits parallèles, également écartés. Le réseau est préféré au prisme pour obtenir un spectre. |
| **réseau interplanétaire** | Réseau de sondes spatiales en orbite autour du Soleil, de la Terre ou de Vénus, qui possédaient des détecteurs de rayons gamma, et qui ont permi les premières découvertes sur les sursauts gamma. |
| **résonance** | Amplification d'une perturbation par action répétitive. Modifie les orbites des petites planètes et de certains satellites. |
| **Résonance Externe de Lindblad** | Zone annulaire extérieure autour du centre d'une galaxie spirale, où les étoiles effectuent un nombre entier de boucles, vues d'une étoile en corotation. |
| **Résonance Interne de Lindblad** | Zone annulaire intérieure autour du centre d'une galaxie spirale, où les étoiles effectuent un nombre entier de boucles, vues d'une étoile en corotation. |
| **reste de supernova** | Nébuleuse produite par l'explosion de la supernova, qui a projeté dans l'espace l'enveloppe de l'étoile. |
| **reticulum** | Mot latin, pluriel *reticula*. Dénomination d'une structure géologique dans le système solaire, signifiant "structure réticulée (comme couverte d'un filet) sur Vénus". Voir aussi : *liste des formations géologiques*. |
| **rétrogradation** | Mouvement apparent (toutes les planètes ont un mouvement réel direct) d'une planète en sens inverse sur le ciel, résultant du mouvement combiné de la planète et de la Terre. Voir aussi : *animation*. |
| **rétrograde** | Mouvement en sens inverse du sens direct. Le sens direct est le sens trigonométrique, lorsqu'on l'observe depuis le nord. |
| **révolution draconitique** | Révolution de la Lune mesurée entre deux passages successifs de celle-ci au nœud ascendant de son orbite. Cette notion est importante pour la prévision des éclipses. |
| **révolution sidérale** | Révolution d'un astre autour d'un autre (ou de leur foyer commun), repéré par rapport aux étoiles lointaines, réputées fixes. La révolution sidérale de la Terre se fait en 23 h 56 mn 4 s. |

| | |
|---|---|
| **révolution synodique** | Temps qui s'écoule entre deux nouvelles Lunes. Voir aussi : *révolution synodique*. |
| **Rhéa** | (mythologie grecque : femme de Chronos, mère de Zeus) Satellite de Saturne n° V, de 1 529 km de diamètre, orbitant à 527 040 km de la planète dans le sens direct, en 4 j 12 h 25 mn. Découvert par J.D. Cassini en 1672. Second satellite de Saturne par la taille, sa densité indique qu'il doit être composé à 75 % de glace d'eau pour 25 % de roches. |
| **Riemann** | (Bernhard, 17/09/1826-20/07/1866) Mathématicien allemand, qui a jeté les bases de la géométrie différentielle, sur laquelle repose la Relativité Générale. Il a aussi développé la théorie des fonctions d'une variable complexe, l'intégrale qui porte son nom, etc. |
| **Ries** | Cratère d'impact terrestre en Allemagne, il a été creusé il y a 14,7 millions d'années, et c'est le plus jeune cratère d'impact en Europe. Les sédiments impactés ont été transformés en une roche caractéristique du lieu, la suévite. |
| **RIL** | Voir : Résonance Interne de Lindblad. |
| **rima** | Mot latin, pluriel *rimæ*. Dénomination d'une structure géologique dans le système solaire, signifiant "sur la lune, fissure". Voir aussi : *liste des formations géologiques*. |
| **Ritchey-Chrétien** | Type de télescope nommé d'après les deux opticiens qui l'ont conçu. Il associe deux miroirs hyperboliques, et limite la coma au 5$^{e}$ ordre. La difficulté de réalisation de ces miroirs limite beaucoup l'utilisation de cette formule par les amateurs. |
| **Rochechouart** | Ville du Limousin, entre Angoulème et Limoges. Il s'y trouve les restes d'un grand cratère d'impact, qui mesurait à l'origine 200 km de diamètre. Il date de 215 MA, comme celui de Manicouagan. Or à l'époque, ces deux régions se trouvaient à la même latitude (tectonique). On pense donc qu'il s'agit d'un impact multiple. Un autre cratère de 300 km de diamètre serait centré sur Bizeneuille (ville à côté de Montluçon), mais il n'est visible que sur les images satellite. Voir : Manicouagan. |
| **roches archéennes** | Plus anciennes roches connues sur Terre. Ce sont forcément des roches continentales (plus légères). Les plus vieilles sont datées de 4,031 Ga (gneiss d'Acasta, Canada). |
| **roches magmatiques** | Ou *roches endogènes*. Elles proviennent de la cristallisation d'un magma. Lorsque leur cristallisation se fait en profondeur, lentement, ce sont les roches plutoniques. Lorsqu'elle se fait en surface, et rapidement, ce sont les roches effusives, ou volcaniques. |
| **roches métamorphiques** | Roche d'origine magmatique ou sédimentaire, transportée en profondeur par la tectonique, et remaniée par la pression et la chaleur. La recristallisation sous forme de minéraux différents se fait en phase solide. Les cristaux à structure allongée se forment perpendiculairement à la pression, donnant souvent un aspect feuilleté à la roche (micachistes, gneiss). |
| **roches sédimentaires** | Roches produites par l'altération et l'érosion d'autres roches préexistantes. Les produits d'altération sont des grains ou des solutions. Ils doivent se déposer et se consolider. On distingue les roches détritiques (grains) et les roches chimiques (dépôts de solutions). |
| **Rodinia** | Supercontinent qui s'est formé vers 1,1 Ga et s'est brisé vers 900 Ma. |
| **Rosalinde** | (mythologie : naïade, fille de Zeus) Satellite d'Uranus n° XIII, de 72 km approximativement, orbitant à 69 900 km de la planète dans le sens direct, en 13 h 24 mn. Découvert par Synnott en 1986. |
| **Rosetta** | Sonde envoyée par l'ESA, à destination de la comète Churyumov-Gerasimenko. Lancée le 2 mars 2004, elle doit atteindre la comète en mai 2014. Elle se mettra en orbite autour du noyau, pour suivre le réveil de la comète à l'approche du Soleil. Elle apporte l'atterrisseur Philae, qui doit analyser la surface du noyau. |
| **rotation différentielle** | Rotation d'un fluide à la surface d'un astre, dont la vitesse dépend de la latitude. Elle est observée dans les atmosphères du Soleil et des planètes géantes. |
| **rotation rigide** | On dit aussi *rotation à la manière d'un solide*. C'est la rotation d'un ensemble d'étoiles toutes à la même vitesse angulaire, quelle que soit leur distance au centre. Tout se passe comme si elles étaient liées de manière rigide les unes aux autres. Elle se produit dans le bulbe des galaxies spirales. |
| **rotation sidérale** | Synonyme de révolution sidérale. |
| **rotation synchrone** | Rotation d'un satellite sur lui-même, dans le même temps que sa révolution autour de la planète. Il présente ainsi à la planète toujours la même face. C'est le cas de la Lune pour la Terre. |
| **rotation synodique** | Synonyme de révolution synodique. |
| **rouge à polir** | Nom donné par les opticiens à un oxyde de fer produit par calcination de l'oxalate ferreux. La poudre abrasive obtenue est très fine, et permet de terminer le polissage d'une surface optique. |
| **rougissement** | Voir : rougissement interstellaire. |
| **rougissement interstellaire** | Absorption de la lumière des étoiles par le milieu interstellaire, qui est inversement porportionnelle à la longueur d'onde. Le bleu est ainsi deux fois plus absorbé que le rouge, et de ce fait les astres paraissent plus rouges qu'ils ne sont vraiment. |
| **RR Lyræ** | Type d'étoiles variables périodiques, semblables aux Céphéides, et servant également d'indicateurs de distances. |
| **rubble pile** | Voir : tas de gravas. |
| **rupes** | Mot latin. Dénomination d'une structure géologique dans le système solaire, signifiant "escarpement". Voir aussi : *liste des formations géologiques*. |
| **RR Lyrae** | Etoile variable pulsante, comme les Céphéides et les W Virginis, mais de population II. Leur période ne dépasse guère 1 jour. Moins brillantes que les Céphéides, ce sont de piètres indicateurs de distance. |

| | |
|---|---|
| **Sacajawea Patera** | Grande caldeira vénusienne, située sur Lakshmi Planum près du pôle nord. Elliptique, de 120 x 215 km, elle est profonde de 2.000 m |
| **sagduction** | Mécanisme tectonique, consistant en un transport vertical : une roche ultrabasique très dense (komatiite) se dépose sur la croûte continentale de densité bien plus faible, qui cède sous le poids. La roche dense s'enfonce alors verticalement. |
| **Sagittarius A*** | Radiosource intense qui se situe au centre de la Voie Lactée. De la matière provenant d'un nuage doit tomber sur elle. Elle correspond à un tour noir de 2,6 millions de masses solaires. |
| **Sao** | (mythologie grecque : une des Néréides, fille de Néreus et Doris) Satellite de Neptune n° XI, de 38 km approximativement, orbitant à 22 422 000 km de la planète dans le sens direct, en 7 ans 357 j. Découvert par Holman en 2002. |
| **Sapas Mons** | Grand volcan vénusien situé dans la partie Est d'Aphrodite Terra. |
| **Saros** | Période de 18 ans qui voit le retour des éclipses de Lune et de Soleil presque aux mêmes instants, mais en des lieux différents de la Terre. |
| **satellite** | Objet tournant autour d'une planète, ou même autour d'un autre satellite (dans ce cas, il n'en existe pas de naturel connu). |
| **Saturne** | Sixième planète du Soleil. Diamètre : 120.536 km, distance au Soleil : 1.426,725 millions de km, année : 29 ans 154,69 jours. Seconde planète gazeuse, Saturne se distingue par ses magnifiques anneaux. Elle présente des phénomènes atmosphériques complexes comme Jupiter. On y observe des aurores polaires. |
| **Schmidt** | • (Bernhardt, 11/04/1879 - 01/12/1935) Opticien américain, qui s'est intéressé aux télescopes à grand champ.<br>• Montage de télescope imaginé par Bernhardt Schmidt, adapté à la photographie. Miroir principal sphérique, associé à une lame de fermeture en verre, plane à l'extérieur, et dont la face interne est de forme complexe. |
| **scintillateur** | Cristal transparent dopé par des substances organiques. Lorsqu'il est traversé par une particule ou un rayon gamma, il émet un photon (scintillation). Un photomultiplicateur placé derrière amplifie ce photon en un signal utilisable par une électronique standard. Ce système permet de compter les particules ou les photons gamma. |
| **scintillement** | Variations très rapide d'éclat des étoiles dues à la réfraction à travers une atmosphère perturbée. |
| **scopulus** | Mot latin. Dénomination d'une structure géologique dans le système solaire, signifiant "escarpement irrégulier". Voir aussi : *liste des formations géologiques*. |
| **seconde d'arc** | Unité de mesure d'angle, notée " ; la minute d'arc est divisée en 60". |
| **seconde de temps** | Unité de temps, notée s ; la minute de temps est divisée en 60 s. |
| **Sedna** | (mythologie inuit : divinité de la mer, qui vivait dans le fond de l'Océan Glacial) Candidate planète naine de 995 km de diamètre, désignation provisoire 2003 VB12, orbitant à 506 UA du Soleil, en 10500 ans. Découverte par Trujillo en 2003. Objet épars de la ceinture de Kuiper, Sedna est composé de glaces d'eau, de méthane et d'azote. Sa surface est couverte de tholins qui lui confèrent une couleur plus rouge que les autres astéroïdes. Voir : ceinture de kuiper. |
| **seeing** | Pouvoir séparateur réel qu'un instrument pourrait atteindre en fonction des turbulences atmosphériques. Voir aussi : *animation*. |
| **Sélênê** | Nom grec de la Lune. Il forme l'adjectif sélénocentrique (*centré sur la Lune*). Il a également donné le nom *sélénium* pour un élément chimique voisin du tellure (de *Tellus*, Terre), et trouvé en association. Les noms rappellent donc cette association. |
| **semaine** | La semaine correspond historiquement à une phase de la Lune. Les noms des jours proviennent des planètes auxquelles ils étaient dédiés. Voir aussi : *noms des jours*. |
| **semi-attachée** | Etoile double dont les deux membres sont très proches l'un de l'autre, presque au contact. |
| **Séquence Principale** | Ligne en forme de S couché, qui montre dans un diagramme HR où se trouvent les étoiles qui fusionnent l'hydrogène en hélium. Le Soleil est sur la Séquence Principale. Elle est dite principale parce que la fusion de l'hydrogène dure beaucoup plus longtemps que celle des éléments plus lourds. L'étoile passe donc beaucoup plus de temps sur cette partie du diagramme que dans les autres (excepté la zone des naines blanches). |
| **série** | En mathématique, somme d'une infinité de termes. Par exemple, 1 + 1/2 + 1/4 + 1/8.... vaut exactement 2. Outil très utilisé lorsqu'il n'est pas possible de trouver une formule pour représenter un phénomène. Il n'existe pas toujours de valeur finie pour une série : 1 + 1/2 + 1/3 + 1/4 + 1/5... (série harmonique) est une somme infinie. On dit qu'une série *converge* si elle donne une valeur finie. |
| **série de Balmer** | Série visible de raies de l'atome d'hydrogène. Elles correspondent à la transition vers, ou à partir du, niveau 2. La première raie (2 → 3 en absorption, 3 → 2 en émission) est la raie Hα qui colore les régions HII. |
| **série de Bracket** | Série infra-rouge de raies de l'atome d'hydrogène. Elles correspondent à la transition vers, ou à partir du, niveau 3. La première raie est la transition 3 → 4 en absorption, ou 4 → 3 en émission. Elle ne porte pas de nom particulier. Voir aussi : *séries de raies*. |
| **série de Lyman** | Série ultraviolette de raies de l'atome d'hydrogène. Elles correspondent à la transition vers, ou à partir du, niveau 1. La première raie (1 → 2 en absorption, 2 → 1 en émission) est la raie Lyman α. Voir aussi : *séries de raies*. |
| **série de Paschen** | Série infra-rouge de raies de l'atome d'hydrogène. Elles correspondent à la transition vers, ou à partir du, niveau 4. La première raie est la transition 4 → 5 en absorption, ou 5 → 4 en émission. Elle ne porte pas de nom particulier. |

| | |
|---|---|
| **série de Pfund** | Série infra-rouge de raies de l'atome d'hydrogène. Elles correspondent à la transition vers, ou à partir du, niveau 5. La première raie est la transition 5 → 6 en absorption, ou 6 → 5 en émission. Elle ne porte pas de nom particulier. Voir aussi : *séries de raies*. |
| **Setebos** | (mythologie : personnage de Shakespeare) Satellite d'Uranus n° XIX, de 480 km approximativement, orbitant à 17 418 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 6 ans 34 j. Découvert par Kavelaars en 1999. |
| **SGR** | ***S**oft **G**amma **R**epeater*, en français *sursauteur gamma*. Source transitoire de rayons gamma, d'intensité très élevée, et présentant des répétitions. |
| **Sgr A*** | Radiosource puissante qui se trouve au centre de la Voie Lactée. Elle tire son énergie de la matière en chute sur le trou noir qui occupe le centre de la Galaxie. |
| **shatter cone** | Roche produite par un impact météoritique, qui prend une forme en cône. |
| **Shergotty** | Météorite tombée le 25 août 1865 près de Shergotty en Inde. Seul un fragment de 5 kg a été récupéré. Il s'agit d'une météorite martienne composée essentiellement de pyroxène et de plagioclase. Voir : Chassigny, Nakhla, SNC. |
| **Siarnaq** | (mythologie inuit : déesse qui engendra la mer, son nom est équivalent à Sedna) Satellite de Saturne n° XXIX, de 32 km approximativement, orbitant à 18 200 000 km de la planète dans le sens direct, en 2 ans 182 j 15 h. Découvert par Gladman en 2000. |
| **Sidérikien** | Troisième et dernière ère géologique dans l'actuelle classification martienne. Elle est caractérisée par l'oxydation du fer en surface, et s'étend de 3,5 milliards d'années à nos jours. Voir : Theiikien, Phyllosien. |
| **sidérite** | Météorite composée presque exclusivement de fer avec un peu de nickel, provenant du noyau d'une petite planète formée juste après le Soleil, et détruite par un choc avec une autre. Voir aussi : *sidérite*. |
| **sidérolithe** | Météorite, formée d'un mélange de fer-nickel et de silicates, provenant du manteau d'une petite planète formée, différenciée, puis détruite par un choc. |
| **sidérostat** | Accessoire optique permettant de diriger le faisceau lumineux issu d'un astre vers une direction fixe. |
| **Sigma** | ***S**ystème d'**I**magerie **G**amma à **M**asque **A**léatoire*. Premier instrument gamma utilisant un masque codé, embarqué à bord d'un satellite. Il a montré que l'on pouvait ainsi déterminer précisément la position d'une source à l'aide d'une seule sonde. Voir : Beppo-SAX. |
| **Sikhote-Alin** | Météorite tombée le 12 février 1947 en Sibérie, ayant produit une trainée lumineuse plus brillante que le soleil. La météorite a explosé à 10 km d'altitude, et produit une pluie de fer sur 10 $km^2$. |
| **silicates** | Composés chimiques à base de silicium ; ils sont très abondants sur Terre, et constituent le noyau des grains interstellaires. |
| **simultanéité** | En physique classique, la simultanéité de deux événements est absolue, par le fait que le temps lui-même est absolu. En Relativité, le temps dépend de l'observateur, et deux événements simultanés pour l'un ne le sont pas pour un autre. |
| **singularité** | Terme mathématique désignant une valeur pour laquelle une fonction prend une valeur infinie. Par exemple, 1/x tend vers l'infini quand x tend vers 0. Le point 0 est un point singulier pour cette fonction. |
| **Sinopé** | (mythologie grecque : nymphe, fille d'Asopos et de Métope, convoitée par Zeus) Satellite de Jupiter n° IX, de 36 km approximativement, orbitant à 23 700 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 758 j. Découvert par Nicholson en 1914. Groupe d'Ananké |
| **sinus** | Mot latin (*pli* ou *creux*). Dénomination d'une structure géologique dans le système solaire, signifiant "baie ou petite plaine". Voir aussi : *liste des formations géologiques*. |
| **Sirius** | Etoile la plus brillante de la constellation du Grand Chien, et aussi de tout le ciel. Le mouvement perturbé de Sirius a permi la découverte de la première naine blanche connue, nommée Sirius b, avec laquelle elle forme un couple stellaire. |
| **Sirius B** | Naine blanche, en orbite avec Sirius et nommée d'après elle, première découverte. Sa luminosité très faible devant celle de Sirius demande des moyens observationnels puissants. |
| **Skathi** | (mythologie scandinave : géante, femme du dieu Niord) Satellite de Saturne n° XXVII, de 8 km approximativement, orbitant à 15 600 000 km de la planète dans le sens direct, en 2 ans. Découvert par Gladman en 2000. Il a été orthographié initialement en Skadi. |
| **Skoll** | (mythologie scandinave : loup géant, fils de Fenrir et frère de Hati) Satellite de Saturne n° XLVII, de 15 km approximativement, orbitant à 17 670 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 2 ans 147 j. Découvert par Sheppard en 2006. |
| **SN** | Abbréviation pour *Super Nova*. Ce sigle sert pour construire des noms, par exemple SN 1987 a. |
| **SN I** | Super Nova de type I. Classe subdivisée en SN Ia et SN Ib. Les SN Ia sont des étoiles massives qui explosent d'elle-même en fin de vie, les SN Ib sont des naines blanches qui captent de la matière d'un compagnon, et dépassent la limite de Chandrasekhar. |
| **SN II** | Super Nova de type II, présentant des raies de l'hydrogène dans son spectre. |
| **SNC** | Abbréviation de Shergotty-Nakhla-Chassigny, lieux où sont tombées des météorites originaires de Mars. Voir : Shergotty, Nakhla, Chassigny. |
| **SNR** | SuperNova Remnant. Voir : Reste de supernova. |
| **SOHO** | ***SO**lar and **H**eliospheric **O**bservatory* (NASA et ESA), satellite qui observe le Soleil en permanence. |
| **Soleil** | Etoile la plus proche de la Terre... |
| | Présence du Soleil dans le ciel pendant 24 heures consécutives au moins (le Soleil ne se couche donc pas pendant ce qui |

| | |
|---|---|
| **Soleil de minuit** | devrait être une nuit au moins). Ce phénomène se produit près des pôles, au-delà des cercles polaires. Il est lié à l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre sur l'écliptique. |
| **solstice** | Les deux points de son orbite apparente où le Soleil est le plus loin de l'équateur ; *solstice d'été* au nord, *solstice d'hiver* au sud. Les solstices correspondent à la nuit la plus courte (été) ou la plus longue (hiver). Voir aussi : *solstice*. |
| **Sothis** | Nom égyptien de l'étoile Sirius. La réapparition de celle-ci après son passage derrière le soleil, correspondait à la crue du Nil, d'importance capitale en Egypte. C'est sans doute ce qui a amené les Egyptiens à faire le choix d'un calendrier solaire. |
| **sous-détermination** | Se dit d'une théorie physique dont les appuis observationnels ou expérimentaux ne suffisent pas pour déterminer toutes les caractéristiques. Une théorie sous-déterminée laisse envisager l'existence d'autres théories, tout aussi adaptées à décrire les phénomènes. |
| **sous-géante** | Etoile qui vient d'épuiser son hydrogène central, et qui s'éloigne de la Séquence Principale. Son diamètre commence à augmenter, mais elle n'est pas encore devenu une vraie géante. |
| **sous-naine** | Etoile qui se situe sous la Séquence Principale dans le diagramme HR. |
| **spationaute** | Terme français désignant une personne ayant fait un voyage dans l'espace. Les termes correspondants sont : astronaute (américain), cosmonaute (russe), taïkonaute (chinois). |
| **speckle** | mot anglais. Voir : tavelure. |
| **speckle interferometry** | Voir : interférométrie des tavelures. |
| **spectre** | Répartition des ondes électromagnétiques en fonction de leur énergie. |
| **spectre du Brocken** | Image fantomatique démesurée, qu'on observe parfois du sommet de certaines montagnes. Etant au sommet, ayant le soleil dans le dos, et une nappe de brouillard devant, notre ombre se projette sur la brume, et se trouve agrandie dans la proportion de la distance. Le spectre est parfois agrémenté d'une gloire. Ce phénomène est très localisé : chacun voit son propre spectre. |
| **spectre éclair** | Spectre de la chromosphère du Soleil que l'on prend, lors d'une éclipse, à l'instant où la Lune couvre la totalité de la photosphère, mais pas encore la chromosphère. Celle-ci apparaît comme un fin croissant qui émet en lumière rouge Hα. |
| **spectre solaire** | Analyse de la lumière du Soleil, montrant les raies d'absorption. Il a permis de faire l'analyse qualitative et quantitative de l'atmosphère du Soleil. |
| **spectrographe** | Instrument d'optique permettant de photographier le spectre d'un astre, et de mesurer éventuellement son décalage spectral. |
| **spectroscope** | Instrument d'optique permettant de visualiser le spectre d'un astre. |
| **spectroscopie** | Technique d'analyse des ondes électromagnétiques à partir du spectre. |
| **sphère armillaire** | Instrument explicatif, permettant de représenter les mouvements des astres. Le lien ci-contre donne une description détaillée, ainsi que des plans de montage. |
| **sphère céleste** | Aspect immédiat du ciel, qui donne l'illusion d'une sphère centrée sur l'observateur. Il n'y aurait donc pas une, mais autant de sphères célestes que de points de vue. Cette illusion tient à l'absence de profondeur.Tous les astres semblent à la même distance. |
| **sphère de Strömgren** | Région HII sphérique entourant une jeune étoile massive, de type O ou B. Quelquefois, la sphère contient plusieurs étoiles formant une association O ou B. L'excitation est produite par le rayonnement ultraviolet de l'étoile, qui s'épuise dans la nébuleuse. Le rayonnement cesse à une distance fonction de la densité de matière absorbante, distance identique dans toutes les directions, ce qui donne la forme sphérique. |
| **sphéromètre** | Appareil permettant de mesurer, pendant l'ébauchage d'un miroir de télescope, la courbure de la portion de sphère en cours de taille. La distance focale est le double de cette courbure. |
| **spicule** | Petits jets de gaz (un millier de km), s'élevant de la photosphère du Soleil, sous l'influence des champs magnétiques locaux. |
| **spin** | Nombre quantique, qui correspond à un mouvement de rotation d'une particule élémentaire. |
| **spirale** | Voir : galaxie spirale. |
| **spirale barrée** | Voir : galaxie spirale barrée. |
| **Spirit** | Rover américain à 6 roues déposé sur Mars le 3 janvier 2004, dans le cratère Gusev. C'est l'un des deux *MER* (Mars Exploration Rover), l'autre étant Opportunity. Il n'émet plus depuis le 22 mars 2010. Le but de cette sonde était la géologie martienne, et particulièrement la recherche de traces d'eau, présente ou surtout passée. Distance parcourue : 7,730 km. |
| **Spondé** | (mythologie grecque : une des Heures (divinités des saisons) fille de Zeus) Satellite de Jupiter n° XXXVI, de 2 km approximativement, orbitant à 23 487 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 2 ans 18 j. Découvert par Scott en 2001. Groupe d'Ananké |
| **Spörer** | Voir : minimum de Spörer. |
| **Stardust** | *Poussière d'étoile*. Sonde spatiale envoyée vers la comète Wild2, pour capturer des poussières provenant de la queue. Une capsule les contenant a été récupérée en janvier 2006. |
| **Stefan-Boltzmann** | Loi de Stefan-Boltzmann. L'énergie rayonnée par un corps noir, par unité de temps et de surface, est proportionnelle à la quatrième puissance de la température : $\mathbf{E = \sigma T^4}$. |

| | |
|---|---|
| **Steins** | (Steins était un astronome soviétique) Astéroïde de dimensions : 5,9×4 km, désignation provisoire 1969 VC, orbitant à 2 UA du Soleil, en 3,63 ans. Découverte par Tchemyk en 1969. Objet de la ceinture principale, Steins est de classe E (rare). Il a une forme caractéristique de diamant, et a été survolé par la sonde Rosetta. |
| **sténopée** | Dans une chambre noire, petit trou par lequel la lumière passe, pour aller former une image. |
| **Stéphan** | (Edouard, 30/08/1837-30/12/1923) Astronome, directeur de l'observatoire de Marseille, ayant effectué la première observation d'interférométrie astronomique. Le télescope de Foucault ne lui a pas permis de mesurer le diamètre d'une étoile, mais il a montré qu'elles étaient plus petites que 0,158", ce qui était un premier résultat. Il a découvert le "quintette de galaxies" qui porte son nom. Il a observé pour la première fois une raie jaune de l'hélium. |
| **Stephano** | (mythologie : personnage de Shakespeare) Satellite d'Uranus n° XX, de 32 km approximativement, orbitant à 8 004 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 1 an 312 j. Découvert par Gladman en 1999. |
| **stéréocomparateur** | Dispositif optique permettant d'animer deux photographies du ciel, prises à des instants différents. Si un objet s'est déplacé entre les deux photos, il apparaît en sautillant d'une position à l'autre. Voir aussi : *Animation*. |
| **Stevns Klint** | Falaises du Danemark, qui montrent la limite Crétacé-Tertiaire, époque de la disparition des dinosaures, et de bien d'autres espèces vivantes. Une mince couche d'argile y présente un excès notable d'iridium, preuve probable de la chute d'une grosse météorite. |
| **stishovite** | Quartz modifié par un choc violent, caractéristique des cratères d'impact. Associée à la coésite. |
| **stochastique** | Voir : filamenteuse. |
| **stratopause** | Limite supérieure de la stratosphère, au-dessous de la mésosphère. Le terme 'pause' désigne une limite. |
| **stratosphère** | Couche de l'atmosphère terrestre située approximativement entre 10 et 50 km d'altitude. La température augmente avec l'altitude. Elle est limitée par la tropopause en-dessous, et la stratopause au-dessus. |
| **stromatolithe** | Construction calcaire faite par des cyanobactéries. |
| **structure précédente** | Structure d'une galaxie spirale dans laquelle les étoiles, dans leur mouvement autour du centre, entrent dans les bras spiraux par leur côté concave. |
| **structure traînante** | Structure d'une galaxie spirale dont les étoiles, dans leur mouvement autour du centre, entrent dans les bras spiraux par leur côté convexe. |
| **Styx** | (mythologie grecque : Océanide, qui personnifie le fleuve des Enfers) Satellite de Pluton n° V, de dimensions 10 à 25 km, orbitant à 45 000 km de la planète dans le sens direct, en 20 j 4 h 48 mn. Découvert par HST en 2012. |
| **Subaru** | Télescope japonais, installé au sommet du Mauna Kea (4.139 m). Miroir monolithique de 8,20 m de diamètre, type Ritchey-Chrétien, opérationnel en 1998. C'est l'un des plus grands télescopes optiques actuels, dans le visible et l'IR proche. Il permet l'utilisation d'une caméra de 80 Mpixels au foyer primaire. |
| **subduction** | Enfoncement de la croûte océanique lourde sous la croûte continentale plus légère. Elle est produite par le déplacement des plaques. |
| **sulcus** | Mot latin, pluriel *sulci*. Dénomination d'une structure géologique dans le système solaire, signifiant "sillons et crêtes parallèles, comme des plis sur un tapis". Voir aussi : *liste des formations géologiques*. |
| **Super-Amas Local** | Super amas de galaxies, dont fait partie l'Amas Local. Il totalise quelques 10.000 galaxies. L'amas de la Vierge en fait également partie. |
| **superamas** | Vastes ensembles de galaxies comprenant les amas et les filaments qui les relient. Ils constituent à très grande échelle, une structure en bulles de savon de l'Univers. |
| **supercontinent** | Le déplacement des plaques tectoniques à la surface de la Terre implique que les plaques entrent en collision. Elles forment alors un complexe plus grand. Ainsi se sont formés des supercontinents qui regroupaient la totalité des terres émergées. |
| **supergéante** | Etoile fusionnant un élément plus lourd que l'hélium, et dont le diamètre est encore plus grand que celui d'une géante. |
| **supergranulation** | Structures à la surface du Soleil, dont la taille est de l'ordre de 30.000 km et la durée de vie de 24 heures. La supergranulation est un niveau de convection à plus grande échelle que la granulation. |
| **supérieure** | Se dit d'une planète dont l'orbite contient de celle de la Terre. *Supérieure* signifie plus loin du Soleil. Par opposition, les planètes dont l'orbite est contenue dans celle de la Terre (plus proches du Soleil) sont dites *planètes inférieures*. |
| **superluminique** | Plus rapide que la lumière ! Il s'agit d'une apparence, produite par un objet se déplaçant à une vitesse proche de celle de la lumière, et vu sous un angle faible depuis la Terre. Voir aussi : *vitesse superluminique*. |
| **supernova** | Une supernova est la manifestation d'un phénomène particulièrement violent dans une étoile. L'étoile peut être détruite. |
| **supersymétrie** | Les particules élémentaires connues sont séparées en deux familles : fermions et bosons. Dans le modèle standard, il n'y a pas de transformation de l'une dans l'autre. La supersymétrie suppose une telle transformation de bosons en fermions, et réciproquement. Elle nécessite l'existence de nombreuses particules encore non observées, et n'a donc pas actuellement de support expérimental. |
| **surface de dernière diffusion** | 380.000 ans après le Big Bang, la température de l'Univers serait tombée en-dessous de 3.000 K. La matière devenant transparente, les photons peuvent nous parvenir. Il donnent un aspect semblable à la surface apparente d'un nuage. |
| **surface de Roche** | Surface équipotentielle, lieu des points autour d'un couple d'étoiles, où l'attraction due à l'une équilibre exactement la gravité due à l'autre. |
| **sursaut gamma** | Flash de lumière gamma, émis aléatoirement dans l'Univers. Les phénomènes qui les produisent sont les plus énergétiques connus à ce jour. |

| | |
|---|---|
| **sursauteur gamma** | Voir : SGR. |
| **Surtur** | (mythologie scandinave : chef des géants de feu) Satellite de Saturne n° XLVIII, de 6 km approximativement, orbitant à 22 710 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 3 ans 202 j. Découvert par Sheppard en 2006. |
| **Suttungr** | (mythologie scandinave : géant qui possède l'hydromel donnant la sagesse. Il en fit boire à Odin.) Satellite de Saturne n° XXIII, de 6 km approximativement, orbitant à 19 460 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 2 j 19 h 12 mn. Découvert par Gladman en 2000. |
| **Sycorax** | (mythologie : personnage de Shakespeare) Satellite d'Uranus n° XVII, de 150 km approximativement, orbitant à 12 180 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 3 ans 193 j. Découvert par Nicholson en 1997. Probablement un astéroïde capturé par Uranus. |
| **Sylvia** | (mythologie romaine : Sylvia était une vestale à laquelle Mars, en rêve, a donné deux jumeaux : Romulus et Rémus, futurs fondateurs de Rome) Astéroïde de dimensions : 384×264×232 km, désignation provisoire A909 GA, orbitant à 3 UA du Soleil, en 6,521 ans. Découverte par Pogson en 1866. Objet de la ceinture principale, Sylvia possède deux satellites, naturellement nommés Romulus et Rémus. |
| **symétrie** | Opération mathématique qui s'applique à une fonction dépendant d'une variable. Si en changeant le signe de cette variable, la valeur de la fonction ne change pas, on dit que la fonction est symétrique par rapport à ce changement. De nombreuses symétries existent en physique (parité, inversion du temps, conjugaison de charge), et jouent un rôle fondamental. Voir aussi : *théorie des cordes*. |
| **synchrotron** | *Rayonnement synchrotron*. Rayonnement électromagnétique produit par des électrons accélérés, découvert dans un accélérateur de particules portant ce nom. |
| **synodique** | Voir : Révolution synodique. |
| **synthèse d'ouverture** | Méthode combinant deux télescopes (ou radiotélescopes) dont on peut faire varier la distance. L'analyse des interférences produites permet de reconstruire une image dont la finesse dépend de la distance entre les deux télescopes. |
| **système copernicien** | Système de description du monde héliocentrique. Le Soleil est au centre, et toutes les planètes lui tournent autour. La Lune tourne autour de la Terre. Bien que déjà imaginé par Aristarque, mais perdu, il a constitué une révolution dans les méthodes de pensée de son temps, et marqué une rupture avec la physique d'Aristote. |
| **système hydrothermal** | Complexe physico-chimique, produit par la remontée d'eau chaude chauffée par le magma, et entraînant de nombreux ions en solution (métaux en particulier). Ce milieu est très actif chimiquement, et produit des composés nécessaires à la vie. |
| **système tychonien** | Système du monde, défini par Tycho Brahé, intermédiaire entre le géocentrisme et l'héliocentrisme : le Soleil et la Lune tournent autour de la Terre, mais les planètes tournent autour du Soleil. Il avait l'avantage de ménager l'enseignement de l'Eglise, et a été enseigné à ce titre à la place du système copernicien. |
| **syzygie** | Terme générique désignant la pleine Lune ou la nouvelle Lune. Terre, Lune et Soleil sont alignés, dans l'un des deux ordres possibles. |

A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S **T** U V W X Y Z

| | |
|---|---|
| **T Tauri** | Etoile tout juste formée, très brillante, qui éjecte un fort vent stellaire. Le Soleil est passé par la phase T Tauri lors de sa formation. |
| **tache** | Zone de la surface du Soleil significativement moins chaude que le reste de la photosphère (4.500 K au lieu 5.700 k). Moins chaude, elle est bien moins brillante, et apparaît noire par contraste. |
| **tache de diffraction** | Tache lumineuse produite par un instrument d'optique à la place du point que l'optique géométrique prévoyait. Elle est due à un étalement de la lumière produit par les interférences au bord de l'objectif. Ce sont les propriétés ondulatoires de la lumière qui limitent ainsi le pouvoir séparateur d'un instrument selon son diamètre. La lumière ne se concentre pas seulement dans la tache de diffraction, mais aussi en partie dans des anneaux concentriques. |
| **tache froide** | Vaste zone de 10° sur le ciel, qui dans le fond diffus, est plus froide que le reste. L'interprétation cosmologique de cette zone est difficile, à cause de ses dimensions extrêmes. Voir : fond diffus cosmologique. |
| **tache solaire** | Zone plus sombre de la photosphère solaire, de température plus basse. Les taches sont grossièrement circulaires, et montrent un diamètre de quelques milliers à quelques dizaines de milliers de kilomètres. |
| **tachocline** | La partie centrale du Soleil est radiative, le reste convectif. La zone radiative tourne en bloc, à la manière d'un solide ; la zone convective présente une rotation différentielle. La *tachocline* est la couche fine qui limite ces deux zones. Elle se trouve approximativement à 200.000 km sous la photosphère. Elle est le siège de violents cisaillements de vitesse entre les deux zones. |
| **tachyon** | Les tachyons sont des particules élémentaires hypothétiques, apparaissant comme solution d'une équation de la Relativité Restreinte. Leur propriété essentielle est de se déplacer toujours plus vite que la lumière. Ils ne peuvent pas franchir cette limite de vitesse, mais en s'en tenant au-dessus. |
| **taénite** | Alliage de fer-nickel à structure cristalline cubique à faces centrées. Composant des sidérites. |
| **taïkonaute** | Terme chinois désignant une personne ayant fait un voyage dans l'espace. Les termes correspondants sont : spationaute (français), astronaute (américain), cosmonaute (russe). |
| **Tarqeq** | (mythologie inuit : dieu lunaire) Satellite de Saturne n° LII, de 7 km approximativement, orbitant à 18 010 000 km de la planète dans le sens direct, en 2 ans 157 j. Découvert par Sheppard en 2007. |

| | |
|---|---|
| **Tarvos** | (mythologie celtique : Tarvos Triganarus, Taureau aux trois grues. Dieu gallo-romain.) Satellite de Saturne n° XXI, de 13 km approximativement, orbitant à 17 980 000 km de la planète dans le sens direct, en 2 ans 182 j 15 h. Découvert par Gladman en 2000. |
| **tas de gravas** | Astéroïde formé de graviers, faiblement liés par leur faible gravité. Un tel objet n'est pas détruit par un impact, les graviers se réarrangeant par leur gravité mutuelle. |
| **tau** | Particule élémentaire ayant les mêmes caractéristiques que l'électron, mais une masse 3.500 fois plus élevée. |
| **Taux d'expansion** | Vitesse à laquelle l'Univers accroît les distances entre galaxies typiques. Le taux actuel est noté $H_0$, et sa valeur est de l'ordre de 72 km $s^{-1}$ $Mpc^{-1}$. |
| **tavelure** | Les tavelures sont les taches visibles à la surface des fruits. Par analogie, c'est le nom des taches fluctuantes que l'on obtient sur des photos d'étoiles à très courte pose. A moins d'un dixième de seconde, la photo donne des images non troublées par la turbulence. |
| **Taygète** | (mythologie grecque : une des Pléiades, fille d'Atlas et Pléione, maîtresse de Zeus) Satellite de Jupiter n° XX, de 5 km approximativement, orbitant à 23 280 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 2 ans 2 j. Découvert par Sheppard en 2000. Groupe de Carmé. |
| **tectite** | (du grec *têktos*, fondu). Petits globules de verre naturel, souvent en forme de coupe ou de goutte, de quelques millimètres à quelques centimètres. Ce sont des matériaux terrestres, fondus puis projetés par un impact météoritique. |
| **tectonique** | Du grec *Tekton*, bâtisseur. Mouvement des plaques qui constituent l'écorce terrestre, dont le moteur est la convection dans le manteau de la Terre. |
| **tectonique des plaques** | La croûte terrestre est divisée en plaques séparées, et qui glissent sur le manteau supérieur. La convection dans le manteau, alimentée par la chaleur du noyau, en est le moteur. Les plaques continentales sont ainsi recyclées en 200 millions d'années environ. Voir : dérive des continents. |
| **Teide 1** | Première naine brune découverte, en 1995 dans les Plëïades. Ses découvreurs, Maria Zapatero, Eduardo Martin, Rafael Rebolo, lui ont donné le nom du volcan sur lequel se trouve leur observatoire. |
| **télescope** | Instrument d'optique pour l'observation des astres, dont la partie essentielle (objectif) est un miroir. A partir de là, de nombreux montages de télescopes sont possibles : Newton, Schmidt, Cassegrain, Coudé. Le premier télescope construit avec un miroir de verre est le télescope de Foucault, installé à l'Observatoire de Marseille. Voir aussi : *Télescope de Foucault*. |
| **télescope de Cassegrain** | Nom du type de télescope imaginé par Laurent Cassegrain : le miroir principal parabolique est percé en son centre ; un peu en avant du foyer, un miroir secondaire hyperbolique renvoie l'image à travers le trou à l'arrière du miroir principal, où l'on place l'oculaire ou les détecteurs. Ce télescope présente une longue focale, et un petit champ. |
| **télescope de Foucault** | Premier télescope à miroir de verre, utilisé à l'Observatoire de Marseille. Avec son diamètre de 80 cm et ses qualités, il est resté 30 ans le meilleur télescope du monde. Il a servi à la première observation interférométrique, en vue de mesurer le diamètre d'une étoile. Ses successeurs ont été basés sur les mêmes principes de construction. |
| **télescope de Gregory** | Télescope à miroir principal parabolique et secondaire elliptique. Dessiné en 1663, son invention est antérieure à celle du télescope de Newton. Mais il ne fut construit qu'en 1673, cinq ans après celui de Newton. Le miroir primaire est percé. |
| **télescope de Maksutov** | Type de télescope assez semblables au Schmidt, mais la lame de fermeture est un ménisque sphérique. Beaucoup plus facile à construire qu'un Schmidt, le Maksutov a un champ un peu moins important. |
| **télescope de Newton** | Montage simple d'un télescope, dont le miroir primaire est parabolique et le secondaire plan. |
| **télescope de Schmidt** | Voir : Schmidt. |
| **télescope Hale** | Télescope de 5 m du Mont Palomar. Il est intallé en monture à berceau. Il devrait être difficile de construire un instrument plus grand sur les mêmes principes. |
| **télescope Herschel** | Télescope spatial européen, observant dans l'infrarouge. Destiné à observer les objets froids, il est orienté vers la formation des étoiles, l'évolution des galaxies. C'est le plus grand télescope spatial avec un miroir de 3,5 m de diamètre. |
| **télescope Herschell** | Télescope spatial de l'Agence Européenne **ESA**, lancé par Ariane 5 le 14 mai 2009, avec le satellite Planck. Il possède un miroir de 3,50 m, ce qui en fait le plus grand télescope spatial actuel. Observant depuis l'infrarouge lointain jusqu'au domaine millimétrique (60 à 670 µm), ses cibles sont les objets froids de l'Univers. C'est le seul télescope spatial dans ce domaine. |
| **télescope Hooker** | Télescope de 2,50 m du Mont Wilson, mis en service en décembre 1908. Second télescope à miroir de verre, après le Foucault de 80 cm de Marseille (1864). |
| **télescope spatial** | ***HST, Hubble Space Telescope***. Coopération entre la NASA et ESA européenne. Télescope de 2,40 m d'ouverture, placé en orbite basse autoure de la Terre, afin d'éviter la turbulence et l'absorption de l'atmosphère terrestre. |
| **Télesto** | (mythologie grecque : fille d'Océan et de Téthys, sœ de Calypso) Satellite de Saturne n° XIII, de dimensions 31×24×21 km, orbitant à 294 660 km de la planète dans le sens direct, en 1 j 21 h 36 mn. Découvert par Smith en 1980. Télesto est au point de Lagrange L4 de Téthys (Calypso au point L5) |
| **tellurique** | Adjectif signifiant : de même nature que la Terre . Qualificatif donné aux 4 planètes proches du Soleil : Mercure, Vénus, la Terre et Mars. |
| **Telxinoé** | (mythologie grecque : muse de la mémoire,fille de Zeus et de Mnémosyne) Satellite de Jupiter n° XLII, de 2 km approximativement, orbitant à 23 981 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 1 an 263 j. Découvert par Sheppard en 2003. Groupe d'Ananké |

| | |
|---|---|
| **température** | La température mesure la vitesse moyenne d'agitation des atomes ou des molécules. Il existe les échelles Celsius (ou Centigrade) et Kelvin (ou échelle absolue). Voir : degré Celsius, degré Kelvin. |
| **température absolue** | Voir : degré Kelvin. |
| **température de Hagedorn** | Dans la théorie des supercordes, c'est la température maximale possible. Lorsqu'on ajoute de l'énergie, on augmente les modes de vibration des cordes, sans en augmenter la température. |
| **température effective** | Température de la photosphère d'une étoile, zone où l'étoile devient transparente, sa densité diminuant vers l'extérieur. |
| **temps absolu** | Temps de la Mécanique Newtonienne, qui est le même pour tous les observateurs. C'est un temps absolu. Il n'est acceptable que pour les vitesses faibles devant celle de la lumière. |
| **temps atomique** | Temps mesuré par des horloges atomiques, basées sur la fréquence d'une raie du césium. Ces horloges sont bien plus précises que la Terre, dont elles permettent de mesurer les irrégularités. |
| **temps caractéristique de chute libre** | Ordre de grandeur du temps que met une particule à tomber en chute libre sur un objet massif. Il intervient lors de la formation d'une étoile, puis lors de l'effondrement de celle-ci lorsqu'elle n'a plus d'énergie. |
| **temps d'exposition** | Voir : temps de vol. |
| **temps de Kelvin-Helmholtz** | Temps caractéristique de refroidissement d'un objet massif. |
| **temps de vol** | Le *temps de vol*, ou *temps d'exposition*, est le temps qu'une météorite, arrachée au sol d'une planète par un violent impact, a passé dans l'espace avant d'arriver sur Terre. Pendant son vol, elle a été exposée aux rayons cosmiques, qui lui ont laissé des traces permettant de déterminer ce temps. |
| **temps des éphémérides** | Lorsqu'on écrit la formule donnant la longitude du Soleil en fonction du temps, on introduit une variable t supposée uniforme. Connaissant t, on peut calculer la longitude ; mais réciproquement, si on observe la longitude du Soleil, on peut en déduire le temps t. Sa valeur ainsi obtenue est nommée temps des éphémérides. |
| **temps nucléaire** | Durée caractéristique de vie d'une étoile sur la Séquence Principale. C'est le rapport de l'énergie totale produite par l'étoile dans sa vie, par sa luminosité. Pour le Soleil, il vaut 10 milliards d'années. |
| **temps propre** | En Relativité, temps mesuré dans le référentiel associé à un objet (référentiel dans lequel cet objet est au repos). |
| **temps sidéral** | Angle horaire du point gamma. Il augmente de 24 h en 23 h 56 mn 4 s de temps solaire moyen. C'est la différence entre ces deux temps qui produit la rotation annuelle du ciel autour de nous (constellations différentes selon la saison). |
| **temps solaire moyen** | Le cadran solaire donne le temps solaire vrai, qui est variable dans l'année du fait de l'excentricité de l'orbite terrestre. Le temps solaire moyen est la moyenne du temps solaire vrai sur l'année. Il reste affecté des inégalités de la rotation de la Terre. |
| **temps universel** | Temps civil du méridien origine, donc de Greenwich. Le temps universel est affecté d'inégalités périodiques (saison), non périodiques (tremblements de terre...). Diverses variantes du temps universel donnent, *a posteriori*, un temps corrigé de ces inégalités. |
| **tenseur** | Objet mathématique, représenté par un tableau de nombres à n dimensions, et dont les composantes se transforment de façon particulière. La Relativité Générale utilise, dans son formulaire, des tenseurs représentant la géométrie de l'espace, et d'autres représentant son contenu en matière-énergie. |
| **tenseur d'Einstein** | Tenseur dépendant de la métrique de l'espace-temps, donc de sa géométrie. Dans l'équation d'Einstein, il représente la géométrie locale de l'espace-temps. Il est construit à partir du tenseur de Ricci et de la métrique. Voir : tenseur, équation d'Einstein. |
| **tenseur de Ricci** | Tenseur d'ordre 2 qui se déduit du tenseur de Riemann par contraction. Le tenseur de Riemann décrit la courbure locale de l'espace-temps, le tenseur de Ricci en est une trace. |
| **tenseur énergie-impulsion** | Tenseur d'ordre 2 décrivant le contenu local en matière-énergie de l'Univers. Ses composantes sont l'énergie, la pression et les forces de viscosité. C'est le second membre de l'équation d'Einstein. Voir : tenseur, équation d'Einstein. |
| **terra** | Mot latin. Dénomination d'une structure géologique dans le système solaire, signifiant "zone étendue de terres". Voir aussi : *liste des formations géologiques*. |
| **Terre** | Troisième planète du Soleil. Diamètre : 12.756,28 km, distance au Soleil : 149,598 millions de km, année : 365,24219 jours. La mieux connue des planètes, et pour cause, elle sert de modèle pour étudier les autres planètes telluriques. Mais en retour, l'état évolutif différent de Vénus et de Mars apporte des indications sur l'avenir de notre planète. |
| **tessellation** | (de *tesselle*, pièce de mosaïque). La tessellation est un pavage. Voir : pavage. |
| **tessera** | Mot latin, pluriel *tesseræ*. Dénomination d'une structure géologique dans le système solaire, signifiant "terrain polygonal, comme carrelé". Voir aussi : *liste des formations géologiques*. |
| **Téthys** | (mythologie grecque : fille de Gaïa et d'Ouranos) Satellite de Saturne n° III, de 1 066 km de diamètre, orbitant à 294 660 km de la planète dans le sens direct, en 1 j 21 h 36 mn. Découvert par J.D. Cassini en 1684. Gros satellite, dont la géologie a été active dans le passé. De nombreuses structures y sont aparentes. |
| **tétraénite** | Alliage de fer-nickel, à structure tétraédrique, qui contient plus de 50 % de nickel. Composant des sidérites. |
| **TeVeS** | Version relativiste de la théorie de la gravitation MOND. Son nom vient de *TEnseurVEcteurScalaire*, car elle fait intervenir trois champs respectivement tensoriel, vectoriel et scalaire. |

| | |
|---|---|
| **Thalassa** | (mythologie grecque : fille d'Ether et d'Héméra, déesse de la mer) Satellite de Neptune n° IV, de dimensions 108×100×52 km, orbitant à 50 075 km de la planète dans le sens direct, en 7 h 28 mn. Découvert par Terrile en 1989. Thalassa orbite à l'intérieur de l'orbite synchrone, et tombe lentement vers la planète. |
| **Tharsis** | Très grand plateau bombé de Mars, présentant de nombreux volcans dont Olympus Mons, Alba Patera. La surrection de ce volcan a produit le canyon de Valles Marineris. |
| **Thébé** | (mythologie grecque : nymphe enleve par Zeus, mère d'Aigyptos) Satellite de Jupiter n° XIV, de 100 km approximativement, orbitant à 222 000 km de la planète dans le sens direct, en 16 h 12 mn. Découvert par Synnott en 1979. |
| **Théia** | Nom de la planète hypothétique qui aurait percuté la Terre, peu après leur formation, et donné naissance à la Lune. |
| **Théiikien** | Seconde ère géologique dans l'actuelle classification martienne. Elle est caractérisée par la formation des sulfates, et s'étend de 3,9 à 3,5 milliards d'années avant le présent. Son nom provient du grec *theiikos* signifiant *sulfate*. Voir : Sidérikien, Phyllosien. |
| **Thémisto** | (mythologie grecque : une des Néréides, maîtresse de Zeus) Satellite de Jupiter n° XVIII, de 8 km approximativement, orbitant à 7 284 000 km de la planète dans le sens direct, en 130 j. Découvert par Koxal en 1975. Orbite particulière, très inclinée, Thémisto orbite seul entre les Galiléens, et les irrégulier prograde s. |
| **théorème de Noether** | "A toute transformation infinitésimale qui laisse invariante l'intégrale d'action correspond une grandeur conservée". Par exemple, l'invariance des lois physiques par translation dans le temps (faire l'expérience aujourd'hui ou demain) correspond à la conservation de l'énergie. |
| **théorème de Vogt-Russel** | Théorème indiquant comment se forment et évoluent les étoiles : "Les caractéristiques et l'évolution d'une étoile sont totalement déterminées par sa masse et sa composition chimique (proportion d'éléments plus lourds que l'hélium)" |
| **théorème du viriel** | Viriel : du latin *vis* = force. Le théorème du viriel relie les quantités d'énergie gravitationnelle et thermique disponibles dans une étoile. Il indique que $E_p + 2\ E_c = 0$ dans sa forme classique. Dans le cas de l'équilibre hydrostatique des étoiles, le coefficient 2 est remplacé par une constante qui peut être de valeur différente, selon que la pression gazeuse domine, ou la pression de radiation. |
| **théorie** | Ensemble de lois qui expliquent le comportement d'un système physique. Une théorie reste valable tant qu'aucune expérience ne vient l'infirmer. |
| **théorie catastrophiste** | Théorie de la formation du système solaire, selon laquelle un phénomène extraordinaire serait la cause de la formation des planètes. Ces théories impliquent que la formation des planètes serait exceptionnelle, et donc qu'il existerait très peu de systèmes planétaires, sinon un seul... |
| **théorie évolutionniste** | Théorie de la formation du système solaire, selon laquelle la formation des planètes serait due à un phénomène physique ordinaire, et donc pourrait se produire partout dans l'Univers. Ces théories s'opposent aux théories catastrophistes. |
| **thermoclastie** | Processus de dégradation physique des roches, soumises à des variations thermique importantes (dues à l'alternance jour-nuit). Phénomène très important sur les planètes sans atmosphère, Mercure et Lune en particulier. |
| **thermodynamique** | Théorie physique expliquant le comportement d'un gaz en fonction de la pression et de la température. Diverses lois ont été produites, qui se résument maintenant par la loi des gaz parfaits. Elle indique que la pression d'un gaz augmente avec la température, et explique la physique de nombreuses étoiles. Lorsque le gaz est dégénéré, la loi des gaz parfaits ne s'applique plus. |
| **thermophile** | Voir : bactérie thermophile. |
| **thermosphère** | Partie de l'atmosphère terrestre dans laquelle la température augmente avec l'altitude, par suite de l'absorption des rayons ultraviolets du Soleil par les molécules d'oxygène. |
| **tholin** | (Du grec *tholos*, encre de seiche). Mélange de composés chimiques organiques que l'on trouve à la surface de nombreux corps à partir de la ceinture d'astéroïdes. Les molécules qui composent les tholins sont azotées, et se forment à partir de molécules carbonées simples : méthane, éthane, éthylène mélangées à de l'eau et de l'azote. Leur couleur brune sombre a donné leur nom. |
| **tholus** | Mot latin, pluriel *tholi*. Dénomination d'une structure géologique dans le système solaire, signifiant "petite montagne, colline". Voir aussi : *liste des formations géologiques*. |
| **Thrymr** | (mythologie scandinave : géant qui a volé le marteau de Thor Mjöllnir) Satellite de Saturne n° XXX, de 6 km approximativement, orbitant à 20 200 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 3 ans. Découvert par Gladman en 2000. |
| **Thyoné** | (mythologie grecque : maîtresse de Zeus, mère de Dionysos) Satellite de Jupiter n° XXIX, de 4 km approximativement, orbitant à 20 939 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 1 an 262 j. Découvert par Scott en 2001. Groupe d'Ananké |
| **Titan** | (mythologie grecque : les Titans sont des divinités qui ont précédé les dieux de l'Olympe. Ils sont fils d'Ouranos et de Gaïa) Satellite de Saturne n° VI, de 5 150 km de diamètre, orbitant à 1 221 830 km de la planète dans le sens direct, en 15 j 22 h 41 mn. Découvert par Huygens en 1665. Gros satellite, couvert de nuages. Visité par la sonde Huygens, la géologie de son sol est passionnante. On y trouve des cailloux de glace, des montagnes et surtout des rivières de méthane. La sonde s'est posée sur un fond de lac asséché semble-t-il. La sonde Cassini a trouvé des lacs d'hydrocarbures. |
| **Titania** | (mythologie : reine des fées ) Satellite d'Uranus n° III, de 1 576 km de diamètre, orbitant à 435 900 km de la planète dans le sens direct, en 8 j 16 h 48 mn. Découvert par Herschel en 1787. Peu de données sur ce satellite lointain, vu seulement par Voyager 2. Surface bien cratérisée, avec des rainures importantes. Une tectonique a dû y être active. |
| **Titius** | Loi de Titius-Bode. Loi empirique donnant les distances des planètes au Soleil. Bien que n'ayant pas de base physique, elle a mis les chercheurs sur la piste d'une planète qui orbiterait entre Mars et Jupiter, permettant ainsi la découverte de Céres (premier astéroïde connu). |

| | |
|---|---|
| **Tiu** | Nom saxon de Mars. |
| **topologie** | Branche des mathématiques qui décrit les propriétés globales des espaces géométriques. La topologie traditionnelle est celle d'un Univers plat (euclidien) ; mais d'autres possibilités, plus complexes, sont étudiées et pourraient changer notre vision de l'Univers. |
| **Toungouska** | Rivière de Sibérie où s'est produit un violent impact le 30 juin 1908. Les conditions climatiques et politiques n'ont pas permis une exploration rapide. On n'a pas trouvé de restes de l'impacteur. Il pourrait s'agir d'une comète. |
| **Toutatis** | 4179 Toutatis est un astéroïde géocroiseur, découvert par une équipe française qui l'a ainsi nommé. En décembre 92, il est passé très près de la Terre, ce qui a permis de bien l'étudier. Il s'est avéré double. |
| **trailing** | Voir : structure traînante. |
| **traînante** | Voir : structure traînante. |
| **trajet de Hayashi** | Ligne, dans le diagramme de Hertzprung-Russel, où se placent les étoiles totalement convectives. Elle constitue une barrière infranchissable lorsque ces étoiles montent vers la branche des géantes. |
| **transfert conductif** | Voir : transport conductif. |
| **transfert convectif** | Voir : transport convectif. |
| **transfert radiatif** | Voir : transport radiatif. |
| **transformation de Galilée** | Transformation permettant de passer d'un référentiel galiléen à un autre. Les lois de la Mécanique sont invariantes dans cette transformation, mais pas l'électromagnétisme. |
| **transformation de Lorentz** | Transformation des coordonnées x, y, z et t, valables dans un référentiel, vers des coordonnées x', y', z' et t' correspondant à un autre référentiel en translation uniforme par rapport au premier. Elle se substitue, en Relativité, à la transformation de Galilée. |
| **transit** | Mauvais anglicisme... Transit est un terme utilisé couramment dans un autre domaine ! Utilisez plutôt le mot *passage*, qui est bien français. Il s'agit du passage d'une planète inférieure devant le Soleil. Les passages de Mercure et Vénus sont très rares, et ont eu une grande importance en permettant de mesurer les distances dans le système solaire. |
| **transition de spin** | Changement d'état de spin d'une particule. L'atome d'hydrogène, dans un milieu de faible énergie, peut être affecté par un changement de spin de l'électron. En se désexcitant, l'atome émet la raie à 21 cm de longueur d'onde. |
| **transition électronique** | Changement de niveau d'énergie d'un électron dans un atome. Absorption si l'atome gagne de l'énergie, émission sinon. |
| **transition rotationnelle** | Modification de l'état énergétique d'une molécule dipolaire (variation du nombre quantique de rotation). La molécule s'excite par absorption d'une onde, et en émet une identique en se désexcitant. L'énergie de rotation étant basse, ce sont des micro-ondes. |
| **transition vibrationnelle** | Modification de l'état de vibration d'une molécule, par absorption (excitation) ou émission (désexcitation) d'une onde. L'énergie typique de ces vibrations correspond à l'infrarouge. Les vibrations sont des déformations géométriques périodiques des molécules. |
| **translation** | Nom d'une transformation mathématique, qui consiste simplement à déplacer un objet d'un point à un autre d'une ligne droite. En physique, une translation est un déplacement d'un objet en ligne droite. Si le déplacement se fait à vitesse constante, on parle de translation uniforme. |
| **transport conductif** | Transport d'énergie par contact direct de particule à particule adjacente. Ce mécanisme n'est pas efficace dans les étoiles en général, car les distances entre atomes sont trop grandes. C'est lui qui assure le transport de chaleur dans un morceau de métal. Voir : conduction. |
| **transport convectif** | Transport de l'énergie par des mouvements de matière (convection). La matière est chauffée par l'énergie, et se met en mouvement vers un point où elle peut se débarrasser de cette énergie. Ce mécanisme est parfois plus efficace que le transport radiatif. Voir : convection. |
| **transport radiatif** | Transport d'énergie réalisé par émission de photons qui, à l'arrivée, déposent leur énergie. Le transport radiatif est important dans certaines étoiles, ou dans certaines parties de leur intérieur. |
| **trapps** | Mot suédois signifiant escalier. Ce sont des dépôts de laves basaltiques, dont l'épaisseur atteint plusieurs kilomètres. Les plus importants en volume sont les trapps de Sibérie, et ceux du Deccan (Inde). |
| **trigonométrie** | Méthode mathématique, basée sur la similitude des triangles, et permettant de déterminer des distances en évaluant des angles. Elle a permi de mesurer les distances dans le système solaire, puis dans le voisinage du Soleil (étoiles proches). Elle fonde la méthode parallactique. |
| **Trinculo** | (mythologie : personnage de Shakespeare) Satellite d'Uranus n° XXI, de 18 km approximativement, orbitant à 8 504 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 2 ans 19 j. Découvert par Holman en 2001. |
| **triple alpha** | La réaction triple alpha réunit trois particules alpha (noyaux d'hélium 4), pour produire un noyau de carbone. C'est la source d'énergie des géantes rouges. |
| **tritium** | Hydrogène dont le noyau est formé d'un proton (qui fait que c'est bien de l'hydrogène) et de deux neutrons. Ce noyau est stable. |
| **Triton** | (mythologie grecque : fils de Poséidon et d'Amphitrite) Satellite de Neptune n° I, de 2 700 km de diamètre, orbitant à 355 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 5 j 21 h. Découvert par Lassel en 1846. Plus gros satellite de Neptune, c'est probablement un objet de la ceinture de Kuiper capturé. Il possède une atmosphère légère d'azote et de méthane. Triton possède des geysers actifs. Sa croûte est faite d'azote gelé, sur un manteau de glace, et probablement un |

| | |
|---|---|
| | noyau de roches et de métal. |
| **tropique** | Les tropiques sont deux lignes fictives, à la surface de la Terre, qui limitent la zone, autour de l'équateur, dans laquelle le Soleil passe au zénith une ou deux fois par an. Voir aussi : *tropique*. |
| **tropopause** | Couche de l'atmosphère terrestre qui sépare la troposphère de la stratosphère. La température, qui diminuait avec l'altitude au-dessous, commence à croître au-dessus. |
| **troposphère** | Couche la plus basse de l'atmosphère de la Terre, dans laquelle nous baignons. La température y décroît avec l'altitude. |
| **trou coronal** | Zone sombre observable dans la couronne solaire en rayons X (haute énergie). La couronne est à très haute température (plus d'un million de degrés), et les trous coronaux sont froids par rapport au reste. |
| **trou noir** | Objet hypothétique, dans lequel aucune force ne vient plus s'opposer à la gravitation. La lumière est piégée à l'intérieur, d'où son nom. De nombreux modèles (quasars, microquasars...) incluent un trou noir, de masse comprise entre quelques masses solaires et quelques milliards de masses solaires. L'adaptation de ces modèles aux observations permet de considérer l'existence des trous nois comme à peu près sûre. |
| **trouvaille** | Nom que l'on donne à une météorite que l'on a trouvé sur le sol, sans avoir assisté à sa chute. De ce fait, on ignore *a priori* depuis combien de temps elle est sur Terre, ce qui produit une incertitude sur son éventuelle contamination par des minéraux terrestres (et à fortiori par la vie terrestre). Voir : chute. |
| **Troyen** | Familles d'astéroïdes qui tournent autour du Soleil sur la même orbite qu'une planète. Ils sont soit en avance, soit en retard, de 60°. Leurs orbites sont stables. Les points où ils se trouvent sont des points de Lagrange. |
| **turbulence** | Agitation de l'atmosphère due à des différences de température entre les couches d'air à basse et haute altitude. Ces mouvements produisent des variations d'indice de réfraction de l'air, qui dégradent considérablement la qualité des images astronomiques. Les télescopes placés en orbite terrestre s'en affranchissent ; l'optique adaptative permet maintenant d'obtenir des images corrigées de la turbulence depuis le sol. |
| **Turonien** | Etage du Crétacé supérieur (Mésozoïque, ancien Secondaire). On note l'apparition d'une ammonite, qui permet d'étendre la stratigraphie. |
| **Tvashtar Catena** | Chaine de volcans située sur Io. On a cru qu'il s'agissait de cryovolcanisme, mais les laves de Tvashtar Parera sont des silicates à très haute température (plus de 1.500°) |
| **Tycho Brahé** | Voir : Brahé. |
| **tychonien** | Voir : système tychonien. |
| **type spectral** | Caractérisation d'une étoile par les raies spectrales de sa lumière. Le type spectral est directement relié à la température superficielle de l'étoile. Selon celle-ci, les éléments qui composent l'atmosphère sont plus ou moins ionisés, et émettent ou absorbent différentes raies. |
| **types d'astéroïdes** | Lettre classant les astéroïdes selon leur composition chimique, ou leur spectre. Le type S signifie silicate ; il correspond aux objets de la ceinture interne des astéroïdes. Le type M est celui des objets métalliques, et C est pour les carbonnés. V correspond à l'astéroïde Vesta. Les autre types moins fréquents sont A, B, D, E, F, G, P, R et T |

A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z

# U

| | |
|---|---|
| **ULIRG** | *Ultra Luminous InfraRed Galaxies*. Galaxies ultra-lumineuses en infrarouge. Elles sont le siège d'une formation d'étoiles 1000 fois plus intense que dans une galaxie ordinaire. Contenant beaucoup de poussières, leur chauffage par les étoiles produit le rayonnement infrarouge. |
| **Ultra Deep Field** | Champ ultra profond de galaxies, observé par le HST. Il se trouve dans une zone du ciel vide de tout objet proche, et peut donc sonder les confins de l'Univers. Il montre une abondance de galaxies. |
| **ultra-violet** | Partie du spectre électromagnétique, entre le visible et les rayons X |
| **Ulysse** | Sonde solaire, qui a été la première à quitter le plan de l'écliptique. Elle permet d'observer les pôles du Soleil, en particulier l'évolution du champ magnétique hors de l'écliptique. |
| **Umbriel** | (mythologie : farfadet dans une pièce de Pope) Satellite d'Uranus n° II, de 1 172 km de diamètre, orbitant à 266 000 km de la planète dans le sens direct, en 4 j 3 h 22 mn. Découvert par Lassel en 1851. Ce satellite présente une surface sombre, parsemée de vieux cratères. Un cratère brillant (Wunda), près de l'équateur, semble avoir récemment dégagé de la glace fraîche. |
| **undae** | Mot latin. Dénomination d'une structure géologique dans le système solaire, signifiant "dunes". Voir aussi : *liste des formations géologiques*. |
| **Unité Astronomique** | Valeur moyenne du rayon de l'orbite terrestre. Pour des raisons pratiques, il était nécessaire de prendre cette distance comme étalon, avant de pouvoir mesurer les distances en kilomètres. 149.597.870 km. |
| **univers ekpyrotique** | Ekpyrotique vient du grec, et signifie *tiré du feu*. Il désigne une cosmologie à rebond, basée sur la théorie des cordes. Le Big Bang serait le rapprochement de deux branes. |
| **univers multiconnexe** | Modèle d'Univers présentant une topologie multiconnexe. Un tel univers peut être fini, sans avoir de bord. Voir : multiconnexe. |
| **univers-île** | Nom donné par Humboldt vers 1860, pour désigner les nébuleuses, qu'il soupçonnait être des rassemblements d'étoiles semblables à la Voie Lactée. Elles sont nommées aujourd'hui galaxies. |
| **Uranius** | |

| | |
|---|---|
| **Tholus** | Petit volcan martien du plateau de Tharsis, proche d'Alba Patera. |
| **Uranus** | Septième planète du Soleil. Diamètre : 51.118 km, distance au Soleil : 2.870,972 millions de km, année : 83 ans 272,99 jours, découverte par William Hesrchell en 1781. Première planète invisible à l'oeil nu, elle est très mal connue car seul Voyager 2 l'a approchée furtivement. Comme les autres planètes gazeuses, elle est couverte de nuages, que l'on peut seuls observer. |
| **URCA** | Processus dont le nom provient d'un casino dont l'argent disparaissait mystérieusement. Le processus URCA est une rupture d'un équilibre entre deux réactions nucléaires (béta) qui transforment un proton en neutron et réciproquement. Dans les conditions normales, ces deux réactions s'équilibrent. Mais si la matière est dégénérée, la seconde réaction est bloquée. C'est ainsi que se constituent les étoiles à neutrons. |
| **Utopia Planitia** | Grande plaine martienne de l'hémisphère nord (3.200 km), sur laquelle s'est posé Viking 2. Le sol est caillouteux, balayé par les vents qui en ont chassé le sable. |

A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z

| | |
|---|---|
| **V391 Peg** | Sous-naine, ayant épuisé son hydrogène et rejeté son enveloppe au début de la fusion de l'hélium. Elle a perdu 40 % de sa masse. Une planète était en orbite autour, et la perte de masse a entraîné son éloignement. C'est pourquoi elle a subsisté. Elle est maintenant à 250 millions de km de l'étoile. |
| **vallée de débâcle** | Vallée produite par la vidange brutale d'un lac, à la suite de la rupture d'un barrage naturel. Exemples sur Terre : Sibérie, glacier du Fond de Chauvet (haute Ubaye). Sur Mars, on observe de nombreuses vallées de débâcle : Ares Valles, Tiu Valles, Kasei Valles… |
| **Valles Marineris** | Plus grand canyon du système solaire, sa profondeur atteint 10.000 m au-dessous du plateau environnant, et il s'étend sur 3.800 km. C'est probablement un fossé d'effondrement, contre-coup de la surrection du plateau de Tharsis où se trouvent les grands volcans martiens. |
| **vallis** | Mot latin, pluriel *valles*. Dénomination d'une structure géologique dans le système solaire, signifiant "vallée". Voir aussi : *liste des formations géologiques*. |
| **Van Allen** | (James, 07/09/1914-09/08/2006) Physicien et astronome américain, il étudia les propriétés magnétiques de l'atmosphère. Il a découvert les *ceintures* qui portent son nom. Voir : ceinture de van Allen. |
| **variable symbiotique** | Etoiles variables très particulières, présentant un spectre composite : spectre brillant d'étoile géante K ou M + spectre moins lumineux d'étoile chaude bleue. Ce sont des systèmes doubles, alliant une étoile bleue et une géante rouge |
| **variables** | Etoiles dont la luminosité n'est pas constante dans le temps. Les variations peuvent être rapides ou lentes, périodiques ou non. |
| **variables à éclipses** | Etoiles doubles dont une composante passe devant l'autre, produisant les variations de luminosité. |
| **variables à longue période** | Etoiles variables dont les fluctuations sont quasi périodiques. Les périodes sont longues. |
| **variables éruptives** | Variables apériodiques, stables pendant de longues périodes, qui présentent des sursauts d'activité assez brefs. |
| **variables intrinsèques** | Variables dont les fluctuations sont dues à de véritables modifications des conditions physiques (en général dans l'enveloppe). Ce terme n'élimine que les variables à éclipses. |
| **variables nébulaires** | Etoiles variables inclassables dans les autres catégories. |
| **variables nouvelles** | Etoiles variables dans des gammes d'onde autres que le visible. |
| **variables périodiques** | Etoiles variables dont les fluctuations sont périodiques. Les périodes sont assez courtes. |
| **Varuna** | (mythologie hindoue : dieu des eaux, assimilable à Poséidon) Candidate planète naine de 1 000 km de diamètre, désignation provisoire 2000 WR106, orbitant à 43 UA du Soleil, en 283,2 ans. Découverte par McMilan en 2000. Astéroïde classique de la ceinture de Kuiper. Voir : ceinture de Kuiper. |
| **vastitas** | Mot latin. Dénomination d'une structure géologique dans le système solaire, signifiant "vaste plaine". Voir aussi : *liste des formations géologiques*. |
| **Vastitas Borealis** | Comme son nom l'indique, c'est une vaste plaine, située au nord de Mars. Elle est située à 4 ou 5.000 m sous le niveau de référence. Ce sont des terrains récents, qui recouvrent des bassins d'impact mis en évidence par la sonde européenne Mars Express. |
| **vecteur contravariant** | En algèbre tensorielle, les indices supérieurs sont associés aux vecteurs, et sont dits *contravariant*. Un vecteur x se décompose sur une base $e_i$ sous la forme : $x = x^i e_i$ (notation d'Einstein). Voir : vecteur covariant. |
| **vecteur covariant** | En algèbre tensorielle, les vecteurs covariants, ou *covecteurs*, sont les formes linéaires construites sur un espace vectoriel E. Pour les distinguer des vecteurs eux-mêmes, qui sont dits *contravariants*, on les note avec un indice inférieur : $f = f_i e^i$, où f est une forme linéaire. Voir : vecteur contravariant. |
| **Venera** | Série de sondes soviétiques qui ont été les seules à se poser à la surface de Vénus. Les conditions extrêmes qui y règnent ne leur ont permis de survivre qu'un peu plus d'une heure, mais assez pour envoyer des données scientifiques importantes, et |

| | |
|---|---|
| | quelques photos du sol. |
| **vent solaire** | Flot de particules (essentiellement des protons), émis par le Soleil vers l'espace. La Terre baigne dans ce milieu. |
| **Vénus** | Seconde planète du Soleil. Diamètre : 12.103,6 km, distance au Soleil : 108,209 millions de km, année : 224,6954 jours. Planète rocheuse, perpétuellement couverte de nuages. Le sol n'est connu que par les sondes Venera, qui ont montré des basaltes. La surface a été cartographiée par radar, elle montre beaucoup de volcans, et des structures géologiques particulières (arachnoïdes, patera...). |
| **verre libyque** | Verre naturel, de couleur jaune à vert clair, en général transparent et de bel aspect. On le trouve dans la *Grande Mer de Sable* (désert libyque, en Egypte), en bordure d'un plateau gréseux. C'est une impactite, produite par fusion du sable lors d'un impact. Il contient 98 % de silice, et 2 % d'alumine. Il s'est formé il y a 28 millions d'années. |
| **Vesta** | Vesta est un astéroïde de la ceinture principale entre Mars et Jupiter. C'est le second par la taille (530 km de diamètre). Vesta est visitée par la sonde Dawn, qui doit rester en orbite autour pendant six mois (mise en orbite 15 juillet 2011). |
| **Vesta** | (mythologie latine : Déesse protectrice des foyers) Candidate planète naine de dimensions : 560×544×454 km, orbitant à 2 UA du Soleil, en 3,63 ans. Découverte par Olbers en 1807. Objet de la ceinture principale, Vesta est le second astéroïde par la taille (530 km de diamètre). Vesta est visitée par la sonde Dawn, qui doit rester en orbite autour pendant six mois (mise en orbite 15 juillet 2011). |
| **vide** | Au XIX$^{e}$ siècle, le vide était l'espace sans matière. La conception relativiste relie indissolublement l'espace à son contenu. Mais la Mécanique Quantique lui assigne de plus un contenu minimum en énergie. |
| **Viking** | Nom des sondes martiennes Viking 1 (lanc. 20/8/1975) et Viking 2 (lanc. 9/9/1975), comprenant chacune un orbiteur et un atterrisseur. Cartographie complète de Mars à mieux que 300 m de résolution ; découverte de la surface martienne. Les atterrisseurs n'ont pas trouvé de vie, mais ont donné des analyses chimiques du sol et de l'atmosphère. |
| **VIRGO** | Instrument conçu pour la détection des ondes gravitationnelles, situé en Italie du nord. C'est un interféromètre isolé des mouvements du sol, qui pourrait détecter des effondrements d'étoiles massives. Mais sa sensibilité risque d'être encore trop faible. |
| **Virgo A** | Virgo A est le nom d'une radiogalaxie, autrement connue sous le terme M87. Elle est au centre de l'amas de la Vierge Virgo. Son image radio est très différente de son image visible, et montre un immense jet qui en émane. A 90 cm de longueur d'onde, on voit deux jets, le plus grand atteignant 100.000 AL. |
| **visible** | Infime partie du rayonnement électromagnétique, comprise entre 0,4 et 0,8 micromètres, à laquelle notre œil est sensible. |
| **vitesse** | Déplacement par unité de temps. Les vitesses à considérer en astronomie sont très variables. Elles se mesurent en général en kilomètre/seconde. La Terre se déplace autour du Soleil à 30 km/s, le Soleil tourne dans la Galaxie à 250 km/s, les galaxies lointaines paraissent s'éloigner, à cause de l'expansion de l'Univers, à des vitesses proches de celle de la lumière. |
| **vitesse aréolaire** | Variation, par rapport au temps, de l'aire balayée par le rayon-vecteur d'une planète. Dans le mouvement képlérien, la vitesse aréolaire est constante (ceci est équivalent à énoncer la loi des aires). |
| **vitesse d'évasion** | C'est la vitesse de libération appliquée à une atmosphère planétaire. Lorsqu'un atome de l'atmosphère acquiers une vitesse supérieure à la vitesse de libération, il quitte la planète, diminuant d'autant son atmosphère. |
| **vitesse de la lumière** | Vitesse à laquelle se propage toute onde électromagnétique dans le vide. On a montré qu'elle est indépendante des conditions de propagation, c'est donc une valeur absolue. Elle est de 300.000 km/s. La Relativité est basée sur le fait qu'aucun corps matériel ne peut atteindre cette vitesse, qui est donc une limite. |
| **vitesse de libération** | Vitesse que doit atteindre un mobile pour s'échapper définitivement à l'attraction d'un astre. La vitesse de libération de la Terre est de 11,2 km/s. La vitesse de libération à la surface d'une comète n'est que de quelques cm/s, aussi le module Champolion doit prévoir des crochets pour s'arrimer à la surface de la comète Churiumov-Gerasimenko. |
| **vitesse orbitale** | Vitesse à laquelle un mobile reste en orbite stable autour d'un astre. La vitesse orbitaleautour de la Terre, vers 300 km d'altitude, est de 8 km/s. |
| **vitesse radiale** | Projection de la vitesse d'un astre sur la ligne de visée. L'importance de cette notion tient à sa mesure, facile grâce au déplacement des raies spectrales que produit le déplacement (*vélocimétrie*). La vitesse perpendiculaire à la vitesse radiale, ou *vitesse tangentielle*, est bien plus difficile à mesurer, car tous les déplacements apparents sur le ciel sont très lents (*astrométrie*). |
| **VLA** | ***V**ery **L**arge **Array***. Radiotélescope formé de 27 antennes paraboliques orientables de 25 m de diamètre chacune, mobiles et disposées selon un tracé en Y (deux branches de 21 km et un pied de 19 km). Résolution angulaire attendue de 0,05 seconde d'arc. |
| **VLT** | *Very Large Telescope*. Ensemble de 4 télescopes européens de 8,20 m de diamètre, installés dans la Cordillière des Andes au Chili. 4 télescopes auxiliaires de 1,80 m complètent l'ensemble pour former el VLTI, (Very Large Telescope Interferometer). C'est donc un interféromètre optique dont le diamètre équivalent est supérieur 120 m. Son pouvoir séparateur a atteint 2 millisecondes d'arc (HST : 58 millisecondes d'arc). |
| **VLTI** | Voir : VLT. |
| **Voie Lactée** | Traînée lumineuse visible dans un ciel pur et noir, qui est la projection, sur la sphère céleste, de la galaxie dans laquelle nous nous trouvons. La légende grecque voulait que Zeus ait laissé échapper un peu de lait de sa mère. Le mot *lait* (*galactos*) a permi de forger le mot *galaxie*. |
| **volatils** | Eléments à point de fusion bas. Hydrogène et hélium en font partie ; ils ne peuvent se condenser près d'une étoile, et sont soufflés loin d'elle par le vent stellaire et les radiations. Ils ont constitué les planètes joviennes. Voir : réfractaires. |
| **volcan** | Formation géologique constituée essentiellement d'une cheminée creusée à travers la croûte d'un corps planétaire ; par cette cheminée, des matériaux internes chauds et liquides remontent vers la surface où ils se répandent. Il existe de très nombreux types de volcans dans le système solaire. Les plus importants sont sur Mars. Voir : volcan bouclier. Voir aussi : *volcanisme*. |

| | |
|---|---|
| **volcan bouclier** | Volcan au cône très aplati, pente des flancs très faible, produit par une lave très fluide pouvant couler très loin. Cetains volcans terrestres sont de ce type (Piton de la Fournaise, Mauna Kea, Erta Ale…), ainsi que de nombreux volcans martiens (Olympus Mons, Alba Patera…). |
| **volcanisme** | Activité superficielle d'une planète, produite par la chaleur interne, qui ramène en surface des matériaux fondus venant des profondeurs. Le volcanisme construit les volcans, et émet des gaz abondants, qui sont à l'origine de l'atmosphère des planètes telluriques. Voir : volcan. |
| **Voyager** | Nom de deux sondes spatiales (NASA) lancées en 1977, les premières à avoir survolé Jupiter puis Saturne. Voyager 1 a continué ensuite vers l'héliopause, qu'elle a probablement atteinte en 2012. Voyager 2 a été dirigée vers Uranus, puis Neptune. Ces deux planètes n'ont pas été visitées par d'autres sondes depuis. |
| **Vredefort** | Cratère d'impact situé en Afrique du Sud, d'un diamètre de l'ordre de 200 km, et vieux de 2 milliards d'années. L'un des deux plus grands, avec celui de Sudbury au Canada. |

A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V

# W

X Y Z

| | |
|---|---|
| **W Virginis** | Etoile variable type. |
| **warp** | Voir : gauchissement. |
| **Weakly Interactive Massive Particle** | Particules massives n'interagissant que très peu avec la matière ordinaire, qui sont prédites par certaines théories avancées des particules, mais non encore découvertes expérimentalement. Elle pourraient être un constituant de la tout aussi hypothétique matière noire. |
| **whisker** | Sorte d'aiguilles millimétriques, formées de fer et de carbone, que Fred Hoyle imagine peupler le milieu interstellaire, et qui par ses propriétés électriques, expliquerait le rayonnement thermique de fond à 3 K. |
| **Widmanstätten** | Alois von Beckh-Widmanstätten (1754-1849). Directeur de la fabrique impériale de porcelaines à Vienne (Autriche). Il a découvert les figures géométriques qui portent son nom, formées par différents cristaux à la surface polie d'une météorite métallique. Voir : figure de Widmanstätten. |
| **Wien** | (Wilhelm, 13/01/1864-30/08/1928). Il a donné une loi empirique du rayonnement du corps noir. Cette loi a servi de base à Max Planck pour déterminer la forme théorique du rayonnement thermique. Il a aussi précisé la position du maximum d'énergie du rayonnement. |
| **WIMP** | Voir : Weakly Interactive Massive Particle. |
| **Wolf** | (Johan, 07/07/1816-06/12/1893) Astronome suisse spécialiste du Soleil. Il a défini un nombre qui caractérise l'activité du Soleil. |
| **Wolf-Rayet** | Voir : étoile Wolf-Rayet. |
| **Woodleigh** | Cratère d'impact situé à l'ouest de l'Australie. Avec celui d'Alamo au Névada, ils datent de 365 millions d'années, et se situent donc à la limite entre le Dévonien et le Carbonifère. |
| **WOS** | ***W**hite **O**val **S**pot*. Tache blanche ovale qui se forme dans la haute atmosphère de Jupiter. Assez semblables dans leur nature à la Grande Tache Rouge, les WOS n'en ont ni la couleur, ni la permanence. |
| **Würm** | Dernière grande glaciation, dont le nom vient d'un affluent du Danube. Cette appellation est locale aux Alpes. Elle a débuté, vers 100.000 ans avant aujourd'hui, a été maximum il y a 20.000 ans, et s'est achevée il y a 10.000 ans. Simultanément, d'autres régions ont été englacées (Europe du nord, Amérique du nord). La modification du climat a entraîné de profondes modifications de la faune et de la flore. |

A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W

# X

Y Z

| | |
|---|---|
| **xénon** | Gaz rare (symbole Xe) de numéro atomique 54, et de masse atomique 131. Ceci le désigne comme gaz propulseur dans les moteurs ioniques, utilisés de plus en plus pour fournir des poussées prolongées. |

A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X

# Y

Z

| | |
|---|---|
| **Yepun** | Nom de l'UT2 du VLT. Il signifie "Vénus" dans la langue Mapuche des indiens de la région. Yepun a été terminé en 2001. |
| **Ymir** | (mythologie scandinave : géant primordial, ancêtre des géants de glace.) Satellite de Saturne n° XIX, de 18 km approximativement, orbitant à 23 040 000 km de la planète dans le sens rétrograde, en 3 ans 216 j. Découvert par Gladman en 2000. |

A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y

# Z

| | |
|---|---|
| **z** | |

| | |
|---|---|
| **Zagora** | Météorite ferreuse trouvée au Maroc. |
| **ZAHB** | Zero Age Horizontal Branch. Branche horizontale d'âge zéro. Equivalent de la ZAMS pour la branche horizontale des étoiles géantes rouges. |
| **ZAMS** | ***Z**ero **A**ge **M**ain **S**equence*, ou *Séquence Principale d'Age Zéro*. Ligne inférieure de la Séquence Principale, où apparaissent les nouvelles étoiles. |
| **zéro absolu** | Température absolue correspondant à l'immobilité totale des particules. Le zéro absolu est l'origine de l'échelle Kelvin. |
| **zodiaque** | Du grec *zôô* vivre, *zoidon* figure d'animal, *zoidiakos* qui concerne les constellations d'animaux. Ceinture de la sphère céleste s'étendant de 8° à peu près, de part et d'autre de l'écliptique, dans laquelle les planètes semblent se déplacer. Défini dans l'antiquité, le zodiaque ne tient pas compte des planètes invisibles à l'œil nu ; mais Uranus et Neptune ont la politesse de respecter la règle, ayant des inclinaisons très faibles. Pluton, planète naine, ayant une orbite très inclinée, n'est pas dans le zodiaque. |
| **zone convective** | Coquille à l'intérieur d'une étoile dans laquelle le transfert d'énergie vers l'extérieur se fait essentiellement par la convection. Selon la masse de l'étoile, la zone convective peut se trouver juste au-dessus du noyau, ou vers la surface. |
| **zone habitable** | Région autour d'une étoile où l'eau, sur une planète, pourrait exister à l'état liquide (température comprise entre le point de congélation et le point d'évaporation). Selon les connaissances actuelles, cette condition est indispensable pour l'apparition de la Vie |
| **zone radiative** | Zone de l'intérieur d'une étoile dans laquelle le transfert d'énergie est assuré essentiellement par radiation. L'énergie produite par les réactions nucléaires centrales est sous forme de photons gamma (très énergétiques). Ils subissent une marche aléatoire, et d'innombrables absorptions-réémissions, qui par le jeu des cascades électroniques, les multiplie et les transforme en photons visibles. |
| **Zwicky** | (Fritz, 14/02/1898 - 08/02/1974) Astronome suisse qui a créé le terme de *supernova*, et prédit qu'elles donneraient des étoiles à neutrons. Il a le premier montré que la masse dynamique des amas de galaxies était insuffisante pour expliquer leur stabilité. |

---=OO=---




Il y a très longtemps que l'on envisage l'existence de planètes tournant autour d'autres étoiles. Mais il y a loin de l'imagination à la découverte. Les romans de science-fiction ont tout d'abord envisagé la vie sur les autres planètes du système solaire, avant de transporter leurs exploits dans d'autres systèmes, ignorant la difficulté du voyage. Mais tout ceci n'avait pas de fondements.

Les astronomes ont tenté, par tous les moyens à leur disposition, de détecter des planètes lointaines. Mais la difficulté est bien trop grande pour pouvoir les observer directement. Il fallait ruser, apprendre à contourner des problèmes que les moyens techniques ne permettaient pas de résoudre. Pour comprendre l'ampleur de la tache, il faut se rendre compte de la différence d'éclat entre une étoile et une planète : Vénus est très brillante, pas trop loin du Soleil, et nous présente une magnitude de -4,4 lorsqu'elle est la plus brillante ; le Soleil a une magnitude apparente de -26,8. La différence de magnitude de plus de 22, indique que le Soleil est plus d'un milliard de fois plus brillant que Vénus.

Si nous nous trouvions sur une planète autour d'une étoile lointaine, la proximitié de Vénus au Soleil et cette énorme différence d'éclat nous rendraient la planète totalement invisible, noyée dans l'éclat de l'étoile. Bien sûr, il en est ainsi lorsque nous tournons nos regards vers une autre étoile, dans l'espoir de voir une planète semblable à Vénus en orbite autour d'elle.

Comment détecter l'invisible ? Il faut évidemment trouver un moyen indirect. Il y en a plusieurs, mais deux d'entre eux sont réellement utilisables, et ont abouti à des succès.

## Méthodes de détection

Ces méthodes sont indirectes en ce sens qu'elles mettent en évidence une modification d'aspect de l'étoile, produite par la planète, et non la planète elle-même. Une caractéristique essentielle de ces méthodes est l'aspect périodique des variations, qui attestent leur origine.

### Vitesses radiales

La première méthode concerne la perturbation gravitationnelle que la planète fait subir à son étoile. Il est faux de dire que la Terre tourne autour du Soleil. En fait, Terre et Soleil tournent tous deux autour de leur centre de gravité commun. Il se trouve que dans ce cas, le centre de gravité est très proche du centre du Soleil, et le déplacemenet de celui-ci est négligeable. Il l'est un peu moins si on considère Jupiter à la place de la Terre.

Pour utiliser une analogie, imaginez que vous soyez dans une petite barque, auprès d'un supertanker. En poussant avec une rame la coque de ce dernier, votre barque va s'en éloigner, le pétrolier ne bougeant pas. Si vous faites la même opération en poussant une autre barque, vous verrez que les deux frêles embarcations s'éloigneront l'une de l'autre de la même quantité. C'est la masse (par l'inertie) qui détermine le mouvement : l'objet le plus massif se déplace moins que l'autre.

Lorsqu'une planète est en orbite autour d'une étoile, les deux bougent, mais la moins massive plus que l'autre. Si l'écart de masse entre la planète et l'étoile est de 1.000 fois, la planète bougera 1.000 fois plus que l'étoile. Or nous disposons d'un moyen très fin de détecter les mouvements d'une étoile. Si on prend un spectre de sa lumière, on y voit des raies d'absorption. Si l'étoile se rapproche de nous, ces raies seront décalées vers le bleu par effet Doppler. Si elle s'éloigne, le décalage se fera vers le rouge. Il suffit donc de disposer d'un spectrographe assez sensible pour détecter le déplacement qu'une planète impose à son étoile.

Mais ce genre de détecteur est difficile à construire, et le premier qui a été réalisé est *ELODIE*, installé à l'Observatoire de Haute Provence. ELODIE est sensible à des mouvement de l'ordre de 10 m/s, l'ordre de grandeur des perturbations qu'une planète comme Jupiter peut faire subir à une étoile comme le Soleil, à condition de n'en être pas trop éloignée.

Et c'est ainsi que la **première exoplanète** a été découverte à l'Observatoire de Haute Provence, par une équipe de deux astronomes Suisses, Michel Mayor et Didier Queloz, en collaboration étroite avec Jean-Pierre Sivan alors directeur de l'Observatoire de Haute Provence. En orbite autour de l'étoile 51 Pegasi, elle est nommée *51 Pegasi B*.

51 Pegasi se trouve à 48 AL de nous, c'est une étoile du même type que notre Soleil, très légèrement plus massive, et âgée de 7,5 milliards d'années. La planète trouvée est une géante gazeuse, mais située à seulement 0,05 UA de l'étoile, dont elle fait le tour en 4,23 jours. Cette grande proximité (Mercure est à 0,4 UA du Soleil, huit fois plus loin), lui confère une température de l'ordre de 1.000 K. Personne ne s'attendait à trouver une planète semblable à Jupiter, plus proche que Mercure… La découverte ultérieure d'autres planètes du même genre a obligé à créer un nom pour cette classe d'objets : les *Jupiter chauds*.

L'existence de ces planètes pose un grave problème aux spécialistes de la formation du système solaire, car elle remet en cause les principes sur lesquels la théorie était basée.

Cette méthode favorise la détection des planètes qui perturbent gravitationnellement leur étoile ; donc celles qui sont à la fois massives et proches. Ceci explique que l'on ait découvert beaucoup de Jupiter chauds : il s'agit d'un biais observationnel.

**Passages**

Une autre méthode envisageable consiste à analyser la quantité de lumière reçue d'une étoile. Si une planète, tournant autour de cette étoile, vient à lui passer devant, elle interceptera une partie de sa lumière en faisant une petite tache mobile à sa surface. La lumière de l'étoile diminuera pour nous légèrement pendant la durée du passage. Ce phénomène se nomme *passage* de la planète devant l'étoile (et non pas transit, qui n'est que la traduction anglaise). On observe depuis longtemps des passages de Mercure et Vénus devant le Soleil.

Cette technique nécessite aussi un instrument très sensible : Jupiter mesure 140.000 km de diamètre, le Soleil 1.400.000 km. Le rapport de rayons entre les deux est de 10. Par conséquent, le rapport de surface est de 100. Si Jupiter passe devant le Soleil pour les habitants d'une planète lointaine, la luminosité du Soleil baissera pour eux de 1%. Ceci est mesurable, et permet d'espérer trouver des planètes autour d'autres étoiles, à la condition que l'orbite soit orientée de façon à permettre les passages : il faut que le plan de l'orbite de la planète passe pratiquement par la Terre.

Cette méthode a permis de trouver quelques planètes extrasolaires. Si on considère la Terre à la place de Jupiter, d'un diamètre de 13.000 km, donc 100 fois plus petit que celui du Soleil, la baisse de luminosité de notre étoile ne sera que de 1/10.000, c'est-à-dire de 0,01 %. Là encore, les grosses planètes sont favorisées…

Pour que cette méthode donne un résultat, il faut que le plan orbital de la planète passe par la Terre, à très peu près. Ce qui fait que peu de systèmes sont favorable à cette observation ; on estime la proportion à 5 % des étoiles possédant une planète. La probabilité de détection est inversement proportionnelle à la distance de la planète à l'étoile, donc cette méthode favorise encore la détection des planètes proches de leur étoile. La masse n'intervient pas, sauf qu'elle est liée au rayon de la planète et donc à la surface qu'elle éclipse.

**Microlentille**

Une méthode basée sur la déviation des rayons lumineux par une masse, ou effet de lentille gravitationnelle, est aussi envisageable. Si une planète passe entre son étoile et nous, sa masse va courber les rayons lumineux issus de l'étoile, en dévier vers nous des rayons qui ne nous seraient pas parvenus autrement. Aussi, l'effet d'une lentile gravitationnelle est d'augmenter la luminosité de l'astre émetteur (l'étoile), pendant la durée de l'alignement. Bien que faible, cet effet est suffisant dans quelques cas pour obtenir un résultat. 4 planètes ont été découvertes par cette voie.

L'intérêt de la méthode réside dans la possibilité de détecter des planètes de faible masse (celle de la Terre), et à des distances importantes de leur étoile.

**Passages supérieurs**

Une méthode semblable à celle des passages consiste à observer la planète lorsqu'elle passe derrière son étoile. A ce moment-là, comme Vénus, elle est éclairée de face par l'étoile, et nous montre sa face lumineuse. Son éclat est donc maximal. Une technique fine consiste à analyser la lumière de l'étoile lorsque la planète en est loin, puis à analyser la lumière du système lorsque la planète va passer derrière. On retranche le spectre précédent, et on obtient ainsi un spectre de la planète.

Difficile à mettre en œuvre, cette méthode a de l'avenir, et devrait permettre, si ce n'est de découvrir de nouvelles exoplanètes, tout au moins d'analyser celles que l'on connaît par d'autre méthodes.

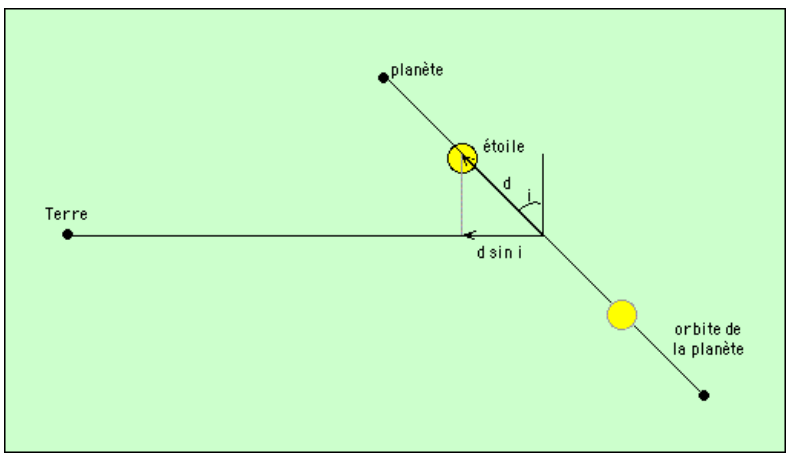
## Après la découverte…

… il s'agit d'étudier ce qu'on a trouvé !

**Masse des exoplanètes**

La masse est le premier critère à considérer. Si la masse est importante, il ne s'agit pas d'une planète. L'objet peut être une autre étoile de faible luminosité (naine rouge par exemple), ou bien une naine brune (trop petite pour fusionner l'hydrogène, mais capable de fusionner le peu de deutérium présent depuis sa formation). Or déterminer la masse est un exercice difficile.

La méthode de détection par les vitesses radiales ne donne pas directement la masse de la planète.



Dans ce schéma, on voit une étoile, et une planète qui lui tourne autour. L'étoile est représentée en deux positions extrêmes : celles qui vues de la Terre, la rapprochent ou l'éloignent le plus. Le point situé entre ces deux positions est le point où devrait se trouver l'étoile si elle n'était pas perturbée. Donc, dans son mouvement, l'étoile oscille entre les deux positions extrêmes représentées en jaune, et se rapproche ou s'éloigne de cette position centrale d'une distance d.

L'orbite étant inclinée sur la ligne de visée d'un angle i, la méthode des vitesses radiales ne nous montre, depuis la Terre, que la projection de ce déplacement sur la ligne de visée, projection dont la longueur est d sin i.

Le déplacement réel est proportionnel à la masse de la planète, donc d  M. (le symbole  se lit "proportionnel à").

Le déplacement apparent d' = d sin i donne d = d' / sin i. Portons cette valeur dans la proportionnalité ci-dessus :

d' / sin i  M d'où d'  M sin i

On mesure d', mais on ne connaît pas i. La mesure de d' nous donne donc la masse apparente, qui est par définition M' = M sin i.

Pour une planète donnée, si l'inclinaison est proche de 0° (orbite de la planète perpendiculaire à la ligne de visée), le sinus est proche de 0. M = M' / sin i peut être très grande !

On pourrait penser que ce problème rend caduque toute observation de planète par cette méthode. Mais la probabilité que l'inclinaison soit presque nulle est presque nulle ! Si donc M' n'est pas trop grande, même divisée par un sinus assez petit, le résultat sera certainement compatible avec une nature planétaire de l'objet. Si on affirme une telle existence, la probabilité d'erreur est vraiment très faible.

A l'heure actuelle, on connait 215 planètes extrasolaires. Il est certain que sur un tel nombre, les fausses détections, s'il y en a, sont très peu nombreuses. Pour quelques planètes, il subsiste un doute : leur masse pourrait en faire des naines brunes, voire des naines rouges.

**Distance**

Le second paramètre important est la distance de la planète à son étoile. Celle-ci détermine la température, et par là les conditions physiques qui règnent sur la planète.

Les caractéristiques orbitales sont plus faciles à déterminer que la masse. Les différentes méthodes donnent la période : périodicité des perturbations de l'étoile, ou bien des passages de la planète… Le spectre de l'étoile centrale permet, grâce à ses propriétés astrophysiques, de déterminer sa masse avec une bonne précision. La mécanique permet alors de calculer le demi-grand axe de l'orbite. C'est ainsi qu'on a compris que les planètes découvertes étaient bien plus près de leur étoile que ce qu'on avait immaginé avant.

Comment concevoir qu'une planète gazeuse se soit formée si près de la fournaise de son étoile ? L'agitation thermique des atomes à cette distance aurait dû empêcher la condensation. Alors, les théoriciens ont imaginé que ces planètes se soient formées à une distance suffisante pour autoriser leur condensation, puis aient migré vers leur orbite actuelle. Cette théorie de la *migration* est tout à fait compatible avec la mécanique céleste.

Alors, pourquoi notre système y aurait-il échappé ? La réponse est surprenante : la migration a eu lieu aussi dans le système solaire. Pour affirmer cette théorie, il faudra tout de même des études plus poussées, s'appuyant sur de nouvelles données.

**Planètes chtoniennes**

La température de l'atmosphère, dans les Jupiter chauds, atteint les 1.200°. L'agitation thermique des atomes d'hydrogène, principaux constituants de l'atmosphère, leur confère une vitesse suffisante pour échapper à la planète, toute massive qu'elle soit. Donc, l'atmosphère s'évapore. Si nous observons une telle planète, elle doit être jeune.

Et que devienennt-elles avec le temps ? Elles devraient perdre leur atmosphère, et ne conserver que leur noyau rocheux et métalique. Assez semblable finalement à une planète tellurique. Ce sont ces planètes gazeuses ayant perdu leur atmosphère que l'on appelle *planètes chtoniennes*. L'adjectif chtonien évoque les divinités infernales.

La planète HD 209458b, pour laquelle le nom *Osiris* est proposé, est située à 150 AL de nous, et tourne autour de l'étoile en 3,25 jours (son année). Cette planète passe devant son étoile, permettant de prendre des spectres. On y a détecté de l'hydrogène, mais aussi du sodium, de l'oxygène et du carbonne. Mais surtout, il est démontré que l'atmosphère s'évapore rapidement, la planète laissant derrière elle un immense nuage de gaz que la chaleur de l'étoile va disperser dans l'espace. C'est le prototype des planètes chtoniennes.

**Planètes-océan**

Une planète-océan est un objet théorique, car les moyens d'observation actuels ne permettent pas d'en détecter, si elles existent. Il s'agit de planètes géantes, assez proches de leur étoile pour que l'eau soit liquide à leur surface.

On observe de grandes quantités de glace à la surface de certains corps du système solaire : Europe par exemple est probablement recouvert d'une carapace de glace de 100 km d'épaisseur, surmontant peut-être un océan d'eau salée. Les comètes sont constituées en grande partie de glace d'eau. Il est probable que les planètes géantes, formées dans la même région du système solaire, possèdent aussi beaucoup d'eau.

Ces considérations justifient le modèle théorique de planète-océan, mais il faudra attendre encore quelques temps avant de savoir si ce modèle a une chance de coller à la réalité.

**Etat actuel**

On a détecté aujourd'hui (30 décembre 2011) 716 exoplanètes par diverses méthodes :

- 657 par la méthode des vitesses radiales (dont 79 systèmes multiples) ;
- 193 par la méthode des passages (dont 6 systèmes multiples) ;
- 13 par microlentille gravitationnelle (dont 1 système multiple) ;
- 29 par imagerie (dont 1 système multiple) ;
- 17 par chronométrie (dont 5 systèmes multiples).

Vous pourrez éventuellement trouver une liste plus à jour sur le site de l'Observatoire de Paris.

---=OO=---




La seconde colonne décrit la signification des variables utilisées dans la formule de la troisième colonne. Si rien n'est indiqué, la signification des variables doit être recherchée au-dessus (décrite dans une formule précédente). Si une variable change de signification, la nouvelle est donnée.

| description | validité | paramètres | fomule |
|---|---|---|---|
| Force gravitationnelle | | f : force exercée ; G : constante de la gravitation ; M et m : masses des deux corps ; r : distance entre les deux corps | $f = - G M m / r^2$ |
| Excentricité d'une ellipse en fonction des deux demi-axes | | a : demi grand axe ; b : demi petit axe ; e : exentricité | $e^2 = (a^2 - b^2) / a^2$ |
| | | c : demi distance focale | $e = c / a$ |
| | | | $a^2 = b^2 + c^2$ |
| Distance périhélique (distance de la planète au Soleil au périhélie) | | | $a (1 - e)$ |
| Distance aphélique (distance de la planète au Soleil au périhélie) | | | $a (1 + e)$ |
| Vitesse d'une planète sur son orbite | | v : vitesse ; r : rayon-vecteur ; M : masse du Soleil ; m : masse de la planète | $v^2 = G (M + m) (2/r - 1/a)$ |
| Vitesse au périhélie | | | $v^2 = [G (M + m) / a] \times (1 + e) / (1 - e)$ |
| Vitesse à l'aphélie | | | $v^2 = [G (M + m) / a] \times (1 - e) / (1 + e)$ |
| Position de la planète sur son orbite | | u : anomalie excentrique ; n : moyen mouvement ; t : temps | $u - e \sin u = n t$ |
| *idem* | | v : anomalie vraie | $\tan (u / 2) = \mathrm{sqrt}((1 - e) / (1 + e)) \tan (v / 2)$ |
| Energie reçue du Soleil / celle reçue sur Terre | | $E_p$ : énergie reçue par la planète ; $E_p$ : énergie reçue par la Terre $d_T$ : distance Terre-Soleil ; $d_p$ : distance Planète-Soleil | $E_p = E_T (d_T / d_p)^2$ |
| Loi de Stefan-Boltzman | | | $W = \sigma T^4$ |
| loi de Pogson | | relation entre la magnitude absolue et la luminosité d'une étoile | $M = - 2,5 \log L + cste$ |
| | | relation de définition de la magnitude absolue | $m - M = 5 \log d - 5$ |
| valeur de l'année-lumière | | | $1 AL = 10^{13} km$ |
| intervalle de masse des étoiles | | | $0,08 M < M_* < 120 M$ |
| intervalle de masse des naines brunes | | | $0,01 M < M^* < 0,08 M$ |
| intervalle de masse des planètes | | | $M^* < 0,01 M$ |
| intervalle de luminosité des étoiles | | | $0,005 L < L_* < 900.000 L$ |
| intervalle de rayon des étoiles | | | $0,02 R < R_* < 1.100 R$ |
| intervalle de température effective des étoiles | | | $2.000 K < T_{eff} < 150.000 K$ |
| température effective d'une étoile | | | $T = (L / 4 \pi \sigma R^2)^{1/4}$ |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | | $_{eff}$ |
| 3$^{me}$ loi de Kepler | | M et m : masses de l'étoile et de la planète | $a^3 / T^2 = G (M + m) / 4 \pi^2)$ |
| Opacité d'un gaz | | $\rho$ : masse volumique du gaz ; T : température du gaz. | $\kappa = \kappa 0 \rho / T^{3,5}$ |
| Loi de Wien | | T : température en Kelvins ; $\lambda_m$ longueur d'onde du maximum en micromètres. | $\lambda_m = 2.898 / T$ K $\mu m^{-1}$ |
| | | | |
| conversion énergie-température | | | 1 eV = 11.600 K |
| Décalage spectral pour un objet proche | | $\lambda$ est la longueur d'onde ; v la vitesse ; c la célérité de la lumière. | $z = \Delta\lambda / \lambda = v / c$ |
| Température du fond de rayonnement cosmique depuis le Big Bang | | $T_0$ est la température actuelle, 2,7 K ; T est la température au temps correspondant à z. | $T = T_0 (1 + z)$ |

---=OO=---




## *Les puissances de dix*

Leur emploi est universel en physique, pour des raisons de commodité.

Par exemple, l'unité de longueur est le mètre, qui correspond à une valeur commode pour nous, à notre échelle, mais qui se trouve totalement inadaptée pour décrire les noyaux atomiques, les longeurs d'onde de la lumière ou les distances dans l'univers.

On résoud ce problème de deux manières différentes :

- en définissant des unités dérivées, qui se déduisent de l'unité principale par un coefficient constant. Par exemple, le kilomètre vaut 1.000 mètres, l'angström utilisé autrefois valait 1 dix-milliardième de mètre ;
- en notant les valeurs à l'aide de coefficients multiplicateurs qui permettent de changer d'échelle ; une année-lumière vaut $10^{13}$ kilomètres.

Les unités dérivées se définissent à l'aide de puissances de 10 : le kilomètre vaut $10^3$ mètres ; l'angström vaut $10^{-10}$ mètres ;

Par définition, la puissance n est le produit de n termes égaux ; c'est donc une abbréviation :

$10^2 = 10 \times 10$

$10^3 = 10 \times 10 \times 10$

$10^4 = 10 \times 10 \times 10 \times 10$

etc.

Nous nous sommes limités à la puissance 4, mais on peut continuer aussi loin qu'on veut :

$$10^n = 10 \times 10 \times ... 10 \quad \text{produit de n termes}$$

Il est bien évident que l'on peut remplacer 10 par 2, ou 3, pour décrire les puissances respectives de ces nombres. De manière un peu plus abstraite, on peut donc remplacer 10 par une lettre, qui est censée représenter n'importe quelle valeur entière :

$$\boxed{a^n = a \times a \times ... \times a \quad \text{produit de n termes}}$$

avec $n \geq 2$, puisque nous sommes partis du carré, qui met en jeu deux termes.

Nous avons commencé avec des entiers. Mais on peut aussi calculer le carré d'un nombre décimal :

$$2{,}5^2 = 2{,}5 \times 2{,}5 = 6{,}25$$

La formule ci-dessus est donc valable si a prend une **valeur décimale quelconque**.

**Première formule**

Il est envisageable de multiplier deux puissances. Qu'obtient-on ? Soit à calculer : $10^n \times 10^p$

Par définition, $10^n = 10 \times 10 \times ... 10$ produit de n termes, et $10^p = 10 \times 10 \times ... 10$ produit de p termes

Donc $10^n \times 10^p = 10 \times 10 \times ... 10 \times 10 \times 10 \times ... 10$ produit de n termes multiplié par produit de p termes

Il y a donc dans ce produit n + p termes.

Pour bien voir ceci, écrivons-le pour $10^2 \times 10^3 = (10 \times 10) \times (10 \times 10 \times 10) =$ produit de 5 termes $= 10^5 = 10^{2+3}$

$10^n \times 10^p = 10^{n+p}$

Ceci peut être fait pour toute autre valeur décimale, et donc :

$$a^n \times a^p = a^{n+p}$$

Remarquez que la formule transforme un **produit de puissances** en une **puissance de somme**.

**Deuxième formule**

On peut envisager de calculer une puissance d'une puissance : $(10^n)^p$.

Par définition, $10^n = 10 \times 10 \times ... 10$ produit de n termes

Donc la puissance p de cette valeur est : $(10 \times 10 \times ... 10)^p = (10 \times 10 \times ... 10) \times (10 \times 10 \times ... 10)... (10 \times 10 \times ... 10)$

Dans chaque paire de parenthèses, il y a n termes, et il y a p paires de parenthèses. Donc, il y a en tout n × p fois la valeur 10.

Pour fixer les idées, nous avons en particulier : $(10^2)^3 = (10 \times 10) \times (10 \times 10) \times (10 \times 10) = 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 = 10^6$

En revenant à la définition, ceci représente $10^{n \times p}$

On ne note pas le produit : $10^{np}$

On vient donc de montrer (même si c'est de manière un peu informelle) que $(10^n)^p = 10^{np}$

Ce que nous nous empressons de réécrire de manière générale :

$$(a^n)^p = a^{np}$$

Remarquez cette fois que la formule transforme une **puissance de puissances** en une **puissance de produit**.

**Première conséquence**

Pour qu'une puissance existe, naturellement, il faut qu'il y ait au moins deux termes ! Donc, $a^1$ n'est pas défini. Ceci est bien gênant, car une telle écriture peut très bien apparaître comme résultat d'un calcul. Que faire ?

Bien évidemment, si nous définissons $a^1$ par une expression quelconque, il y a peu de chances pourqu'elle satisfasse la formule 1. Aussi, c'est bien de la première formule qu'il faut partir pour tenter une définition.

Dans cette formule, prenons p = 1 : $a^n \times a^1 = a^{n+1}$. A gauche, $a^n$ contient n termes, et à droite $a^{n+1}$ contient (n + 1) termes. Pour que l'égalité soit conservée, il faut donc que $a^1$ contienne exactement 1 terme, donc que :

$$a^1 = a$$

**Deuxième conséquence**

Sur cette lancée, qu'en serait-il de 0 ? Autrement dit, pourrait-on définir, donner un sens à, $a^0$ ?

Le même raisonnement que ci-dessus nous amène à partir de la formule 1, et à l'appliquer avec p = 0 :

$a^n \times a^0 = a^{n+0} = a^n$.

A gauche, $a^n$ contient n termes ; à droite, on retrouve les mêmes n termes. Donc, à gauche, la multiplication par $a^0$ ne change pas la valeur. La seule possibilité est que :

$$a^0 = 1$$

Remarquez que la valeur 1 est la même, quelle que soit la valeur de a ! $1 = 2^0 = 3^0 = 4^0$...

Pour les deux définitions que nous venons de proposer, remarquez que 0 est l'élément neutre de l'addition, et 1 celui de la multiplication.

L'opération *puissance* transforme l'élément neutre de l'addition en l'élément neutre de la multiplication. Les mathématiques montrent une magnifique cohérence !

**Troisième conséquence**

Ayant défini initialement les puissances pour $p \geq 2$, nous venons de prolonger cette définition pour p = 1 puis p = 0. Maintenant, tout entier positif ou nul peut être une puissance. Que dire des entiers négatifs ?

Pour l'instant, on ne peut pas les considérer. Mais là encore, on peut envisager de les voir apparaître. En effet, si n est le résultat d'un calcul, rien n'empêche d'obtenir une valeur négative pour n, et de trouver $a^{-3}$ par exemple. Une telle situation s'est produite dans le passé (lointain), et les mathématiciens en restaient là, sur une impossibilité de résoudre le problème. Mais là encore, nous allons trouver une méthode. Comme précédemment, pour que les calculs soient réguliers, il faut que la formule 1 soit valide avec la définition de la puissance négative. Donc :

$a^n \times a^{-p} = a^{n-p}$.

A gauche, nous avons un produit de n termes, multiplié par la valeur à déterminer de $a^{-p}$. A doite, dans $a^{n-p}$, nous avons n - p termes, c'est-à-dire n termes, auquels on en a retranché p. Pour que ce soit égal à l'expression de gauche, il faut qu'il y ait le même nombre de termes, donc il faut que $a^{-p}$ retranche p termes aux n de $a^n$…

Pour retrancher ces p termes, il suffit de diviser p fois par a, c'est-à-dire diviser par $a^p$. Et donc :

$$a^{-p} = 1 / a^p$$

Exemple : on doit avoir $a^3 \times a^{-2} = a^{3-2}$

$(a \times a \times a) \times (a^{-2}) = a^{3-2} = a^1 = a$

Donc, $a^{-2}$ retranche 2 a à gauche. Pour cela, $a^{-2}$ divise deux fois par a, ce qu'on peut encore traduire par divise par $a^{+2}$.

$a^{-p}$ divise par $a^p$, ou encore multiplie par $1 / a^{-p}$

Maintenant, nous avons défini $a^n$ pour toute valeur entière de n, positive, négative ou nulle, de telle manière que la formule 1 soit vérifiée :

$$a^n a^p = a^{n+p} \quad \_\_ n, p \_\_ \_\_$$

On n'a pas noté l'opérateur de multiplication à gauche. Les symboles à droite signifient que la formule est valable pour tous les n, et pour tous les p, pris dans l'ensemble des entiers relatifs (c'est-à-dire positifs, négatifs, ou 0).

$$= \{... -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, ...\}$$

**Vérification de la formule 2**

Maintenant que nous avons défini les puissances en-dessous de 2, il faut vérifier que la formule 2 $(a^n)^p = a^{np}$ est toujours valide. Il faut passer en revue les valeurs de n et de p non considérées avant, donc 1, 0 et les valeurs négatives.

Prenons d'abord n = 1. La formule devient $(a^1)^p = a^{1\,p}$. D'après la définition, $a^1 = a$, et 1 p = p. Donc $a^p = a^p$ est évidemment vérifié. Les mathématiciens disent *trivialement*, terme qui signifie *tellement évident qu'aucune démonstration n'est nécessaire*.

Considérons maintenant n négatif, avec p positif. La tâche n'est guère plus importante : $(a^{-n})^p = a^{-n\,p}$. Toujours en appliquant la définition, $a^{-n} = 1 / a^n$. Donc il faut vérifier que $(1 / a^n)^p = a^{-n\,p}$.

Examinons d'abord le terme de gauche. $(1 / a^n)^p = (1 / a \times a... \times a)^p = (1 / a \times a... \times a) \times (1 / a \times a... \times a)... \times (1 / a \times a... \times a)$.

Dans chaque parenthèse, il y a n termes, et il y a p parenthèses. Donc ceci est égal à $1 / (a \times a... \times a)$ où la parenthèse contient n p termes. C'est donc par définition $1 / a^{n\,p}$. Et enfin, par définition de la puissance négative, $1 / a^{n\,p} = a^{-n\,p}$. cqfd

Ceci achève la démonstration pour les valeurs de n 1, 0 et négatives. Il est facile de faire le même genre de travail pour les valeurs de p, ce qui achèverait la démonstration, et que nous laissons au lecteur. La méthode est toujours la même : il faut revenir aux définitions.

## *Résumé des puissances*

| |
|---|
| $a^n = a \times a \times ... \times a$ produit de n termes |
| $a^1 = a$ |
| $a^0 = 1$ |
| $a^{-p} = 1 / a^p$ |
| $a^n a^p = a^{n+p}$ __ n, p __ __ |
| $(a^n)^p = a^{np}$ __ n, p __ __ |

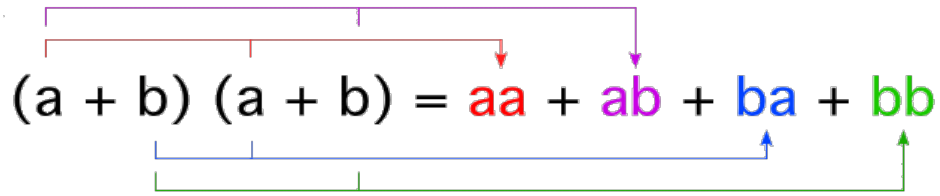
## *Identités remarquables*

### Carré d'une somme

L'identité s'écrit $(a + b)^2 = a^2 + 2\,a\,b + b^2$

Il est très facile de la démontrer algébriquement : $(a + b)^2 = (a + b)\,(a + b)$

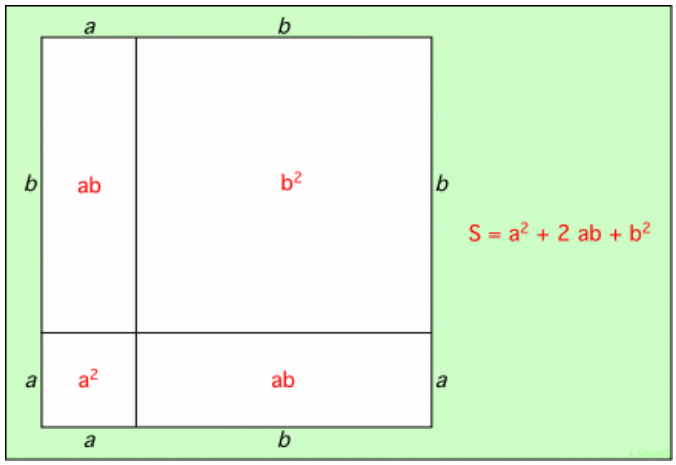
Pour calculer le produit de ces deux facteurs, on additionne les produits de chaque couple de termes. Les couples de termes sont mis en lumière ci-dessous :




Le produit étant commutatif, ab = ba, et donc les deux termes se concentrent en 2 ab :

$$(a + b)^2 = a^2 + 2\,ab + b^2$$

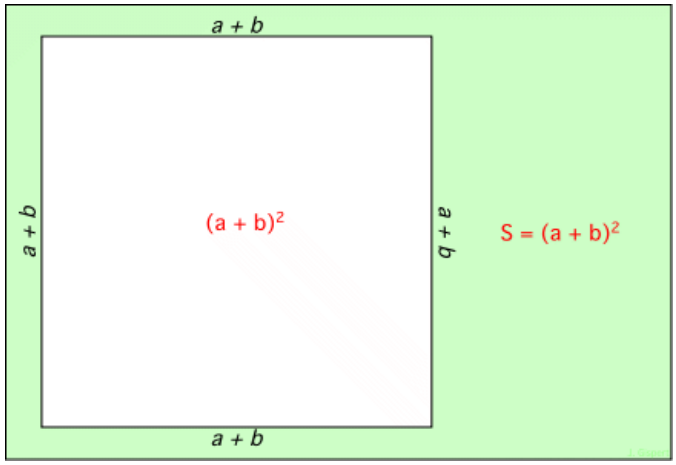
Mais on peut voir cette égalité sous une forme géométrique, peut-être plus parlante. Un carré (algébrique) est la mesure de la surface d'un carré. Ainsi, $a^2$ mesure la surface d'un carré de côté a. Plus généralement, la surface d'un rectangle de côtés a et b est le produit ab de ses côtés. La figure ci-dessous se décompose en quatre parties :




Tout d'abord, en bas à gauche, un petit carré de côté a. Sa surface, notée en rouge en son centre, vaut $a^2$. Ensuite, on trouve un second carré, plus grand, de côté b, et haut et à droite. Sa surface est donc $b^2$. La figure se complète par un rectangle en haut à gauche, qui s'appuie sur les deux carrés, et dont les côtés sont par conséquent a et b. Ce rectangle a une surface valant ab. Enfin, en bas et à droite, un autre rectangle qui s'appuie sur d'autres côtés des carrés, et dont les côtés sont également a et b. Sa surface vaut par conséquent aussi ab.

La figure complète est un carré, puisque chaque côté comporte deux longueurs, a et b. Et sa surface est la somme des surfaces de chaque composante, donc $a^2 + b^2 + ab + ab$. On ajoute les deux quantités égales, et on réarrange en : $S = a^2 + 2\,ab + b^2$. Cette formule est donc une représentation de la surface totale du grand carré.

Alternativement, on peut calculer directement sa surface. Puisque son côté vaut a + b, sa surface s'obtient en multipliant a + b par a + b, c'est-à-dire en prenant le carré de a + b, soit $(a + b)^2$. On le voit sur la figure ci-dessous :




Nous venons de trouver deux formules différentes, qui représentent toutes deux la même quantité : la surface du grand carré. Par conséquent, ces deux quantités sont égales, et l'on peut écrire : $(a + b)^2 = a^2 + 2\,ab + b^2$

Pourrait-on avoir une formule semblable avec des cubes ? Bien sûr ! Algébriquement, il suffit de reprendre la définition du cube, et d'effectuer :

$(a + b)^3 = (a + b)\,(a + b)\,(a + b) = (a + b)\,(a^2 + 2\,ab + b^2)$

où l'on a remplacé le produit des deux derniers termes par la formule équivalente qu'on vient de déterminer. Il nous reste seulement à effectuer ce produit. Comme plus haut, c'est la somme des produits de chaque couple de termes :

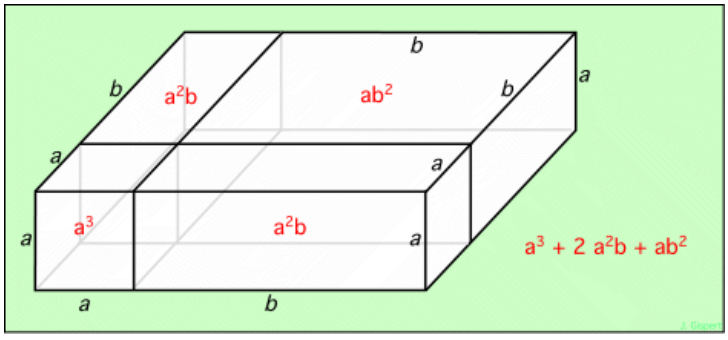
$(a + b)\,(a^2 + 2\,ab + b^2) = a^3 + 2\,a^2b + ab^2 + a^2b + 2\,ab^2 + b^3$

et en regroupant les termes égaux :

$$(a + b)^3 = a^3 + 3\,a^2b + 3ab^2 + b^3$$

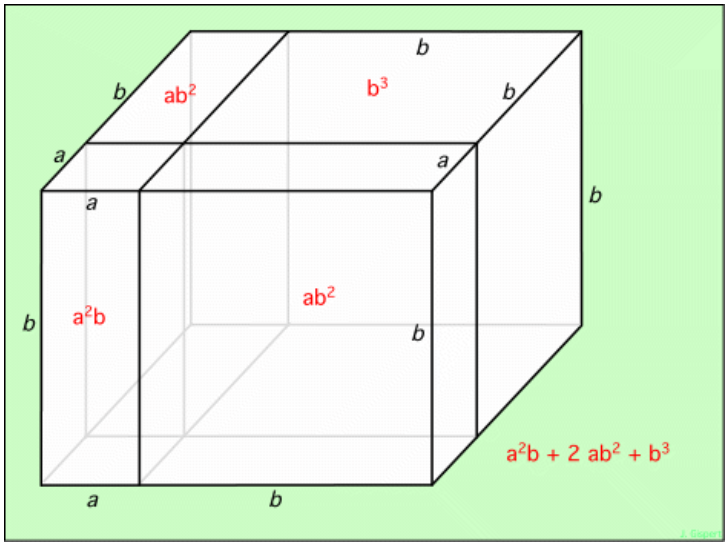
Y aurait-il aussi une interprétation géométrique ? Oui, là encore... Evidemment, à la place de surfaces, on aura des volumes. Repartons de la figure en surface précédente, et donnons-lui une épaisseur.

On construit ainsi une plaque d'épaisseur a, représentée ci-dessous :



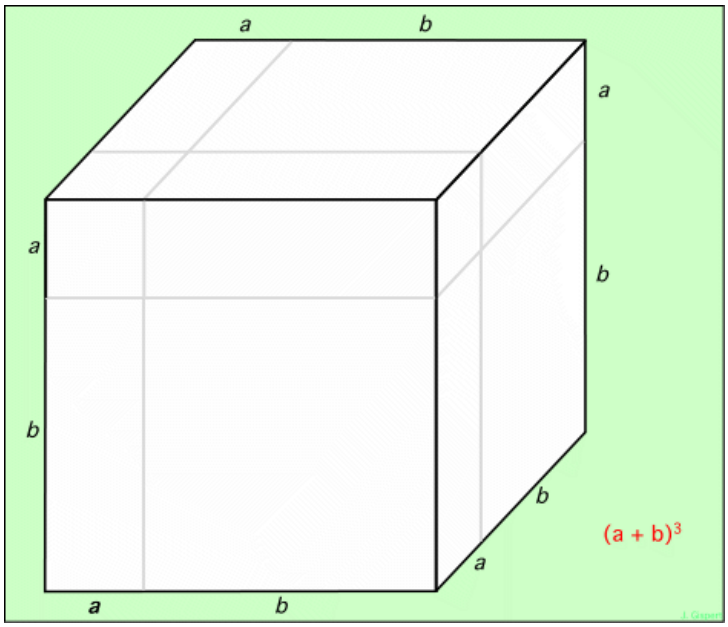

Il est facile d'en évaluer les différents volumes : on note la longueur de chaque côté, et on multiplie. Le résultat est noté en bas à droite de la figure.

Construisons maintenant un autre volume, en donnant à la surface précédente une épaisseur b :




L'évaluation des volumes est tout aussi simple. La somme est notée en bas à droite.

Il ne reste qu'à empiler les deux volumes à peine construits :




Le volume total des deux parties est donc :

$a^3 + 2\,a^2b + ab^2 + a^2b + 2\,ab^2 + b^3$

Le plus en rouge sépare les deux expressions provenant des deux parties de la figure. Le résultat est :

$a^3 + 3\,a^2b + 3\,ab^2 + b^3$

Par construction, on a bien un cube de côté a + b. Par conséquent son volume est $(a + b)^3$. L'égalité de ces deux expressions du volume donne la formule annoncée.

Pourrait-on aller encore plus loin, et envisager une puissance 4 ? Bien sûr, il suffit, algébriquement, de multiplier le dernier résultat par a + b, pour passer de la puissance 3 à la puissance 4. Le calcul donne :

$(a + b)^4 = a^4 + 4\,a^3b + 6\,a^2b^2 + 4\,ab^3 + b^4$

On voit apparaître une forme facile à prévoir. Tous les termes de la somme totalisent les mêmes exposants : le premier a l'exposant 4 pour a, et 0 pour b ; le second a 3 pour a, 1 pour b ; le troisième 2 pour chacun ; le quatrième 1 pour a et 3 pour b ; et enfin le dernier 4 pour b. On peut prévoir que les puissances supérieures seront construites de la même manière. D'ailleurs, les constructions géométriques ci-dessus nous ont montré que pour la puissance 2, c'est une somme de surfaces. Toute surface est le produit de deux termes, donc il doit y avoir exactement deux termes, égaux (comme dans $a^2$), ou différents (comme dans ab). Pour le cube, c'est une somme de volumes, donc trois termes...

Mais au-delà de 3, l'intuition géométrique ne peut pas être poursuivie... tout au moins avec des mathématiques élémentaires. Il existe des géométries dans des espaces ayant plus de trois dimensions, mais nous ne sommes pas capables de les visualiser dans notre espace à trois dimensions.

Mais un raisonnement sur la forme des expressions permet de calculer une puissance quelconque. Le problème est de déterminer les coefficients,

et le triangle de Pascal permet de le faire. On écrit tout d'abord 1 sur la première ligne, puis 1, et 1 sur la seconde. La première ligne correspond à $(a + b)^0$ qui vaut 1, la seconde à la puissance 1, qui s'écrit 1 a + 1 b. Ensuite, pour chaque ligne successive, on additionne les deux termes qui sont dans la ligne immédiatement au-dessus, dans la case au-dessus et celle qui est à sa gauche. Voici quelques lignes du triangle :

1
1 1
1 2 1
1 3 3 1
1 4 6 4 1
1 5 10 10 5 1

On peut continuer ainsi, après avoir vérifié que les expressions que nous avons obtenues plus haut sont bien en accord avec les coefficients obtenus ici.

Dans le volume que nous avons dessiné, la face supérieure représente le dessin des surfaces, et montre que $(a + b)^2 = a^2 + 2\,ab + b^2$. Les volumes montrent de leur côté que $(a + b)^3 = a^3 + 3\,a^2b + 3\,ab^2 + b^3$. Une figure à 4 dimensions (que l'on ne peut pas dessiner, mais qui est imaginable, et mathématiquement constructible) exhiberait ces deux identités sur des 'faces', et en plus l'identité $(a + b)^4 = a^4 + 4\,a^3b + 6\,a^2b^2 + 4\,ab^3 + b^4$. On peut imaginer aussi la dimension 5, et ainsi de suite. Un hypervolume de dimension n, exhiberait ainsi toutes les identités remarquables jusqu'à la puissance n, comme décomposition de certaines faces, de dimension 2 pour la puissance 2, de dimension 3 pour la puissance 3...

Si on part de $10^4$, on obtient $10^3$ en divisant par 10 : $10^3 = 10^4 / 10$ ;

de même, partant de $10^3$, on obtient $10^2$ en divisant par 10 : $10^2 = 10^3 / 10$ ;

puis $10^2$ donne $10^1 = 10$ en divisant par 10 une nouvelle fois : $10^1 = 10^2 / 10$ ; $10^1 = 100 / 10 = 10$.

On voit donc tout d'abord que $10^1 = 10$.

Que se passe-t-il si nous divisons cette dernière valeur par 10 ? $10^1 / 10 = 10 / 10 = 1$. Or dans notre procédé nous avons à chaque opération retranché 1 à la puissance : on est passé de la puissance 4 à la puissance 3, puis de 3 à 2 ... Maintenant, partant de 1, nous obtenons 0 !

On définit donc une nouvelle puissance ainsi :

$$10^0 = 1$$

On peut représenter tout ce qui vient d'être défini sous forme de tableau, le nombre du haut étant la puissance, et celui du bas la valeur de 10 élevé à cette puissance :

| **n** | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\mathbf{10^n}$ | 1 | 10 | 100 | 1.000 | 10.000 | 100.000 | 1.000.000 |

Bien sûr, tout ce que nous venons de dire peut se répéter pour d'autres nombres : on définit les puissances d'un nombre quelconque x de la manière suivante :

$$x^n = \text{produit de n termes égaux à x}$$

La dernière étape de notre raisonnement ci-dessus nous a montré qu'on passait de $10^1 = 10$ à $10^0 = 10 / 10 = 1$. De même, $x^1 = x$ et donc $x^0 = x / x = 1$.

**Donc tout nombre à la puissance 0 donne 1.**

**Les puissances négatives**

Et si nous continuions notre procédé ?

Nous nous sommes arrêtés à $10^0 = 1$ ; si nous divisons encore par 10, nous obtenons 1/10 et nous retranchons 1 à la puissance. D'où, naturellement :

$10^{-1} = 1/10$

On continue ?

$10^{-2} = 1/100$

$10^{-3} = 1/1000$

etc.

Maintenant, nous avons défini toutes les puissances entières de 10. Ce que nous avons fait sur cette valeur particulière peut se faire sur tout nombre.

La puissance 2 porte un nom particulier : on l'appelle *carré*, car c'est elle qui donne la surface d'un carré.

La puissance 3 de même se nomme *cube*, car elle donne le volume d'un cube.

On s'arrête là, car notre univers ne présente que 3 dimensions (d'espace)... à moins que la théorie des supercordes ne nous en révèle d'autres, mais celles-ci, si elles existent, échappent à nos sens.

| $10^{-6}$ | $10^{-5}$ | $10^{-4}$ | $10^{-3}$ | $10^{-2}$ | $10^{-1}$ | $10^0$ | $10^1$ | $10^2$ | $10^3$ | $10^4$ | $10^5$ | | $10^6$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,000001 | 0,00001 | 0,0001 | 0,001 | 0,01 | 0,1 | 1 | 10 | 100 | 1.000 | 10.000 | 100.000 | | 1.000.000 |
| micro | | | milli | | | | | hecto | kilo | | | | méga |

On remarque dans ce tableau que pour écrire sous forme de nombre la puissance $10^n$, il faut écrire "1" suivi de n zéros. Ainsi $10^3$ s'écrit "1" suivi de trois "0".

De même, pour écrire $10^{-n}$, il faut écrire "0", suivi de n-1 zéros, suivi de 1. Ainsi $10^{-3}$ s'écrit "0", suivi de deux 0, suivi de 1 (dans les deux cas, il y a n chiffres, soit avant, soit après la virgule).

**Calcul des puissances**

Le produit de deux puissances peut s'écrire sous une forme simple. Voyons d'abord un exemple :

$10^5 \times 10^3 = 100.000 \times 1.000 = 100.000.000 = 10^8$

Ceci peut se faire plus généralement :

$10^n \times 10^p$ = ("1" suivi de n zéro) × ("1" suivi de p zéro) = ("1" suivi de n+p zéro) = $10^{n+p}$

Par conséquent : $\mathbf{10^n \times 10^p = 10^{n+p}}$

Si l'une des deux puissances est négative, le résultat est le même :

$10^5 \times 10^{-3} = 100.000 \times 0,001 = 1.000 = 10^3$

d'où $\mathbf{10^n \times 10^{-p} = 10^{n-p}}$

On pourrait vérifier aussi que le résultat se conserve si les deux puissances sont négatives. Au bout du compte, la formule est vraie pour tout n et p entiers négatifs, positifs ou nuls.

**Exemple**

Une année-lumière est la distance parcourue par la lumière en une année. La lumière se propage à la vitesse de 300.000 kilomètres par seconde. $300.000 = 3 \times 100.000 = 3\ 10^5$. On peut déjà écrire que la vitesse de la lumière vaut $3\ 10^5$ kilomètres par seconde.

Transformons maintenant cette valeur dans les unités internationales, c'est-à-dire en mètres par seconde. Un kilomètre vaut 1.000 mètres, c'est-à-dire $10^3$ mètres. Donc la vitesse de la lumière est de $3\ 10^5$ fois $10^3$ mètres par seconde = $3\ 10^5$ x $10^3$ mètres par seconde = $3\ 10^{5+3}$ mètres par seconde = $3\ 10^8$ mètres par seconde.

Pour connaître l'année-lumière en mètres, il faut multiplier la vitesse par le temps ; calculons ce temps. L'année contient 365 jours de 24 heures, chaque heure est composée de 60 minutes de 60 secondes.

1 heure = 60 × 60 secondes = 3.600 secondes

1 année = 365 × 24 heures = 8.760 heures

d'où : 1 année = 8.760 × 3.600 secondes = 31.536.000 secondes

Une année-lumière vaut 3 $10^8$ mètres par seconde × 31.536.000 secondes = 3 $10^8$ × 31.536.000 = 3 × 31.536.000 $10^8$ = 94.608.000 $10^8$ mètres.

Cette valeur est trop précise pour qu'on puisse la retenir. Changeons-la un peu pour la simplifier. 94.608.000 est très proche de 94.000.000, qui est proche de 100.000.000. Maintenant, nous n'avons plus qu'un 1 suivi de 8 zéros. Ce nombre peut donc s'écrire sous forme d'une puissance de 10 :

100.000.000 = $10^8$

L'année-lumière est donc très proche de : $10^8$ × $10^8$ mètres = $10^{8+8}$ mètres = $10^{16}$ mètres

Si on l'écrit sous forme de nombre : $10^{16}$ mètres = 10.000.000.000.000.000 mètres, nombre absolument illisible !

Si on veut exprimer l'année-lumière en kilomètres, il suffit d'enlever 3 zéros à ce nombre, donc de retrancher 3 à la puissance de 10 :

**1 AL = $10^{13}$ kilomètres**

**Préfixes**

Pour parler simplement, on définit des préfixes correspondant à des coefficients standards :

hecto = $10^2$ = 100

kilo = $10^3$ = 1.000

| femto | pico | nano | micro | milli | kilo | méga | giga | téra | péta |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $10^{-15}$ | $10^{-12}$ | $10^{-9}$ | $10^{-6}$ | $10^{-3}$ | $10^3$ | $10^6$ | $10^9$ | $10^{12}$ | $10^{15}$ |

Le pulsar milliseconde tourne sur lui-même en une milliseconde !

Le *laser femtoseconde* est un laser dont l'impulsion lumineuse dure une femtoseconde, soit un millionième de milliardième de seconde !

**Les constantes physiques**

Nombre d'Avogadro N = 6,022 $10^{23}$ $mol^{-1}$

Constante de Boltzmann $k_B$ = 8,617 $10^{-5}$ eV $K^{-1}$

Constante de Plank h = 4,136 $10^{-15}$ eV s

Vitesse de la lumière dans le vide c = 299.792.458 m $s^{-1}$ proche de 300.000 km $s^{-1}$

Charge élémentaire de l'électron e = 1,602 $10^{-19}$ C

Masse de l'électron $m_B$ = 9,109 $10^{-31}$ kg

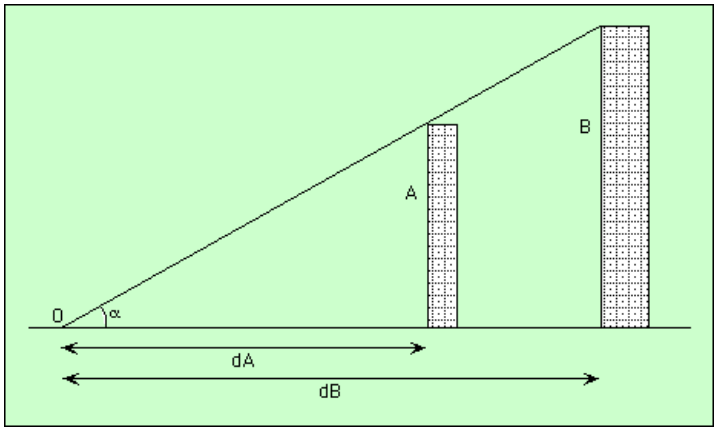
Masse du proton mp = 1,673 $10^{-27}$ kg

Masse du neutron mn = 1,675 $10^{-27}$ kg

# Trigonométrie

La trigonométrie a été inventée il y a très longtemps, pour résoudre les problèmes qui se posent dans un triangle (d'où le nom, du grec *tri* trois, *gonos* angle).

Comment mesurer la hauteur d'un immeuble, sans dérouler une corde depuis le toit ? On peut faire un dessin et remarquer que plusieurs immeubles de tailles différentes, mais situés à des distances différentes, sont vus sous la même hauteur **apparente**. Cette hauteur se matérialise par l'angle α sous lequel on voit l'immeuble.




L'idée de base consiste donc à trouver un immeuble assez bas pour pouvoir le mesurer, et à déterminer la hauteur du grand en faisant une proportion :

$$\text{hauteurB} / \text{hauteurA} = \text{distanceB} / \text{distanceA}$$

On connait hauteurA, distanceA et distanceB, on en déduit hauteurB = (distanceB / distanceA) × hauteurA.

Pour faire cette mesure, on a utilisé une propriété des *triangles semblables* : leurs côtés sont dans le même rapport. Deux trinagles sont semblables s'ils ont la même forme, mais sont de dimensions différentes. C'est exactement ce qui se passe si vous faites des photos d'un triangle, avec des réglages de zoom différents. Sur les photos, vous verrez toujours le même triangle, mais avec des tailles différentes.

**Etude des rapports**

Les rapports de longueurs que l'on peut définir dans les triangles sont donc très importants, et l'idée est vite venue de les étudier et de formaliser les calculs associés. C'est ce que fait la trigonométrie.

Reprenons le rapport précédent, en simplifiant un peu l'écriture :

$$\text{hauteurB} / \text{hauteurA} = \text{distanceB} / \text{distanceA}$$

réécrit

$$hB / hA = dB / dA$$

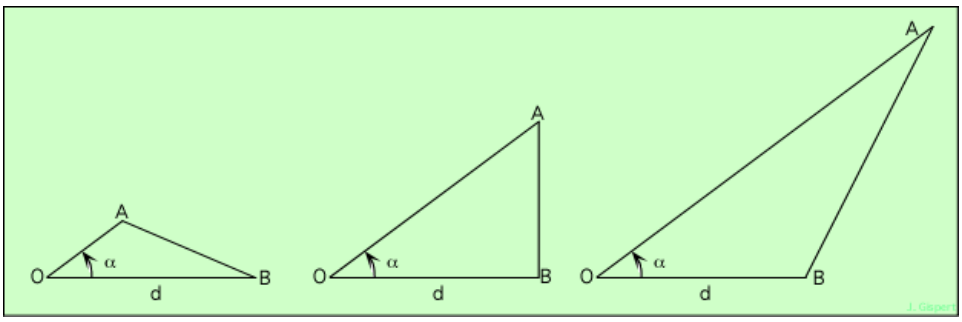
De chaque côté de l'égalité on voit des grandeurs dépendant des deux immeubles. On peut réécrire le rapport en mettant du même côté le grandeurs qui caractérisent chacun :

$$hB / dB = hA / dA$$

Ceci exprime que **le rapport hauteur / distance est le même pour tous les triangles semblables**. C'est-à-dire pour tous les triangles qui ont les mêmes angles. On va donc caractériser les angles (cette famille de triangles), par le rapport hauteurA / distanceA en particulier.

**Triangles particuliers**

Les triangles les plus divers sont trop complexes pour être apréhendés facilement. En effet, avec un angle α donné, on peut avoir n'importe quelle valeur pour les deux autres angles :




Ces trois triangles partagent le même angle α (celui auquel on va s'intéresser), et aussi la même base OB = d. Mais les autres côtés sont différents.Celui du milieu est particulier : il est rectangle en B (l'angle B vaut 90°). Pour représenter l'angle α, on peut choisir ce triangle particulier. C'est ce choix qui est la base de la trigonométrie.

**En résumé :** la trigonométrie est l'étude des rapports dans les triangles, et pour pouvoir les caractériser, on choisit les triangles rectangles comme représentants.

## Fonctions trigonométriques

On définit trois fonction de base : le sinus, le cosinus et la tangente. Chacune correspond à un rapport dans un triangle rectangle. Considérez donc le triangle rectangle au centre de la figure.

| | |
|---|---|
| Le sinus (noté *sin*) est le rapport du côté opposé sur l'hypothénuse : | **sin α = AB / OA** |
| Le cosinus (noté *cos*) est le rapport du côté adjacent sur l'hypothénuse : | **cos α = OB / OA** |
| La tangente (notée *tg*) est le rapport du côté opposé sur le côté adjacent : | **tg α = AB / OB** |

Nous pouvons déjà trouver une propriété, en divisant le sinus par le cosinus :

sin α / cos α = (AB / OA) / (OB / OA) = (AB / OA) x (OA / OB) = AB / OB

On constate que c'est le rapport qui définit la tangente. Donc :

**sin α / cos α = tg α**

On voit tout de suite que si l'angle est nul, la hauteur de l'immeuble est nulle aussi. Si l'angle vaut 90°, la tangente (la hauteur) est infinie.

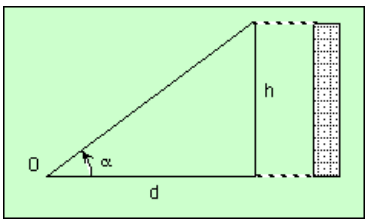
Pour quelle valeur de l'angle la hauteur vaut-elle 1 ? Si on refait un dessin montrant cette situation, on s'aperçoit qu'on a construit un carré, et que le triangle CPS est la moitié du carré. Donc l'angle recherché vaut la moitié d'un angle droit, 45°.

Supposons qu'on ait réussi à calculer les valeurs de cette fonction pour un grand nombre de valeurs de l'angle. Ces valeurs seront notées dans une table sous la forme :

| angle | tangente | angle | tangente |
|---|---|---|---|
| 0° | 0 | 50° | 1,19 |
| 5° | 0,0875 | 55° | 1,43 |
| 10° | 0,176 | 60° | 1,73 |
| 15° | 0,268 | 65° | 2,14 |
| 20° | 0,364 | 70° | 2,75 |
| 25° | 0,466 | 75° | 3,73 |
| 30° | 0,577 | 80° | 5,67 |
| 35° | 0,700 | 85° | 11,4 |
| 40° | 0,839 | 90° | infinie |
| 45° | 1,000 | | |

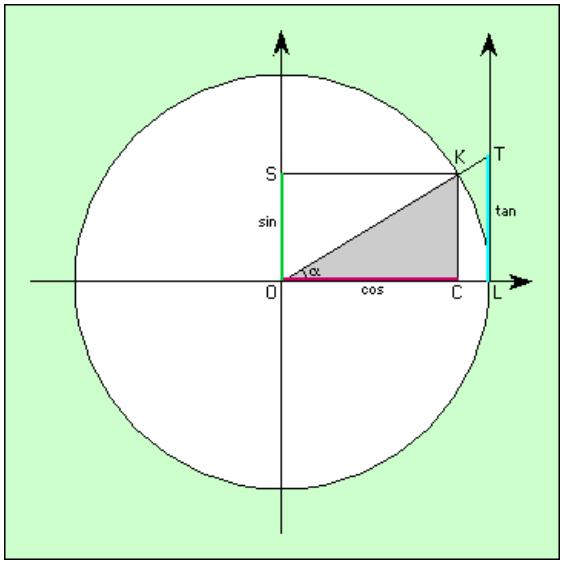
Alors, on peut calculer la hauteur d'un immeuble simplement en mesurant l'angle sous lequel on le voit et sa distance :

hauteur = distance tg α




**Cercle trigonométrique**

Pour tenir compte de tous les angles possibles, on définit le cercle trigonométrique dans lequel ils vont s'inscrire/ Par définition, le cercle trigonométrique est un cercle de rayon 1 (ce qui se justifie puisqu'on ne calcule que des rapports), avec deux axes orientés perpendiculaires :




Donc sur le schéma, OL = OK = 1.

La tangente de l'angle α est notée tan, et sa mesure est la longueur du segment LT.

Sur le cercle trigonométrique, on définit encore deux fonctions, nommées sinus et cosinus. Comme la tangente, ce sont des rapports :

$$\sin \alpha = \text{côté opposé / hypothénuse} = CK / OK$$

$$\cos \alpha = \text{côté adjacent / hypothénuse} = OC / OK$$

Les triangles OCK et OLT étant semblables, LT / CK = OL / OC

LT = tg α ; CK = sin α ; OL = 1 ; OC = cos α

Par substitution il vient immédiatement :

tg α / sin α = 1 / cos α

ce qui s'écrit plus simplement :

$$\text{tg } \alpha = \sin \alpha / \cos \alpha$$

**Relation fondamentale**

Dans le triangle rectangle OCK, on peut écrire le théorème de Pytagore :

$OC^2 + CK^2 = OK^2$

par substitution encore il vient :

$\cos \alpha^2 + \sin \alpha^2 = 1^2$

que l'on écrit :

$$\sin \alpha^2 + \cos \alpha^2 = 1$$

Etant donné que le cercle trigonométrique a un rayon unité, on voit que le cosinus ne peut pas dépasser 1. Si l'angle croît jusqu'à 90°, le cosinus décroît jusqu'à 0. L'angle dépassant 90°, le cosinus passe de l'autre côté, il est orienté dans l'autre sens, et devient donc négatif. Sa valeur va décroître jusqu'à l'angle de 180°, et atteindra -1. Ensuite, si l'angle augmente toujours, le cosinus remonte de -1 jusqu'à 0 pour α = 270°, et ensuite jusqu'à 1 pour 360°

Rien ne nous empêche d'entamer un deuxième tour, avec un angle croissant toujours au-dessus de 360°. Les valeurs du cosinus seront les mêmes que précédemant. Donc, on a la relation fondamentale :

$$\cos (360° + \alpha) = \cos \alpha$$

On peut d'ailleurs faire autant de tours qu'on veut, et donc pour toute valeur de n :

$$\mathbf{\cos (n\ 360° + \alpha) = \cos \alpha}$$

Une telle fonction est dite **périodique**, puisque pour des valeurs croissantes de la variable, elle reprend les mêmes valeurs dans le même ordre. La période est de 360°.

Le sinus est symétrique du cosinus.

Tout ce que nous avons vu pour le cosinus peut s'adapter au sinus :

pour $\alpha = 0$, il vaut 0 ;

pour a = 90°, il vaut +1 ;

pour a = 180°, il vaut 0,

et pour a = 270°, il vaut -1.

Le sinus lui aussi est périodique, de période 360°.

$$\sin (n\ 360° + \alpha) = \sin \alpha$$

**Radians**

La plupart du temps, les mathématiciens n'utilisent pas les degrés, mais les radians pour la mesure des angles.

La définition est simple : un tour complet, qui vaut 360°, vaut par définition 2 π radians. D'où la correspondance :

| degrés | 0° | 30° | 45° | 60° | 90° | 180° | 270° | 360° |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| radians | 0 | π / 6 | π / 4 | π / 3 | π / 2 | π | 3 π / 2 | 2 π |

La conversion est facile. Soit à trouver la valeur en radians d'un angle de 23°. On écrit la correspondance :

180° → π

23° → x

Donc : 180° / 23° = π / x

x = π × 23° / 180° = 0,4014 radians

Dans l'autre sens, la conversion est tout aussi aisée :

180° → π

y° → 0,4014

Donc : 180° / y° = π / 0,4014

y = 180 × 0,4014 / π = 22,998°

On peut voir une petite difficulté si l'angle n'est pas un nombre entier de degrés. Prenons un exemple encore. Trouver la valeur en radians de l'angle 23° 42' 12"

Nous allons d'abord convertir cette valeur sexagésimale en valeur décimale :

1' → 60"

x' → 12"

d'où : 1' / x' = 60" / 12"

et x' = (12" / 60") × 1' = 0,2'

Par conséquent, 12" font 0,2'. Et 42' 12" font 42,2'.

L'angle à déterminer est maintenant écrit : 23° 42,2'. Il ne contient plus de secondes. On le traduit en degrés décimaux pareillement :

1° → 60'

x° → 42,2'

d'où : 1° / x° = 60' / 42,2'

et x° = 42,2' / 60' = 0,7033°

Donc l'angle vaut 23,7033° décimaux.

Maintenant, on peut le convertir en radians comme précédement :

$180° \rightarrow \pi$

$23{,}7033° \rightarrow x$

Donc : $180° / 23{,}7033° = \pi / x$

$x = \pi \times 23{,}7033° / 180° = 0{,}4137$ radians

**Relations**

Il existe de très nombreuses relations entre les trois fonctions trigonométriques que nous avons définies. Ces relations permettent de faire des calculs, en remplaçant par exemple une somme de terme par un produit. Elles sont très utiles.

Voici un tableau qui les réuni :

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| $\cos^2 a + \sin^2 a = 1$ | $\text{tg } a = \sin a / \cos a$ | $\cos^2 a = 1 / (1 + \text{tg}^2 a)$ | $\sin^2 a = \text{tg}^2 a / (1 + \text{tg}^2 a)$ | |
| $\cos (- a) = \cos a$ | $\cos (\pi - a) = - \cos a$ | $\cos (\pi + a) = - \cos a$ | $\cos (\pi / 2 - a ) = \sin a$ | $\cos (\pi / 2 + a ) = - \sin a$ |
| $\sin (- a) = - \sin a$ | $\sin (\pi - a) = \sin a$ | $\sin (\pi + a) = - \sin a$ | $\sin (\pi / 2 - a) = \cos a$ | $\sin (\pi / 2 + a) = \cos a$ |
| $\text{tg } (- a) = - \text{tg } a$ | $\text{tg } (\pi - a) = - \text{tg } a$ | $\text{tg } (\pi + a) = \text{tg } a$ | | |

| | | |
|---|---|---|
| $\cos (a + b) = \cos a \cos b - \sin a \sin b$ | $\cos 2 a = \cos^2 a - \sin^2 a$<br>$\cos 2 a = 2 \cos^2 a - 1$ | $1 + \cos a = 2 \cos^2 a/2$ |
| $\cos (a - b) = \cos a \cos b + \sin a \sin b$ | $\cos 2 a = 1 - 2 \sin^2 a$<br>$\sin 2 a = 2 \sin a \cos a$ | $1 - \cos a = 2 \sin^2 a/2$ |
| $\sin (a + b) = \sin a \cos b + \sin b \cos a$ | $\text{tg } 2 a = 2 \text{tg } a /(1 - \text{tg}^2 a)$ | $\sin a = 2 \sin a/2 \cos a/2$ |
| $\sin (a - b) = \sin a \cos b - \sin b \cos a$ | $\cos^2 a = (1 + \cos 2a) / 2$ | $\cos a = (1 - t^2)/ (1 + t^2)$<br>$(t = \text{tg } a/2)$ |
| $\text{tg } (a + b) = (\text{tg } a + \text{tg } b) / (1 - \text{tg } a \text{ tg}) b$ | $\sin^2 a = (1 - \cos 2a) / 2$ | $\sin a = 2 t / (1 + t^2)$ |
| $\text{tg } (a - b) = (\text{tg } a - \text{tg } b) / (1 + \text{tg } a \text{ tg } b)$ | $\text{tg}^2 a = (1 - \cos 2a) / (1 + \cos 2a)$ | $\text{tg } a = 2 t / (1 - t^2)$ |

| | | |
|---|---|---|
| $\cos a \cos b = [\cos (a + b) + \cos (a - b)] / 2$ | $\cos p + \cos q = 2 \cos (p + q)/2 \cos (p - q)/2$ | $\text{tg } p + \text{tg } q = \sin (p + q) / \cos p \cos q$ |
| $\sin a \sin b = [\cos (a - b) - \cos (a + b)] / 2$ | $\cos p - \cos q = - 2 \sin (p + q)/2 \sin (p - q)/2$ | $\text{tg } p - \text{tg } q = \sin (p - q) / \cos p \cos q$ |
| sin a co | | |




La sphère armillaire décrite dans ce cours est assez facile à construire à l'aide de contreplaqué de 5 mm, dans les proportions de l'original. On peut également l'agrandir, à condition d'employer du bois plus épais (contreplaqué de 8 mm par exemple). Elle a été initialement conçue à partir d'un modèle de 1,30 m de diamètre, réalisé à l'Observatoire de Marseille par Daniel Bardin, et qui est un remarquable outil pédagogique.

Les plans donnés sont indicatifs. Prenez-les comme guide, mais pas comme travail d'ingénieur. Vous devez suivre l'ordre de présentation des plans comme ordre de construction. Ainsi, après avoir construit le bâti, vous adapterez précisément les dimensions des cercles *méridien astronomique* et *cercle horaire*, de telle manière qu'ils puissent coulisser librement dans le bâti, mais sans jeu. Il en va de même pour la suite.

Si vous vous lancez, bon travail !

Télécharger les plans

---=OO=---

# Plans d'une sphère armillaire
# à but pédagogique

Réalisée par Jacques Gispert

Association Andromède
(Observatoire de Marseille)

AMAS
Association Marseillaise d'Astronomie

Ces plans font partie d'un cours d'astronomie accessible sur le site :

http://astronomia.fr/

Vous y trouverez une description complète de la sphère armillaire et de son utilisation.

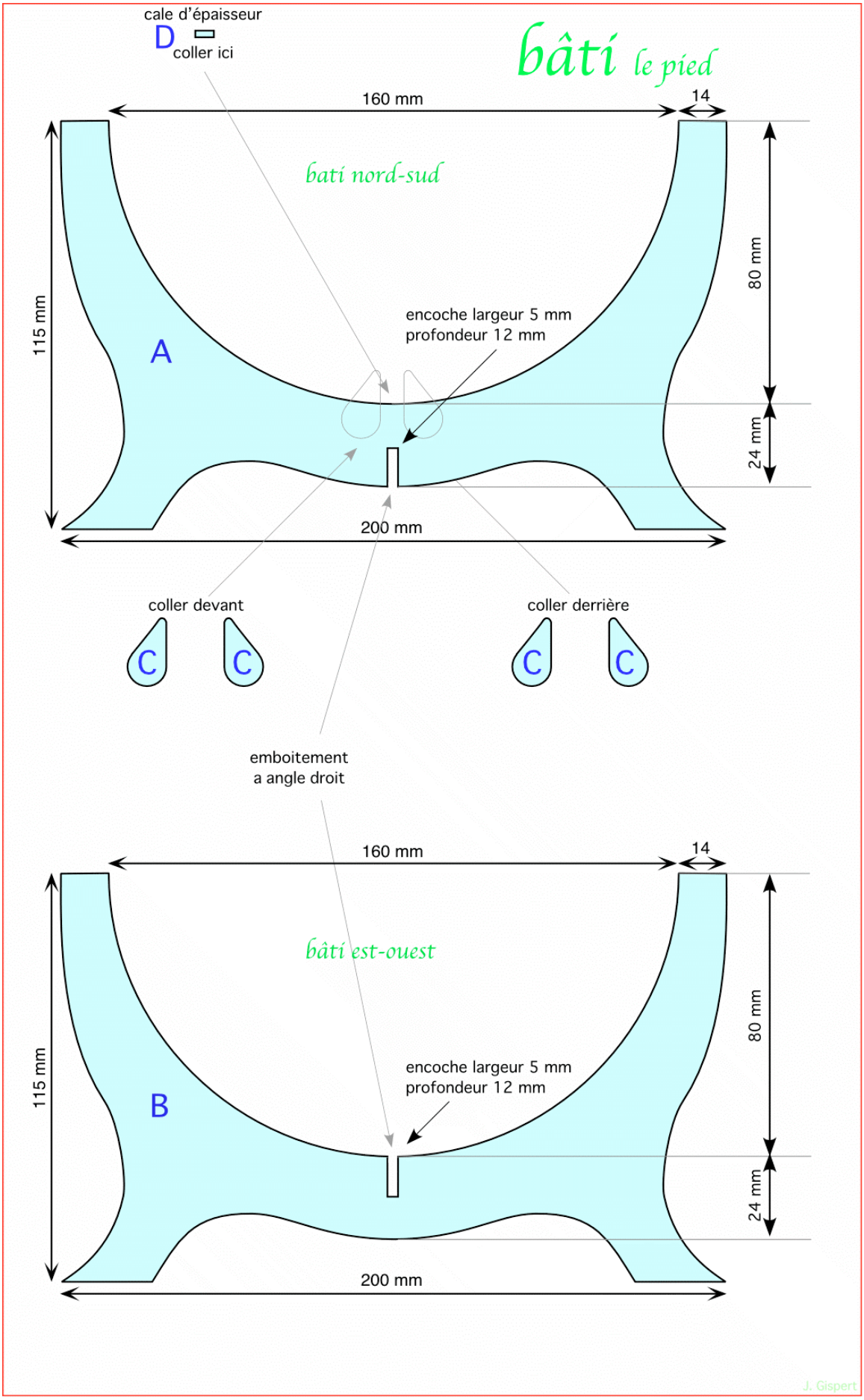
La sphère est réalisée dans du contreplaqué d'épaisseur assortie avec les dimensions : pour un modèle de 25 cm de diamètre, 5 mm suffisent ; mais pour 50 cm, il faut envisager 8 mm au moins. Il faut que le bois ait une certaine rigidité pour conserver sa forme, et éviter que les cercles se gauchissent.

Les graduations sont pyrogravées sur les différents cercles, ainsi que les autres annotations mentionnées sur les plans. Une fois finie, elle peut être colorée plus ou moins avec du brou de noix, et cirée.

La partie la plus délicate concerne les axes. Pour de petits modèles, des aiguilles à tricoter métalliques peuvent convenir : il existe un grand choix de diamètres, et en général, elles ne sont pas tordues !

Tous les plans sont des images à 150 ppp, et peuvent être agrandis.

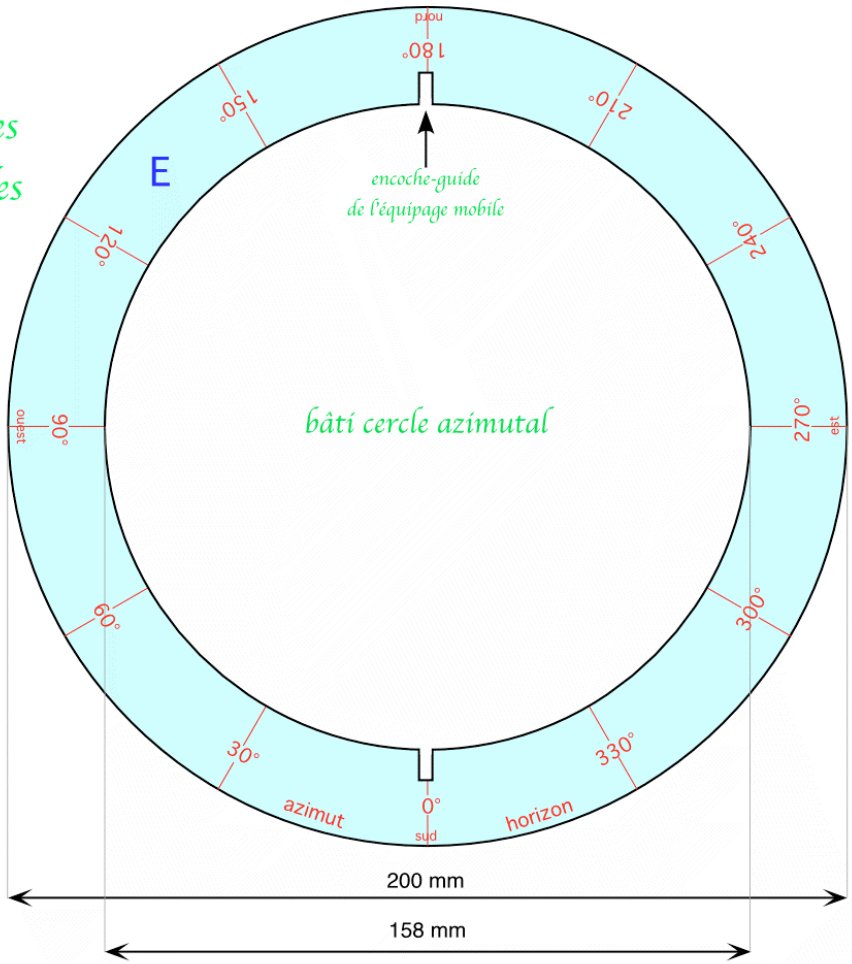
# bâti le pied

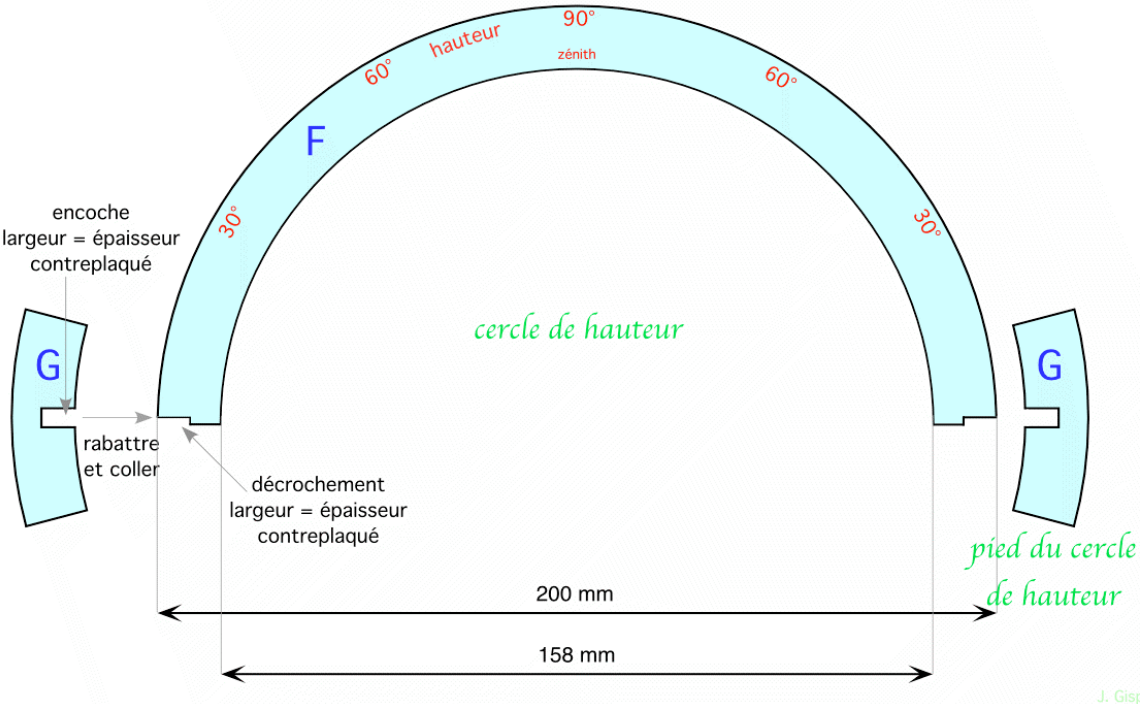



J. Gispert

# bâti

## coordonnées horizontales

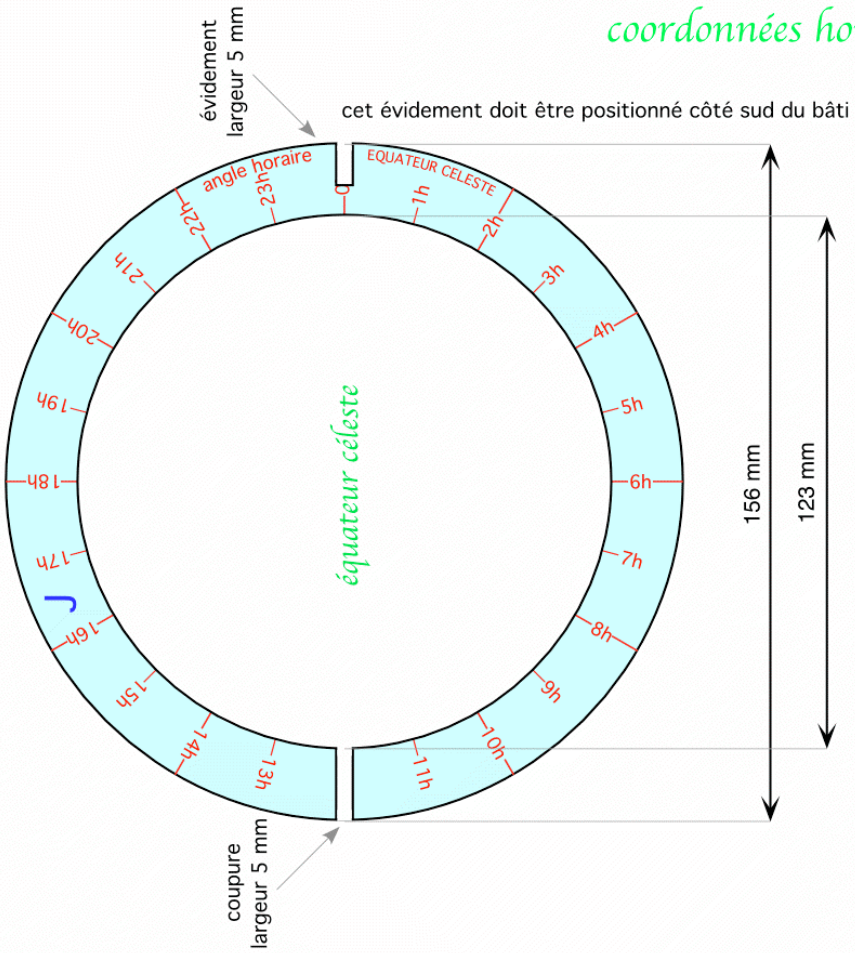


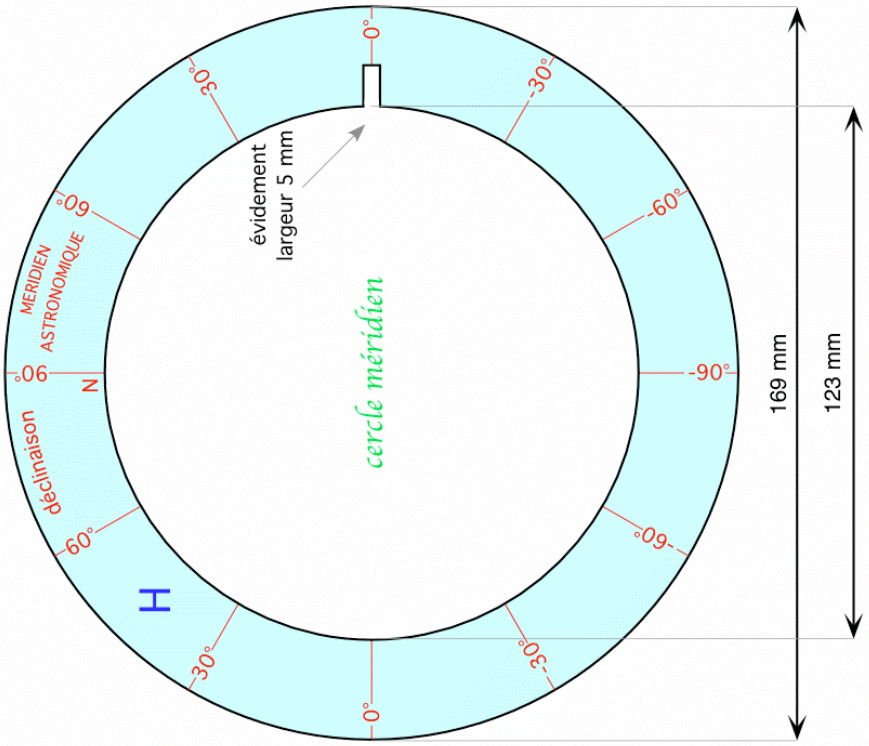




J. Gispert

# équipage mobile

## coordonnées horaires

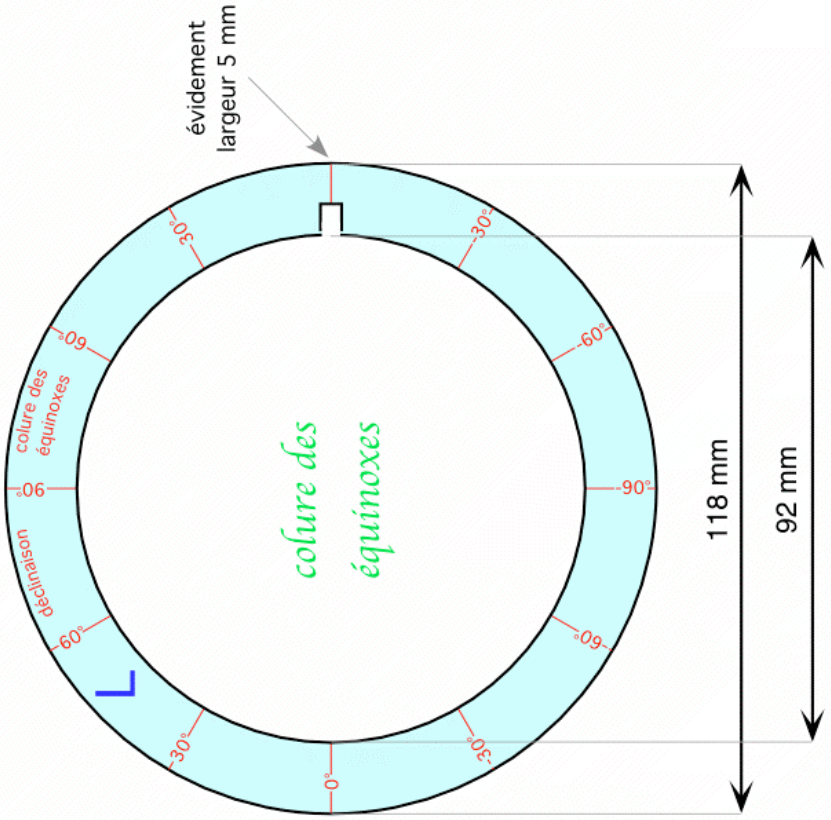


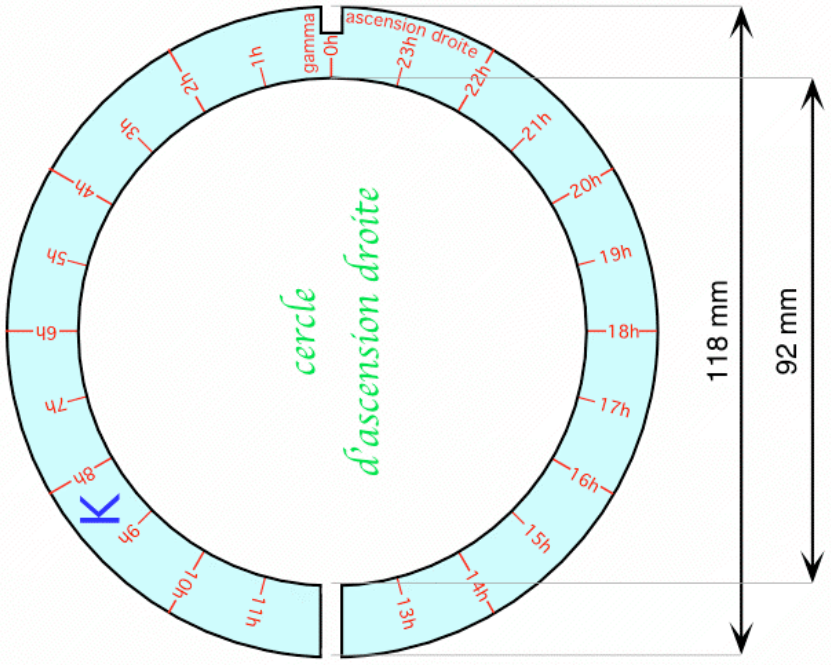




J. Gispert

# équipage mobile

## coordonnées équatoriales

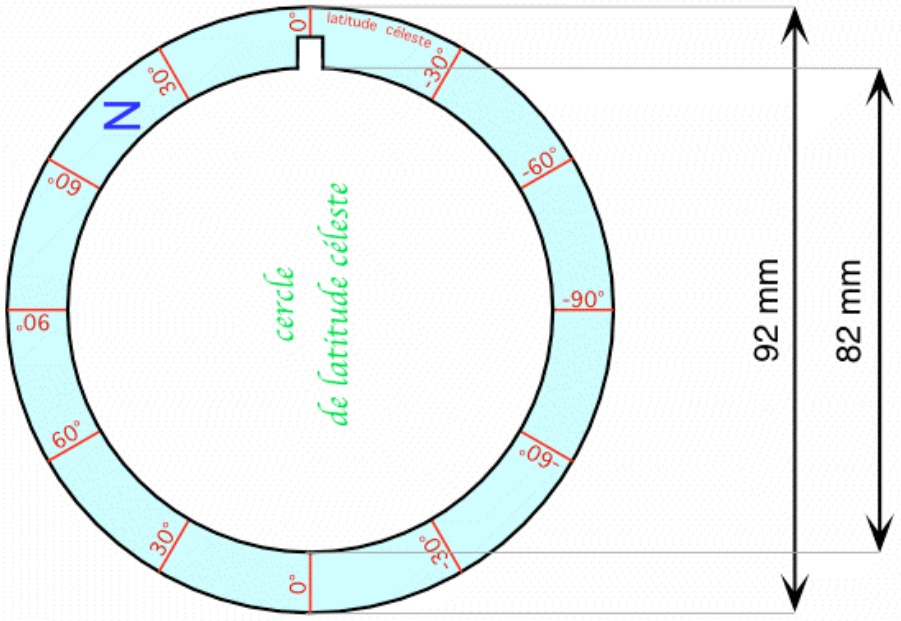


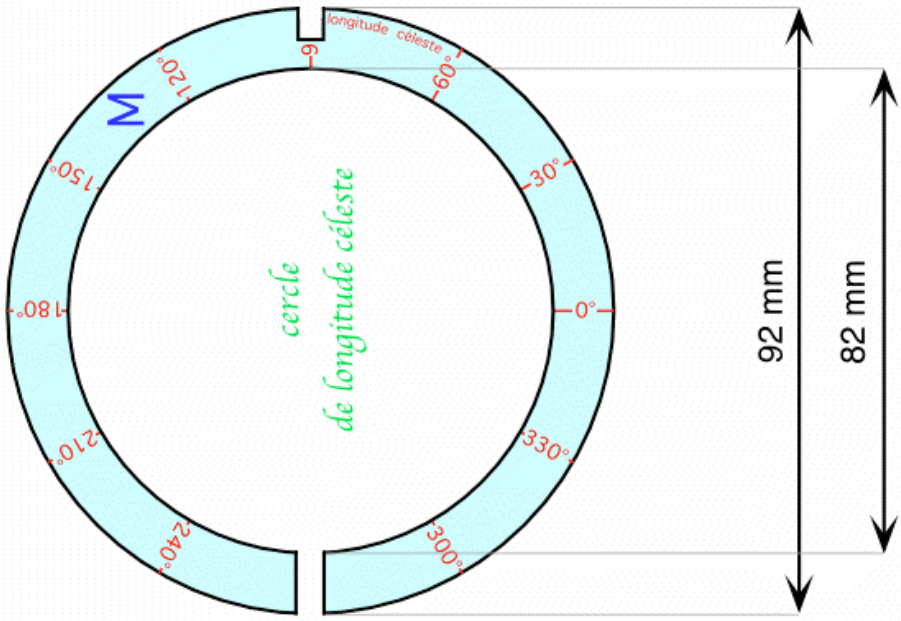




J. Gispert

# équipage mobile

## coordonnées célestes




J. Gispert




Ces fiches tentent de regrouper de manière simple et condensée les renseignements que l'on peut souhaiter connaître à propos de tout ce qui concerne l'astronomie, ou la physique qu'elle utilise.

Les constantes : valeurs fondamentales de l'astronomie.

Les unités physiques : les différentes unités utilisées en physique, et tout particulièrement en astronomie.

Les éléments chimiques : table de Mendeleev, table des isotopes, correspondance nom-symbole.

Les étoiles : paramètres du soleil, étoiles proches, diamètres des étoiles, étoiles doubles, étoiles brillantes, étoiles variables, types spectraux, classes de luminosité.

Les figures d'albédo : structures visibles à l'occulaire dans les télescopes anciens. Les noms qui leur ont été attribués correspondent parfois à des structures géologiques connues maintenant.

Histoire : astronomes, découvertes, mythologie, noms des étoiles, constellations.

Les hydrocarbures : composés chimique qui entrent dans la composition du pétrole, mais se retrouvent dans beaucoup de milieux astronomiques différents : nuages interstellaires, atmosphères planétaires.

La lumière : les divers rayonnements, raies de Fraunhoffer, spectre du Soleil.

Le milieu interstellaire : les molécules chimiques qui y ont été détectées.

La physique nucléaire : cycle proton-proton, cycle du carbone, fusion de l'hélium.

Les observations : quelques objets à voir au fil des saisons, avec cartes schématiques. Ces données sont accessibles en format PDF.

Les planètes : globes, orbites, atmosphères, satellites, petites planètes, étoiles filantes, strucutres géologiques.

Les sondes spatiales : quelques sondes, avec leur usage astronomique.

La Voie Lactée : données de base sur notre Galaxie.

---=OO=---




**Valeur des constantes physiques et astronomiques**

| Désignation | | Symbole | Valeur |
|---|---|---|---|
| Constante de la gravitation universelle | | G | **6,67259 $10^{-11}$** $m^3$ $kg^{-1}$ $s^{-2}$ |
| Constante de Planck | | | **6,626 075 5 $10^{-34}$** J s |
| Constante de Planck normalisée | / 2 π | | **1,054 572 66 $10^{-34}$** Js |
| Longueur de Planck | | $l_P$ | **1,616 05 $10^{-35}$** m |
| Masse de Planck | | $m_P$ | **2,176 71 $10^{-8}$** kg |
| Temps de Planck | | $t_P$ | **5,390 56 $10^{-44}$** s |
| Température de Planck | | $T_P$ | **1,415 $10^{32}$ K** |
| Constante des gaz parfaits | | R | **8,314 510** J $K^{-1}$ $mol^{-1}$ |
| Constante de Boltzmann | | k | **1,380 658 $10^{-23}$** J $K^{-1}$ |
| Vitesse de la lumière | | c | **299.792,458** km $s^{-1}$ |
| Nombre d'Avogadro | | $N_A$ | **6,022 136 7 $10^{23}$** $mol^{-1}$ |
| Pression atmosphérique normale | | | **1.013.250** dyn $cm^{-2}$ |
| Constante de Rydberg | | $R_H$ | **10.967.758,306** $m^{-1}$ |
| Constante de structure fine | | α | **7,297 353 08 $10^{-3}$** |
| Constante de Stefan-Boltzmann | $2\pi^5 k^4 / 15 h^3 c^2$ | σ | 5,670 51 $10^{-8}$ J $m^{-2}$ $s^{-1}$ $K^{-4}$<br>**5,670 51 $10^{-5}$** erg $cm^{-2}$ $s^{-1}$ $K^{-4}$ |
| Fréquence de résonnance du césium | Utilisée pour la définition de la seconde | | **9.192.631.770** Hz |
| Unité de masse atomique | définie par rapport à la masse du carbone 12 | u | **1,660 540 2 $10^{-27}$** kg |
| Rapport masse proton / masse électron | | | **1.836,152 701** |
| Masse de l'électron | | $m_e$ | **9,109 389 7 $10^{-31}$** kg<br>**0,510 999 06** MeV / $c^2$ |
| Masse du proton | | $m_p$ | **1,672 623 1 $10^{-27}$** kg<br>**938,272 029** MeV / $c^2$<br>**1,007 276 470** u |
| Masse du neutron | | $m_n$ | **1,674 928 6 $10^{-27}$** kg<br>**939,565 36** MeV / $c^2$<br>**1,008 664 904** u |
| Masse de la particule alpha (noyau d'hélium) | | $m_\alpha$ | 3,72738 Gev / $c^2$ |
| Charge de l'électron | | e | **4,803 206 8 $10^{-19}$** C |
| | Masse | M | **1,989 1 $10^{30}$** kg |
| | Rayon | R | **6,955 08 $10^8$** m |
| | Luminosité | L | 3,845 $10^{26}$ W<br>**3,845 $10^{33}$** erg $s^{-1}$ |
| | Magnitude absolue | M | +4,85 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Soleil | Magnitude apparente visuelle | $m_v$ | - 26,72 |
| | Température superficielle | $T_{eff}$ | 5.770 K |
| | Durée de vie | | $10^9$ années |
| | Distance au centre de la Voie Lactée | | 8,5 kpc |
| | Vitesse dans la Voie Lactée | | 220 km $s^{-1}$ |
| | Durée d'un tour dans la Voie Lactée | | 240 Ma |
| Terre | Masse | | **5,974 2 $10^{24}$** kg |
| | Rayon équatorial | | **6.378,136** km |
| | Masse volumique moyenne | | **5,515** g $cm^{-3}$ |
| Naine blanche | densité | | $10^9$ g $cm^{-3}$ |
| Etoile à neutrons | densité | | $10^{14}$ g $cm^{-3}$ |
| Voie Lactée | Masse | | 2 $10^{11}$ Mo |
| | Diamètre | | |
| | Epaisseur du disque | | étoiles : 1 kpc<br>gaz + poussières : 200 pc |
| | Diamètre du halo | | 50 kpc |

Les 4 forces fondamentales de la Nature sont dans le rapport d'intensité suivant :

| | |
|---|---|
| Gravité | 1 |
| Interaction faible | $10^{26}$ |
| Interaction électromagnétique | $10^{37}$ |
| Interaction forte | $10^{40}$ |

La gravitation est prise pour unité. Le tableau montre que l'interaction faible est $10^{26}$ fois plus forte que la gravité.

---=OO=---




Le tableau ci-dessous montre les principales unités physiques, avec leurs valeurs et les relations qu'elles ont entre elles.

Les unités sont définies par rapport au système actuel SI.

Les définitions des unités de base, données en italique, sont celles du *BIPM*, *Bureau International des Poids et Mesures*.

| unité de... | nom | symbole | description | valeur | Dimensions |
|---|---|---|---|---|---|
| longueur | mètre | m | **Unité de base du système SI** (dérivée dans le système CGS). *Le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de 1/299.792.458 s.* | - | [L] |
| | centimètre | cm | Unité dérivée (fondamentale dans le système CGS) | $10^{-2}$ m | |
| | micromètre | µm | Unité de longueur dérivée : 1 millionième de mètre. | $10^{-6}$ m | |
| | nanomètre | nm | Unité de longueur dérivée : 1 milliardième de mètre. | $10^{-9}$ m | |
| | ångström | Å | Unité de longueur dérivée : 1 dix-milliardième de mètre. | $10^{-10}$ m | |
| | fermi | fm | Unité de longueur dérivée (domaine nucléaire) : 1 millième de milliardième de mètre. | $10^{-15}$ m | |
| | unité astronomique | UA | Unité de longueur spécialisée, basée sur des mesures géométriques naturelles dans le système solaire. Abandonnée au profit du parsec. | 149.597 870,691 ± 0,030 km | |
| | année-lumière | AL | Unité basée sur les propriétés de la lumière. Non rattachable directement à l'UA. | $10^{13}$ km | |
| | parsec | pc | Unité alternative à l'AL. Le pc est basé sur l'UA, ce qui assure la cohérence du système d'unité astronomiques. | 3,26 AL = 206.265 UA = 3,086 $10^{16}$ m | |
| surface | mètre carré | $m^2$ | Puissance de l'unité fondamentale *mètre*. | - | [$L^2$] |
| | kilomètre carré | $km^2$ | Surface définie à partir de l'unité dérivée *kilomètre*. | $10^6$ $m^2$ | |
| | are | a | Unité utilisée uniquement pour le cadastre et en agriculture. Surface d'un carré de 100 m de côté. L'hectare vaut 100 ares, soit un carré de 1.000 m de côté. | 100 $m^2$ | |
| volume | mètre cube | $m^3$ | Volume défini à partir de l'unité fondamentale *mètre*. | - | [$L^3$] |
| | kilomètre cube | $km^3$ | Volume défini à partir de l'unité dérivée *kilomètre*. | $10^9$ $m^3$ | |
| | litre | l | Unité dérivée valant 1 $dm^3$. | 1 $dm^3$ = $10^{-3}$ $m^3$ | |
| masse | kilogramme | kg | **Unité de base du système SI** (dérivée dans le système CGS). *Le kilogramme est la masse du prototype international du kilogramme* | - | [M] |
| | gramme | g | Unité de base dans le système CGS (dérivée dans le système SI). | $10^{-3}$ kg | |
| | tonne | t | Unité dérivée dans les deux systèmes. | 1.000 kg | |
| | dalton ou unité de masse atomique | Da, u | Unité dérivée, utilisée dans le domaine atomique. | 1,66054 $10^{-27}$ kg | |
| | masse solaire | M | Unité dérivée, utilisée en astrophysique, pour indiquer la masse des étoiles. Le kilogramme est une unité bien trop petite, aussi prend-on la masse du Soleil comme unité. | 2 $10^{30}$ kg | |
| | - | MeV / 2 | Unité dérivée, utilisée dans le domaine atomique, issue directement de l'équivalence masse-énergie décrite par l'équation d'Einstein E = m $c^2$. Il | 1,66054 $10^{-27}$ | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | c | en découle immédiatement que $m = E / c^2$. L'échelle pertinente pour l'énergie est le MeV (méga électron-volt), d'où l'unité. | kg | |
| masse volumique | kilogramme par mètre-cube | kg $m^{-3}$ | Unité du système SI. L'unité la plus utilisée est le gramme par centimètre cube. | 1 kg $m^{-3}$ = $10^{-3}$ g $cm^{-3}$ | [$ML^{-3}$] |
| | gramme par centimètre-cube | g $cm^{-3}$ | Unité CGS couramment utilisée. L'unité SI est le kilogramme par mètre cube. | 1 g $cm^{-3}$ = $10^3$ kg $m^{-3}$ | |
| nombre d'onde | - | - | Unité dérivée du système SI. Nombre d'oscillations par seconde d'un phénomène périodique. | - | [$L^{-1}$] |
| temps | seconde | s | **Unité de base (dans les deux systèmes SI et CGS)**. *La seconde est la durée de 9.192.631.770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133.* | | [T] |
| | minute | mn | Unité dérivée, multiple de l'unité fondamentale. | 60 s | |
| | heure | h | Unité dérivée, multiple de l'unité fondamentale. | 60 mn = 3.600 s | |
| | jour | s | Jour solaire moyen de 24 h. | 86.400 s | |
| | année julienne | a | Année julienne de 365,25 jours. | 31.557.600 s | |
| | siècle julien | - | Siècle de 400 années juliennes. | 12.623.040.000 s | |
| fréquence | herz | Hz | Nombre de cycles par seconde effectués par un système périodique. | $s^{-1}$ | [$T^{-1}$] |
| vitesse | mètre-seconde | m $s^{-1}$ | Unité dérivée du système SI. | - | [$LT^{-1}$] |
| | kilomètre-seconde | km $s^{-1}$ | Multiple du mètre-seconde, utilisée essentiellement en astronomie et astronautique. | 1.000 m $s^{-1}$ | |
| | kilomètre-heure | km $h^{-1}$ | Petite unité dérivée adaptée à la vie courante. | 0,277 m $s^{-1}$ | |
| accélération | mètre seconde / seconde | m $s^{-2}$ | Unité dérivée du système SI. | | [$LT^{-2}$] |
| angle | radian | rad | Unité naturelle, un tour complet valant 2 π | π rd = 360° | [1] |
| | degré | ° | $360^e$ partie du cercle. | 0,01745 rd | |
| | grade | gr | Ancienne unité d'angle, divisant le cercle en 200 parties égales. | 1,8° = 0,0314 rd | |
| | minute (d'arc) | ' | $60^e$ partie du degré. | 0,0166° = 0,00029 rd | |
| | seconde (d'arc) | " | $60^e$ partie de la minute. | 0,000278° = 4,85 $10^{-6}$ rd | |
| | heure | h | Unité utilisée en astronomie, l'heure est la $24^e$ partie du cercle. | 1 h = 15° | |
| | minute | mn | Unité utilisée en astronomie, la minute est la $60^e$ partie de l'heure. | 1 mn = 15' | |
| | seconde | s | Unité utilisée en astronomie, la seconde est la $60^e$ partie de la minute. | 1 s = 15" | |
| accélération angulaire | radian par seconde carrée | rad $s^{-2}$ | Unité dérivée du système SI. Variation de la vitesse angulaire. | | [$T^{-2}$] |
| angle solide | stéradian | sr | | | [1] |
| force | newton | N | Unité SI. Force capable de communiquer à une masse de 1 kilogramme une accélération de 1 m $s^{-2}$ | - | [$MLT^{-2}$] |
| | dyne | dyn | Unité CGS. Force nécessaire pour accélérer une masse de 1 gramme de 1 cm $s^{-2}$ | $10^{-5}$ N | |
| | kilogramme-force | kgf | Force gravitationnelle que la Terre produit sur une masse de 1 kg... à Paris (ce qui donne le caractère universel de la définition). Evidemment abandonnée. | 9,81 N | |
| moment d'une force | - | - | Unité dérivée du système SI. Le moment de la force traduit sa capacité à provoquer une rotation. Une force donnée agit d'autant plus qu'elle est applique plus loin de l'axe. | = N m | [$ML^2T^{-2}$] |
| ordre | entropie | S | Unité dérivée du système SI. Rapport de la quantité de chaleur à la température. En mécanique statistique, l'entropie mesure le désordre.. | = Q / T | [$ML^2T^{-2}\Theta^{-1}$] |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| énergie | joule | J | Un joule représente le travail fourni par une force d'un Newton dont le point d'application se déplace d'un mètre dans la direction de la force. | 1 N m<br>1 kg $m^2$ $s^{-2}$<br>6,24 $10^{18}$ eV<br>$10^7$ ergs | $[ML^2T^{-2}]$ |
| | electron-volt | eV | Energie acquise par un électron accéléré par une différence de potentiel de 1 V. | 1 eV = 1,602 $10^{-19}$ J | |
| | calorie | cal | quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'un gramme d'eau de 14,5° à 15,5° sous une pression normale (101,325 kPa). | 4,186 J | |
| | thermie | th | Ancienne unité de quantité de chaleur, encore utilisée dans le bâtiment. | $10^6$ calories | |
| | erg | erg | Unité CGS. | 1 g $cm^2$ $s^{-2}$ = $10^{-7}$ J | |
| puissance | watt | W | Unité dérivée du système SI. 1 W est la puissance d'un système capable de fournir 1 joule pendant 1 seconde. C'est l'énergie par unité de temps. | 3.600 J | $[ML^2T^{-3}]$ |
| | kilowatt | kW | Multiple du watt. | 3,6 $10^6$ joules | |
| | cheval-vapeur | ch | Unité pratique. | 3,6 $10^6$ joules | |
| pression | pascal | Pa | Unité dérivée du système SI. 1 Pa est la pression qui, appliquée uniformément sur une surface d'une mètre carré, produit une force d'un newton. | 1 N $m^2$ | $[ML^{-2}T^{-2}]$ |
| | atmosphère | atm | Ancienne unité correspondant à la pression atmosphérique. | 101.325 Pa | |
| | hectopascal | hPa | Unité utilisée maintenant pour mesurer la pression atmosphérique. | 100 Pa = 1.000 mbar | |
| | bar | bar | Du grec *baros* = pesanteur. Unité ancienne, voisine de la pression atmosphérique. | $10^5$ Pa | |
| | millibar | mbar | Unité utilisée autrefois pour mesurer la pression atmosphérique. Remplacée par l'hectopascal. | $10^2$ Pa | |
| | torr | torr | Pression produite par une colonne de 1 mm de mercure. Utilisée autrefois pour les baromètres. 1 atmosphère vaut 760 mm de Hg, soit 760 torr. | 13,32 Pa = 101.325 Pa | |
| courant électrique | ampère | A | **Unité de base du système SI**.<br>*L'ampère est l'intensité d'un courant constant qui, maintenu entre deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une distance de 1 mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force égale à 2 $10^{-7}$ N par mètre de longueur*. | - | [I] |
| charge électrique | charge de l'électron | e | Charge électrique la plus petite qui soit observable (les quarks portent une charge plus petite, mais inobservable isolée). | 1,602 $10^{-19}$ C | [IS] |
| | coulomb | C | Unité dérivée du système SI. C'est la quantité d'électricité transportée par un courant de 1 ampère, qui s'écoule pendant une seconde. | 6,24151 $10^{18}$ e | |
| | ampère-heure | Ah | Quantité d'électricité transportée par un courant de 1 ampère, qui s'écoule pendant une heure. | 3.600 C | |
| résistance électrique | ohm | Ω | Unité dérivée du système SI. Un ohm est la résistance d'un conducteur qui est traversé par un courant de un ampère lorsqu'on lui applique une différence de potentiel de un volt, à la condition que ce courant ne produise pas de force électromotrice. | | $[ML^2T^{-3}I^{-2}]$ |
| capacité électrique | farad | F | Unité dérivée du système SI. Un farad est la capacité d'un condensateur qui présente une différence de potentiel de un volt entre ses armatures, lorsqu'il possède une charge d'un coulomb. | C / V | $[ML^{-2}T^4I^2]$ |
| différence de potentiel | volt | V | | | $[ML^2T^{-3}I^{-1}]$ |
| flux radio | jansky | Jy | Unité de densité de flux, utilisée en radioastronomie. | $10^{-26}$ W $m^2$ $Hz^{-1}$ | $[ML^3T^{-2}]$ |
| température | degré Kelvin ou degré absolu | K | **Unité de base du système SI**. Echelle dont l'origine correspond à l'immobilité totale (théorique) des particules.<br>*Le kelvin, unité de température thermodynamique, est la fraction 1/273,16 de la température thermodynamique du point triple de l'eau*. | - | [Θ] |
| | degré Celsius | ° C | L'échelle Celsius est identique à l'échelle absolue, à une translation près : T Celsius = T Kelvin - 273,15. | T Celsius = T Kelvin - 273,15 | |
| induction magnétique, | tesla | T | Unité dérivée du système SI. Induction magnétique qui produit, à travers une surface de 1 mètre carré, un flux d'induction magnétique total de 1 weber (à la condition d'être réparti uniformément, et perpendiculaire à la | - | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| champ magnétique | | | surface). Terre : 0,5 T ; magnétar : 10 T. | | $[MT^{-2}I^{-1}]$ |
| | gauss | G | Unité CGS d'induction magnétique. | $10^{-4}$ T | |
| | maxwell | Mx | Unité CGS, analogue du weber dans le système SI. | $10^{-8}$ Wb | |
| flux d'induction magnétique | weber | Wb | Unité dérivée du système SI. Flux d'induction magnétique qui produit une force électromotrice de 1 V en se dissipant en une seconde dans une unique spire de conducteur. En se dissipant, il cède la totalité de son énergie. | 1 T $m^{-2}$ = 1 V s | $[ML^2T^{-2}I^{-1}]$ |
| inductance électrique | henry | H | Unité dérivée du système SI. Le henry est l'inductance d'un circuit parcouru par un courant qui varie uniformément de 1 ampère par seconde, et produit ainsi à ses bornes une force électromotrice de 1 volt. | 1 H = 1 V $A^{-1}$ s | $[ML^2S^{-2}A^{-2}]$ |
| éclairement | lux | lx | Unité dérivée du système SI. Un lux est l'éclairement d'une surface de 1 mètre carré; éclairée uniformément par un flux d'un lumen. | | $[L^{-2}I_V]$ |
| quantité de matière | mole | mol | **Unité de base du système SI**.<br>*La mole est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0,012 kilogrammes de carbone 12 Lorsqu'on emploie la mole, les entités élémentaires doivent être spécifiées et peuvent être des atomes, des molécules, des ions, des électrons, d'autres particules ou des groupements spécifiés de telles particules.* | | [N] |
| flux lumineux | lumen | lm | Unité dérivée du système SI. Un lumen correspond au flux lumineux émis par une source ponctuelle d'un candela dans un angle solide d'un stéradian. | | $[I_V]$ |
| intensité lumineuse | candela | cd | **Unité de base du système SI**.<br>*Le candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 540 $10^{12}$ Hz et dont l'intensité énergétiqe dans cette direction est de 1/683 watt par stéradian*. | - | $[I_V]$ |
| radioactivité | becquerel | Bq | **Unité dérivée du système SI**. Le becquerel correspond à une désintégration par seconde. | - | $[T^{-1}]$ |

Les anglais notent AU (Astronomical Unit) pour UA, et LY (Light Year) pour AL.

---=OO=---




**Métaux**

Définition du chimiste : un métal est un élément dont un électron périphérique est très peu lié à l'atome ; de ce fait, il peut très facilement passer d'un atome à un autre, ce qui assure une grande conductibilité électrique (et thermique).

Les métaux du chimiste sont en particulier : le plomb, le cuivre, le zinc, l'argent, l'or, le platine, le fer, le nickel…

Définition de l'astronome : les métaux sont tous les éléments, sauf l'hydrogène et l'hélium. Autrement dit, l'astronome sépare les éléments en deux catégories : l'hydrogène et l'hélium, qui constituent 99 % de l'univers, et les poluants que sont le carbonne, l'oxygène, le soufre, le fer etc.

**Tableau des éléments**

Les colonnes contiennent : le nom, le symbole, le numéro atomique, la masse atomique, le nombre de nucléons des ivers isotopes, l'abondance en masse de cet isotope par rapport aux autres, et enfin l'énergie de strong>première ionisation en électrons/volts. Ce tableau est trié par numéro atomique croissant

Toutes les valeurs sont données pour les éléments légers, jusqu'au nickel. Pour les suivants, seuls les nombres de nucléons des isotopes sont indiqués.

| nom | symb. | n° atomique Z | nb nucléons A | masse atomique | abondance % en masse | énergie d'ionisation eV |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Hydrogène | H | 1 | 1 | 1,0080 | 99,985 | 13,53 |
| (Deutérium) | D | | 2 | 2 | | 0,015 |
| (Tritium) | T | | 3 | 3 | | instable |
| Hélium | He | 2 | 3 | 4,0026 | 0,00014 | 24,47 |
| | | | 4 | | 99,99986 | |
| Lithium | Li | 3 | 6 | 6,940 | 7,4 | 5,37 |
| | | | 7 | | 92,6 | |
| Béryllium | Be | 4 | 9 | 9,013 | 100 | 9,28 |
| Bore | B | 5 | 10 | 10,82 | 19,6 | 8,25 |
| | | | 11 | | 80,4 | |
| Carbone | C | 6 | 12 | 12,010 | 98,89 | 11,2 |
| | | | 13 | | 1,11 | |
| Azote | N | 7 | 14 | 14,008 | 99,635 | 14,47 |
| | | | 15 | | 0,365 | |
| Oxygène | O | 8 | 16 | 16,000 | 99,759 | 13,55 |
| | | | 17 | | 0,037 | |
| | | | 18 | | 0,204 | |
| Fluor | F | 9 | 19 | 19,00 | 100 | 18,6 |
| Néon | Ne | 10 | 20 | 20,183 | 90,5 | 21,47 |
| | | | 21 | | 0,27 | |
| | | | 22 | | 9,2 | |
| Sodium | Na | 11 | 23 | 22,997 | 100 | 5,12 |
| Magnésium | Mg | 12 | 24 | 24,32 | 78,8 | 7,61 |
| | | | 25 | | 10,1 | |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 26 | | 11, | |
| Aluminium | Al | 13 | 27 | 26,97 | 100 | 5,96 |
| Silicium | Si | 14 | 28 | 28,09 | 92,17 | 8,08 |
| | | | 29 | | 4,71 | |
| | | | 30 | | 3,12 | |
| Phosphore | P | 15 | 31 | 30,974 | 100 | 11,11 |
| Soufre | S | 16 | 32 | 32,066 | 95 | 10,31 |
| | | | 33 | | 0,785 | |
| | | | 34 | | 4,2 | |
| | | | 36 | | 0,015 | |
| Chlore | Cl | 17 | 35 | 35,457 | 75,80 | 12,96 |
| | | | 37 | | 24,20 | |
| Argon | A | 18 | 36 | 39,944 | 0,337 | 15,69 |
| | | | 38 | | 0,063 | |
| | | | 40 | | instable | |
| Potassium | K | 19 | 39 | 39,100 | 93,2 | 4,32 |
| | | | 40 | | ? erreur | |
| | | | 41 | | ? | |
| Calcium | Ca | 20 | 40 | 40,08 | 96,93 | 6,09 |
| | | | 42 | | 0,64 | |
| | | | 43 | | 0,14 | |
| | | | 44 | | 2,1 | |
| | | | 46 | | 0,003 | |
| | | | 48 | | 0,187 | |
| Scandium | Sc | 21 | 45 | 44,96 | 100 | 6,7 |
| Titane | Ti | 22 | 46 | 47,90 | 7,9 | 6,81 |
| | | | 47 | | 7,3 | |
| | | | 48 | | 73,9 | |
| | | | 49 | | 5,5 | |
| | | | 50 | | 5,4 | |
| Vanadium | V | 23 | | 50,95 | | 6,76 |
| Chrome | Cr | 24 | 50 | 52,01 | 4,4 | 6,74 |
| | | | 52 | | 83,7 | |
| | | | 53 | | 9,5 | |
| | | | 54 | | 2,4 | |
| Manganèse | Mn | 25 | 55 | 54,93 | 100 | 7,4 |
| Fer | Fe | 26 | 54 | 55,85 | 5,9 | 7,83 |
| | | | 56 | | 91,6 | |
| | | | 57 | | 2,2 | |
| | | | 58 | | 0,3 | |
| Cobalt | Co | 27 | 59 | 58,94 | 100 | 8,5 |
| Nickel | Ni | 28 | 58 | 58,69 | 68 | 7,6 |
| | | | 60 | | 26,2 | |
| | | | 61 | | 1,2 | |
| | | | 62 | | 3,6 | |
| | | | 64 | | 1 | |
| Cuivre | Cu | 29 | 63-65 | 63,542 | | 7,68 |
| Zinc | Zn | 30 | 64-66-67-68-70 | 65,377 | | 9,36 |
| | | | | | | |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Gallium | Ga | 31 | | 69,72 | | 5,97 |
| Germanium | Ge | 32 | | 72,60 | | 8,09 |
| Arsenic | As | 33 | 75 | 74,91 | | 10,5 |
| Sélénium | Se | 34 | 74-76-77-78-80-82 | 78,96 | | 9,7 |
| Brome | Br | 35 | 79-81 | 79,916 | | 11,3 |
| Krypton | Kr | 36 | | 83,80 | | 13,94 |
| Rubidium | Rb | 37 | | 85,48 | | 4,16 |
| Strontium | Sr | 38 | | 87,63 | | 5,67 |
| Yttrium | Y | 39 | | 88,92 | | 6,5 |
| Zirconium | Zr | 40 | | 91,22 | | 6,92 |
| Niobium | Ni | 41 | | 92,91 | | 6,8 |
| Molybdène | Mo | 42 | 92-94-95-96-97-98-100 | 95,95 | | 7,06 |
| Technétium | Tc | 43 | | 98,91 | | 7,1 |
| Ruthénium | Ru | 44 | | 101,7 | | 7,7 |
| Rhodium | Rh | 45 | | 102,91 | | 7,7 |
| Paladium | Pd | 46 | | 106,7 | | 8,3 |
| Argent | Ag | 47 | 107-109 | 107,880 | | 7,54 |
| Cadmium | Cd | 48 | 106-108-110-111-112-113-114-116 | 112,41 | | 8,96 |
| Indium | In | 49 | | 114,76 | | 5,76 |
| Etain | Sn | 50 | 112-114-115-116-117-118-119-120-122-124 | 118,70 | | 7,3 |
| Antimoine | Sb | 51 | 121-123 | 121,76 | | 8,35 |
| Tellure | Te | 52 | | 127,61 | | 8,96 |
| Iode | I | 53 | 127-129 | 126,91 | | 10,44 |
| Xénon | Xe | 54 | 129 | 131,3 | | 12,08 |
| Césium | Cs | 55 | | 132,91 | | 3,87 |
| Baryum | Ba | 56 | 130-132- 134-135-136-137- 138 | 137,36 | | 5,19 |
| Lanthane | La | 57 | | 138,92 | | 5,59 |
| Cérium | Ce | 58 | | 140,13 | | 6,54 |
| Praséodyme | Pr | 59 | | 140,92 | | 5,8 |
| Néodyme | Nd | 60 | | 144,27 | | 6,3 |
| Prométhium | Pm | 61 | | 145 | | 6,3 |
| Samarium | Sm | 62 | | 150,43 | | 6,6 |
| Europium | Eu | 63 | | 152,0 | | 5,64 |
| Gadolinium | Gd | 64 | | 156,9 | | 6,7 |
| Terbium | Tb | 65 | | 159,2 | | 6,7 |
| Dysprosium | Dy | 66 | | 162,46 | | 6,8 |
| Holmium | Ho | 67 | | 164,94 | | |
| Erbium | Er | 68 | | 167,2 | | |
| Thulium | Tm | 69 | | 169,4 | | |
| Ytterbium | Yb | 70 | | 173,04 | | 6,2 |
| Lutécium | Lu | 71 | | 175,0 | | 5 |
| Hafmium | Hf | 72 | | 178,6 | | 5,5 |
| Tantale | Ta | 73 | 181 | 180,88 | | 6 |
| Tungstène | W | 74 | 180-182-183-184-186 | 183,92 | | 8,1 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Rhénium | Re | 75 | | 186,31 | | 7,85 |
| Osmium | Os | 76 | | 190,2 | | 8,7 |
| Iridium | Ir | 77 | | 193,1 | | 9,2 |
| Platine | Pt | 78 | | 195,23 | | 8,9 |
| Or | Au | 79 | 197 | 197,2 | | 9,2 |
| Mercure | Hg | 80 | 196-198-199-200-201-202-204 | 200,61 | | 10,38 |
| Thallium | Tl | 81 | | 204,39 | | 6,07 |
| Plomb | Pb | 82 | 204-206-207-208 | 207,21 | | 7,38 |
| Bismuth | Bi | 83 | 209 | 209 | | 8 |
| Polonium | Po | 84 | | 210 | | 7,25 |
| Astate | At | 85 | | 210 | | 9,4 |
| Radon | Rn | 86 | | 222 | | 10,69 |
| Francium | Fr | 87 | | 223 | | 4 |
| Radium | Ra | 88 | | 226 | | 5,25 |
| Actinium | Ac | 89 | | 227 | | |
| Thorium | Th | 90 | | 232,12 | | |
| Protactinium | Pa | 91 | | 231 | | 5,7 |
| Uranium | U | 92 | 234-235-238 | 238,07 | | 4 |
| Neptunium | Np | 93 | | 237 | | |
| Plutonium | Pu | 94 | | 244 | | |
| Américium | Am | 95 | | 243 | | |
| Curium | Cm | 96 | | 247 | | |
| Berkélium | Bk | 97 | | 247 | | |
| Californium | Cf | 98 | | 251 | | |
| Einsteinium | Es | 99 | | 254 | | |
| Fermium | Fm | 100 | | 254 | | |
| Mendélévium | Md | 101 | | 256 | | |
| Nobelium | No | 102 | | 254 | | |
| Lawrencium | Lw | 103 | | 257 | | |

**Anciens noms**

Certains éléments chimiques ont changé de nom depuis le Moyen Age, mais leur symbole chimique en porte la trace. Il arrive aussi que certains composés chimiques soient nommés d'après l'ancien nom de leur principal composant. Ainsi :

| nom actuel | ancien nom | symbole |
|---|---|---|
| Azote | Nitre | N |
| Sodium | Natrium | Na |
| Potassium | Kalium | K |
| Antimoine | Stibium | Sb |
| Tungstène | Wolfram | W |

*Kali* est le nom arabe de la soude. Les composés oxygénés de l'azote sont nommés *Nitrites* et *Nitrates*. Le nom *Wolfram* est usité à l'heure actuelle pour désigner un minéral à base de tungstène ; de même, le sulfure naturel d'antimoine est la *Stibine*.

**Tableau de Mendéléev**

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| H hydrogène 1,0079 1 | | | | | | | | | | | | | | | | He hélium 4,0026 2 |
| Li lithium 6,941 3 | Be bérylium 9,0122 4 | | | | | | | | | | | B bore 10,811 5 | C carbone 12,011 6 | N azote 14,007 7 | O oxygène 15,999 8 | F fluor 18,998 9 | Ne néon 20,18 10 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Na<br>sodium<br>22,99<br>11 | Mg<br>magnésium<br>24,305<br>12 | | | | | | | | | | | Al<br>aluminium<br>26,982<br>13 | Si<br>silicium<br>28,085<br>14 | P<br>phosphore<br>30,974<br>15 | S<br>soufre<br>32,065<br>16 | Cl<br>chlore<br>35,453<br>17 | Ar<br>argon<br>39,948<br>18 |
| K<br>potassium<br>39,098<br>19 | Ca<br>calcium<br>40,078<br>20 | Sc<br>scandium<br>44,956<br>21 | Ti<br>titane<br>47,867<br>22 | V<br>vanadium<br>50,941<br>23 | Cr<br>chrome<br>51,996<br>24 | Mn<br>manganèse<br>54,938<br>25 | Fe<br>fer<br>55,845<br>26 | Co<br>cobalt<br>58,933<br>27 | Ni<br>nickel<br>58,693<br>28 | Cu<br>cuivre<br>63,546<br>29 | Zn<br>zinc<br>65,38<br>30 | Ga<br>gallium<br>69,723<br>31 | Ge<br>germanium<br>72,64<br>32 | As<br>arsenic<br>74,922<br>33 | Se<br>sélénium<br>78,96<br>34 | Br<br>brome<br>79,904<br>35 | Kr<br>krypton<br>83,798<br>36 |
| Rb<br>rubidium<br>85,468<br>37 | Sr<br>strontium<br>87,62<br>38 | Y<br>ytrium<br>88,906<br>39 | Zr<br>zirconium<br>91,224<br>40 | Nb<br>niobium<br>92,906<br>41 | Mo<br>molybdène<br>95,96<br>42 | Tc<br>technétium<br>98,00<br>43 | Ru<br>ruthénium<br>101,07<br>44 | Rh<br>rhodium<br>102,91<br>45 | Pd<br>palladium<br>106,42<br>46 | Ag<br>argent<br>107,87<br>47 | Cd<br>cadmium<br>112,41<br>48 | In<br>indium<br>114,82<br>49 | Sn<br>étain<br>118,71<br>50 | Sb<br>antimoine<br>121,76<br>51 | Te<br>tellure<br>127,60<br>52 | I<br>iode<br>126,9<br>53 | Xe<br>xénon<br>131,29<br>54 |
| Cs<br>césium<br>132,91<br>55 | Ba<br>baryum<br>137,33<br>56 | La<br>lanthane<br>138,91<br>57 | Hf<br>hafnium<br>178,49<br>72 | Ta<br>tantale<br>180,95<br>73 | W<br>tungstène<br>183,84<br>74 | Re<br>rhénium<br>186,21<br>75 | Os<br>osmium<br>190,23<br>76 | Ir<br>iridium<br>192,22<br>77 | Pt<br>platine<br>195,08<br>78 | Au<br>or<br>196,97<br>79 | Hg<br>mercure<br>200,59<br>80 | Tl<br>thalium<br>204,38<br>81 | Pb<br>plomb<br>207,2<br>82 | Bi<br>bismuth<br>208,98<br>83 | Po<br>polonium<br>209<br>84 | At<br>astate<br>210<br>85 | Rn<br>radon<br>222<br>86 |
| Fr<br>francium<br>223<br>87 | Ra<br>radium<br>226<br>88 | Ac<br>actinium<br>227<br>89 | Rf<br>rutherfordium<br>261<br>104 | Db<br>dubnium<br>262<br>105 | Sg<br>seaborgium<br>266<br>106 | Bh<br>bohrium<br>264<br>107 | Hs<br>hassium<br>277<br>108 | Mt<br>meitnérium<br>268<br>109 | Ds<br>damstadtium<br>271<br>110 | Rg<br>roetgenium<br>272<br>111 | Uub<br>unumbium<br>277<br>112 | Uut<br>ununtrium<br>284 ?<br>113 | Uuq<br>ununquadium<br>289 ?<br>114 | UUp<br>ununpentium<br>288 ?<br>115 | Uuh<br>ununhexium<br>293 ?<br>116 | Uus<br>ununseptium<br>291 ?<br>117 | Uuo<br>ununoctium<br>294 ?<br>118 |

Entre La (57) et Hf (72) se placent les *lantanides* :

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ce<br>cérium<br>140,12<br>58 | Pr<br>praséodyme<br>140,91 59 | Nd<br>néodyme<br>144,24<br>60 | Pm<br>prométhium<br>145<br>61 | Sm<br>samarium<br>150,36<br>62 | Eu<br>europium<br>151,96<br>63 | Gd<br>gadolinium<br>157,25<br>64 | Tb<br>terbium<br>158,93<br>65 | Dy<br>dysprosium<br>162,5<br>66 | Ho<br>holmium<br>164,93<br>67 | Er<br>erbium<br>167,26<br>68 | Tm<br>thulium<br>168,93<br>69 | Yb<br>ytterbium<br>173,05<br>70 | Lu<br>lutetium<br>174,97<br>71 |

et entre Ac (89) et Rf (104), les *actinides* :

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Th<br>thorium<br>232,04<br>90 | Pa<br>palladium<br>231,04<br>91 | U<br>uranium<br>238,03<br>92 | Np<br>neptunium<br>237,05<br>93 | Pu<br>plutonium<br>244<br>94 | Am<br>américium<br>243<br>95 | Cm<br>curium<br>247<br>96 | Bk<br>berkélium<br>247<br>97 | Cf<br>californium<br>251<br>98 | Es<br>einsteinium<br>252<br>99 | Fm<br>fermium<br>257<br>100 | Md<br>mendélévium<br>258<br>101 | No<br>nobélium<br>259<br>102 | Lr<br>lawrencium<br>262<br>103 |

Les éléments radioactifs (dont l'un au moins des isotopes est radioactif) sont placés sur fond violet.

On sait aujourd'hui produire des éléments hautement radioactifs, de masse supérieure. Leurs périodes sont infinitésimales, et les difficultés à mesurer les propriétés de ces éléments sont, de ce fait, bien grandes. C'est ce qui justifie les ? pour la masse atomique de ces éléments.

Remarquez les jolis noms des éléments les plus lourds : ils sont simplement formés à partir du numéro atomique… *Ununoctium* signifie simplement $118^{e}$ ! (ununoctium = un-un-oct-ium ; 1-1-8-ium, *ium* étant le suffixe habituel des noms d'éléments). Ce sont des noms provisoires, destinés à être remplacés par des noms de même nature que ceux des éléments plus légers, noms acceptés par l'organisme responsable. Actuellement, le nom *Copernicium* a été proposé (14 juillet 2009) pour *l'unumbium*. *L'ununtrium* et *l'ununseptium* n'ont pas encore été observés. Les autres ont été observés une fois, mais ces expériences ne sont pas encore validées.

**Association nom-symbole**

Les deux tableaux ci-dessous permettent de retrouver rapidement le symbole d'un élément, connaissant son nom, ainsi que le nom connaissant le symbole. Ils sont triés par ordre alphabétique pour faciliter cette recherche.

Accès au symbole par le nom

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| actinium | Ac | chlore | Cl | hydrogène | H | osmium | Os | seaborgium | Sg |
| aluminium | Al | chrome | Cr | indium | In | oxygène | O | sélénium | Se |
| américium | Am | cobalt | Co | iode | I | palladium | Pd | silicium | Si |
| antimoine | Sb | cuivre | Cu | iridium | Ir | phosphore | P | sodium | Na |
| argent | Ag | curium | Cm | krypton | Kr | platine | Pt | soufre | S |
| argon | Ar | darmstadtium | Ds | lanthane | La | plomb | Pb | strontium | Sr |
| arsenic | As | dubnium | Db | lawrencium | Lr | plutonium | Pu | tantale | Ta |
| astate | At | dysprosium | Dy | lithium | Li | polonium | Po | technétium | Tc |
| azote | N | einsteinium | Es | lutetium | Lu | potassium | K | tellure | Te |
| baryum | Ba | erbium | Er | magnésium | Mg | praséodyme | Pr | terbium | Tb |
| berkélium | Bk | étain | Sn | manganèse | Mn | prométhium | Pm | thalium | Tl |
| bérylium | Be | europium | Eu | meitnérium | Mt | protactinium | Pa | thorium | Th |
| bhorium | Bh | fermium | Fm | mendélévium | Md | radium | Ra | thulium | Tm |
| bismuth | Bi | fluor | F | mercure | Hg | radon | Rn | titane | Ti |
| bore | B | francium | Fr | molybdène | Mo | rhénium | Re | tungstène | W |
| brome | Br | gadolinium | Gd | néodyme | Nd | rhodium | Rh | uranium | U |
| cadmium | Cd | galium | Ga | néon | Ne | roentgenium | Rg | vanadium | V |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| calcium | Ca | germanium | Ge | neptunium | Np | rubidium | Rb | xenon | Xe |
| californium | Cf | hafnium | Hf | nickel | Ni | ruthénium | Ru | ytterbium | Yb |
| carbone | C | hassium | Hs | niobium | Nb | rutherfordium | Rf | yttrium | Y |
| cerium | Ce | hélium | He | nobélium | No | samarium | Sm | zinc | Zn |
| césium | Cs | holmium | Ho | or | Au | scandium | Sc | zirconium | Zr |

Accès au nom par le symbole

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ac | actinium | Co | cobalt | I | iode | O | oxygène | Se | sélénium |
| Ag | argent | Cr | chrome | In | indium | Os | osmium | Sg | seaborgium |
| Al | aluminium | Cs | césium | Ir | iridium | P | phosphore | Si | silicium |
| Am | américium | Cu | cuivre | K | potassium | Pa | protactinium | Sm | samarium |
| Ar | argon | Db | dubnium | Kr | krypton | Pb | plomb | Sn | étain |
| As | arsenic | Ds | darmstadtium | La | lanthane | Pd | palladium | Sr | strontium |
| At | astate | Dy | dysprosium | Li | lithium | Pm | prométhium | Ta | tantale |
| Au | or | Er | erbium | Lr | lawrencium | Po | polonium | Tb | terbium |
| B | bore | Es | einsteinium | Lu | lutetium | Pr | praséodyme | Tc | technétium |
| Ba | baryum | Eu | europium | Md | mendélévium | Pt | platine | Te | tellure |
| Be | bérylium | F | fluor | Mg | magnésium | Pu | plutonium | Th | thorium |
| Bh | bhorium | Fm | fermium | Mn | manganèse | Ra | radium | Ti | titane |
| Bi | bismuth | Fr | francium | Mo | molybdène | Rb | rubidium | Tl | thalium |
| Bk | berkélium | Ga | galium | Mt | meitnérium | Re | rhénium | Tm | thulium |
| Br | brome | Gd | gadolinium | N | azote | Rf | rutherfordium | U | uranium |
| C | carbone | Ge | germanium | Na | sodium | Rg | roentgenium | V | vanadium |
| Ca | calcium | H | hydrogène | Nb | niobium | Rh | rhodium | W | tungstène |
| Cd | cadmium | He | hélium | Nd | néodyme | Rn | radon | Xe | xenon |
| Ce | cerium | Hf | hafnium | Ne | néon | Ru | ruthénium | Y | yttrium |
| Cf | californium | Hg | mercure | Ni | nickel | S | soufre | Yb | ytterbium |
| Cl | chlore | Ho | holmium | No | nobélium | Sb | antimoine | Zn | zinc |
| Cm | curium | Hs | hassium | Np | neptunium | Sc | scandium | Zr | zirconium |

---=OO=---




## *Paramètres physiques du Soleil*

| zone | dimensions en rayons solaires | température Kelvins | densité g/cm3 |
|---|---|---|---|
| cœur | 0 à 0,3 | 14 millions | 160 à 10 |
| zone radiative | 0,3 à 0,7 | 7 à 1 millions de K | 10 à 1 |
| zone convective | 0,7 à 1 | 1 million à 15 000 K | 1 à 3 $10^{-6}$ |
| photosphère | 350 km | 6.000 K | 3 $10^{-6}$ à $10^{-7}$ |
| chromosphère | 3.000 km | 4.000 à 20.000 K | $10^{-7}$ à 10-13 |
| couronne | millions de km | 1 à 10 millions de K | $10^{-13}$ à $10^{-17}$ |

Le Soleil est désigné par son symbole :

Le cœur, de rayon 0,3 R , représente un volume de $0,3^3 = 0,027$ V , ce qui représente donc 2,7 % du volume du Soleil. A cause de la grande densité, le cœur contient 40 % de la masse totale du Soleil.

**Paramètres du Soleil**

M = 1,9891 $10^{30}$ kg

L = 3,826 $10^{26}$ W

R = 6,960 $10^5$ km

Constante solaire = 1.367 W/$m^2$

## *Les étoiles proches*

| étoile | magnitude visuelle apparente | type spectral | mouvement propre annuel | vitesse radiale km/s | distance AL | magnitude absolue visuelle | luminosité visuelle soleil = 1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Soleil | -25,8 | Go | - | - | - | 5 | 1,0 |
| α Centaure A | 0,3 | G4 | 3,68" | -22 | 4,3 | 4,7 | 1,3 |
| α Centaure B | 1,7 | K1 | - | - | - | 6,1 | 0,36 |
| α Centaure C | 11 | M? | - | - | - | 15,4 | 0,00007 |
| étoile de Barnard | 9,7 | M5 | 10,30" | -110 | 6,1 | 13,3 | 0,0008 |
| Lalande 21 185 | 7,6 | M2 | 4,78" | -87 | 7,9 | 10,7 | 0,0052 |
| Wolf 359 | 13,5 | M5 | 4,84" | -90 | 8,0 | 16,6 | 0,00023 |
| Sirius A | -1,6 | A0 | 1,32" | -8 | 8,6 | 1,3 | 30 |
| Sirius B | 7,1 | A5 | - | - | - | 10,0 | 0,010 |
| Ross 154 | 11 | M4 | 0,67 | ? | 9,3 | 13,7 | 0,00033 |
| Ross 248 | 12,2 | M6 | 1,58" | ? | 10,3 | 14,7 | 0,00013 |
| Luyten 789-6 | 12,3 | M5 | 3,27" | ? | 10,3 | 14,8 | 0,00012 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ε Eridan | 3,8 | K0 | 0,97" | 15 | 10,7 | 6,2 | 0,33 |
| Procyon A | 0,5 | F3 | 1,25" | -3 | 11,0 | 2,9 | 6,9 |
| Procyon B | 10,8 | ? | - | - | - | 13,2 | 0,00052 |
| 61 Cygni A | 5,6 | K5 | 5,22" | -63 | 11,1 | 7,9 | 0,069 |
| 61 Cygni B | 6,3 | K6 | - | - | - | 8,6 | 0,036 |
| Ross 128 | 11,1 | K5 | 1,40" | ? | 11,2 | 13,4 | 0,00044 |
| ε Indien | 4,7 | K5 | 4,67" | -40 | 11,2 | 7,0 | 0,16 |
| τ Ceti | 3,6 | K0 | 1,92" | -16 | 11,2 | 5,9 | 0,44 |
| Struve 2 398 A | 8,9 | M4 | 2,29" | 0 | 11,3 | 11,2 | 0,0033 |
| Struve 2 398 B | 9,7 | M5 | - | - | - | 12,0 | 0,0016 |
| BD _ 12" 4523 | 9,7 | M4 | 1,24" | ? | 11,6 | 11,9 | 0,0017 |
| Groombridge 34 A | 8,1 | M1 | 2,91" | 8 | 11,7 | 10,3 | 0,0076 |
| Groombridge 34 B | 10,9 | M6 | - | - | - | 13,1 | 0,00058 |
| Lacaille 9 352 | 7,4 | M2 | 6,87" | 10 | 12,0 | 9,6 | 0,014 |
| BD +5° 1 668 | 10,1 | M4 | 3,73" | 22 | 12,4 | 12,2 | 0,0013 |
| Ross 614 | 11 | M4 | 0,97" | ? | 12,5 | 13,1 | 0,00058 |
| Lacaille 8 760 | 6,6 | M1 | 3,46" | 22 | 12,5 | 8,7 | 0,033 |
| Krüger 60 A | 9,8 | M4 | 0,87" | -24 | 12,7 | 11,8 | 0,0019 |
| Krüger 60 B | 11,3 | M6 | - | - | - | 13,3 | 0,00048 |
| étoile de Kapteyn | 8,8 | M0 | 8,79 | 242 | 12,7 | 10,8 | 0,0048 |
| étoile de Van Maanen | 12,3 | F0 | 2,98" | 238 | 13,2 | 14,3 | 0,00019 |
| Groombridge 1 618 | 6,8 | K6 | 1,45" | -27 | 14,1 | 8,6 | 0,036 |
| Wolf 424 A | 12,6 | M5 | 1,87" | ? | 14,2 | 14,4 | 0,00017 |
| Wolf 424 B | 12,6 | M5 | _ | _ | _ | 14,4 | 0,00017 |
| CD-46° 11540 | 9,4 | M3 | 1,15" | ? | 14,5 | 11,2 | 0,0033 |
| AOe 17415-6 | 9,1 | M4 | 1,31" | -17 | 15,1 | 10,8 | 0,0048 |
| Ross 780 | 10,3 | M5 | 1,12" | ? | 15,3 | 11,9 | 0,0017 |
| CD-44° 11909 | 10,0 | M5 | 1,14" | - | 15,4 | 11,6 | 0,0023 |
| BD+20° 2465 | 9,5 | M3 | 0,49" | +9 | 15,5 | 11,1 | 0,0036 |
| CD-37° 15492 | 8,3 | M3 | 6,09" | +24 | 15,5 | 9,9 | 0,011 |
| CD-49° 13515 | 8,6 | M3 | 0,78" | ? | 15,6 | 10,2 | 0,0083 |
| Altaïr | 0,9 | A5 | 0,66" | -26 | 15,7 | 2,5 | 10 |
| BD+43° 4305 | 10,2 | M5 | 0,84" | +2 | 15,7 | 11,8 | 0,0019 |
| O2 Eridan A | 4,5 | G5 | 4,08" | -42 | 15,9 | 6,1 | 0,36 |
| O2 Eridan B | 9,2 | B9 | - | - | - | 10,8 | 0,0048 |
| O2 Eridan C | 10,7 | M4 | - | - | - | 12,3 | 0,0012 |
| AC+79° 3888 | 11,0 | M4 | 0,87" | ? | 16,4 | 12,5 | 0,0010 |
| 70 Ophiucus A | 4,3 | K1 | 1,13" | -7 | 16,5 | 5,8 | 0,48 |
| 70 Ophiucus B | 6,0 | K5 | - | - | - | 7,5 | 0,10 |

D'après : *Astronomie, les astres, l'univers* ; Larousse

## *Diamètre de quelques étoiles*

| étoile | type spectral | diamètre/Soleil | classe |
|---|---|---|---|
| ε Cocher B | K5 | 2000 | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| VV Céphée A | M2 | 1200 | **Supergéantes** |
| o Baleine | M6e | 400 | |
| α Orion | M2 | 300 à 400 | |
| ζ Cocher A | K5 | 300 | |
| α Scorpion | M1 | 300 | |
| ε Cocher A | F5 | 200 | |
| β Pégase | M5 | 120 | |
| α Taureau | K5 | 45 | **Géantes** |
| V 380 Cygne A | B2 | 29 | |
| α Bouvier | K0 | 25 | |
| α Cocher | G0 | 16 | |
| Y Cygne A, B | O9 | 5,9 | |
| β Persée A | B8 | 3,1 | **Séquence Principale Naines** |
| β Cocher A | A0 | 2,8 | |
| Procyon A | F5 | 1,7 | |
| α Centaure A | G4 | 1,2 | |
| Soleil | G2 | 1,0 | |
| W Grande Ourse A | F8 | 0, | |
| 70 Ophiucus A | K1 | 0,9 | |
| 70 Ophiucus B | K5 | 0,7 | |
| Krüger 60 A | M4 | 0,5 | |
| Sirius B | A5 | 0,02 | **Naines Blanches** |
| 40 Eridan B | A | 0,02 | |
| Van Maanen 2 | G | 0,006 | |
| Wolf 457 | | 0,003 | |

D’après : Astronomie, les astres, l’univers ; Larousse

Le tableau ci-dessus donne des valeurs approximatives, obtenues par diverses méthodes. La surface des étoiles, trop petite, n’est pas visible depuis la Terre à l’aide d’un télescope classique.

Le télescope spatial, s’affranchissant de l’atmosphère, n’a pas les mêmes limites, mais il est encore un peu petit pour observer la surface des autres étoiles (autres que le Soleil).

Une technique difficile et récente, l’interférométrie optique - dans laquelle le français Antoine Labeyrie est un précurseur - permet d’associer plusieurs télescopes pour obtenir l’équivalent d’un très grand télescope. Cette technique, en cours de développement avec de très grands projets comme le VLT, permettra d’observer directement la surface des étoiles les plus proches.

## *Quelques belles étoiles doubles*

A l’œil nu, on peut admirer Mizar et Alcor, dans la Grande Ourse, qui constituent une étoile double. A l’aide d’un instrument, on en verra beaucoup, mais une question se pose immédiatement.

Les étoiles se trouvent à des distances très variables de la Terre ; se peut-il que deux étoiles à des distances très différentes soient vues dans la même direction comme une étoile double ? la réponse est bien sûr oui, il y a tant d’étoiles que ceci se produira surement. On les appelle *étoiles doubles visuelles*. Mais il existe aussi des étoiles qui tournent l’une autour de l’autre, exactement comme une planète tourne autour du Soleil.

Il existe même des système comportant un plus grand nombre d’étoiles, 3, 4 ou même 5.

Il est difficile de déterminer rapidement si deux étoiles qui constituent une double vue dans un instrument sont vraiment liées l’une à l’autre.

Le tableau ci-dessous donne quelques couples, réels ou apparents, qui constituent un magnifique spectacle dans un petit instrument.

| **étoile** | **distance des composantes** | **magnitudes et couleurs des composantes** | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| β Cygne | 34,5" | 3,2 | orangée | 5,4 | bleue |
| η Persée | 28,0" | 3,9 | orangée | 8,7 | bleue |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| α Chiens de Chasse | 19,8" | 2,9 | jaune | 8,7 | bleue |
| ζ Grande Ourse | 14,5" | 2,4 | blanche | 4,0 | blanche |
| γ Dauphin | 10,4" | 4,5 | jaune | 5,5 | verte |
| γ Andromède | 9,8" | 2,3 | orangée | 5,1 | verte (1) |
| β Orion | 9,5" | 0,3 | blanche | 9,0 | bleue |
| η Cassiopée | 9,6" | 3,7 | jaune | 7,4 | rouge |
| γ Vierge | 5,8" | 3,7 | jaune | 3,7 | jaune |
| α Hercule | 4,7" | 3,5 | rouge | 5,4 | verte |
| γ Lion | 4,1" | 2,0 | jaune | 3,8 | jaune |
| δ Serpent | 4,0" | 4,2 | bleuâtre | 5,2 | bleuâtre |
| α Scorpion | 3,0" | 1,2 | rouge | 7,0 | verte |
| ε Bouvier | 2,8" | 3,0 | jaune | 6,3 | bleue |
| α Gémeaux | 2,0" | 2,7 | blanche | 3,7 | blanche |

D'après : *Astronomie, les astres, l'univers* ; Larousse

(1) l'étoile la plus faible est elle-même double ; les deux composantes sont à 0,5" l'une de l'autre ; elles sont respectivement de magnitude 5,5 de couleur verte, et 6,3 de couleur bleue.

## *Les étoiles les plus brillantes du ciel*

| étoile | nom | magnitude | type spectral | distance AL | luminosité | mouvement propre annuel |
|---|---|---|---|---|---|---|
| α Grand Chien | Sirius | -1,6 | A0 | 8,6 | 30 | 1,32" |
| α Carène | Canopus | -0,9 | F0 | 100 | 1.900 | 0,32" |
| α Centaure A, B | | 0,1 | G4;K1 | 4,3 | 1,3 - 0,36 | 3,68" |
| α Lyre | Véga | 0,1 | A0 | 27 | 60 | 0,35" |
| α Cocher | Capella | 0,2 | G0 | 42 | 150 | 0,44" |
| α Bouvier | Arcturus | 0,2 | K0 | 33 | 80 | 2,28" |
| β Orion | Rigel | 0,3 | B8 | 540 | 21.000 | 0,0" |
| α Petit Chien | Procyon | 0,5 | F3 | 11 | 6,9 | 1,25" |
| α Eridan | Achernar | 0,6 | B5 | 70 | 280 | 0,09" |
| β Centaure | | 0,9 | B1 | 190 | 1.400 | 0,04" |
| α Aigle | Altaïr | 0,9 | A5 | 15,7 | 10 | 0,66" |
| α Orion | Bételgeuse | 1 var. | M2 | 300 | 40.000 | 0,03" |
| α Croix du Sud | | 1,1 | B1 | 220 | 1.200 | 0,05" |
| α Taureau | Aldébaran | 1,1 | K5 | 53 | 90 | 0,20" |
| β Gémeaux | Pollux | 1,2 | K0 | 29 | 25 | 0,62" |
| α Vierge | Spica | 1,2 | B2 | 120 | 440 | 0,05" |
| α Scorpion | Antarès | 1,2 | M1 | 250 | 1.900 | 0,03" |
| α Poisson Austral | Fomalhaut | 1,3 | A3 | 16 | 23 | 0,36" |
| α Cygne | Deneb | 1,3 | A2 | 400 | 4.800 | 0,00" |
| α Lion | Régulus | 1,3 | B8 | 67 | 130 | 0,25" |

**Nombre d'étoiles visibles**

A l'œil nu, on peut voir (dans d'excellentes conditions, ciel noir, très, très loin des villes…) jusqu'à 3.000 étoiles (magnitude limite 6). A l'aide de jumelles, on en voit déjà beaucoup plus ; et une lunette ou un télescope en montrent encore bien davantage.

Le tableau ci-dessous indique combien d'étoiles se montrent en fonction de la magnitude limite accessible avec un instrument :

| magnitude limite | nombre d'étoiles | magnitude limite | nombre d'étoiles |
|---|---|---|---|
| 6 | 3.000 | 14 | 6.500.000 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 8 | 23.000 | 16 | 20.900.000 |
| 10 | 165.000 | 18 | 142.000.000 |
| 12 | 1.100.000 | 20 | 506.000.000 |

### *Etoiles variables*

Pour les binaires à éclipses, le nom est celui donné au couple. Les composantes portent le même nom, suivi des lettres A ou B.

| | Etoile | Nom | m min | m max | période |
|---|---|---|---|---|---|
| **Binaires à éclipses** | β Persée | Algol | 2,2 | 3,5 | 2,87 |
| | λ Taureau | - | 3,3 | 4,7 | 3,95 |
| | δ Orion | - | 2,3 | 2,5 | 5,73 |
| | VV Orion | - | 5,3 | 5,7 | 1,49 |
| | β Cocher | - | 2,1 | 2,2 | 3,95 |
| | ε Cocher | - | 3,4 | 4,2 | 9898,5 |
| | WW Cocher | - | 5,6 | 6,2 | 2,53 |
| | δ Balance | - | 4,8 | 6 | 2,33 |
| | U Ophiucus | - | 5,7 | 6,7 | 1,68 |
| | AR Cassiopée | - | 4,9 | 5 | 6,07 |
| | β Lyre | - | 3,4 | 4,3 | 12,91 |
| | υ Hercule | - | 4,6 | 5,4 | 2,05 |
| | α Couronne | - | 2,3 | 2,4 | 17,36 |
| | ι Bouvier | - | 4,9 | 5,5 | 0,27 |
| | ο Andromède | - | 3,6 | 4,5 | 1,60 |
| | R Andromède | - | 6 | 14,9 | 409 |
| **Céphéides** | δ Céphée | - | 3,8 | 4,6 | 5,37 |
| | α Petite Ourse | - | 2,1 | 2,3 | 3,97 |
| | δ Ecu | - | 5 | 5,2 | 0,19 |
| | T Licorne | - | 5,8 | 6,8 | 27 |
| | RT Cocher | - | 5 | 6,6 | 3,73 |
| | ζ Gémeaux | - | 3,7 | 4,3 | 10,15 |
| | η Aigle | - | 3,7 | 4,4 | 7,18 |
| | T Petit Renard | - | 5,5 | 6,1 | 4,44 |
| | DT Cygne | - | 5,7 | 6,1 | 2,50 |
| **Variables à longue période** | ο Baleine | Mira Ceti | 2 | 10 | 331,65 |
| | R Cygne | - | 6,5 | 14,4 | 426,3 |
| | χ Cygne | - | 3,3 | 14,2 | 407 |
| | R Triangle | - | 5,7 | 12,6 | 266 |
| | U Orion | - | 5,3 | 12,6 | 372 |
| | R Serpent | - | 5,7 | 14,4 | 357 |
| | R Grande Ourse | - | 6,7 | 13,4 | 302 |
| | T Grande Ourse | - | 6,6 | 13,4 | 257 |
| | R Bouvier | - | 6,6 | 12,9 | 223 |
| | R Lion | - | 5,4 | 10,5 | 313 |
| | R Hydre | - | 4 | 10,1 | 3,86 |
| | T Céphée | - | 5,4 | 11 | 389 |
| | VV Céphée | - | 5,3 | 6 | 743 |
| | R Cassiopée | - | 4,8 | 13,6 | 431 |
| | R Aigle | - | 5,7 | 12 | 293 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Variables irrégulières** | R Couronne Boréale | - | 5,8 | 14,8 | |
| | T Cygne | - | 5 | 5,5 | |
| | W Cygne | - | 5 | 6,7 | 131 |
| | ρ Persée | - | 3,2 | 4,1 | |
| | RS Cancer | - | 5,4 | 6,6 | |
| | UX Dragon | - | 5,8 | 6,5 | |
| | U Dauphin | - | 5,6 | 7,5 | |
| | TV Poissons | - | 4,6 | 5,2 | 49 |
| | Y Chiens de Chasse | - | 5,2 | 6,6 | 158 |
| | α Cassiopée | - | 2,1 | 2,6 | |
| | γ Cassiopée | - | 1,6 | 3 | |
| | ρ Cassiopée | - | 4,4 | 5,1 | |
| | u Céphée | - | 3,6 | 4,8 | |
| | α Hercule | - | 3,1 | 3,9 | |
| | γ Hercule | - | 4,4 | 5,6 | |
| | η Gémeaux | - | 3,1 | 3,9 | |
| | AE Cocher | - | 5,3 | 6,2 | |
| | UU Cocher | - | 5,1 | 6,8 | 235 |
| | α Orion | - | 0,1 | 1,2 | 2.070 |
| | U Licorne | - | 5,6 | 7,3 | 92 |
| | δ Serpent | - | 4,9 | 5,6 | |
| | R Lyre | - | 4 | 4,5 | |
| | VZ Girafe | - | 5,1 | 5,5 | |

### *Types spectraux*

OBAFGKM(RNS) dans l'ordre des plus chaudes aux plus froides jusqu'au type M.

**O**h, **B**e **A** **F**ine **G**irl, **K**iss **M**e **R**ight **N**ow, **S**weatheart

| classe | couleur | indice de couleur | température effective (K) | type | caractéristiques |
|---|---|---|---|---|---|
| O | bleue | - 0,3 | 28.000 - 50.000 | κ Per, ε Ori | très peu de raies d'absorption |
| B | bleue-blanc | - 0,2 | 9.900 - 28.000 | Rigel, Spica | peu de raies H et He |
| A | blanches | 0,0 | 7.400 - 9.900 | Véga, Sirius | raies H max. d'intensité, quelques |
| F | blanc-jaune | 0,3 | 6.000 - 7.400 | Procyon | nombreuses raies métalliques |
| G | jaunes | 0,7 | 4.900 - 6.000 | Soleil, α Cen A | nombreuses raies métalliques, premières bandes d'absorption moléculaires (CH, OH…) |
| K | jaune-orangé | 1,2 | 3.500 - 4.900 | Arcturus | larges bandes moléculaires en absorption |
| M | rouge-orangé | 1,4 | 2.000 - 3.500 | Bételgeuse | très larges bandes moléculaires ZiO |
| R | rouge-orangé | 1,7 | 3.500 - 5.400 | | très larges bandes moléculaires composés carbonnés |
| N | rouge | > 2 | 1.900 - 3.500 | R Lep | très larges bandes moléculaires composés carbonnés |
| S | rouge | 1,7 | 2.000 - 3.500 | R Cyg | très larges bandes moléculaires oxyde de zirconium |

### *Classes de luminosité*

| classe | type d'étoiles | exemple |
|---|---|---|
| O | supergéantes très lumineuses, hypergéantes | ρ Cas, S Dor |
| | | |

| | | |
|---|---|---|
| Ia | supergéantes lumineuses | Bételgeuse, Deneb |
| Ib | supergéantes moins lumineuses | Antarès, Canopus |
| II | géantes brillantes | Polaris, θ Lyræ |
| III | géantes | Aldébaran, Arcturus, Capella |
| IV | sous-géantes | Procyon |
| V | naines (Séquence Principale) | Soleil, α Cen, Sirius, Véga, 61 Cyg |
| Sd | sous-naines | aucune brillante |
| D | naines blanches | Sirius B, Procyon B, 40 Eri B |

---=OO=---




L'observation des planètes s'est faite au télescope avant l'exploration spatiale. L'image de Mars, au plus près, ne dépasse pas 25,6" d'arc. Il est très difficile, dans ces conditions, de distinguer des détails précis à la surface de la planète, le pouvoir séparateur d'un télescope au sol étant de l'ordre de la seconde. De plus, on ne voit pas de relief, car 2 ou 3.000 m de plus ou de moins, quand on se trouve à 70 millions de km, ne changent vraiment rien.

Il ne reste à observer que quelques différences de coloration ou de brillance, concernant des zones assez vastes à la surface de la planète. Plus précisément, le sol, selon ses propriétés physiques ou chimiques et sa granulométrie, renvoie plus ou moins de lumière. On peut parler, comme pour une planète dans son ensemble, de l'albédo du sol.

Les seuls détails observables ainsi sont donc des *figures d'albédo* (albedo features).

Par suite, les astronomes ont donné des noms aux taches permanentes. Mais aujourd'hui, des sondes explorent les planètes de près, donnant une résolution infiniment plus précise. Sur les photos qu'on obtient ainsi, on voit des détails très fins, et des zones plus vastes de coloration variée. Le jeu consiste à repérer les anciennes zones, qui ont un nom, pour les associer aux nouvelles bien plus précises. Ce jeu-là n'est pas facile, et n'a pas toujours de solution bien précise.

Prenons l'exemple, sur Mars, de la zone nommée autrefois Nix Olympica (neiges de l'Olympe). Cette partie de Mars a reçu ce nom parce que sa couleur changeait selon la saison, de rouge en été à blanc en hiver. On a alors pensé qu'il y avait là une zone qui se couvrait de neige en hiver, probablement une montagne, d'où le nom.

Mais les images récentes montrent, à cet emplacement, le plus beau volcan du système solaire. Et ce qu'on avait pris pour de la neige est en fait un immense nuage qui s'accroche au sommet. Dans ces conditions, conserver le nom ancien n'aurait pas beaucoup de sens, mais en mettre un sans aucun lien avec lui non plus. Les astronomes ont donc choisi une solution médiane, qui consiste à conserver la seconde partie du nom (Olympica), et à l'adapter à une montagne. C'est ainsi que Nix Olympica est devenu *Olympus Mons*, perdant la référence à la neige, et gagnant celle à une montagne.

La pauvreté de la résolution télescopique n'a pas permis de créer de nombreux noms, et seuls les principaux détails de surface ont été désignés. Le problème d'association ne se pose donc pas pour beaucoup de noms. Il a fallu ensuite en créer de nouveaux.

La convention prise a été de construire les noms en deux parties : la première donne le nom particulier de la structure observée, et la seconde son type géologique. Le type porte un nom latin. Olympus Mons en est un exemple : Olympus est le nom particulier, et Mons indique qu'il s'agit d'une montagne.

Nous allons décrire ci-dessous les noms des divers types géologiques que l'on observe sur les planètes ou satellites du système solaire. Certaines se voient sur toutes les planètes, d'autres n'ont jamais été observées que sur une seule d'entre elles. C'est le cas par exemple des coronæ, que l'on a découvertes sur Vénus et jamais observées ailleurs. Par contre, les cratères d'impacts se trouvent absolument sur tous les objets du système solaire (à moins que leur surface soit vraiment très jeune, et que les traces aient été effacées).

| singulier | pluriel | définition | abbrév. |
|---|---|---|---|
| catena | catenae | Chaîne de cratères (cratères secondaires par exemple). Mais aussi tubes de lave effondrés. | CA |
| cavus | cavi | Creux, dépression irrégulière, aux bords raides, qui ne ressemblent pas à des cratères d'impact. | CB |
| chaos | | Zone de terrain chaotique, désordonnée. Chaos en grec signifie *vide, sans bornes*. | CH |
| chasma | chasmata | Dépression allongée et profonde, aux bords pentus ; canyon. | CM |
| collis | colles | Petites collines, éminences. | CO |
| corona | coronae | Structure ovoïde. | CR |
| crater | craters | Dépression circulaire. | AA |
| dorsum | dorsa | Crête (dos d'un animal). | DO |
| eruptive center | | Centre volcanique en activité sur Io. | ER |
| facula | faculae | Tache brillante | FA |
| farrum | farra | Structure en forme de crêpe, ou ligne de telles structures. | FR |
| flexus | flexus | Crête courbe et basse en forme de coquille St Jacques. | FE |
| fluctus | fluctus | Terrain formé par l'écoulement d'un flot. | FL |
| fossa | fossae | Fossé, tranchée, chenal. Dépression peu profonde, longue et étroite.Sur Mars, les fossæ sont isolées ou en groupe. | FO |
| labes | labes | Glissement de terrain. Abondants sur les pentes de Valles Marineris. | LA |
| labyrinthus | | Complexe de vallées ou de canyons qui se croisent. Spécialement sur Mars. | LB |

| | | | |
|---|---|---|---|
| lacus (1) | | Lac ; petite plaine. | LC |
| large ringed feature | | Figure circulaire. | LG |
| lenticula | lenticulae | Petite tache sombre sur Europe. | LE |
| linea | lineae | Trace brillante ou sombre, rectiligne ou courbe. | LI |
| macula | maculae | Tache sombre, éventuellement irrégulière. | MA |
| mare (1) | | Mer ; grande plaine circulaire. | ME |
| mensa | mensae | (table) petit plateau bordé de falaises. Semblables aux mesa d'Amérique (même racine). | MN |
| mons | montes | Montagne. C'est un terme fourre-tout. | MO |
| oceanus (1) | | Grande zone sombre sur la Lune. | OC |
| palus (1) | | Marais ; petite plaine. | PA |
| patera | paterae | Cratère irrégulier, ou complexe avec bords en forme de coquille, qui ne ressemble pas à un cratère d'impact. | PE |
| planitia | planitiæ | Plaine basse, lisse, pratiquement sans défauts. | PL |
| planum | plana | Plateau, ou plaine élevée. L'élévation distingue de Planitia. | PM |
| plume | | | PU |
| promontorium (1) | | Cap ; promontoire. | PR |
| regio | regiones | Grande zone différenciée de ses voisines par sa couleur ou sa brillance. | RE |
| reticulum | reticula | Motif réticulé sur Vénus. | RT |
| rima (1) | rimae | Fissure. | RI |
| rupes | rupes | Falaise, escarpement, paroi rocheuse, à-pic. L'allure générale est linéaire. | RU |
| scopulus | scopuli | Escarpement irrégulier ou lobé. Semblable à Rupes, mais non linéaire, irrégulier. | SC |
| sinus | | Baie ; petite plaine. | SI |
| sulcus | sulci | Sillons ou fossés, et chaîne de montagnes quasi-parallèles, donnant l'allure d'un tapis plissé. | SU |
| terra | | Grande masse de terrain. | TA |
| tessera | tesserae | Terrain très fracturé, en forme de tuiles, ou polygonal. | TE |
| tholus | tholi | (Dôme, coupole) petite montagne en dôme, isolée. | TH |
| unda | undae | (Onde, vague) terrain ondulé, dunes. | UN |
| vallis | valles | Vallée. | VA |
| vastitas | | (de *vasto*, vide) Grande plaine. | VS |

(1) Utilisé seulement pour la Lune.

*Ares* est le nom latin de Mars, *Kasei* son nom japonais, et *Ma'adim* son nom hébreu.

---=OO=---




## *Les grandes dates*

| | |
|---|---|
| -8000 | Création du premier calendrier égyptien |
| -4236 | Création du calendrier Vague en Egypte; les égyptiens connaissent déjà la valeur 365,25 jours pour l'année. |
| -3000 à -1000 | Monuments orientés précisément en fonction du soleil, des étoiles (pyramides d'Egypte, Stonehenge) |
| -600 | Thalès pense que la Terre est plate et flotte sur l'eau, sous la voûte du ciel |
| -530 | Pythagore suppose la Terre sphérique, entourée de 10 sphères de cristal concentriques, portant les astres. En tournant, ces sphères produisent des notes de musique selon leur taille et leur vitesse ; l'ensemble de ces notes donne un accord parfait. C'est l'origine de la *musique des sphères* |
| -450 | Anaxagore suppose tous les astres sphériques et construit une théorie des éclipses |
| -280 | Aristarque de Samos pense que planètes et étoiles tournent autour du soleil. Cette idée, juste pour les planètes, ne sera pas acceptée ; le système géocentrique de Ptolémée sera conservé jusqu'à la révolution copernicienne. Il a pu calculer les distances relatives entre la Terre, la Lune et le Soleil. |
| -250 | Erathostène calcule le rayon de la Terre par des mesures d'angle entre Syenne (Assouan) et Alexandrie. |
| -150 | Hipparque dresse le premier catalogue d'étoiles ; il les classe en 6 grandeurs selon leur éclat. Son classement est à la base de la notion actuelle de magnitude. Il définit les constellations. |
| +150 | Ptolémée décrit son modèle complexe et faux de système géocentrique dans son ouvrage *l'Almageste*. La complexité n'est pas naturelle, mais lui permettait d'obtenir une approximation acceptable des positions des planètes. Son système représente donc à peu près les mouvements, mais n'explique rien. |
| 900 | Al-Batani détermine une bonne valeur de la durée de l'année. |
| 900 | Al-Sufi découvre la galaxie d'Andromède. |
| 1054 | Une supernova explose ; elle est observée par les chinois qui consignent par écrit ce qu'ils voient (*étoile invitée*). A l'heure actuelle, il en reste le pulsar du Crabe, et une nébuleuse planétaire. |
| 1252 | Alphonse X de Castille publie un catalogue de positions d'étoiles, les Tables Alphonsines. |
| fin XIII$^{e}$ | Les premières lentilles optiques sont taillées par des verriers vénitiens |
| 1543 | Copernic publie son modèle héliocentrique dans *De Revolutionibus Orbium Cœlestium*; enfin, la Terre tourne autour du Soleil ! |
| 1558 | Le principe de la lunette est décrit dans un livre publié à Naples par Porta. |
| 1575 | Tycho Brahé a mesuré les positions de Mars, observée à l'œil nu, avec une précision record de 1'. Il a prouvé que les comètes sont des objets astronomiques et non des phénomènes atmosphériques. |
| 1582 | Changement de calendrier : on passe du Julien au Grégorien. |
| 1600 | Kepler, en utilisant les positions notées par Tycho Brahé, et en supposant que Mars parcourait la seule courbe fermée aplatie connue à l'époque, (l'ellipse) a pu formuler les lois du mouvement des planètes. Avec l'héliocentrisme, les lois de Kepler achèvent une description correcte des mouvements dans le système solaire. |
| 1604 | Construction des premières lunettes par les Hollandais Janssen, et Lippershey ; toutes simples, constituées d'un verre unique en guise d'objectif et d'un autre verre comme oculaire, elles étaient de très mauvaise qualité avec une forte aberration chromatique. Le diamètre était faible, de l'ordre de 5 cm maximum. |
| 1610 | Galilée utilise une lunette et découvre les cratères de la Lune, les montagnes, et surtout il découvre les quatre principaux satellites de Jupiter, qui porteront son nom : satellites galiléens.Il donne ainsi un argument très fort pour abandonner définitivement le géocentrisme. Il découvre l'inertie. |
| 1647 | Hevelius établit une carte de la Lune. |
| fév. 1672 | Newton présente le télescope qu'il vient d'inventer à la Société Royale de Londres. Le miroir primaire a un diamètre de 37 mm pour une focale de 16 cm ; il est bien sûr de type Newton ! le miroir est naturellement en métal poli. |
| 1676 | Römer mesure la vitesse de la lumière. |

| | |
|---|---|
| 1682 | Halley montre par le calcul que plusieurs comètes ne sont que des passages successifs de la même (qui portera son nom) et prédit un prochain retour. |
| 1687 | Newton découvre la loi de la Gravitation Universelle ; il invente une forme de télescope. |
| 1781 | Découverte d'Uranus par William Herschel. |
| 1814 | Fraunhofer a découvert les raies d'absorption dans le spectre du soleil, mais n'en connaissait pas l'interprétation. |
| 1842 | Découverte de la variation de fréquence en fonction de la vitesse par Doppler. |
| 1848 | Fizeau propose d'appliquer l'effet Doppler à la mesure des vitesses radiales des étoiles. |
| 23 sept 1846 | Découverte de Neptune par Galle, d'après les calculs de Urbain Le Verrier. |
| 1859 | Bunsen et Kirchhoff associent les spectres de raie d'absorption aux éléments chimiques qui en sont responsables ; ils en déduisent la composition chimique du soleil. |
| 1864 | Angelo Secchi comprend que le Soleil est une sphère entièrement gazeuse. |
| 1865 | Foucault construit le premier télescope à miroir de verre à Marseille. |
| 1868 | Découverte par Janssen d'une raie dans le spectre solaire qui ne correspondait à aucun élément connu sur Terre ; Lockyer propose de l'appeler Hélium (de Hélios : Soleil). |
| 1875 | Découverte de l'hélium en laboratoire. |
| 1905 | Relativité Restreinte d'Einstein. |
| 1912 | Vesto Slipher découvre le décalage vers le rouge des nébuleuses (galaxies). |
| 1912 | Miss Henrietta Leavitt détermine la relation période-luminosité des Céphéides, qui est à la base de la détermination de toutes les distances. |
| 1914 | Utilisation à Marseille de l'interféromètre de Pérot et Fabry pour mesurer les vitesses des gaz dans la nébuleuse d'Orion ; cet interféromètre avait été inventé à Marseille également quelques années avant. |
| 1915 | Publication de la Relativité Générale. |
| 1923 | Hubble trouve une Céphéide dans la nébuleuse d'Andromède, d'où découle la mesure de sa distance. Il obtient 1 million d'années-lumière, ce qui est trop faible, mais indique que c'est un objet hors de notre Voie Lactée. |
| 1929 | Publication par Hubble d'une relation linéaire entre le décalage vers le rouge et la distance de l'objet. Cette relation avait été trouvée bien avant par Alexandre Friedmann et Georges Lemaître en résolvant l'équation d'Einstein de la Relativité Générale. |
| 1930 | Bernard Lyot fabrique un coronographe, permettant de voir la couronne solaire en dehors des éclipses totales. |
| 18 fév 1930 | Découverte de Pluton par Clyde Tombaugh. Considéré comme la neuvième planète du système solaire, Pluton n'est plus aujourd'hui que l'un des plus gros objets de la ceinture de Kuiper. |
| 1948 | Georges Gamow prédit l'existence du rayonnement fossile cosmologique. |
| 1948 | Mise en service du télescope Hale du Mont Palomar. |
| 1949 | Première observation du Soleil en rayons X à l'aide d'une fusée. |
| 4 oct 1957 | Lancement de Spoutnik 1 et inauguration de l'exploration spatiale. |
| 1961 | Découverte d'un objet d'allure stellaire, mais présentant une forte émission radio ; cette radiosource quasi stellaire a été nommée Quasar : QUASi-stellAR radiosource. |
| 1968 | Découverte, par Jocelyn Bell, du premier pulsar dont l'émission radio si régulière a d'abord été confondue avec un message envoyé par des extraterrestres ! |
| 20 juillet 1969 | Neil Armstrong et Edwin Aldrin se promènent sur la Lune, dans la mer de la Tranquillité, pendant que Michael Collins les observe d'en haut. Apollo 11 vient d'inaugurer l'exploration spatiale par l'Homme (des engins automatiques s'étaient déjà posés sur la Lune). |
| 1972 | Mise en service du télescope Bolchoï de 6 mètres à Zélentchouk. |
| 1976 | Le rayonnement fossile prévu par Georges Gamow est observé par Penzias et Wilson. |
| 1977 | Découverte des anneaux d'Uranus, par l'observation d'une occultation d'étoile. |
| 1979 | Découverte des anneaux de Jupiter par la sonde Voyager 1. |
| 1986 | Découverte des anneaux de Neptune par André Brahic, par la même méthode d'occultation que pour Uranus. |
| 1990 | Lancement du télescope spatial Hubble (HST : Hubble Space Telescope). |
| fin 1995 | Découverte par Michel Mayor et Didier Queloz, à l'Observatoire de Saint Michel de Provence, de la première planète hors du système solaire. |

De nombreuses autres dates sont très importantes, mais elles portent sur des phénomènes physiques qui sortent de notre cadre.

### *Grands Astronomes*

**Avant J.C.**

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Thalès de Millet** | 624 | 560 | astronome grec. Il a prédit l'éclipse de Soleil du 28 mai 585 avant J.C. |
| **Anaximandre** | 617 | 547 | philosophe et astronome ionien né à Millet. Il concevait la Terre comme un cyclindre d'axe est-ouest, suspendu dans l'espace. Les étoiles étaient fixées à une sphère tournant autour. |
| **Pythagore** | 569 | 500 | il fut le premier à penser que la Terre était sphérique et tournait sur elle-même. |
| **Empédocle** | 492 | 440 | né en Sicile. Il a imaginé les quatre éléments (eau, terre, air et feu) pour expliquer la matière. |
| **Leucippe** | 490 | ? | philosophe grec. Il a introduit la notion d'atomes qui sera développée par Démocrite. |
| **Oenopide** | 480 | ? | philosophe grec. Il a mesuré l'inclinaison de l'axe de rotation terrestre sur l'écliptique, et a trouvé 24°. |
| **Anaxagore** | 480 | 430 | philosophe grec. Il pensait que la matière était constituée de graines, qui lui donnaient ses propriétés. En conséquence, les astres devaient être faits de la même matière que la Terre. Il considérait le Soleil comme un énorme rocher chaud et lumineux. Il a compris le mécanisme des éclipses. |
| **Démocrite** | 470 | 380 | philosophe grec, né en Thrace. Il a montré que les atomes définis par Leucippe étaient la base de toute matière. Il a compris que la Voie Lactée était un grand rassemblement d'étoiles, et que la Lune était semblable à la Terre. |
| **Méton** | 440 | ? | astronome grec, né à Athènes. Il a découvert le cycle de 19 ans des éclipses, nommé cycle de Méton. Ce cycle a permis l'élaboration des calendriers lunaires ou semi-lunaires. |
| **Héraclide** | 390 | 320 | astronome grec. Le premier à considérer que Vénus et Mars orbitaient autour du Soleil. Il a aussi compris que la Terre tourne sur elle-même en 24 heures. |
| **Aristote** | 384 | 322 | philosophe macédonien, fondateur de l'école péripatétitienne. Il a découvert que le mouvement de chute libre était accéléré. |
| **Callipe** | 370 | 300 | |
| **Pythéas** | 330 | | marin et explorateur marseillais. Il a probablement découvert l'Islande. Il a mesuré la latitude de Marseille (première mesure de latitude connue), et a expliqué l'origine des marées. |
| **Aristarque de Samos** | 310 | 230 | astronome grec né à Samos. Il a compris la rotation de la Terre sur elle-même et autour du Soleil (système héliocentrique). Il a mesuré la distance de la Terre au Soleil en considérant les phases lunaires. |
| **Erathosthène** | 284 | 192 | mathématicien, astronome et philosophe grec, né à Cyrène. Il mesura le méridien terrestre, et l'obliquité de l'écliptique. |
| **Hipparque** | 160 | 126 | astronome grec qui découvrit la précession des équinoxes |
| **Sosigène** | 90 | | astronome grec. Il a conseillé Jules César pour l'établissementdu calendrier julien. |

**Après J.C.**

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Ptolémée** | Claude | | | Astronome, mathématicien et géographe alexandrin, auteur du système géocentrique, publié dans l'Almageste. Cet ouvrage, dont les bases sont fausses, a été la référence jusqu'à la révolution copernicienne. |
| **Al Battani** | | 12$^{e}$ s | | |
| **Al Farghani** | | 12$^{e}$ s | | |
| **Regiomontanus** | Johan Muller, dit | 1436 | 1476 | Astronome allemand, né à Königsberg, publia les éphémérides de Nuremberg. Il a décrit très précisément le mouvement des comètes. |
| **Copernic** | Nicolas | 1473 | 1543 | Astronome polonais, né à Torun. Il démontra que les planètes tournent autour du Soleil et sur elle-même : système de Copernic, décrit dans De Revolutionibus Coelestium Orbium. Ce système est descriptif. C'est Kepler qui donnera les lois du mouvement. |
| **Tycho Brahé** | | 1546 | 1601 | Astronome danois, né à Knudstrup. Excellent observateur, ses mesures de position très précises, en particulier de Mars, ont permis à Kepler d'établir ses lois sur le mouvement des planètes. |
| **Bruno** | Giordano | 1548 | 1600 | Philosophe italien, né à Nola. Il affirma que la terre est une planète comme les autres, le Soleil une étoile quelconque, et l'univers infini. Il pensait également que la vie existait sur d'autres planètes. Pour cela, il fut brulé à Rome comme hérétique. |
| **Galilée** | Galileo Galilei, dit | 1564 | 1642 | Physicien et astronome italien, né à Pise. Il est l'un des fondateurs de la méthode expérimentale. Après les hollandais, il construisit une lunette et la tourna vers le ciel. Il découvrit ainsi les satellites de Jupiter, qui tournaient autour d'un autre corps que la Terre. La preuve était donc faite que la Terre n'est pas le centre de l'univers. Pour échapper au bûcher, il dut abjurer ses théories. |
| **Kepler** | Johannes Kepleris, dit | 1571 | 1630 | Astronome allemand, né à Weil. D'après les mesures de position de Mars relevées par Tycho-Brahé, il montra que les planètes tournent autour du Soleil sur des orbites elliptiques, dont le Soleil occupe un foyer. Il définit les trois lois dites de Kepler du mouvement des planètes. |
| **Toricelli** | Evangelista | 1608 | 1647 | Physicien italien, né à Faenza. Il inventa le baromètre, et montra que la pression de l'air diminue quand on s'élève. Ceci signifie que l'atmosphère de la Terre est limitée. |
| **Cassini** | Jean | 1625 | 1712 | Astronome français, né en Italie. Il a découvert Tethys, Dione, Rhea, et Japet (satellites de Saturne), et la division des anneaux qui porte son nom. |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Huygens** | Christiaan | 1629 | 1695 | Physicien et astronome hollandais, né à La Haye. Il imagina le premier que la lumière était une onde. Il découvrit les anneaux de Saturne. |
| **Cassegrain** | Laurent | 1629 | 1693 | Inventeur d'un type de télescope d'usage presque universel aujourd'hui, composé d'un primaire concave, et d'un secondaire convexe. |
| **Newton** | Isaac | 1642 | 1727 | Physicien anglais, né à Wollsthorpe. Il découvrit la décomposition de la lumière blanche. Il fit la théorie de l'attraction universelle, et sa loi est toujours valable tant que les mouvements sont lents devant la vitesse de la lumière. |
| **Halley** | Edmund | 1656 | 1742 | Astronome anglais qui appliqua la théorie de la graviation de Newton au mouvement des comètes ; il montra ainsi que 3 comètes différentes étaient des apparitions de la même, qui fut nommée comète de Halley. |
| **Cassini** | Jacques | 1677 | 1756 | Astronome français |
| **Bradley** | James | 1693 | 1762 | Astronome anglais, né à Sherborne. Il a découvert l'aberration de la lumière et la nutation de l'axe terrestre. |
| **Maupertuit** | Pierre Louis Moreau de | 1698 | 1759 | Fils d'un corsaire malouin, il a étudié divers domaines scientifiques, dont la biologie. Il est considéré comme un précusrseur en génétique. Mais il a aussi travaillé sur la physique, étant l'auteur du *principe de moindre action* qui gouverne une grande partie des phénomènes physiques. |
| **Euler** | Leonhard | 1707 | 1783 | Mathématicien suisse, né à Bâle. Il formalisa la théorie du mouvement des planètes. |
| **abbé Lacaille** | Nicolas Louis de | 1713 | 1762 | Astronome français, né à Rumigny. Il fit une révision générale du ciel austral. |
| **Clairaut** | Alexis | 1717 | 1765 | Astronome français, né à Paris. Il détermina la longueur d'un degré du méridien (mesure du rayon de la Terre). |
| **Messier** | Charles | 1730 | 1817 | Astronome français. Grand chasseur de comètes, il était parfois géné par des objets d'aspect nébuleux dans le ciel. Pour éviter de les confondre avec une comète, il en a dressé un catalogue qui porte son nom. Le catalogue de Messier est toujours utilisé. Exemple : M 13 l'amas globulaire d'Hercule. |
| **Lalande** | Joseph Lefrançois de | 1732 | 1807 | Astronome français, né à Bourg-en-Bresse. Sa bibliographie astronomique (1804) est une chronique de la science de son temps. |
| **Herschell** | Sir William | 1738 | 1822 | Astronome britanique d'origine allemande, né à Hanovre. Découvrit Uranus en 1781, 2 de ses satellites en 1787, 2 satellites de Saturne en 1789. Il étudia les étoiles doubles. |
| **Saussure** | Horace de | 1740 | 1799 | |
| **Bode** | Johan | 1747 | 1826 | Astronome allemand, qui a trouvé une loi empirique donnant les distances des planètes au soleil. |
| **Laplace** | Pierre | 1749 | 1827 | Astronome et mathématicien français, né à Simon de Beaumont-en-Auge. Il fit la première théorie pour expliquer la formation du système solaire (1796). |
| **Pons** | Jean-Louis | 1761 | 1831 | Concierge de l'observatoire de Marseille ; formé par le Directeur de l'Observatoire (Jacques-Joseph Thulis), il est devenu le plus grand découvreur de comètes, avec 48 comètes à son actif, dont 18 trouvées à Marseille. Il a été nommé en 1819 directeur de l'obsevatoire de Lucques en Italie. C'est lui qui a découvert la comète d'Encke (nommée ainsi parce que c'est ce dernier qui en a calculé l'orbite). |
| **Bessel** | Friedrich | 1784 | 1846 | Astronome allemand, né à Minden. Il effectua la première mesure sérieuse d'une distance stellaire. |
| **Fraunhofer** | Joseph von | 1787 | 1826 | Physicien allemand, né à Staubing. Il étudia les raies du spectre solaire, dit spectre de Fraunhofer. |
| **Herschell** | John | 1792 | 1871 | Astronome anglais, fils de William, né à Slough. Il construisit un très gros télescope, et étudia les magnitudes stellaires. |
| **Parsons dit lord Rosse** | William | 1800 | 1867 | Il a étudié le reste de supernova M1, qu'il a nommé nébuleuse du Crabe. Il possédait un télescope de 1,83 m de diamètre, ce qui était très important pour son époque. |
| **Doppler** | Christian | 1803 | 1853 | Physicien autrichien, né à Salzbourg. Il étudia les variations de la hauteur d'un son en fonction de la vitesse (effet Doppler). Cet effet se produit également avec la lumière, et donne une mesure de l'expansion de l'univers. |
| **le Verrier** | Urbain | 1811 | 1877 | Astronome français, né à Saint Lô. Par le calcul, il découvrit la planète Neptune grâce aux perturbations qu'elle produit sur l'orbite d'Uranus. |
| **Fizeau** | Hippolyte | 1819 | 1896 | Physicien français, né à Paris. Il mesura directement la vitesse de la lumière, et étendit l'effet Doppler à l'optique. Cet effet est nommé *effet Doppler-Fizeau* |
| **Foucault** | Léon | 1819 | 1868 | Physicien français, né à Paris. Il montra directement la rotation de la Terre par le déplacement de son pendule. |
| **Adams** | John | 1819 | 1892 | Astronome anglais qui a envisagé l'existence d'une planète au-delà d'Uranus par le calcul des perturbations. |
| **Kirchhoff** | Gustav | 1824 | 1887 | Physicien allemand, né à Kœnigsberg. Il découvrit, en collaboration avec Bunsen, l'analyse spectrale grâce à laquelle on connait la composition des étoiles. |
| **Wolf** | Charles | 1827 | 1918 | Découvreur, avec Georges Rayet en 1867, des étoiles massives évoluées à très fort vent stellaire, connues sous le nom d'étoiles Wolf-Rayet. |
| **Stefan** | Joseph | 1835 | 1893 | Physicien autrichien, né à Klagenfurt. Il est l'auteur d'une loi portant son nom sur le rayonnement des corps chauffés. |
| **Schiaparelli** | Giovanni | 1835 | 1910 | Astronome italien qui a observé des structures linéaires sur Mars, qu'il a appellés *canali*. Une mauvaise traduction en a fait les canaux… |
| **Lockyer** | Joseph | 1836 | 1920 | Il a découvert l'hélium (avec Jules Janssen), et créé la revue Nature, qui existe toujours et reste une référence scientifique internationnale. |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Rayet** | Georges | 1839 | 1906 | Découvreur, avec Charles Wolf en 1867, des étoiles massives évoluées à très fort vent stellaire, connues sous le nom d'étoiles Wolf-Rayet. |
| **Violle** | Jules | 1841 | 1923 | Physicien français, né à Langres. Il mesura la constante solaire au sommet du Mont Blanc. |
| **Mohorovicic** | Andrija | 1857 | 1936 | Par l'étude des séismes (notamment celui de Zageb en 1909), il a montré que les ondes sismiques se réfléchissent dans l'intérieur terrestre sur une discontinuité, à la limite entre la crôute terrestre (basalte, granite) et le manteau supérieur (péridotite). Cette discontinuité porte le nom de Moho ; elle est située autour de 35 km de profondeur. |
| **Leavitt** | Miss Henrietta | 1868 | 1921 | En travaillant sur les Céphéides du Grand Nuage de Magellan, elle a découvert une relation entre la période et la luminosité. Cette relation est à la base de toutes les mesures de distance dans l'Univers, au-delà de quelques centaines d'années-lumière. |
| **Hertzsprung** | Ejnar | 1873 | 1967 | Astronome danois, né à Frederiksberg. Avec Russel, il proposa une classification des étoiles de même type spectral en classes de luminosité, et le diagramme de Hertzprung-Russel, qui explique l'évolution des étoiles. |
| **Russel** | Henry | 1877 | 1957 | Astronome américain, né à Oyster Bay. Avec Hertzprung, il est l'auteur du diagramme d'évolution des étoiles. Son diagramme permet aussi de classer les étoiles en naines, géantes et supergéantes. |
| **Einstein** | Albert | 1879 | 1955 | Physicien allemand, né à Ulm. Auteur de la théorie de la Relativité (Restreinte, puis Générale), il étudia le problème cosmologique. Le Big Bang est une solution de ses équations relativistes. Il étudia aussi la mécanique quantique, et c'est lui qui imagina le photon. |
| **Eddington** | Arthur | 1882 | 1944 | Astronome et physicien anglais, né à Kendal. Il a déterminé la masse, la température et la constitution de nombreuses étoiles. |
| **Friedman** | Alexandre | 1888 | 1925 | Théoricien russe. Comme l'abbé Lemaître, il a résolu les équations du champ de gravitation d'Einstein, et trouvé des solutions non stationnaires. Cette grande découverte n'a pas été appréciée à sa juste valeur. Einstein lui-même n'a pas cru à ces résultats, et a introduit la constante cosmologique pour forcer l'existence d'une solution stationnaire. Friedman a démontré un peu plus tard que la solution d'Einstein est instable. |
| **Hubble** | Edwin | 1889 | 1953 | Observateur américain ; utilisant les résultats de Miss Henrietta Leavitt, il a trouvé que les nébuleuses spirales sont extérieures à la Voie Lactée. Grâce ensuite aux résultats de Vesto Slipher, il a vérifié en 1929 que les galaxies s'éloignent d'autant plus vite qu'elles sont plus lointaines. Il a interprété ce résultat comme une vitesse de fuite. Mais il n'a pas fait le lien avec le résultat théorique de Friedman et Lemaître, trouvé 10 ans auparavant. |
| **Lemaître** | abbée Georges | 1894 | 1966 | Théoricien belge. Il a trouvé en 1918 des solutions des équations d'Einstein de la Relativité Générale, qui prévoyaient que l'Univers devait être soit en expansion, soit en contraction. Sa prévision s'est avérée juste quelques années plus tard. Alexandre Friedman était arrivé indépendamment aux mêmes conclusions. |
| **Zwicky** | Friz | 1898 | 1974 | Créateur du terme *supernova* ; il a prédit la formation d'étoiles à neutrons. Il est le premier a avoir envisagé l'existence de matière noire. |
| **Jansky** | Karl | 1905 | 1950 | Ingénieur américain, qui a découvert le rayonnement radio-électrique de la Voie Lactée. En observant une période de 23 h 56 minutes, il a montré que la source était en-dehors du système solaire, puis déterminé qu'elle était dans la direction du Sagittaire (centre de la Galaxie). |
| **Kuiper** | Gerard | 1905 | 1973 | Astronome américain, né en Hollande ; il étudia la surface de la lune, découvrit Miranda et Néreide, trouva l'atmosphère de Titan, et imagina une nouvelle ceinture d'astéroïdes, nommée ceinture de Kuiper. |
| **Schimdt** | Bernard | | | Opticien estonien, inventeur d'un type de télescope à grand champ adapté à la photographie. |
| **Bok** | Bart Jan | 1906 | 1983 | Bart Bok est connu pour sa découverte de nuages nois particulièrement absorbants dans certaines nébuleuses. Ces nuages, connu sous le nom de Globules de Bok, sont très probablement des lieux de formation d'étoiles. Il a également publié un article contre l'astrologie : Objections to Astrology Un asteroïde, 1983 Bok, lui a été dédié, ainsi qu'à sa femme, elle aussi astronome. |
| **Tombaugh** | Clyde | 1906 | | Astronome américain, découvreur de Pluton. |
| **Reber** | Grote | 1911 | 2002 | Grote Reber a construit dans son jardin le 1$^{er}$ radio-télescope en 1937. Muni d'un miroir parabolique de 3 m de diamètre, il a pu observer les radio-sopurces les plus brillantes. |
| **Fehrenbach** | Charles | 1914 | - | Directeur de l'observatoire de Haute-Provence, puis de l'observatoire de Marseille (1948 1971). Il a développé la technique du prisme-objectif, permettant de prendre, en une seule pose, les spectres de toutes les étoiles d'un champ. |
| **Van Allen** | James | 1914 | 2006 | Physicien américain qui a découvert les ceintures de radiation qui entourent la Terre, grâce au premier satellite américain. |
| **Gliese** | Wilhelm | 1915 | 1993 | Astronome allemand, surtout connu par le catalogue des étoiles proches qu'il a réalisé (*Gliese Catalogue of Nearby Stars*). Il a travaillé à Berlin et à Heidelberg. L'étude actuelle des étoiles susceptibles d'habriter des exoplanètes, concernant des étoiles proches, fait un grand usage de son catalogue. Sont également concernées les naines brunes et rouges. |
| **Kerr** | Roy | 1934 | - | Astronome Néo-Zélandais qui a découvert, en 1963, une solution aux équations de la Relativité Générale expliquant les trous noirs en rotation. On nomme ces objets les trous noirs de Kerr. |
| **Kowal** | Charles | 1940 | | Astronome américain, qui a découvert 2060 Chiron. |

## *Noms des dieux*

Utilisés pour nommer les corps célestes :

| Dieu Romain | Dieu Grec |
|---|---|
| **Mercure** | **Hermès** |
| Dieu du commerce, des voleurs et des voyageurs. Fils de Jupiter. Son nom a été donné à la plus proche (et plus rapide) planète du Soleil. | Dieu de l'Olympe, fils de Zeus et de Maïa, petit-fils d'Atlas, messager des dieux. Nom donné à une petite planète (astéroïde). |
| **Vénus** | **Aphrodite** |
| Déesse de l'amour. Nom donné naturellement à la plus belle des planètes (vue de la Terre). | Déesse de la beauté et de l'amour. Nom donné à une région de la planète Vénus. |
| **Tellus ou Terra (mater)** | **Gaïa ou Gé** |
| Terre mère, associée à Jupiter (père). Associée aussi à Cérès, déesse de la moisson. Son nom donne l'adjectif *tellurique*. | Gaïa divinité de la terre, épouse d'Ouranos (son fils…), mère des Titans et des Cyclopes. Son nom donne le préfixe *géo*. Certaines traditions l'assimilent à *Chthon*, d'où vient l'adjectif *chthonien*. |
| **Mars** | **Arès** |
| Dieu de la guerre et des agriculteurs. La couleur rouge (sang) de la planète Mars lui a donné son nom par association. Cette couleur n'est due qu'à de la rouille… | Dieu de la guerre, fils de Zeus et d'Héra. Nom donné à une vallée de débâcle sur Mars. |
| **Jupiter** | **Zeus** |
| Père des dieux, fils de Saturne qu'il renversa. Vainqueur des Titans, il donna à Neptune la mer, à Pluton l'enfer, et garda la Terre et le Ciel. Premier des dieux, son nom a été donné à une planète très brillante ; c'est aussi la plus grosse, mais ça, les Anciens ne le savaient pas ! | Dieu suprême, fils de Cronos et de Rhéa, dieu de la foudre. Il détrona Cronos, et s'installa à sa place sur l'Olympe. |
| **Saturne** | **Cronos** |
| Père de Jupiter, qui l'a chassé du ciel. Réfugié au Lattium, il y fit fleurir la paix et la prospérité, et enseigna aux hommes l'agriculture. Son règne est nommé *l'âge d'or*. Saturne est la plus lointaine planète visible à l'œil nu. | Fils d'Ouranos et de Gaïa, père de Zeus. |
| **Uranus** | **Ouranos** |
| Père de Saturne. Nom donné à la 7$^{e}$ planète par Johan Bode en 1781. | Fils de Gaïa (sans père). |
| **Neptune** | **Poséïdon** |
| Dieu de la mer, fils de Saturne, frère de Jupiter et de Pluton. | Dieu de la mer, habitait un palais au fond des mers. |
| **Pluton** | **Hadès** |
| Roi des enfers, dieu des morts. Fils de Saturne et de Rhéa, frère de Jupiter et de Neptune, époux de Proserpine. | Dieu des enfers. |

## *Satellites de Mars*

| | |
|---|---|
| **Phobos** | L'un des chevaux qui tiraient le char de Mars. Phobos en grec signifie "la crainte". |
| **Deïmos** | L'autre cheval qui tirait le char de Mars. Son nom signifie "l'épouvante". |

## *Satellites de Jupiter*

| | |
|---|---|
| **Metis** | Première femme de Jupiter. Lorsqu'elle se trouva enceinte, Jupiter la dévora ! Ensuite, Athena naquit par la cuisse de Jupiter… |
| **Adrastée** | Nymphe Crétoise à laquelle Rhéa confia Zeus enfant. |
| **Amalthée** | Chèvre qui allaita Jupiter enfant. Une de ses cornes devint la Corne d'abondance. |
| **Thébée** | Nymphe enlevée par Zeus. |
| **Io** | Fille d'Inachos, aimée par Zeus qui la changea en génisse afin de la soustraire à la jalousie de sa femme Héra. L'ayant malgré tout reconnue, Héra envoya un taon pour la persécuter. Rendue folle par ses piqûres, Io erra autour de la Méditerranée. |
| **Europe** | Superbe fille d'Agenor, elle a été séduite par Jupiter, qui se présenta à elle comme un magnifique taureau blanc. Quand Europe grimpa sur son dos, il partit à la nage et l'entraîna en Crète. Elle lui donna plusieurs enfants, dont Minos, roi de Crète. |
| **Ganymède** | Beau jeune homme transporté sur l'Olympe par Zeus, déguisé en aigle. Il devint l'échanson des dieux de l'Olympe. |

| | |
|---|---|
| **Callisto** | Superbe fille de Lycaon, elle a été séduite par Jupiter. Pour la soustraire à la jalousie d'Héra, celui-ci la changea en ourse. |
| **Leda** | Séduite par Zeus sous la forme d'un cygne, elle fut la mère de Pollux et d'Hélène. |
| **Elara** | Une des maîtresses de Zeus, mère du Géant Titius. |
| **Ananké** | Fille de Zeus et de Thémis, déesse de la nécessité. |
| **Carmé** | Nymphe, servante d'Artémis. Mère de Britomartis, dont Zeus, bien sûr, était le père… |
| **Pasiphaé** | Femme de Minos, et mère du Minotaure. |
| **Sinope** | Fille du dieu des rivières Asope, et de Méropée. Elle fut enlevée par Apollon. |

Io, Europe, Ganymède et Callisto, dont les noms ont été donnés aux 4 plus gros satellites de Jupiter, découverts par Galilée, sont 4 amours illicites de Jupiter.

### *Satellites de Saturne*

| | |
|---|---|
| **Pan** | Fils d'Hermès et de Dryope. Moitié humain, moitié chèvre, c'est le dieu pastoral. |
| **Atlas** | L'un des Titans, il portait les cieux sur ses épaules. |
| **Prométée** | Frère d'Atlas et d'Epimétée, il offrit de nombreux présents à l'humanité, dont le feu. |
| **Pandore** | Façonnée dans l'argile par Hephaestus, à la demande de Zeus, elle épousa Epiméthée. Elle ouvrit la boite qui répandit tous les maux sur l'humanité. |
| **Janus** | Dieu aux deux visages, capable de voir devant et derrière lui en même temps. |
| **Epiméthée** | Dieu grec aux deux visages. |
| **Mimas** | L'un des Titans, abattu par Hephaestus (ou Arès) au cours de la guerre entre les Titans et les dieux de l'Olympe. |
| **Encelade** | L'un des Titans. Il a été écrasé par Athéna lors de la bataille entre les Titans et les dieux de l'Olympe. La terre accumulée sur son corps a constitué la Sicile. |
| **Téthys** | Une sœur des Titans, femme d'Oceanus et mère de toutes les rivières, et des Océanides. |
| **Telesto** | L'une des Océanides, nymphes des eaux, filles d'Océanus et de Téthys. |
| **Calypso** | Fille d'Atlas et maîtresse d'Odyssée. |
| **Dioné** | Sœur de Cronos, et mère (par Zeus évidemment…) d'Aphrodite. |
| **Rhéa** | Sœur de Cronos, et aussi sa femme… mère de Zeus. |
| **Hypérion** | L'un des Titans. |
| **Japet** | L'un des Titans. |

Les Titans sont les fils d'Ouranos et de Gaïa. Révoltés contre les dieux, ils tentèrent d'escalader le ciel en empilant des montagnes. Ils perdirent cette guerre contre les dieux, et furent finalement foudroyés par Jupiter.

### *Satellites d'Uranus*

| | |
|---|---|
| **Cordélia** | Fille du roi Lear, dans la commédie de Shakespeare. |
| **Ophélia** | Fille de Polonius, fiancée d'Hamlet dans le drame de Shakespeare. |
| **Bianca** | Personnage de "la mégère apprivoisée". |
| **Cressida** | Personnage de Shakespeare. |
| **Desdemona** | Femme d'Othello dans "le Maure de Venise". |
| **Miranda** | Héroïne de "la tempête". |
| **Ariel** | Esprit aimable dans "la tempête". |
| **Umbriel** | Esprit maléfique de Pope. |
| **Titania** | Reine des fées dans "le songe d'une nuit d'été". |
| **Obéron** | Roi des fées dans "le songe d'une nuit d'été". |

### *Satellites de Neptune*

| | |
|---|---|
| **Naïade** | Nom d'un groupe de nymphes gardiennes des lacs, des fontaines, des sources. |
| **Thalassa** | Déesse grecque de la mer, mère d'Aphrodite. |

| | |
|---|---|
| **Despina** | Fille de Poséïdon et de Déméter. |
| **Galatéa** | L'une des Néréïdes, servante de Poséïdon. |
| **Larissa** | Une maîtresse de Poséïdon. |
| **Protéus** | Un dieu grec de la mer, fils d'Océanus et Téthys. |
| **Triton** | Un dieu de la mer, fils de Poséïdon et Amphithrite. |
| **Néréïde** | Nom des 50 filles de Néréus et Doris, servantes de Neptune. |

### *Satellites de Pluton*

| | |
|---|---|
| **Charon** | Passeur des enfers, qui menait la barque traversant le Styx pour amener les âmes vers Pluton. |

### *Région sur Vénus*

| | |
|---|---|
| **Ishtar** | Déesse perse de l'amour. |
| **Aphrodite** | Déesse grecque de l'amour. |
| **Sacajawea** | Indienne de la tribu des Shoshone, épouse d'un membre de l'expédition chargée de rejoindre la côte Pacifique des USA. |

### *Origine des noms de certaines étoiles*

| nom | dénomination | origine | signification |
|---|---|---|---|
| **Achernar** | α Eridani | arabe | Akher-nahr : le bout du fleuve |
| **Akrab** | β Scorpii | arabe | Scorpion |
| **Albireo** | β Cygni | arabe | Oiseau |
| **Alcor** | | arabe | Al-qûr : le petit cavalier |
| **Aldébaran** | α Tauri | arabe | Al-dabaran : la suivante (car elle suit les Pléiades) |
| **Alderamin** | α Cephei | arabe | Al-deramin : le bras droit |
| **Algénib** | γ Pegasi | arabe | Jenah al-faras : l'aile du cheval |
| **Algol** | β Persei | arabe | Ra's al-ghul : la tête de démon |
| **Alioth** | ε Ursa Majoris | arabe | Al'ayyîq : la queue |
| **Alkaïd** | η Ursa Majoris | arabe | Al-qà'id : le conducteur, le chef. Autre nom : Benetnasch |
| **Almak** | γ Andromedæ | arabe | Al-naq : le lynx du désert |
| **Sirrah** | α Andromedæ | arabe | Sirrah (al faras) : l'ombilic (du cheval). Autre nom : Alpheratz |
| **Altaïr** | α Aquilæ | arabe | Al nesr al taïr : l'aigle volant |
| **Antarès** | α Scorpii | grec | Anti Arès : rivale de Mars (car elle est rouge, et opposée à Mars dans le ciel) |
| **Arcturus** | α Bootes | grec | Arctos oura : à la queue de l'ourse |
| **Bellatrix** | γ Orionis | latin | La guerrière |
| **Bételgeuse** | α Orionis | arabe | Ibt al ghul : l'épaule du démon |
| **Cor Caroli** | α Canes Venaticorum | | Nom donné par Edmund Halley en hommage au roi Charles II |
| **Deneb** | α Cygni | arabe | Al danahb al dajajah : la queue de la poule (d'après un ancien nom de la constellation) |
| **Deneb Kaitos** | β Ceti | arabe | Queue de la baleine |
| **Denebola** | β Leo ???? | arabe | Al danahb al asad : la queue du lion |
| **Dubhe** | α Ursa Majoris | arabe | Dubb : ours |
| **El nath** | β Taurii | arabe | La corne |
| **Gemma** | α Corona Borealis | latin | La perle |
| **Hamal** | α Arieti | arabe | Hamal : Le bélier |
| **Kiffa australe** | α Libræ | arabe | Al kaffa : Balance |
| **Kiffa boréale** | β Libræ | arabe | Balance |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Kochab** | β Ursa Minoris | arabe | Kaucab al Shemali : la planète (étoile) du nord |
| **Markab** | α Pegasi | arabe | Markab : Selle |
| **Mérak** | β Ursa Majoris | arabe | Merak al dubb al akbar : les reins du grand ours |
| **Mira Ceti** | α Ceti | latin | La Merveilleuse de la baleine |
| **Mirach** | β Andromedæ | arabe | Pagne |
| **Mirzam** | β Canis Majoris | arabe | Celui qui précède |
| **Mizar** | ξ Ursa Majoris | arabe | Le tablier |
| **Phecda** | γ Ursa Minoris | arabe | Fekhdah al dubb al akbar : la cuisse du grand ours |
| **Procyon** | α Canis Minoris | grec | Pro (tou) kounos : avant le chien (elle se lève avant Sirius) |
| **Ras Algethi** | α Herculi | arabe | L'homme agenouillé |
| **Rasalhague** | α Ophiuci | arabe | La tête du serpentaire |
| **Régulus** | β Leo Minoris | latin | Petit roi |
| **Rigel** | α Orionis | arabe | Rijil Jauzah : la jambe (gauche) du géant Jauzah |
| **Ruchbach** | δ Cassiopea | arabe | Ruckbat : Le genou (de la femme sur le trône) |
| **Schéat** | β Pegasi | arabe | Epaule |
| **Schédar** | α Cassiopea | arabe | Sein |
| **Spica** | α Virginis | latin | Epi (de la Vierge) |
| **Unuk** | α Serpens | arabe | Unuk : Le cou (du serpent) |
| **Vindemiatrix** | ε Virginis | latin | La vendengeuse (son lever héliaque correspondait au début des vendanges) |

## *Noms des constellations*

Le tableau ci-dessous donne les noms des constellations des deux hémisphères, en français, avec le nom latin correspondant, le génitif et l'abbréviation qui servent à désigner une étoile de la constellation.

Exemple : Altaïr est l'étoile la plus brillante de l'Aigle, on la désigne donc par α Aquilæ, ou α Aql.

**Hémisphère Nord**

| Français | Latin | Génitif | Abb |
|---|---|---|---|
| Andromède | Andromede | Andromedæ | And |
| Bélier | Aries | Arietis | Ari |
| Bouvier | Bootes | Bootis | Boo |
| Cancer | Cancer | Cancri | Cnc |
| Cassiopée | Cassiopeia | Cassiopeiæ | Cas |
| Céphée | Cepheus | Cephei | Cep |
| Chevelure de Bérénice | Coma Berenices | Comæ Berenices | Com |
| Chiens de Chasse | Canes Venatici | Canum Venaticorum | CVn |
| Cocher | Auriga | Aurigæ | Aur |
| Couronne Boréale | Corona Borealis | Coronæ Borealis | CrB |
| Cygne | Cygnus | Cygni | Cyg |
| Dauphin | Delphinus | Delphini | Del |
| Dragon | Draco | Draconis | Dra |
| Gémeaux | Gemini | Geminorum | Gem |
| Grande Ourse | Ursa Major | Ursæ Majoris | UMa |
| Hercule | Hercules | Herculis | Her |
| Lynx | Lynx | Lyncis | Lyn |
| Lyre | Lyra | Lyræ | Lyr |
| Pégase | Pegasus | Pegasi | Peg |
| Persée | Perseus | Persei | Per |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Petit Cheval | Equuleus | Equulei | Equ |
| Petit Lion | Leo Minor | Leonis Minoris | LMi |
| Petite Ourse | Ursa Minor | Ursæ Minoris | UMi |
| Scorpion | Scorpius | Scorpii | Sco |
| Taureau | Taurus | Tauri | Tau |
| Triangle | Triangulum | Trianguli | Tri |

**Zone équatoriale**

| Français | Latin | Génitif | Abb |
|---|---|---|---|
| Aigle | Aquila | Aquilæ | Aql |
| Baleine | Cetus | Ceti | Cet |
| Hydre femêle | Hydra | Hydræ | Hya |
| Licorne | Monoceros | Monocerotis | Mon |
| Lion | Leo | Leonis | Leo |
| Ophiucus | Ophiucus | Ophiuchi | Oph |
| Orion | Orion | Orionis | Ori |
| Petit Chien | Canis Minor | Canis Minoris | CMi |
| Poissons | Pisces | Piscium | Psc |
| Serpent | Serpens | Serpentis | Ser |
| Sextant | Sextans | Sextantis | Sex |
| Verseau | Aquarius | Aquarii | Aqr |
| Vierge | Virgo | Virginis | Vir |

Pour nos latitudes (43° Nord), toutes les constellations de l'hémisphère nord sont bien sûr visibles, mais certaines constellations australes le sont également. Dans la seconde partie du tableau, elles sont marquées d'un astérisque dans la quatrième colonne.

**Hémisphère Sud**

| Français | Latin | Génitif | Abb |
|---|---|---|---|
| Autel | Ara | Araæ | Ara |
| Balance | Libra | Libræ | Lib * |
| Boussole | Pyxis | Pyxidis | Pyx |
| Burin | Cælum | Cæli | Cae |
| Caméléon | Chamoeleon | Chamæleontis | Cha |
| Capricorne | Capricornus | Capricorni | Cap * |
| Carène | Carina | Carinæ | Car |
| Centaure | Centaurus | Centauri | Cen |
| Colombe | Colomba | Colombæ | Col |
| Compas | Circinus | Circini | Cir |
| Corbeau | Corvus | Corvi | Crv * |
| Coupe | Crater | Crateris | Crt * |
| Couronne Australe | Corona Australis | Coronæ Australis | CrA |
| Croix du Sud | Crux | Crucis | Cru |
| Dorade | Dorado | Doradus | Dor |
| Ecu de Sobieski | Scutum | Scuti | Sct * |
| Eridan | Eridanus | Eridani | Eri * |
| Flèche | Sagitta | Sagittæ | Sge |
| Fourneau | Fornax | Fornacis | For |
| Girafe | Camelopardalis | Camelopardalis | Cam |
| Grand Chien | Canis Major | Canis Majoris | CMa * |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Grue | Grus | Gruis | Gru |
| Horloge | Horologium | Horologii | Hor |
| Hydre mâle | Hydrus | Hydri | Hyi |
| Indien | Indus | Indi | Ind |
| Lézard | Lacerta | Lacertæ | Lac |
| Lièvre | Lepus | Leporis | Lep * |
| Loup | Lupus | Lupi | Lup |
| Machine Pneumatique | Antlia | Antliæ | Ant |
| Microscope | Microscopium | Microscopii | Mic |
| Mouche | Musca | Muscæ | Mus |
| Octant | Octans | Octantis | Oct |
| Oiseau de Paradis | Apus | Apodis | Aps |
| Paon | Pavo | Pavonis | Pav |
| Peintre | Pictor | Pictoris | Pic |
| Petit Renard | Vulpecula | Vulpeculæ | Vul |
| Phénix | Phoenix | Phoenicis | Phe |
| Poisson Austral | Pisces Austrinus | Piscis Austrini | PsA |
| Poisson Volant | Volans | Volantis | Vol |
| Poupe | Puppis | Puppis | Pup * |
| Règle | Norma | Normæ | Nor |
| Réticule | Reticulum | Reticuli | Ret |
| Sagittaire | Sagittarius | Sagittarii | Sgr * |
| Sculpteur | Sculptor | Sculptoris | Scl |
| Table | Mensa | Mensæ | Men |
| Télescope | Telescopium | Telsecopii | Tel |
| Toucan | Tucana | Tucanæ | Tuc |
| Triangle Austral | Triangulum Australe | Tringuli Australis | TrA |
| Voiles | Vela | Velorum | Vel |

La Terre est ronde

Ce fait a été trouvé par quelques penseurs grecs, en se basant sur des observations simples, mais en en tirant le meilleur parti.

- observations nord-sud ; lorsqu'on voyage vers le nord ou vers le sud, l'aspect du ciel change continûment : en allant vers le nord, l'étoile polaire monte vers le zénith, en allant vers le sud au contraire elle descend vers l'horizon. Il existe donc une sphère céleste plus grande que celle que l'on peut voir d'un point de la Terre sans se déplacer, et un déplacement nord-sud change la perspective sous laquelle on voit cette sphère ;

- observations est-ouest ; une éclipse totale de lune par exemple est un phénomène général, visible de tous les points de la Terre ; mais deux observateurs situés à des longitudes différentes l'observeront à des heures différentes (par exemple en début de nuit pour le premier, et en milieu de nuit pour le second situé plus à l'est).

On peut trouver une explication commune à ces deux observations, en considérant que la Terre est une sphère ; tout déplacement, nord-sud ou est-ouest, montrera la voûte céleste sous un angle différent, ce qui se traduit dans un sens par la visibilité de nouvelles étoiles, et dans l'autre par un décalage horaire sur les phénomènes globaux.

L'observation d'une éclipse de Lune montre aussi que l'ombre de la Terre sur la Lune est toujours ronde, pour toutes les éclipses. Là encore, la seule explication acceptable est donnée par une forme sphérique.

Ces éclipses ont donné aux astronomes grecs un renseignement de plus : le Soleil étant supposé très loin, les rayons qui nous parviennent sont grossièrement parallèles ; l'ombre de la Terre au cours d'une éclipse est donc à peu près du même diamètre que la Terre elle-même ; or la Lune y reste plongée assez longtemps, donc est nettement plus petite. Aristarque de Samos a estimé en 250 avant JC qu'elle était 3 fois plus petite (en réalité c'est presque 4 fois, mais l'ordre de grandeur est bon).

A partir de là, on connaissait le diamètre de la Lune comparé à celui de la Terre ; comme on connaissait aussi son diamètre apparent, on en déduisit sa distance. Aristarque a trouvé que la Lune est située à 20 fois le rayon terrestre de nous ; la valeur correcte est 60 fois, l'ordre de grandeur était donc correct.

**Mesure moderne de la distance Terre-Lune**

Cette mesure est faite par des télescopes Laser-Lune. L'un est situé à l'OHP (Observatoire de Haute Provence), l'autre sur le plateau de Calern, près de Nice. La précision actuelle de la mesure est de quelques centimètres, et descendra bientôt à quelques millimètres.

## *Les grands instruments*

| nom | type | diamètre | poids mobile | pays | lieu | altitude | mise en service |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Keck 1 | tél. | 9,82 m | 300 t | USA | Mauna Kea Hawai | 4.150 m | 1993 |
| Keck 2 | tél. | 9,82 m | 300 t | USA | Mauna Kea Hawai | 4.150 m | 1996 |
| Large Binocular Telescope | tél. | 8,40 m | 350 t | USA | Mount Graham | 3.170 m | 1997 |
| Subaru | tél. | 8,30 m | 500 t | Japon | Mauna Kea | 4.139 m | 1999 |
| VLT 1 Antu | tél. | 8,20 m | 400 t | Europe | Cerro Paranal Chili | 2.635 m | 1997 |
| VLT 2 Kuyen | tél. | 8,20 m | 400 t | Europe | Cerro Paranal Chili | 2.635 m | 1999 |
| VLT 3 Melipal | tél. | 8,20 m | 400 t | Europe | Cerro Paranal Chili | 2.635 m | 2000 |
| VLT 4 Yepun | tél. | 8,20 m | 400 t | Europe | Cerro Paranal Chili | 2.635 m | 2001 |
| Gémini nord | tél. | 8,10 m | 342 t | internat. | Mauna Kea | 4.214 m | 1999 |
| Gémini sud | tél. | 8,10 m | 342 t | internat. | Cerro Pachon | 2.715 m | 2001 |
| Monolithic Mirror Tel. | tél. | 6,50 m | 130 t | USA | Mont Hopkins | 2.606 m | 1996 |
| Magellan Project I | tél. | 6,50 m | 130 t | USA | Las Campanas Chili | 2.300 m | 1999 |
| Magellan Project II | tél. | 6,50 m | 130 t | USA | Las Campanas Chili | 2.300 m | 2002 |
| Bolshoi Teleskop BTA | tél. | 6,00 m | 740 t | Russie | Zelentchouk | 2.070 m | 1976 |
| Hale Telescope | tél. | 5,08 m | 530 t | USA | Mont Palomar | 1.706 m | 1948 |
| CFHT | tél. | 3,58 m | 240 t | internat. | Mauna Kea | 4.200 m | 1979 |
| NTT | tél. | 3,50 m | 120 t | ESO | La Silla | 2.353 m | 1989 |
| Yerkes | lun. | 1,02 m | | USA | Williams Bay | 334 m | 1897 |
| James Lick | lun. | 0,91 m | | USA | mont Hamilton | 1.283 m | 1888 |
| C. Donald Shane | tél. | 3,05 m | | USA | mont Hamilton | 1.283 m | 1959 |
| 193 | tél. | 1,93 m | | France | St Michel de Provence | 650 m | 1958 |
| Hooker telescope | tél. | 2,50 m | 90 t | USA | Mount Wilson | 1.742 m | 1917 |

Les télescopes Keck sont des miroirs mosaïques de 36 hexagones de 1,80 m chacun. Ils constituent un miroir hyperbolique ouvert à f/1,75. Les deux télescopes sont placés à 85 m l'un de l'autre.

Le Large Binocular Telescope est constitué de deux télescopes identiques placés à 14,40 m l'un de l'autre, **dans une même monture**. Le poids de cette monture à deux miroirs est de 350 tonnes.

---=OO=---




Les composés chimiques contenant du carbone sont les composés organiques. On en connait plus de 12 millions !

Parmi eux, les hydrocarbures sont des composés chimiques constitués uniquement de carbone et d'hydrogène. Ils donnent lieu à d'innombrables formules différentes. Les atomes d'hydrogène sont monovalents : ils possèdent une liaison. Par exemple, deux atomes d'hydrogène peuvent partager leurs liaisons pour former une molécule d'hydrogène $H_2$ (formule brute, indiquant le nombre d'atome de chaque espèce chimique). On le symbolise aussi par H-H, formule développée dans laquelle le - représente la liaison partagée par les deux atomes d'hydrogène.

Les liaisons chimiques sont produites par des forces d'origine électrique (le noyau atomique étant chargé positivement, et le cortège électronique négativement). Ces forces donnent des liaisons plus ou moins fortes selon les atomes reliés. On en distingue de plusieurs natures. La plus simple est la liaison covalente, dans laquelle un électron est partagé par deux atomes.

L'énergie de liaison chimique est de l'ordre d'un électron-volt. Par comparaison, l'énergie de liaison des nucléons dans un noyau atomique est de l'ordre du million d'électrons-volt (MeV)

Deux atomes peuvent partager plus d'un électron. Selon le nombre partagé, la liaison est simple (1), double (2), triple ou même quadruple.

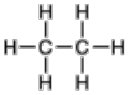
**Hydrocarbures saturés**

Les atomes de carbone sont tétravalents : ils possèdent 4 liaisons et peuvent se lier à 4 autres atomes. Par exemple, un atome de carbone peut se lier à 4 atomes d'hydrogène. La formule brute de cet assemblage, nommé *méthane*, sera $CH_4$, sa formule développée est plus difficile à écrire, car elle possède une forme dans le plan :

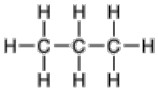


Dans certains composés, les atomes de carbone peuvent se lier les uns aux autres. Ils partageront alors une ou plusieurs liaisons. Lorsqu'ils en partagent plusieurs, on parle de liaisons doubles ou triples. Si deux carbones présentent une double liaison, qui sera notée =, ils seront liés à deux hydrogènes de moins (pour chacun, un hydrogène est remplacé par l'autre carbone). La propriété pour un hydrocarbure d'avoir le maximum possible d'atomes d'hydrogène s'appelle *saturation* : ces composés sont les hydrocarbures saturés. On les nomme encore alcanes (les hydrocarbures sont nommé par le préfixe *alc* suivi de *ane*, *ène* ou *yne*). Le plus simple est le méthane dont on a donné les deux formules (brute et développée) plus haut.

Le second alcane (par ordre de complexité croissante) est l'*éthane* : $C_2 H_6$. Sa formule développée est :



On voit qu'entre les deux carbones il y a une simple liaison. Cet hydrocarbure est lui aussi saturé. Le suivant, nommé *propane*, se définit en reproduisant le même motif :



Sa formule brute est $C_3H_6$.

La formule brute générale qui représente toute cette famille des alcanes est $C_n H_{2n+2}$.

Voici la liste des plus simples :

| Alcanes | | | |
|---|---|---|---|
| **nom** | **formule** | **nom** | **formule** |
| méthane | $CH_4$ | heptane | $C_7H_{16}$ |
| éthane | $C_2H_6$ | octane | $C_8H_{18}$ |
| | | | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| propane | $C_3H_8$ | nonane | $C_9H_{20}$ |
| butane | $C_4H_{10}$ | décane | $C_{10}H_{22}$ |
| pentane | $C_5H_{12}$ | pentadécane | $C_{15}H_{32}$ |
| hexane | $C_6H_{14}$ | eicosane | $C_{20}H_{42}$ |

## *Hydrocarbures insaturés*

**Les alcènes**

Les hydrocarbures qui comportent un groupe C=C (une double liaison), ne comportent pas le nombre maximum d'atomes d'hydrogène ; ils sont insaturés. On les nommait autrefois *oléfines*.

Pour être insaturé, un hydrocarbure doit comporter une double liaison entre deux carbones, donc au moins deux atomes de carbone. La double liaison entre eux ne leur laisse que deux liaisons à chacun pour se lier à des hydrogènes. Donc chaque carbone sera lié à deux hydrogènes : $CH_2 = CH_2$ (ou $C_2H_4$). Il s'agit de *l'éthylène* (éthylène est le nom courant, consacré par l'usage. Le nom qu'il faudrait utiliser est éthène, pour respecter les règles de formation des noms). Il y a toute une famille de tels hydrocarbures, qui sont nommés collectivement *alcènes*.

**Les alcynes**

On peut également avoir une triple liaison entre deux carbones, ce qui donnera lieu à une nouvelle famille d'hydrocarbures. On les appelle *alcynes*.

$$H\text{-}C \equiv C\text{-}H$$

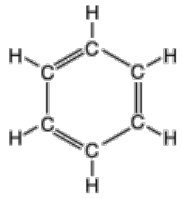
Il s'agit de *l'acétylène*, dont le nom standard est éthyne.

On dit que l'on a affaire à un alcyne vrai si R ou R' est un hydrogène.

**Les hydrocarbures aromatiques**

Les hydrocarbures aromatiques, contrairement aux précédents qui sont des chaînes linéaires, comportent un cycle de carbones. Ce cycle se nomme *noyau benzénique*. Il contient des doubles liaisons, et les aromatiques sont donc insaturés.

Le plus simple des hydrocarbures aromatiques est le benzène [$C_6H_6$]. Avec deux cycles, on a le naphtalène [$C_{10}H_8$] (2 cycles accolés) et le biphényle [$C_{12}H_{20}$] (2 cycles liés par liaison simple). Dans les alkylbenzènes, on aura le toluène [$C_8H_5$-$CH_3$].



**Exemple** : L'alcyne le plus simple est l'acétylène (nom usuel de l'éthyne) dont la structure développée est :

que l'on représente plus usuellement sous la forme :

En chimie, on parle d'isomérie lorsque deux molécules possèdent la même formule brute alors que les atomes sont arrangés de façon différente. Des telles molécules sont dites isomères l'une de l'autre.

On distingue différents type d'isomérie.

Sommaire

1 Isomérie de chaîne

2 Isomérie de fonction

3 Isomérie de position

4 Stéréoisomèrie

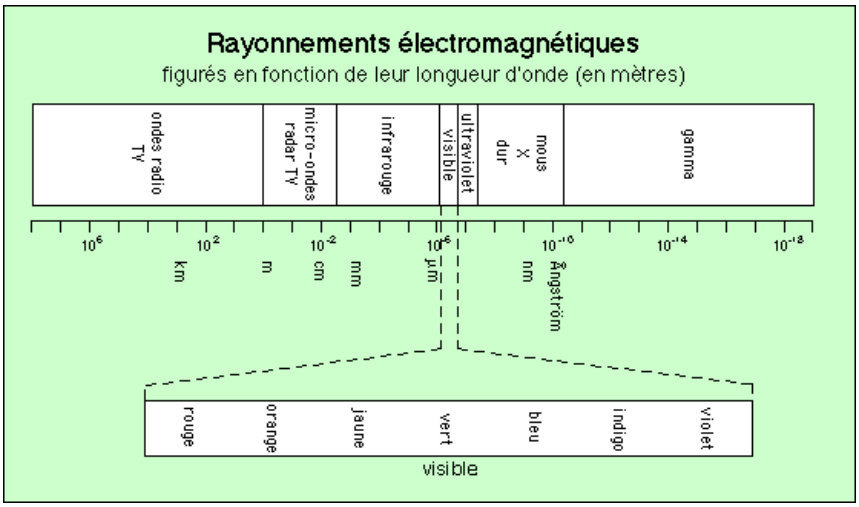
CH3 : groupement méthyle

---=OO=---

# Fiches : la lumière



## *Les rayonnements électromagnétiques*




| | |
|---|---|
| **rayons gamma** | $\lambda < 5\ 10^{-12}$ m |
| | $\nu > 6\ 10^{19}$ Hz |
| **rayons X** | $\lambda$ de $5\ 10^{-12}$ m à $5\ 10^{-9}$ m |
| | $\nu$ de $6\ 10^{19}$ Hz à $6\ 10^{16}$ Hz |
| **ultra-violet** | $\lambda$ de $5\ 10^{-9}$ m à $8\ 10^{-7}$ m (= *0,8 µm*) |
| | $\nu$ de $6\ 10^{16}$ Hz à $3{,}75\ 10^{14}$ Hz |
| **visible** | $\lambda$ de $4\ 10^{-7}$ m = *0,4 µm* à $8\ 10^{-7}$ m = *0,8 µm* |
| | $\nu$ de $7{,}5\ 10^{14}$ Hz à $3{,}75\ 10^{14}$ Hz |
| **infra-rouge** | $\lambda$ de $8\ 10^{-7}$ m = *0,8 µm* à $10^{-3}$ m |
| | $\nu$ de $3{,}75\ 10^{14}$ Hz à $3\ 10^{11}$ Hz |
| **micro-ondes** | $\lambda$ de $10^{-3}$ m à 1 m |
| | $\nu$ de $3\ 10^{11}$ Hz à $3\ 10^{8}$ Hz |
| **ondes radio** | $\lambda$ de 1 m à $10^{5}$ m |
| | $\nu$ de $3\ 10^{8}$ Hz à 3.000 Hz |
| **ondes longues** | $\lambda > 10^{5}$ m |
| | $\nu$ < 3.000 Hz |

**Vitesse de la lumière**

c = 299.792,458 km $s^{-1}$

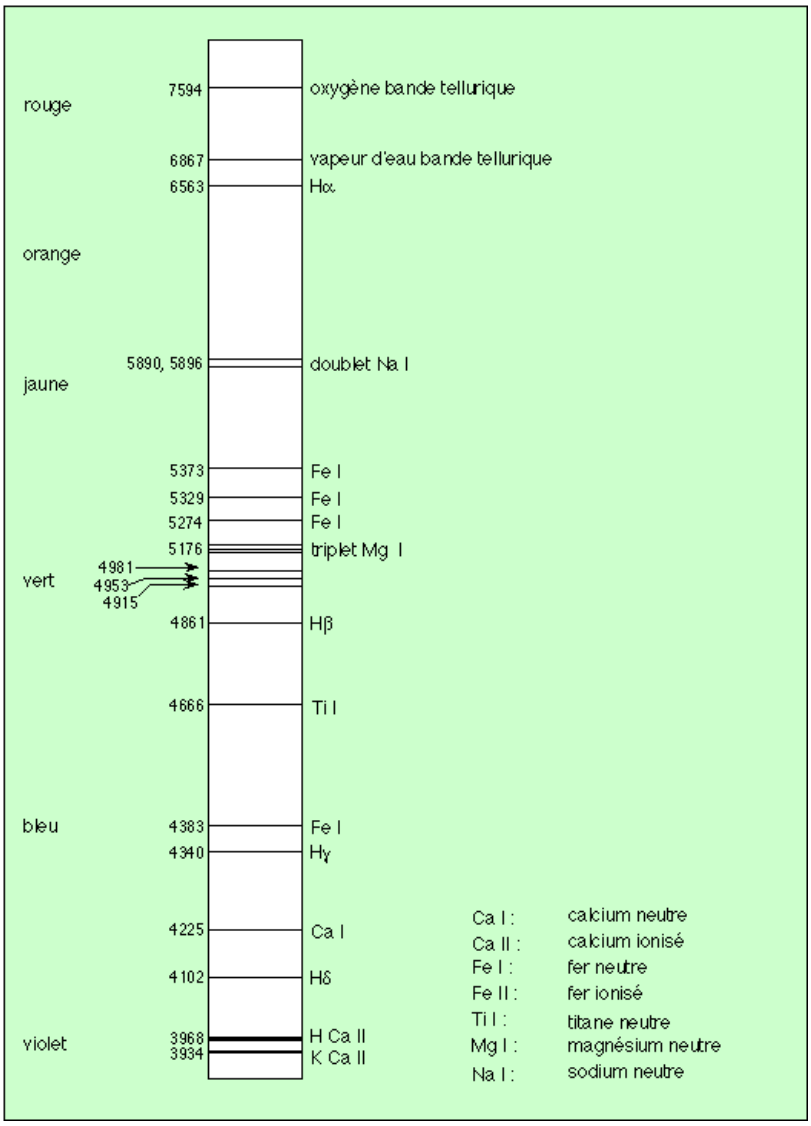
A une très bonne approximation près, on peut dire 300.000 km $s^{-1}$

A partir de la vitesse, on calcule la valeur de l'année-lumière : 1 AL = $0{,}946073047\ 10^{13}$ km, soit pratiquement $10^{13}$ km.

**Raies d'absorption de Fraunhofer**

| lettre de Fraunhofer | longueur d'onde en nanomètres | élément |
|---|---|---|
| A | 7954 | Oxygène (bande tellurique) |
| a | 7187 | vapeur d'eau (bande tellurique) |
| B | 6867 | Oxygène (bande tellurique) |
| C | 6563 | Hydrogène (H) Hα |
| D | 5890 et 5896 | sodium neutre (Na I ; doublet du sodium) |
| ... | 5876 | hélium neutre (He I) ; étoiles chaudes |
| E | 5270 | fer neutre (Fe I) |
| b | 5167, 5173, 5184 | magnésium neutre (Mg I) |
| ... | 4955 | oxyde de titane (Ti O) ; étoiles tièdes |
| F | 4861 | Hydrogène Hβ |
| ... | 4686 | hélium ionisé (He II) ; étoiles très chaudes |
| d | 4384 | fer neutre (Fe I) |
| G | 4300 | molécule CH |
| ... | 4340 | hydrogène (H) Hγ |
| g | 4227 | calcium neutre (Ca I) |
| h | 4101 | hydrogène Hδ |
| H | 3968 | calcium ionisé (Ca II) |
| K | 3934 | calcium ionisé (Ca II) |

**Spectre du soleil**




Les raies telluriques sont produites par l'atmosphère de la Terre. Elles ne figurent pas dans un spectre du Soleil pris de l'espace.

---=OO=---




**Molécules détectée dans le milieu interstellaire**

| symbole | nom | symbole | nom |
|---|---|---|---|
| AlCl | chlorure d'aluminium | AlF | fluorure d'aluminium |
| $C_2$ | dicarbone | $C_2H$ | radical éthynyle |
| $C_2H_2$ | éthyne | $C_2H_4$ | éthène |
| $C_2H_5CN$ | cyanure d'éthyle | $C_2O$ | monoxyde de dicarbone |
| $C_2S$ | monosulfure de dicarbone | $C_3H$ | propynylidine |
| $C_3H_2$ | cyclopropénylidène | $C_3N$ | radical cyanoéthyle |
| $C_3O$ | monoxyde de tricarbone | $C_3S$ | monosulfure de tricarbone |
| $C_4H$ | radical butadiynyle | $C_4S$ | monosulfure de tétracarbone |
| $C_5H$ | radical pentynylidyne | $C_6H$ | radical hexatriynyle |
| CH | méthylidine | $CH^+$ | ion méthyladine |
| $CH_2CN$ | radical cyanométhyle | $CH_2CHCN$ | cyanure de vynile |
| $CH_2NH$ | méthanimine | $CH_3CHO$ | éthanal |
| $CH_3CH_2OH$ | éthanol | $CH_3CN$ | cyanure de méthyle |
| $CH_3C_2H$ | propyne | $CH_3C_3N$ | méthylcyanoéthylène |
| $CH_3C_4H$ | méthyldiacétylène | $CH_3NC$ | méthylisocyanide |
| $CH_3NH_2$ | méthylamine | $CH_3OH$ | méthanol |
| $CH_3SH$ | méthylmercaptan | $(CH_3)_2O$ | diméthyléther |
| $(CH_3)_2CO$ | acétone | CN | cyanogène |
| CO | monoxyde de carbone | CP | carbure de phosphore |
| CS | monosulfure de carbone | $H_2$ | dihydrogène |
| $H_2C_3$ | propadiénylène | $H_2C_4$ | butatriénylidène |
| $H_2CS$ | thioformaldéhyde | $H_2CCO$ | cétène |
| $H_2D+$ | eau | $H_2O$ | eau |
| $H_2S$ | sulfure de dihydrogène | $H_3O+$ | ion hydronium |
| HCl | chlorure d'hydrogène | HCHO | méthanal |
| HCCCHO | propynal | HCCN | |
| $HCO^+$ | ion formyle | $HCO_2CH_3$ | formiate de méthyle |
| HCN | cyanure d'hydrogène | $HCNH^+$ | |
| HCO | radical formyle | HCOOH | acide formique |
| $HCS^+$ | ion thioformylium | $HC_3N$ | cyanoacéthylène |
| $HC_5N$ | cyanodiacéthylène | $HC_7N$ | cyanotriacéthylène |
| $HC_9N$ | cyanooctatétrayne | $HC_{11}N$ | cyanopentacéthylène |
| HNC | ioscyanure d'hydrogène | HNCO | acide isocyanique |
| HNCS | acide iosothiocyanique | HNO | radical nitroxyle |
| $HOCO^+$ | ion carboxyle | KCl | chlorure de potassium |

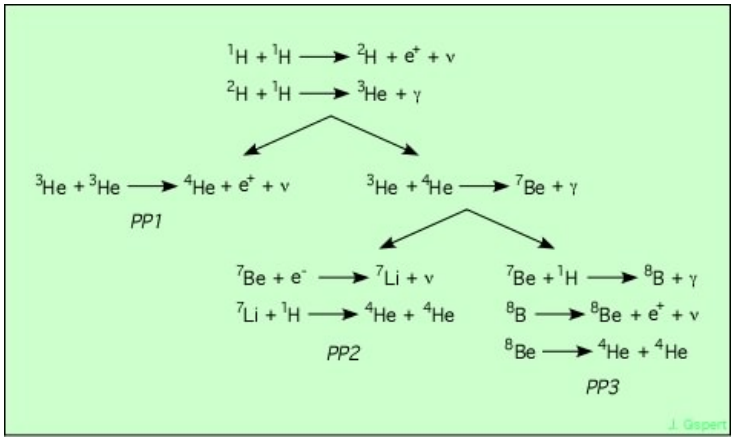
| | | | |
|---|---|---|---|
| $N_2H+$ | ion diazénylium | NaCl | chlorure de sodium |
| $NH_2CHO$ | formamide | $NH_2CN$ | cyanamide |
| $NH_3$ | amoniac | NO | monoxyde d’azote |
| NS | monosulfure d’azote | OCS | sulfure de carbonyle |
| OH | radical hydroxyle | PN | nitrure de phosphore |
| SiC | carbure de silicium | $SiC_2$ | dicarbure de silicium |
| $SiH_2$ | silylène | $SiH_4$ | silane |
| SiN | nitrure de silicium | SiO | monoxyde de silicium |
| SiS | monosulfure de silicium | $SO_2$ | dioxyde de soufre |

---=OO=---




En cours de rédaction...

**Cycle proton-proton**

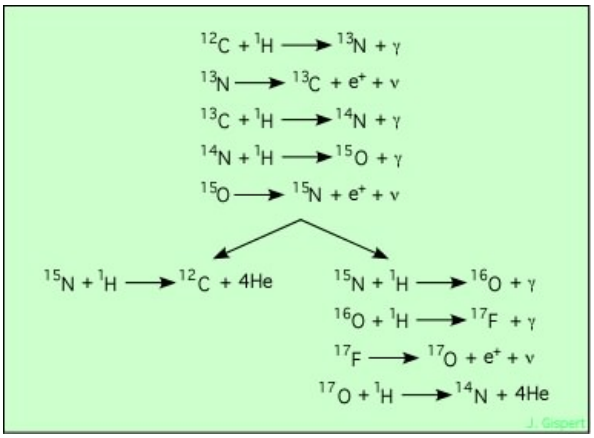



Ces réactions se produisent à une température de 15 millions de degrés (atteinte dans le coeur du soleil).

Toutes ces réactions ne se produisent pas à la même vitesse ; remarquons tout d'abord que dans la première, l'atome produit, noté $^2H$, est un atome de Deutérium (encore appellé hydrogène lourd et alors noté D ; c'est lui qui, lié à l'oxygène, donne la molécule d'eau lourde $D_2O$). Or cet atome ne comprend pas deux protons, mais un proton et un neutron. Donc, dans la bataille (de la réaction, pas de l'eau lourde ! ), un proton (l'un des noyaux d'hydrogène) s'est forcément transformé en neutron. Nous sommes en train d'étudier des réactions nucléaires, basées sur l'interaction forte, mais cette transformation proton-neutron fait intervenir l'interaction faible (désintégration béta). Or les réactions dues à l'interaction faible sont considérablement plus lentes que celles dues à l'interaction forte. C'est donc elle qui va ralentir énormément le processus de transformation de l'hydrogène en hélium. Heureusement, car sans cela, il y a longtemps que le Soleil aurait fini de briller !

Pour être complet, il faudrait mentionner deux variantes du cycle proton-proton. Celle donnée ci-dessus se nomme alors PPI, et les deux autres PPII et PPIII. Elles font intervenir le lithium et le berylium, qui sont des noyaux très fragile, qui en fait se brisent en général avant de pouvoir intervenir dans une autre réaction. Pour cette raison, l'efficacité de ces variantes est beaucoup plus faible que celle du cycle principal.

**Cycle du carbone, ou cycle CNO, ou cycle de Bethe**




Le cycle du carbone a deux variantes ; la première restitue le carbone utilisé dans la première réaction, alors que la seconde produit de l'azote dans la dernière réaction. En fait, l'azote produit peut intervenir dans la quatrième réaction de la première forme, et donc redonner du carbone au bout du compte. Dans une telle réaction, le carbone est appellé *catalyseur*, puisque finalement l'atome de carbone utilisé est restitué. Tout se passe donc comme s'il avait facilité la réaction sans intervenir lui-même (sa présence est bien sûr obligatoire ; sans lui, les réactions n'ont pas lieu).

Le cycle du carbone se produit à température de 20 millions de degrés au moins. C'est pourquoi le moteur du soleil est alimenté essentiellement par le cycle proton-proton. Par contre, dans des étoiles plus massives, la température centrale est plus élevée, et le cycle de carbone devient prédominant.

Le bilan global de toutes ces réactions peut s'écrire : $4\ ^{1}H \rightarrow\ ^{4}He$ ; en effet, tout le reste est restitué à la fin de la réaction. Seul l'hydrogène a été transformé. C'est pour cette raison qu'on dit que les étoiles transforment l'hydrogène en hélium.

**Fusion de l'hélium**

La fusion de l'hélium donne essentiellement deux produits, le carbone et l'oxygène. Elle commence par la réaction triple alpha, ainsi nommée parce qu'elle implique 3 particules alpha (noyaux d'hélium) dans un temps extrêmement bref.

Processus triple alpha

| | |
|---|---|
| Rencontre de deux alpha | $^{4}He + ^{4}He \rightarrow\ ^{8}Be + \gamma$ |
| puis presque simultanément | $^{8}Be + ^{4}He \rightarrow\ ^{12}C + \gamma$ |

Ce processus a été proposé dans les années 50 par Edwin Salpeter. Ce sont les réactions de fusion de l'hélium, qui se produisent lorsque l'hydrogène est épuisé. Température nécessaire : **100 millions de degrés** ; densité minimum : **100 kg/cm$^3$**.

**synthèse de l'oxygène**

$$^{4}He + ^{12}C \rightarrow\ ^{16}O + \gamma$$

**synthèse d'éléments plus lourds**

$$^{12}C + ^{12}C \rightarrow\ ^{20}Ne + ^{4}He$$

$$^{16}O + ^{16}O \rightarrow\ ^{28}Si + ^{4}He$$

$$^{12}C + ^{16}O \rightarrow\ ^{24}Mg + ^{4}He$$

$$^{28}Si + \gamma \rightarrow\ ^{24}Mg + ^{4}He$$

$$^{28}Si + ^{4}He \rightarrow\ ^{32}S + \gamma$$

$$^{32}S + ^{4}He \rightarrow\ ^{36}Ar + \gamma \text{ etc.}$$

**Période d'éléments radioactifs**

| Elément | Période |
|---|---|
| Ca 41 | 100.000 ans |
| Sn 126 | 200.000 ans |
| Cl 36 | 300.000 ans |
| Al 26 | 716.000 ans |
| Se 79 | 1,1 millions d'années |
| Be 10 | 1,5 millions d'années |
| I1 29 | 15,7 millions d'années |
| K 40 | 1,25 milliards d'années |
| U 238 | 4,5 milliards d'années |
| Th 232 | 14 milliards d'années |

Le césium Cs 137 (période 30,15 jours), l'iode I 131 (période 8,02 jours), le xénon Xe 133 (période 5,3 jours), ne sont pas présents dans notre environnement naturel. Ils ont été rejetés dans l'atmosphère par les accidents nucléaires de Tchenobyl, et de Fukushima. Ils résultent des réactions de fission, et sont produits à faible taux par la fission naturelle (uranium en particulier). Mais leur courte période les élimine très rapidement.

**Muon**

Le muon est un électron lourd, qui présente les mêmes caractéristiques quantiques que l'électron, à l'exception de sa masse. Celle-ci est de 207 fois celle de l'électron. Mais du fait de cette grande masse, le muon est instable et se désintègre en un électron, un neutrino muonique et un antineutrino électronique. La durée de vie du muon est de 2,2 microsecondes.

A la vitesse de la lumière, il peut donc parcourir $x = c\ t = 3\ 10^{5}$ km $s^{-1}$ x $2,2\ 10^{-6}$ s = $6,6\ 10^{-1}$ km = 660 m.

Or ils sont produits en altitude dans l'atmosphère, et par conséquent ne devraient pas être observés au sol. Mais la durée de vie indiquée est celle ressentie par le muon, et non celle vue par l'observateur au sol. Pour celui-ci, la durée de vie est augmentée selon la formule relativiste :

$t_{obs} = t / sqrt(1 - v^2 / c^2)$

Pour le muon, $v = 0,995\ c$

donc $v^2 / c^2 = 0,995^2\ c^2 / c^2 = 0,990025$

$t_{obs} = t / sqrt(1 - 0,990025) = t / 9,9874921777\ 10^{-2}$

$t_{obs} = 10\ t$

La durée de vie apparente étant donc 10 fois supérieure à la durée de vie réelle, le muon parcours une distance 10 fois supérieure, donc 6,6 km. Ceci permet à de nombreux muons de parvenir jusqu'au sol.

---=OO=---



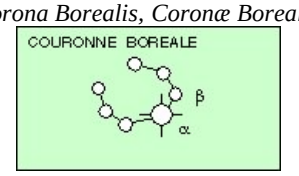
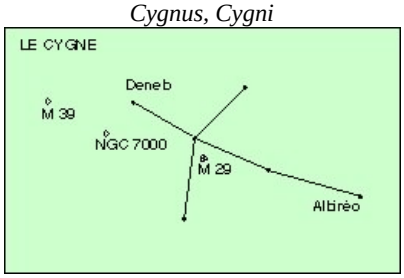
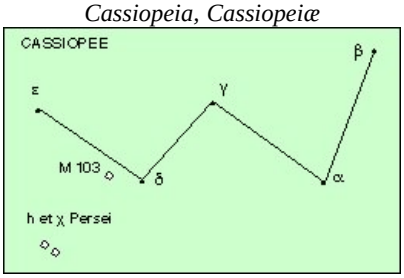

Pour préparer une soirée d'observation, vous pouvez vous munir d'une carte du ciel, et d'une lampe de poche munie d'un filtre devant l'ampoule (afin de diminuer la luminosité pour ne pas éblouir pendant la nuit).

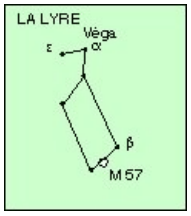
Un accessoire très utile doit être signalé : il existe aujourd'hui de nombreux logiciels de planétarium, qui montrent sur l'écran de votre ordinateur l'aspect du ciel à la date et l'heure qui vous convient, et pour l'endroit où vous vous trouvez. Il existe de nombreuses offres commerciales dans ce domaine. Mais on dispose d'un logiciel de bonne qualité, qui a le grand avantage d'être gratuit. Il se nomme *Stellarium*, vous pouvez le télécharger librement sur son site, et constitue un projet de logiciel libre de *sourceforge*. Il vous est proposé en différentes versions, adaptées à votre système d'exploitation favori : MacOS X, Linux, ou éventuellement Windows...

En utilisant un tel planétarium, vous pourrez voir la position des planètes le soir prévu pour l'observation, ainsi que tous les objets intéressants : Messier, NGC ; nébuleuses, amas ouverts ou globulaires, étoiles doubles...

Au-dessus de chaque carte se trouve le nom de la constellation en latin, ainsi que le génétif qui est utilisé pour désigner les objets contenus dans la constellation. Par exemple, la Grande Ourse est nommée *Ursa Major*, et son étoile principale est α *Ursæ Majoris*.

## *Observations en été*

<table>
<tr><td>Couronne d'Ariane, fille de Minos roi de Crète.<br><br>Les Aborigènes d'Australie y voient un boomerang !<br><br>α se nomme Gemma, ou la Perle; ou Alphecca (arabe = la plus brillante) ou Margarita. Binaire à éclipses P=17,3 ans ; A0 V et G5 V ; mv 2,2 ; 74 AL<br><br>β est Nusakan ; F0 ; mv 3,7 ; 59 AL<br><br>coin sud : amas de plus de 400 galaxies toutes de mv ≥ 16, à 1 milliard d'AL</td><td>Corona Borealis, Coronæ Borealis<br> 
</td></tr>
<tr><td>Cygnus, Cygni<br> 
</td><td>Deneb α Cygni supergéante type A2 9000° bleutée 300 diamètres solaires<br><br>située à 1.200 AL<br><br>Albiréo β Cygni double<br><br>Nébuleuse North América NGC 7000 près de Deneb<br><br>M 29 et M 39 amas ouverts</td></tr>
<tr><td>ε cas 550 AL ; δ cas 60 AL ;<br><br>γ cas 800 AL ; α cas 150 AL ; β cas 40 AL : même luminosité apparente<br><br>γ cas est variable entre les magnitudes 1,6 et 3 sans période précise (variations de volume)<br><br>h et χ persei est une paire d'amas ouverts âgés de 10 MA, situés à 6.500 AL à l'extrémité d'un bras spiral</td><td>Cassiopeia, Cassiopeiæ<br> 
</td></tr>
<tr><td>Lyra, Lyræ</td><td>α Lyræ, Véga nom arabe signifiant Vautour (nom ancien de la constellation, originaire du Moyen Orient) type spectral A1 10.000° blanc bleutée 3 diam Sol située à 26 AL mv 0,3<br><br>β Lyræ, Sheliak de l'arabe Harpe ; variable à éclipses TS B7V et A8 de mv 3,5 et de période 12 jours, presque en contact, à 800 AL de la Terre.<br><br>δ Lyræ double mv 5,6 et 4,3 à 10', séparation facile</td></tr>
</table>




aux jumelles TS B3,5V et M4II à 800 AL. Contraste de couleurs.

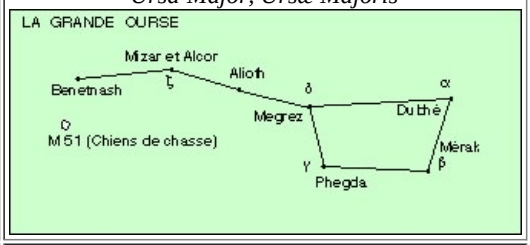
ε Lyræ double double ! aux jumelles, deux étoiles sont visibles mv 4,7 et 5,1 ; avec optique de plus de 75 mm chacune se dédouble. La composante la plus brillante de ε1 est encore une binaire spectroscopique.

M 57 nébuleuse planétaire de la lyre, en anneau 4 000 AL tél. 100 mm. Diamètre 2'. Etoile centrale mv 15.

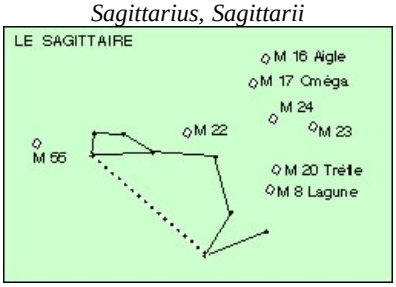
Mizar (+ brillante) et Alcor : double (par perspective ?) : Mizar et Alcor sont à 1 AL l'une de l'autre. Le système est à 90 AL de la Terre. Mizar elle-même est double (télescopique) dont la composante la plus brillante est une double spectroscopique ; Alcor est double.

M 51 galaxie des Chiens de Chasse (constellation voisine) superbe galaxie double, avec un bras entre les deux

*Ursa Major, Ursæ Majoris*




*Sagittarius, Sagittarii*




M 8 nébuleuse dite de la Lagune à 2.500 AL ;

M 20 nébuleuse du Trèfle car trilobée à 2.200 AL ;

M 17 nébuleuse Oméga (à cause de sa forme) ;

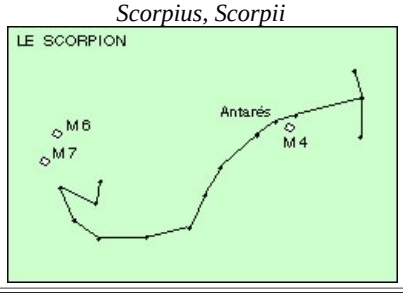
M 16 nébuleuse de l'Aigle contient un amas d'étoiles qui l'excitent

M 23 amas ouvert à 4.500 AL ; M 24 portion riche de la Voie Lactée, contient l'amas ouvert NGC 6603 (télescope) ; M 22 amas globulaire à 10.000AL ; M 55 amas globulaire

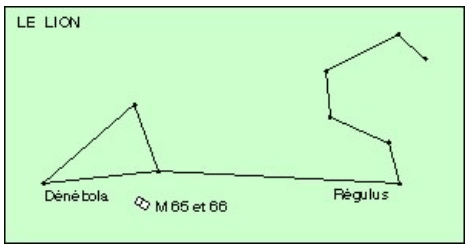
Antarès α Scorpii type M1 3.200° 300 diam Sol située à 450 AL MV 0,8 à 1,8 pér. 5 ans

M4 amas globulaire 10.000 AL ; M 6 et M 7 amas ouverts 100 étoiles chacun à 2.000 AL

*Scorpius, Scorpii*




*Leo, Leonis*




Le Lion est le lion de Némée tué par Hercule.

Régulus α Leonis type B7 20.000° bleue 70 AL 4 fois + grosse que le Soleil

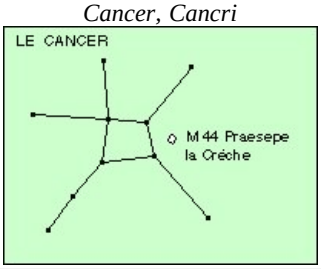
Dénébola β Leonis type A4 10.000° bleutée 40 AL

M 65 et M 66 galaxies spirales très proches (20')

Coma Berenices : amas ouvert 80 étoiles 260 AL ; contient un très riche amas de galaxies, observables avec de puissants télescopes

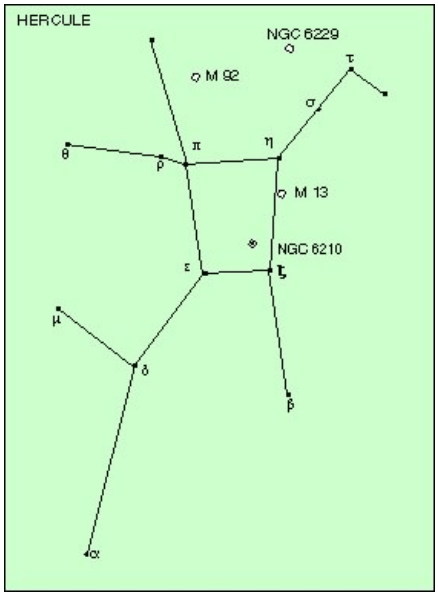
M 44 amas ouvert de la Crèche ou Praesepe, 300 étoiles, visible à l'œil nu

*Cancer, Cancri*




*Hercules, Herculis*

Hercule est sans doute une adaptation du géant babylonien Gilgamesh, qui a accompli des travaux extraordinaires. Fils de Jupiter et d'Alcmène.




α = Ras Algethi (tête de l'agenouillé) mv 3 ; très belle double M5 II rouge, et G5 III mv 5.

β est Kornephoros (grec porteur de massue) ; G8 III mv 2,8 150 AL.

ζ G0 IV mv 2,8 35 AL l'une des **plus proches** étoiles connues !

M13 amas globulaire 300.000 étoiles mv 5 ; 170 AL de diamètre = 10' ; 25.000 AL de distance ; les étoiles les + brillantes sont de mv 11

M 92 à 28.000 AL plus petit

NGC 6229 amas globulaire mv 9 ; 100.000 AL

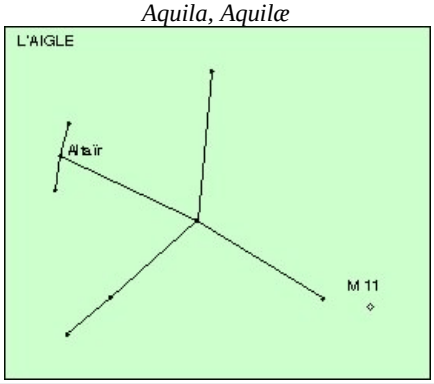
NGC 6210 petite planétaire mv 10

Altaïr α Aquilæ 8.000° blanche 16 AL

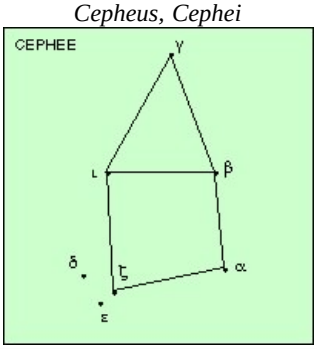
η Aquilæ céphéide période 7 j 4 h mag. 4,1 à 5,3

M 11 amas ouvert compact (appartenant à l'Ecu)

*Aquila, Aquilæ*




*Cepheus, Cephei*



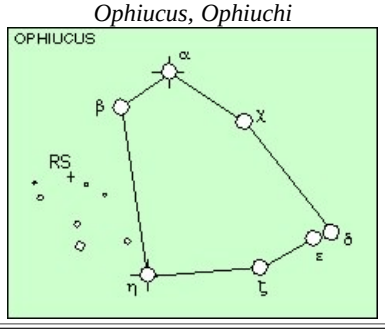

δ Céphée prototype des céphéides, dont elles tirent leur nom ; période 5 j 9 h mag. 4,1 à 5,2 ; diamètre variable entre 35,4 et 31,6 fois celui du Soleil ; 930 AL

la polaire est une géante à 470 AL

Ophiucus = porteur de serpents en grec. Même personnage que Asclépios (Esculape) = Hippocrate latin. Asclépios a tué un serpent. Il a vu arriver un autre serpent, qui a réssucité le premier en le frottant avec une herbe. Asclépios a suivi cet exemple, et a appris à résusciter les gens. Hadès, dieu des enfers, se voyant au chomage technique, demanda à Zeus de tuer Asclépios. Ce que fit Zeus, mais il le catastérisa avec son serpent. Ophiucus sépare la tête (Serpens Caput) et la queue (Serpens Cauda).

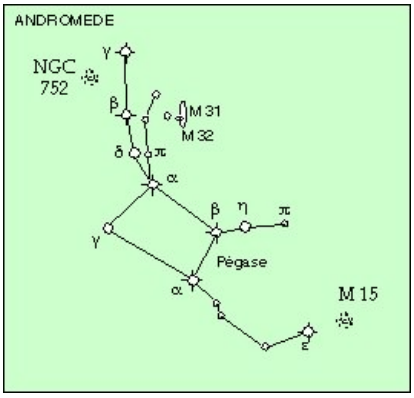
RS Oph est une des très rares novæ récurentes !

*Ophiucus, Ophiuchi*




## *Observations en automne*

| | |
|---|---|
| *Andromeda, Andromedæ* | Fille de Céphée et de Cassiopée. Cassiopée s'est vantée d'être plus belle que les Néréides, nymphes de la mer, filles de Poséïdon. Celui-ci envoya un monstre marin, Cetus, la Baleine, pour semer la désolation dans le pays. Un oracle dit à Céphée que la seule façon d'arrêter le monstre était de lui offrir Andromède en sacrifice. Céphée et Cassiopée ont enchaîné Andromède à un rocher. Persée venait de tuer les Gorgones, et portait la tête de Méduse dans un sac. Il la montra à la Baleine, qui en fut pétrifiée d'horreur. |




α Alpheratz A0 V ; mv 2,1 ; 96 AL

γ Almach = le lynx du désert ; double aux jumelles : + brillante K2 III mv 2,2 ; seconde A0 mv 5 à nouveau double deux composantes de mv 5.

M 31 Grande galaxie d'Andromède, située à 2,2 millions d'années-lumière ; spirale assez semblable à notre Voie Lactée. Objet le + lointain visible à l'œil nu. M32 est visible dans un petit télescope.

NGC 752 amas ouvert

Pégase est né de quelques gouttes de sang de Méduse, mélangées à l'écume de mer.

M 15 amas globulaire, l'un des plus brillants.

NGC 7331 spirale mv 10 ; 50 millions d'AL.

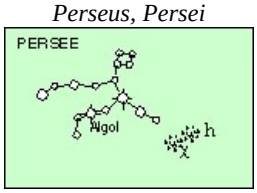
β Persei, Algol dans Persée est le prototype des variables à éclipses. Sa période est de 2,87 jours, et elle varie de la magnitude 2,2 à la magnitude 3,4. Les deux composantes sont très serrées. Elles sont 3 à 4 fois plus grosses que le Soleil, et de types spectraux B8 ( géante chaude) et G4 (très semblable au Soleil). A 93 AL.

Autour d'alpha, petit amas ouvert très joli.

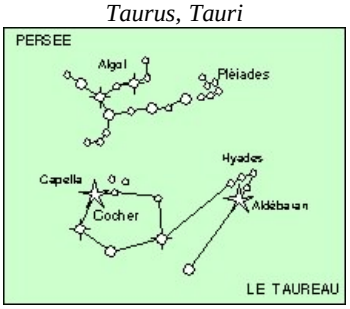
Persée h et χ Persei sont deux amas ouverts ; leurs centres sont formés d'étoiles. Ils sont de 6$^{e}$ et 7$^{e}$ magnitude. h Per = NGC 869 ; χ Persei = NGC 884. Ils sont à 7.300 AL.

M34 amas ouvert mv 5 ; 18' de diamètre ; 1.400 AL.

*Perseus, Persei*




*Taurus, Tauri*

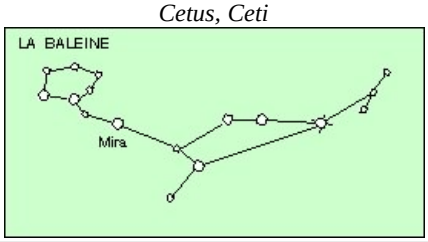



Les Pléiades sont le plus bel amas ouvert de l'hémisphère nord. Elles comptent à peu près 400 étoiles, dont une dizaine visibles à l'œil nu. L'amas n'a que 30 millions d'années, et se trouve à 100 parsecs.

Dans le Taureau, les Hyades sont un autre bel amas ouvert. Il contient une centaine d'étoiles, et se trouve à 45 parsecs.

la Baleine : Mira, la Merveilleuse Mira est une supergéante rouge variable, découverte en 1596 par Fabricius. Température de 2.600° au max, de 1.900° au min. 4 à 5 masses solaires, diamètre de 400 diamètres solaires ! magnitude de 3,9 à 5,9, maxima aigus et de faible durée, minimas plats. Croissance de 1 magnitude en 15 jours, décroissance de 1 magnitude en 1 mois environ. Spectre variable. Compagnon naine chaude de faible luminosité variable irrégulière de 9,9 à 11.

*Cetus, Ceti*




α Cap semble double , mais $\alpha_1$ est à 1100 AL, alors que $\alpha_2$ ne se trouve qu'à 116 AL.

---=OO=---




Les tables ci-dessous incluent Pluton, qui n'est plus considéré comme planète principale depuis août 2006. Dans les pages sur les planètes, Pluton était déjà considéré comme membre de la ceinture de Kuiper depuis 1992.

| planète | distance | | diamètre | | vitesse km/s | année | inclinaison axe rotation | inclinaison orbite/ écliptique | excentricité de l'orbite | Temp. moyenne | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $10^6$ km | UA | km | /Terre | | | | | | K | cent. |
| Mercure | *57,909* | **0,387099** | **4.879,4** | *0,3826* | **47,87** | **87,9684 j** | **0,0°** | **7,005°** | **0,206** | **440** | *167°* |
| Vénus | *108,209* | **0,723332** | **12.103,6** | *0,9488* | **35,02** | **224,6954 j** | **177,3°** | **3,394°** | **0,006** | **730** | *456°* |
| Terre | *149,598* | **1,000000** | **12.756,28** | *1* | **29,79** | **365,24219 j** | **23,45°** | **0,000°** | **0,0167** | **288 / 293** | *15° / 20°* |
| Mars | *227,936* | **1,523662** | **6.794** | *0,5326* | **24,13** | **1 an 321,68 j** | **25,19°** | **1,851°** | **0,093** | **183 / 268** | *-90° / -5°* |
| Jupiter | *778,412* | **5,203363** | **142.984** | *11,2089* | **13,07** | **11 ans 312,85 j** | **3,12°** | **1,305°** | **0,048** | **165** | *-108°* |
| Saturne | *1 426,725* | **9,537070** | **120.536** | *9,4491* | **9,67** | **29 ans 154,69 j** | **26,73°** | **2,484°** | **0,054** | **134** | *-140°* |
| Uranus | *2 870,972* | **19,191264** | **51.118** | *4,0072* | **6,84** | **83 ans 272,99 j** | **97,86°** | **0,770°** | **0,047** | **76** | *-198°* |
| Neptune | *4 498,253* | **30,068963** | **49.528** | *3,8826* | **5,48** | **163 ans 264,15 j** | **29,58°** | **1,769°** | **0,008** | **73** | *-195°* |
| *Pluton* | *5 906,376* | **39,481686** | **2.390** | *0,1874* | **4,75** | **248 ans 7,60 j** | **119,61°** | **17,142°** | **0,249** | **58** | *-216°* |

Les valeurs en caractères gras proviennent de ALLEN, avec une précision parfois moindre. Les valeurs en italique sont calculées d'après les valeurs de ALLEN.

L'année est exprimée en années juliennes de 365,25 jours solaires moyens. L'inclinaison de l'orbite est donnée pour l'équinoxe 2000. L'inclinaison de l'axe de rotation est donnée par rapport au plan de l'orbite. 1 UA = 149,59787066 $10^6$ km. Les températures sont celles du sol pour les planètes qui en ont un, et du niveau atmosphérique où la pression est de 1 bar pour les 4 géantes.

## *Données sur les globes*

| planète | masse planète | | période rotation | | vitesse de libération | masse vol. | | pesanteur | | albédo |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $10^{24}$ kg | /Terre | jour dec. | jour | | g $cm^{-3}$ | /eau | m $s^{-2}$ | /Terre | |
| Mercure | **0,33022** | **0,055274** | 58,646 | *58 j 15 h 30 mn* | **4,25** | **5,43** | 6,1 | **3,70** | *0,38* | 0,06 |
| Vénus | **4,8690** | **0,81500** | **-243,0187** | *243 j 0 h 27 mn* | **10,36** | **5,24** | 5,1 | **8,87** | *0,91* | 0,66 |
| Terre | **5,9742** | **1,000000** | **0,9973** | *23 h 56 mn 4 s* | **11,18** | **5,515** | 5,52 | **9,80** | *1* | 0,39 |
| Mars | **0,64191** | **0,10744** | **1,0259** | *24 h 37 mn 18 s* | **5,02** | **3,94** | 3,9 | **3,71** | *0,38* | 0,16 |
| Jupiter | **1.898,7** | **317,82** | **0,4135** | *9 h 55 mn 30 s* | **59,54** | **1,33** | 1,3 | **23,12** | *2,36* | 0,42 |
| Saturne | **568,51** | **95,161** | **0,4440** | *10 h 39 mn 22 s* | **35,49** | **0,70** | 0,7 | **8,96** | *0,91* | 0,45 |
| Uranus | **86,849** | **14,371** | **-0,7183** | *17 h 14 mn 24 s* | **21,29** | **1,30** | 1,6 | **8,69** | *0,89* | 0,55 |
| Neptune | **102,44** | **17,147** | **0,6712** | *16 h 6 mn 36 s* | **23,71** | **1,76** | 2,2 | **11,00** | *1,12* | 0,66 |
| *Pluton* | **0,013** | **0,002200** | **-6,3872** | *6 j 9 h 18 mn* | **1,27** | **1,1** | 2,03 | **0,81** | *0,08* | |

Les valeurs en caractères gras proviennent de ALLEN

0,075 M = 149,18 $10^{27}$ kg

$0{,}075\ M_\odot = 75\ M_J$

$75\ M_J = 75 \times 1{,}8987\ 10^{27}\ kg = 142{,}4\ 10^{27}\ kg$

$0{,}075\ M_\odot$ est à peu près la masse limite en-dessous de laquelle une étoile ne peut fusionner l'hydrogène. Les étoiles plus petites sont des naines brunes.

## *Les atmosphères*

| **Planète** | **pression bars** | **Hydro. H** | **Hélium He** | **Méthane $CH_4$** | **Sodium Na** | **Oxygène O** | **diox. carb. $CO_2$** | **azote N** | **argon Ar** | **eau $H_2O$** | **autres** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Mercure | | | 42 % | | 42 % | 15 % | | 1 % | | | |
| Vénus | 92 | | | | | | 96 % | 3+ % | | | |
| Terre | 1,013 | | | | | 21 % | | 77 % | | | 2 % |
| Mars | 0,007 | | | | | 0,1 % | 95,3 % | 2,7 % | 1,6 % | 0,03 % | |
| Jupiter | 0,7 | 90 % | 10 % | | | | | | | | |
| Saturne | 1,4 | 97 % | 3 % | | | | | | | | |
| Uranus | 1,2 | 83 % | 15 % | 2 % | | | | | | | |
| Neptune | $1^{-3}$ | 85 % | 13 % | 2 % | | | | | | | |
| *Pluton* | | | | 0,3 % | | | | | | | |
| Titan | 1,5 | | | | | | | | | | |
| Triton | $10^{-5}$ | | | | | | | | | | |

L'atmosphère de Titan comporte HCH, $HC_3N$, $C_2N_2$.

## *Les satellites*

Grâce aux sondes spatiales qui vont sur place, et même à l'aide de télescopes depuis la Terre, on découvre encore de nouveaux satellites aux planètes géantes. Les nombres indiqués ci-dessous ne sont donc pas forcément à jour !

| **Planète** | **nb de satellites connus** |
|---|---|
| Mercure | 0 |
| Vénus | 0 |
| Terre | 1 |
| Mars | 2 |
| Jupiter | 63 |
| Saturne | 31 |
| Uranus | 27 |
| Neptune | 13 |
| *Pluton* | 4 |

**Propriétés**

| | **Nom** | **diamètre km** | **révolution sidérale** | **Distance km** | **exc.** | **découvert par** | **en** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Terre** | Lune | 3.473 | 27 j 7 h 43 mn | 384.000 | 0,055 | voir Soleil | |
| **Mars** | Phobos | 27×21×19 | 7,7 h | 9.380 | 0,015 | Hall | 1877 |
| | Deimos | 15×12×11 | 30 h | 23.460 | 0,0005 | Hall | 1877 |
| | Metis | 40 | 7,1 h | 128.000 | | Synnott | 1979 |
| | Adrastée | 20 | 7,2 h | 129.000 | | Jewitt | 1979 |
| | Amalthée | 200 | 12 h | 181.000 | 0,003 | Barnard | 1892 |
| | Thébé | 100 | 16,2 h | 222.000 | 0,015 | Synnott | 1979 |
| | Io | 3.630 | 1,77 j | 422.000 | 0,004 | Galilée | 1610 |
| | Europe | 3.138 | 3,55 j | 671.000 | 0,009 | Galilée | 1610 |
| | Ganymède | 5.262 | 7,16 j | 1.070.000 | 0,002 | Galilée | 1610 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Jupiter** | Callisto | 4.800 | 16,69 j | 1.883.000 | 0,007 | Galilée | 1610 |
| | Léda | 16 | 239 j | 11.094.000 | 0,148 | Kowal | 1974 |
| | Himalia | 186 | 251 j | 11.480.000 | 0,158 | Perrine | 1905 |
| | Lysithéa | 36 | 259 j | 11.720.000 | 0,107 | Nicholson | 1938 |
| | Elara | 76 | 260 j | 11.737.000 | 0,207 | Perrine | 1905 |
| | Ananké | 30 | 631 j | 21.200.000 | 0,169 | Nicholson | 1951 |
| | Carmé | 40 | 692 j | 22.600.000 | 0,207 | Nicholson | 1938 |
| | Pasiphaé | 50 | 735 j | 23.500.000 | 0,378 | Melotte | 1908 |
| | Sinope | 36 | 758 j | 23.700.000 | 0,275 | Nicholson | 1914 |
| **Saturne** | Pan | 20 | | 133.580 | | M. Showalter | 1990 |
| | Atlas | 30 | 14,4 h | 138.000 | 0 | Voyager 1 | 1980 |
| | Prométhée | 100 | 14,7 h | 139.000 | 0,003 | Voyager 1 | 1980 |
| | Pandore | 90 | 15,1 h | 142.000 | 0,004 | Voyager 1 | 1980 |
| | Epiméthée | 120 | 16,7 h | 151.000 | 0,009 | A. Dollfus | 1966 |
| | Janus | 200 | 16,7 h | 151.000 | 0,007 | A. Dollfus | 1966 |
| | Mimas | 392 | 22,6 h | 186.000 | 0,020 | W. Herschel | 1789 |
| | Encelade | 500 | 32,9 h | 238.000 | 0,005 | W. Herschel | 1789 |
| | Téthys | 1.060 | 45,3 h | 295.000 | 0 | J.D. Cassini | 1684 |
| | Télesto | 28 | 45,3 h | 295.000 | | B. Smith | 1980 |
| | Calypso | 30 | 45,3 h | 295.000 | | B. Smith | 1980 |
| | Dioné | 1.120 | 2,7 j | 377.000 | 0,002 | J.D. Cassini | 1684 |
| | Hélène | 32 | 2,7 j | 377.000 | 0,005 | Voyager 1 | 1980 |
| | Rhéa | 1.530 | 4,5 j | 527.000 | 0,001 | J.D. Cassini | 1672 |
| | Titan | 5.150 | 16 j | 1.222.000 | 0,03 | C. Huygens | 1665 |
| | Hypérion | 260 | 21 j | 1.481.000 | 0,10 | Lassell, Bond | 1848 |
| | Japet | 1.460 | 79 j | 3.561.000 | 0,028 | J.D. Cassini | 1671 |
| | Phoébé | 220 | 550 j | 12.952.000 | 0,163 | W. Pickering | 1898 |
| **Uranus** | Cordélia | 26 | 8 h | 50.000 | 0 | Voyager 2 | 1986 |
| | Ophélia | 30 | 9 h | 54.000 | 0,01 | Voyager 2 | 1986 |
| | Bianca | 42 | 10,4 h | 59.000 | 0 | Voyager 2 | 1986 |
| | Cressida | 62 | 11 h | 62.000 | 0 | Voyager 2 | 1986 |
| | Desdémona | 54 | 11,4 h | 63.000 | 0 | Voyager 2 | 1986 |
| | Juliet | 84 | 11,8 h | 64.000 | 0 | Voyager 2 | 1986 |
| | Portia | 108 | 12,3 h | 66.000 | 0 | Voyager 2 | 1986 |
| | Rosalind | 54 | 13,4 h | 70.000 | 0 | Voyager 2 | 1986 |
| | Bélinda | 66 | 15 h | 75.000 | 0 | Voyager 2 | 1986 |
| | Puck | 154 | 18,3 h | 86.000 | 0 | Voyager 2 | 1985 |
| | Miranda | 480 | 1,4 j | 1,4 jour | 0,003 | Kuiper | 1948 |
| | Ariel | 1.158 | 2,5 j | 191.000 | 0,003 | Lassell | 1851 |
| | Umbriel | 1.172 | 4,1 j | 266.000 | 0,005 | Lassell | 1851 |
| | Titania | 1.580 | 8,7 j | 436.000 | 0,002 | W. Herschel | 1787 |
| | Obéron | 1.524 | 13,5 j | 583.000 | 0,001 | W. Herschel | 1787 |
| **Neptune** | Naïade | 54 | 7 h | 48.233 | 0 | Voyager 2 | 1989 |
| | Thalassa | 80 | 7,5 h | 50.070 | 0 | Voyager 2 | 1989 |
| | Despina | 150 | 8 h | 52.532 | 0 | Voyager 2 | 1989 |
| | Galatéa | 160 | 10,3 h | 61.944 | 0 | Voyager 2 | 1989 |
| | Larissa | 200 | 13,3 h | 73.547 | 0,001 | Voyager 2 | 1989 |
| | Protéus | 416 | 27 h | 117.636 | 0 | Voyager 2 | 1989 |
| | Triton | 2.700 | 6 j | 355.000 | 0 | Lassell | 1846 |
| | Néréide | 340 | 360 j | 5.510.000 | 0,751 | Kuiper | 1949 |
| ***Pluton*** | Charon | 1.186 | 6,4 j | 19.600 | 0 | Christy | 1978 |
| | Hydra | 32 à 113 | 38,2 j | 65.000 | 0,005 | Mutchler | 2005 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Nix | 32 à 113 | 24,8 j | 49.000 | 0,002 | Mutchler | 2005 |
| | S/2011 (134340) | 13 à 34 | 32 j | 59.000 | - | HST | 2011 |

Seuls les principaux satellites ont été enregistrés dans ce tableau. Les planètes géantes possèdent en plus les satellites suivants :

| **planète** | **satellites nommés** | **nombre de satellites sans nom** |
|---|---|---|
| Jupiter | Callirrhoé, Thémisto, Megaclite, Taygète, Chaldène,Harpalyke, Kalyke, Iocaste, Erinome, Isonoé, Praxidike, Autonoé, Thyone, Hermippe, Aitné, Eurydome, Euanthe, Euporie, Orthosie, Sponde, Kale, Pasithée | 23 |
| Saturne | Pan, Ymir, Paaliaq, Tarvos, Ijiraq, Suttung, Kiviuq, Mundilfari, Albiorix, Skadi, Erriapo, Siarnaq, Thrym | 1 |
| Uranus | Caliban, Sycorax, Propero, Setebos, Stephano, Trinculo | 3 |
| Neptune | Naïade, Thalassa, Despina, Galatée, Larissa, Protée, Triton, Néréide, Halimède, Sao, Laomédie, Psamathée, Néso | 5 |

Les satellites sans nom ont été récemment découverts, et n'ont encore qu'une dénomination provisoire.

Il faut ajouter les éléments (masse, densité, excentricité...) des principaux satellites Lune, Io, Europe....

## *Petites planètes, ou astéroïdes (les 275 premières...)*

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Cérès | 56 | Melete | 111 | Ate | 166 | Rhodope | 221 | Eos |
| 2 | Pallas | 57 | Mnemosyne | 112 | Iphigenia | 167 | Urda | 222 | Lucia |
| 3 | Juno | 58 | Concordia | 113 | Amalthea | 168 | Sibylla | 223 | Rosa |
| 4 | Vesta | 59 | Elpis | 114 | Kassandra | 169 | Zelia | 224 | Oceana |
| 5 | Astraea | 60 | Echo | 115 | Thyra | 170 | Maria | 225 | Henrietta |
| 6 | Hebe | 61 | Danae | 116 | Sirona | 171 | Ophelia | 226 | Weringia |
| 7 | Iris | 62 | Erato | 117 | Lomia | 172 | Baucis | 227 | Philosophia |
| 8 | Flora | 63 | Ausonia | 118 | Peitho | 173 | Ino | 228 | Agathe |
| 9 | Metis | 64 | Angelina | 119 | Althaea | 174 | Phaedra | 229 | Adelinda |
| 10 | Hygiea | 65 | Cybele | 120 | Lachesis | 175 | Andromache | 230 | Athamantis |
| 11 | Parthenope | 66 | Maja | 121 | Hermione | 176 | Iduna | 231 | Vindobona |
| 12 | Victoria | 67 | Asia | 122 | Gerda | 177 | Irma | 232 | Russia |
| 13 | Egeria | 68 | Leto | 123 | Brunhild | 178 | Belisana | 233 | Asterope |
| 14 | Irene | 69 | Hesperia | 124 | Alkeste | 179 | Klytaemnestra | 234 | Barbara |
| 15 | Eunomia | 70 | Panopaea | 125 | Liberatrix | 180 | Garumna | 235 | Carolina |
| 16 | Psyche | 71 | Niobe | 126 | Velleda | 181 | Eucharis | 236 | Honoria |
| 17 | Thetis | 72 | Feronia | 127 | Johanna | 182 | Elsa | 237 | Coelestina |
| 18 | Melpomene | 73 | Klytia | 128 | Nemesis | 183 | Istria | 238 | Hypatia |
| 19 | Fortuna | 74 | Galatea | 129 | Antigone | 184 | Dejopeja | 239 | Adrastea |
| 20 | Massalia | 75 | Eurydike | 130 | Elektra | 185 | Eunike | 240 | Vanadis |
| 21 | Lutetia | 76 | Freia | 131 | Vala | 186 | Celuta | 241 | Germania |
| 22 | Kalliope | 77 | Frigga | 132 | Aethra | 187 | Lamberta | 242 | Kriemhild |
| 23 | Thalia | 78 | Diana | 133 | Cyrene | 188 | Menippe | 243 | Ida |
| 24 | Themis | 79 | Eurynome | 134 | Sophrosyne | 189 | Phthia | 244 | Sita |
| 25 | Phocaea | 80 | Sappho | 135 | Hertha | 190 | Ismene | 245 | Vera |
| 26 | Proserpina | 81 | Terpsichore | 136 | Austria | 191 | Kolga | 246 | Asporina |
| 27 | Euterpe | 82 | Alkmene | 137 | Meliboea | 192 | Nausikaa | 247 | Eukrate |
| 28 | Bellona | 83 | Beatrix | 138 | Tolosa | 193 | Ambrosia | 248 | Lameia |
| 29 | Amphitrite | 84 | Klio | 139 | Juewa | 194 | Prokne | 249 | Ilse |
| 30 | Urania | 85 | Io | 140 | Siwa | 195 | Eurykleia | 250 | Bettina |
| 31 | Euphrosyne | 86 | Semele | 141 | Lumen | 196 | Philomela | 251 | Sophia |
| 32 | Pomona | 87 | Sylvia | 142 | Polana | 197 | Arete | 252 | Clementina |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 33 | Polyhymnia | 88 | Thisbe | 143 | Adria | 198 | Ampella | 253 | Mathilde |
| 34 | Circe | 89 | Julia | 144 | Vibilia | 199 | Byblis | 254 | Augusta |
| 35 | Leukothea | 90 | Antiope | 145 | Adeona | 200 | Dynamene | 255 | Oppavia |
| 36 | Atalante | 91 | Aegina | 146 | Lucina | 201 | Penelope | 256 | Walpurga |
| 37 | Fides | 92 | Undina | 147 | Protogeneia | 202 | Chryseis | 257 | Silesia |
| 38 | Leda | 93 | Minerva | 148 | Gallia | 203 | Pompeja | 258 | Tyche |
| 39 | Laetitia | 94 | Aurora | 149 | Medusa | 204 | Kallisto | 259 | Aletheia |
| 40 | Harmonia | 95 | Arethusa | 150 | Nuwa | 205 | Martha | 260 | Huberta |
| 41 | Daphne | 96 | Aegle | 151 | Abundantia | 206 | Hersilia | 261 | Prymno |
| 42 | Isis | 97 | Klotho | 152 | Atala | 207 | Hedda | 262 | Valda |
| 43 | Ariadne | 98 | Ianthe | 153 | Hilda | 208 | Lacrimosa | 263 | Dresda |
| 44 | Nysa | 99 | Dike | 154 | Bertha | 209 | Dido | 264 | Libussa |
| 45 | Eugenia | 100 | Hekate | 155 | Scylla | 210 | Isabella | 265 | Anna |
| 46 | Hestia | 101 | Helena | 156 | Xanthippe | 211 | Isolda | 266 | Aline |
| 47 | Aglaja | 102 | Miriam | 157 | Dejanira | 212 | Medea | 267 | Tirza |
| 48 | Doris | 103 | Hera | 158 | Koronis | 213 | Lilaea | 268 | Adorea |
| 49 | Pales | 104 | Klymene | 159 | Aemilia | 214 | Aschera | 269 | Justitia |
| 50 | Virginia | 105 | Artemis | 160 | Una | 215 | Oenone | 270 | Anahita |
| 51 | Nemausa | 106 | Dione | 161 | Athor | 216 | Kleopatra | 271 | Penthesilea |
| 52 | Europa | 107 | Camilla | 162 | Laurentia | 217 | Eudora | 272 | Antonia |
| 53 | Kalypso | 108 | Hecuba | 163 | Erigone | 218 | Bianca | 273 | Atropos |
| 54 | Alexandra | 109 | Felicitas | 164 | Eva | 219 | Thusnelda | 274 | Philagoria |
| 55 | Pandora | 110 | Lydia | 165 | Loreley | 220 | Stephania | 275 | Sapientia |

### *Caractéristiques de quelques petites planètes*

| nom | découverte | | | diamètre | demi grand axe | excentricité | inclinaison | période | rotation |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | auteur | lieu | date | | | | | | |
| 1 Cérès | Piazzi | Palerme | 1/1/1801 | 974 km | 2,77 UA | 0,097 | 10° 30' | 1.681 j | 9,078 h |
| 2 Pallas | Olbers | Brême | 1802 | 538 km | 2,77 UA | 0,180 | 35° | 1.684 j | 7,811 h |
| 4 Vesta | Olbers | Brême | 1807 | 500 km | 2,36 UA | 0,097 | 7° | 1.326 j | |
| 10 Hygeia | | | | 430 km | 3,14 UA | 0,136 | 4° | | |
| 511 Davida | | | | 336 km | 3,18 UA | 0,171 | 16° | | |
| 704 Interamnia | | | | 330 km | 3,06 UA | 0,081 | 17° | | |
| 52 Europa | | | | 310 km | 3,10 UA | 0,119 | 7° 30' | | |
| 15 Eunomia | | | | 270 km | 2,64 UA | 0,143 | 11° 45' | | |
| 87 Sylvia | | | | 270 km | 3,49 UA | 0,051 | 10° 45' | | |
| 16 Psyché | | | | 265 km | 2,92 UA | 0,10 | 3° | | |
| 31 Euphrosyne | | | | 250 km | 3,16 UA | 0,099 | 26° 15' | | |
| 65 Cybèle | | | | 245 km | 3,43 UA | 0,129 | 3° 30' | | |
| 3 Juno | Harding | Lilienthal | 1804 | 245 km | 2,67 UA | 0,218 | 13° | 1.593 j | |
| 324 Bamberga | | | | 240 km | 2,68 UA | 0,285 | 11° | | |
| 107 Camilla | | | | 240 km | 3,49 UA | 0,084 | 10° | | |
| 8 Flora | Hind | Londres | 1847 | | 2,201 UA | 0,157 | 4° 36' | 1.193 j | |
| 11 Parthénope | De Gasparis | Naples | 1850 | | 2,452 UA | 0,100 | 3° 30' | 1.403 j | |
| 24 Thémis | De Gasparis | Naples | 1853 | | 3,134 UA | 0,136 | 1° 11' | 2.019 j | |
| 25 Phocée | Chacornac | Marseille | 1853 | | 2,402 UA | 0,253 | 22° 9' | 1.358 j | |
| 158 Coronis | Knorre | Berlin | 1876 | | 2,868 UA | 0,058 | 2° 19' | 1.774 j | |
| 170 Maria | Perrotin | Toulouse | 1877 | | 2,554 UA | 0,063 | 15° 36 | 1.491 j | |
| 221 Eos | Palis | Vienne | 1882 | | 3,011 UA | 0,097 | 9° 56' | 1.913 j | |

La colonne inclinaison donne l'inclinaison de l'orbite de la planète sur le plan de l'écliptique.

## *Pluies d'étoiles filantes*

| nom | Date du maximum | Dates extrêmes | Nombre visible | vitesse km/s | Comète associée |
|---|---|---|---|---|---|
| Quadrantides (ou Bootides)** | 3 janv. | 1er janv.-4 janv. | 40 | 41 | Kozik-Peltier |
| Lyrides** | 21 avril | 19 avril-24 avril | 5 | 48 | Thatcher |
| η Aquarides* | 4 mai | 21 avril-12 mai | 20 | 65 | Halley |
| Ariétides | 8 juin | 29 mai-18 juin | < 5 | | |
| ζ Perséides | 9 juin | 1er juin-16 juin | < 5 | | |
| Ophiuchides | 20 juin | 17 juin-26 juin | < 5 | | |
| β Taurides* | 30 juin | 24 juin-6 juil. | 20 | | Encke |
| δ Aquarides* | 29 juil. | 21 juil.-15 août | 15 | 41 | |
| α Capricornides | 1er août | 17 juil.-21 août | < 5 | | Mrkos |
| ι Aquarides* | 5 août | 15 juil.-25 août | 5 | | |
| Perséides** | 12 août | 25 juil.-17 août | 50 | 60 | Swift-Tuttle |
| κ Cygnides | 20 août | 18 août-22 août | < 5 | | |
| Draconides | 9 oct. | 9 oct.-10 oct. | < 5 | | Giacobini-Zinner |
| Orionides** | 22 oct. | 18 oct.-26 oct. | 15 | 66 | Halley |
| Taurides* | 10 nov. | 15 sept.-15 déc. | 5 | 28 | Encke |
| Andromédides | 14 nov. | 3 nov.-22 nov. | < 5 | | Biéla |
| Léonides* | 17 nov. | 14 nov.-20 nov. | 10 | 71 | Temple-Tuttle |
| Poenicides | 5 déc. | 5 déc. | < 5 | | Blanpain |
| Géminides** | 14 déc. | 7 déc.-15 déc. | 60 | 35 | |
| Ursides | 22 déc. | 17 déc.-24 déc. | < 5 | 34 | Tuttle |

Les pluies donnant le plus grand nombre d'étoiles filantes très brillantes sont marquées d'astérisques.

d'après Michel Marcelin, L'Astronomie, Hachette/CIL.

## *Noms des structures géologiques du système solaire*

L'Union Astronomique Internationale, responsable de la dénomination des structures observées à la surface des planètes, a défini des noms latins qui donnent une indication sur leur type. Vous trouverez ci-dessous ces noms avec leurs signification.

Recherchez par exemple sur la carte de Mars les formations nommées : *Valles Marineris*, *Olympus Mons*, *Candor Chasma*, et déterminez ce qu'elles représentent.

| nom | explication |
|---|---|
| *Catena, catenae* | chaîne de cratères. |
| *Cavus, cavi* | creux, dépressions irrégulières. |
| *Chaos* | zone de terrain fracturé. |
| *Chasma, chasmata* | dépression profonde, allongée, à forte pente ; bords escarpés. |
| *Colles* | petites collines ou mamelons. |
| *Corona, coronae* | formation de forme ovoïde. |
| *Crater, craters* | dépression circulaire. |
| *Dorsum, dorsa* | crête (dos d'un animal). |
| *Facula, faculae* | tache brillante. |
| *Farrum, farra* | structure en forme de crêpe, ou alignement de telles structures. |
| *Flexus* | crête courbe très basse, festonnée. |
| *Fluctus* | terrain d'écoulement. |
| *Fossa, fossae* | dépression longue et étroite, peu profonde. |

| | |
|---|---|
| *Labes* | glissement de terrain. |
| *Labyrinthus* | complexe de plusieurs vallées qui se coupent. |
| *Lacus* | sur la lune, lac, petite plaine. |
| *Lenticula, lenticulae* | petites taches sombre sur Europe. |
| *Linea, lineae* | rayures allongées, claires ou sombres, droites ou courbes. |
| *Macula, maculae* | tache sombre, parfois irrégulière. |
| *Mare* | sur la lune, mer, grande plaine circulaire. |
| *Mensa, mensae* | montagne à sommet plat, et bordée de falaises. |
| *Mons, montes* | montagne. |
| *Oceanus* | sur la lune, très grande zone sombre. |
| *Palus* | sur la lune, marais ; petite plaine. |
| *Patera, paterae* | cratère irrégulier, ou cratère complexe à bords festonnés. |
| *Planitia* | petite plaine. |
| *Planum* | plateau ou grande plaine. |
| *Promontorium* | sur la lune, cap, promontoire. |
| *Regio, regiones* | vaste région qui se distingue par sa couleur ou sa brillance. |
| *Reticulum, reticula* | structure réticulée (comme couverte d'un filet) sur Vénus. |
| *Rima, rimae* | sur la lune, fissure. |
| *Rupes* | escarpement. |
| *Scopulus* | escarpement irrégulier. |
| *Sinus* | baie ou petite plaine (latin : *pli* ou *creux*). |
| *Sulcus, sulci* | sillons et crêtes parallèles, comme des plis sur un tapis. |
| *Terra* | zone étendue de terres. |
| *Tessera, tesserae* | terrain polygonal, comme carrelé. |
| *Tholus, tholi* | petite montagne, colline. |
| *Undae* | dunes. |
| *Vallis, valles* | vallée. |
| *Vastitas* | vaste plaine. |

*Elektron* = ambre en grec (car un morceau d'ambre frotté avait la propriété d'attirer les corps légers ; cette propriété lui vient des électrons arrachés par le frottement, d'où le nom donné à cette particule).

---=OO=---




**Magellan**

Magellan lancée le 4 mai 1989, arrivée à Vénus le 10 août 1990, placée sur une orbite quasi-polaire. 8 mois de cartographie, 84% de la surface, résolution 10 fois meilleure que celle des sondes Venera 15 et 16.
Deux cycles supplémentaires jusqu'au 15 mai 1991, et 14 septembre 1992 ont étendu la surface couverte à 98%, avec une résolution de 100 m.
Des mesures gravimétriques ont aussi déterminé la répartition des masses dans la planète.

---=OO=---




La Voie Lactée est un disque aplati d'étoiles de 80.000 AL de diamètre, de 6.000 AL d'épaisseur, et entourée d'un halo sphérique d'étoiles de 100.000 AL de diamètre. La masse de la Voie Lactée est supérieure à 100 milliards de masses solaires.

Le système solaire se trouve à 30.000 AL du centre de la Galaxie. Le disque est en rotation avec des bras spiraux.

On notera que la Voie Lactée est donc une galaxie, mais on la nomme souvent aussi La Galaxie, avec une majuscule.

---=OO=---




Le nom de *séminaires* a été choisi pour l'organisation qu'il implique, en chapitres relativement courts et indépendants les uns des autres, mais il ne s'agit pas de séminaires de recherche universitaire. Toutefois, ils visent à approfondir des domaines particuliers qui n'auraient pas leur place dans un cours général.

Les sujets accessibles ci-dessous sont ceux qui ont été déjà traités. Mais dans l'esprit des séminaires, de nouveaux sujets seront traités au fil du temps, en fonction des disponibilités, de l'actualité…

Année 2011/2012

| | |
|---|---|
| **Sursauts gamma** | Les sursauts gamma sont des phénomènes rapides extrèmement violents, qui mettent en jeu des objets compacts (étoile à neutrons, ou trou noir). Description des magnétars. |
| **Gravitation Universelle** | Génèse de la loi de Newton à partir des lois de Kepler. La méthode de Newton est géométrique et élémentaire. |
| **Le calendrier** | Objet ce tous les jours, le calendrier a été moteur dans la compréhension des mouvements des astres. Présentation historique, et méthodes de calcul. |
| **Chimie physique le tableau de Mendeleev** | La structure électronique des atomes permet de comprendre le tableau de Mendeleev, les propriétés chimiques des éléments et les raies spectrales des atomes. |
| **Le diagramme HR** | Etude du diagramme HR, de sa constitution et de ses diverses présentations, de sa construction pratique. Son utilité en astrophysique. |
| **Pluton et la ceinture de Kuiper** | Pluton n'est plus considéré comme une planète, mais comme le premier objet connu de la ceinture de Kuiper. Ces objets ont des propriétés intéressantes. |
| **Etoiles symbiotiques** | Des étoiles qui partagent… |

Année 2012/2013

| | |
|---|---|
| **Un peu de topologie** | L'Univers considéré du point de vue de la topologie, théorie et observations envisageables. |
| **Coup de projecteur sur la Mécanique Quantique** | La quantification et le Principe d'Incertitude en relation avec l'onde de de Broglie. |
| **Radioastronomie (fichier powerpoint) Didier Pierson** | Principes de la radioastronomie, les instruments, l'Univers visible en radio. |
| **Géologie de Mars** | Quelques résultats récents sur la géologie de Mars. |
| **Avancées en cosmologie** | Remise en cause du Principe Cosmologique, et les résultats associés. |
| **Les mondes glacés** | La grande diversité des satellites des planètes géantes, dans un milieu froid où l'on pensait qu'il ne se passait rien…. |
| **La matière noire** | Nécessaire pour valider certaines théories, la matière noire existe-t-elle ? |
| **Eléments de théorie des cordes** | La théorie des cordes va au-delà du modèle standard des particules. Elle n'est pas encore validée expérimentalment. |

Année 2013/2014

| | |
|---|---|
| **Méthodes physiques** | Les méthodes de la physique moderne inventées par l'Antiquité. |
| **Hypertélescopes** | Télescopes de très grandes dimensions (kilométriques), inventés par Antoine Labeyrie. |

---=OO=---




Les rayons gamma étant, fort heureusement pour nous, totalement arrêtés par l'atmosphère terrestre, n'ont jamais été observés avant l'avénement de moyens aériens ou spatiaux. Dès que ceux-ci l'ont permi, des expériences ont été faites, et des sources gamma découvertes dans le ciel. En étaient responsables certains objets qui émettent des rayons gamma en continu, même si leur flux est variable (quasars par exemple). Ceux que nous détaillons dans ce chapitre sont produits par des sources transitoires, visibles seulement pendant une brève période.

**Découverte**

Le 4 juin 1967, une expérience américaine, emportée en ballon stratosphérique, a observé la nébuleuse du Crabe, et y a détecté un flux de photons gamma de basse énergie. Ceci un peu avant la découverte du pulsar (radio) du Crabe. Et il s'est avéré que la période de variation en gamma était la même qu'en radio. L'association entre les deux objets était donc faite. Un pulsar émettait des rayons gamma, et cette émission est continue. En 68, une confirmation de ces résultats était donnée par Jacques Paul, de Saclay, dans une gamme de haute énergie. Remarquez que le pulsar du Crabe fait partie de notre Galaxie, qui à ce jour était l'unique source connue de rayons gamma.

En 1968 encore, le satellite américain OSO 3 (*Orbiting Solar Observatory*), équipé d'un détecteur rudimentaire de rayons gamma, découvrait quelques sources dans la Voie Lactée, localisées plutôt vers son centre. L'instrument ne permettait pas d'en dire plus sur ces sources. Mais d'après ce qu'on connaissait alors, les sources gamma étaient galactiques, et elles étaient continues.

Les *sursauts gamma*, tels qu'on les nomme aujourd'hui, ont été découverts plus tard, tout à fait marginalement, par les militaires ! Dans la course aux armements des années 60, chacun s'équipait de systèmes de plus en plus puissants, qu'il fallait bien sûr valider expérimentalement. Pour cela, on a fait d'abord des essais nucléaires en surface, puis des essais souterrains. Tout ceci était facile à détecter par les sismographes utilisés pour analyser les tremblements de Terre. Alors, la tentation a été forte de procéder à des essais dans l'espace, au-dessus de l'atmosphère.

Une explosion hors de l'atmosphère serait-elle facilement détectable ? Que produirait-elle ? Pas de bruit (pas d'air, donc pas de son) ; pas de champignon atomique (même raison, pas d'air) ; un éclair particulièrement brillant, puis une bouffée de rayons gammas émis par les désintégrations. C'est ce point que les deux signataires ont décidé de controller, parce que c'était plus facile.

Le traité SALT (*Strategic Arms Limitation Talks*) signé le 26 mai 1972, prévoyait la limitation des armements nucléaires, et par conséquent aussi de leurs essais. Américains et Soviétiques se sont alors lancés dans une nouvelle compétition pour traquer les éventuelles violations du traité par l'autre. Rapidement, un flash gamma a été enregistré. Le risque était assez grand que les militaires prennent ce phénomène naturel pour une explosion provoquée par l'autre camp. En réalité, ils ont fait preuve les uns et les autres d'un grand sang froid ! Car il leur a bien fallu en venir à la bonne explication : il n'y avait pas eu d'explosion artificielle, mais bien un événement astronomique qu'il fallait donc comprendre. Ce fut le début d'une longue quête…

**Rayons gamma**

Les rayons gamma sont simplement des rayons électromagnétiques, comme la lumière, mais bien plus énergétiques. Puisque $E = h \nu$, l'énergie étant bien plus élevée, la fréquence l'est également. Et par suite, la longueur d'onde est bien plus courte. La longueur d'onde est même plus courte que les distances interatomiques dans la matière normale. Aussi, les rayons gamma peuvent-ils pénétrer profondément dans la plupart des matériaux, sans interactions. C'est ce qui les rend très pénétrants. C'est en particulier l'explication de leur dangerosité : ils peuvent pénétrer profondément dans le corps, et finissent par interagir en déposant une énergie énorme, capable de détruire toute molécule biologique. Cette propriété va rendre également difficile leur utilisation astronomique.

Les rayons gamma ont, par définition, une longueur d'onde $\lambda < 10^{-11}$ m (le diamètre d'un atome est de l'ordre de $10^{-10}$ m, donc au moins 10 fois plus gros), et une fréquence correspondante $\nu > 3\ 10^{19}$ Hz. L'énergie d'un photon gamma est donnée par $E = h \nu$. Donc $E_\gamma > h \times 3\ 10^{19}$ Hz $= 6{,}626\ 10^{-34}$ J s $\times\ 3\ 10^{19}$ Hz $= 19{,}878\ 10^{-15}$ J. On a l'habitude de caractériser les rayons de très haute énergie (gamma en particulier), non pas par leur fréquence ou leur longueur d'onde, mais par l'énergie associée. De plus, l'unité usuelle est l'électron-volt, eV, ou ses multiples le kilo électron-volt keV, et le méga électron-volt MeV. Dans cette unité, le résultat que nous venons d'obtenir s'écrit : $1{,}2407\ 10^{-1}$ MeV = 0,124 MeV, ou 124 keV. Cette valeur étant peu commode, on considérera que les photons gamma sont ceux dont l'énergie est au-dessus de 100 keV, les X étant au-dessous. Bien que leur nature profonde (électromagnétique) soit la même, les rayons X sont produits par le nuage électronique des atomes, alors que les gamma proviennent du réarrangement des nucléons à l'intérieur du noyau. C'est cette propriété qui permet de les distinguer, mais il existe d'autres mécanismes de production de rayons gamma.

**Détecteurs**

Pour détecter les rayons gamma, il faut des matériaux lourds (de masse atomique élevée) car leurs atomes sont plus gros, et restent proches. Leur probabilité d'arrêter un rayon gamma en est d'autant plus élevée. Le mécanisme de détection est *la scintillation* : un cristal scintillateur est couplé à un photomultiplicateur, qui amplifie considérablement le signal. Lorsqu'un photon gamma pénètre dans le cristal scintillateur, il finit par être absorbé par un atome, auquel il arrache un électron. L'électron est éjecté à grande vitesse, et va ioniser un atome un peu plus loin. L'atome se désexcite en émettant un photon dans le visible, qui déclenche le photomultiplicateur. Dans ce processus, toute mémoire de la

direction d'arrivée du photon gamma est perdue… Le résultat est le même, d'où que vienne le photon. Seule son énergie peut être évaluée. Les détecteurs les plus utilisés contiennent un cristal d'iodure de césium (le césium est de masse atomique 133). Pour les militaires, ce principe de détection était suffisant, mais nous verrons plus loin que ce n'est pas le cas pour les astronomes.

Ces détecteurs ne permettent pas de déterminer précisément la fréquence des photons capturés, et donc ne permettent pas de faire de la spectroscopie.

**Nature des sursauts**

La première caractéristique est la brièveté du phénomène, qui le distingue des sources observées dans la Voie Lactée en 1967. Cette brièveté en fait d'ailleurs la difficulté : le temps d'apercevoir un sursaut, il est déjà éteint…

Les paramètres essentiels pour la compréhension de ces phénomènes sont l'énergie mise en jeu, et son évolution dans le temps. Les premières observations ont fourni l'énergie reçue par le détecteur, et une courbe de lumière grossière (comptage de photons). Pour remonter à l'énergie émise, il faudrait connaître la distance de l'objet. C'est là le problème essentiel. Comment déterminer la distance ?

La première méthode envisageable consisterait à associer à l'émetteur gamma un objet connu par ailleurs, par exemple visible, et dont on connait la distance. Ceci s'appliquerait en particulier à des objets proches (dans notre Galaxie).

Si les émetteurs gamma sont lointains, le décalage vers le rouge pourrait s'appliquer, mais il n'est pas possible de le mesurer sur le rayonnement gamma lui-même. En effet, chaque photon gamma porte beaucoup d'énergie, et à puissance rayonnée égale, le nombre de photons gamma est bien moindre que celui de photons visible (dans le rapport des énergies, c'est-à-dire des fréquences, donc de l'ordre de 100.000 fois moins). On en revient donc à déterminer le décalage spectral dans une autre longueur d'onde, donc à trouver un objet associé dans cette gamma-là.

La clé du problème semble donc, au moins pour l'avenir proche, de trouver une association. Mais alors, comment l'obtenir ? Les photons gamma, comme les photons visibles, se déplacent en ligne droite (plus généralement selon une géodésique de l'espace, mais la même pour les deux). Donc, la direction d'arrivée des photons gamma et visibles émis par un même objet est la même. Alors, il *suffit* de déterminer la position précise de la source gamma pour résoudre le problème… Mais c'est là la grande difficulté !

**Direction de la source**

Les premières observations ont montré que les rayons gamma se manifestaient pendant un temps très bref (quelques secondes, d'ou le nom de sursauts), et qu'il était impossible de prévoir où et quand. Dans ces conditions, il devenait très difficile de les comprendre, les détecteurs rudimentaires ne fournissant pratiquement pas d'informations à leur sujet. Nous allons voir les différentes méthodes qui ont été utilisées pour cela, avec leurs caractéristiques (présentées par ordre de réalisation historique) :

- collimation
- optique gamma (miroirs)
- réseaux
- masque codé

**Collimation**

Pour déterminer la direction d'arrivée d'un photon gamma, la première solution consiste à **collimater le détecteur**. On place le cristal au fond d'un cylindre en matériau absorbant (du tungstène par exemple), de telle sorte que seuls les photons arrivant par l'ouverture du cylindre puissent atteindre le cristal. Ceci limite l'angle de vision du détecteur, pour lequel de nombreuses sources deviennent inaccessibles : le ciel n'est plus couvert en totalité. Mais lorsqu'un événement est détecté, on connait sa direction à quelque chose près. Plus le cylindre est étroit, meilleure sera la précision, et pire sera la couverture du ciel. On doit donc trouver un compromis entre ces deux caractéristiques. Le plus raisonnable donne un angle de vision de quelques degrés. Malheureusement, une telle grossièreté de position ne permettra pas de trouver une éventuelle contrepartie optique de l'objet émetteur, car de nombreuses sources envisageables se trouveront dans la boîte d'erreur (projection sur le ciel de l'ouverture de l'instrument). Cette méthode rudimentaire a été utilisée par de nombreuses sondes.

**Optique gamma**

Une autre méthode de détection serait de faire de l'**optique gamma**, comme on fait de l'optique dans le visible. Mais le pouvoir de pénétration des rayons gamma interdit de faire de véritables miroirs : les photons passent au travers… Sauf, si on place les miroirs en incidence rasante. Alors, le photon gamma ricoche sur le miroir comme une pierre sur l'eau. Mais ceci ne permet pas de faire de l'optique comparable à celle du visible. Pourtant, on a construit des instruments basés sur ce principe, qui ont donné de très bons résultats. Mais leur précision en direction n'est pas meilleure. Remarquez que les télescopes optiques concentrent la lumière pour améliorer la sensiblilité. En gamma, c'est pour le moment impossible.

Le physicien allemand Hans Wolter a montré (1952) que la combinaison d'un paraboloïde et d'un hyperboloïde permet de focaliser un faisceau X très près de l'axe (il a produit 3 combinaisons différentes, dite Wolter I, II et III). La combinaison Wolter I permet de placer plusieurs doublets concentriques, et donc d'augmenter le champ de l'instrument. Pour cela, les miroirs que l'on produit sont en métal lourd (plus le métal est lourd, mieux il réfléchit les rayons X), et sous une épaisseur très réduite (170 µm).

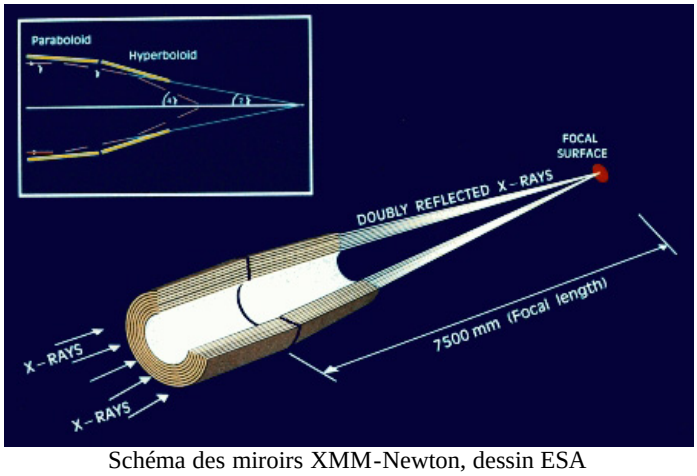
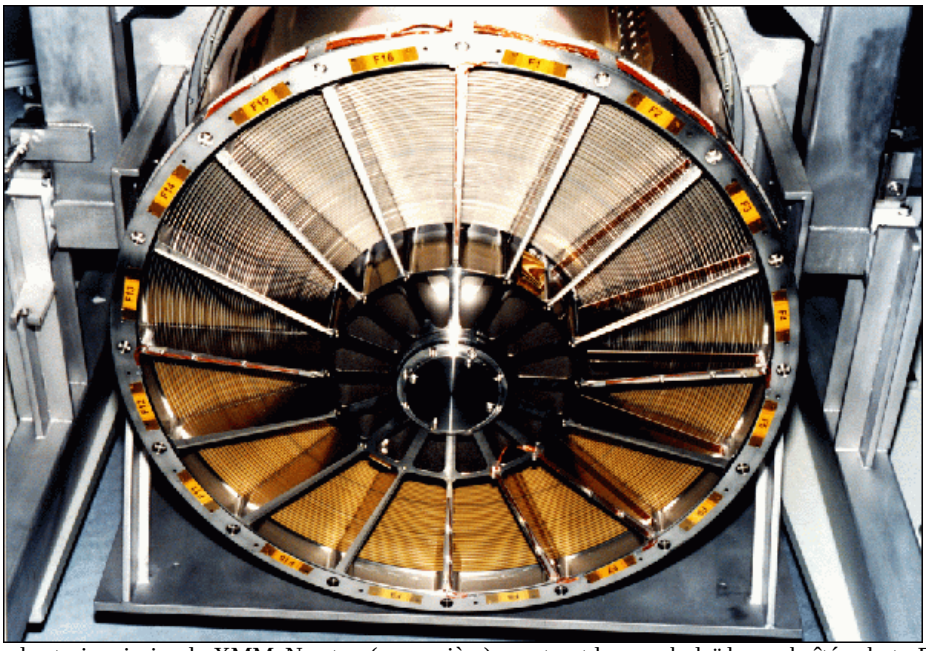


Schéma des miroirs XMM-Newton, dessin ESA

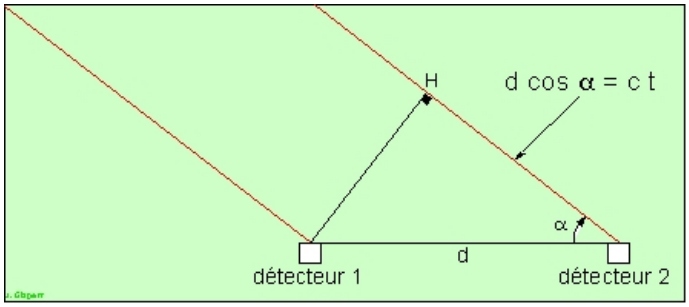
Le satellite XMM-Newton emporte trois mroirs identiques, de type Wolter I, constitués de 58 doublets de miroirs, le plus grand (extérieur) mesurant 70 cm de diamètre.


L'un des trois miroirs de XMM-Newton (vue arrière) montrant les paraboloïdes emboîtés photo ESA

Une technique astucieuse a été utilisée par les savants soviétiques à bord des sondes Venera (à destination de Vénus, vous verrez pourquoi un peu plus bas). Au lieu de mettre un détecteur, **ils en ont placé six** ! Ces détecteurs étaient colimatés par un cylindre, mais le matériau absorbant était relativement mince, et laissait passer le flux gamma, affaibli. Si un flot de photons arrive de face, il frappe le cristal de plein fouet, et le signal est très fort. S'il arrive par le côté, il traverse le matériau absorbant, et ne produit dans le cristal qu'un signal atténué. On saura donc si le flot est arrivé de face ou non. Alors, on place deux détecteurs opposés l'un à l'autre. Puis on place ainsi trois couples selon trois axes perpendiculaires. Toute bouffée de photons gamma va frapper tous les détecteurs, mais plus ou moins selon leur angle d'arrivée. L'analyse des signaux produits par les différents détecteurs permet de reconstruire la direction, avec une précision qui est de 1 à 4°, mais avec une couverture totale du ciel. Les sondes Venera conjuguaient donc la surveillance de tout le ciel à la mesure grossière de la direction.

**Réseaux**

Une technique plus coûteuse permet d'améliorer la précision de position. Il s'agit d'observer le même flux par **plusieurs détecteurs éloignés l'un de l'autre**. Une considération géométrique toute simple montre que la direction d'arrivée d'une bouffée de photons se déduit facilement si deux détecteurs (non directionnels) l'observent avec un décalage temporel. Les photons arrivant de l'infini (rayons parallèles) le retard d'arrivée sur le second détecteur dépend simplement de l'angle avec la ligne qui joint les détecteurs :



Les rayons (en rouge) étant parallèles, les deux détecteurs les recevront avec un léger décalage temporel. Lorsque le rayon de gauche arrive, celui de droite est encore au point *H*. La distance qu'il lui reste à parcourir pour déclencher le détecteur 2 est égale à $d \cos \alpha$. Parcourue à la vitesse de la lumière ($c$), elle correspond à un temps $t$ tel que $d \cos \alpha = c\ t$. On ignore l'angle $\alpha$. On peut l'obtenir si on a mesuré $t$ : $\cos \alpha = c\ t / d$, et donc $\alpha = arc \cos (c\ t / d)$.

Pour déterminer la position d'un sursaut, il faut connaître à la fois la position de chacune des sondes, et l'instant très précis d'arrivée des premiers photons (qui déterminent le début du sursaut). Ceci n'est pas simple. La mesure en elle-même est difficile à faire, car il faut des horloges bien synchronisées à bord de chaque sonde, et il faut que les premiers photons soient détectés par toutes les sondes. Si, pour des problèmes de sensibilités différentes, les premiers photons sont observés par une partie seulement des sondes, l'instant de début ne sera connu qu'avec une erreur inhérente à cette différence. Puis, lorsque les mesures sont transmises à la Terre, il faut les collecter en un endroit unique, et les analyser. Tout ceci prenait beaucoup de temps.

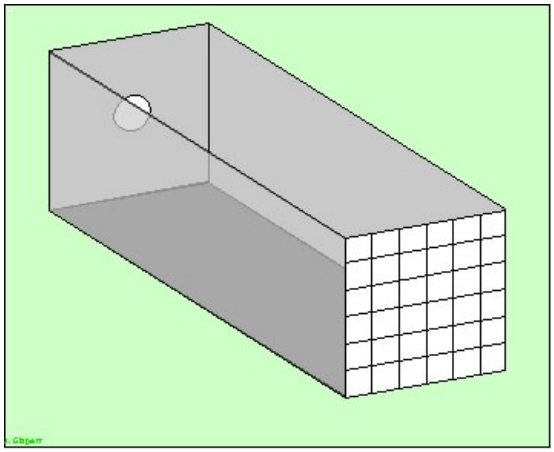
Si on place trois instruments, on détermine très bien la direction. Mais la précision dépend fortement de la distance $d$ entre les sondes…: la distance $d$ correspond à un temps de parcours de la lumière de $d = c\ t$, d'où $t = d / c$ (plus elle est grande, plus le temps $t$ est grand).

Une première expérience de ce type a été faite par les sondes Vela américaines, qui étaient lancées par paire (pour détecter les expériences nucléaires, c'étaient des satellites militaires). Les deux sondes étaient éloignées de 200.000 km à peu près, située chacune d'un côté de la Terre, et la précision était médiocre.

La solution viable était donc celle d'un **réseau interplanétaire** (voilà pourquoi les Venera ont été concernées). L'époque s'y prêtait bien, car l'engouement pour l'exploration des planètes proches était grand : Vénus, Mars étaient des cibles alléchantes, et Américains et Soviétiques se faisaient une concurence farouche pour faire les premières découvertes. Avec une base de plusieurs millions de kilomètres, la précision devient suffisante pour trouver l'objet visible éventuellement associé au sursaut. Mais, car il y a un mais… le temps nécessaire à la récupération des données en provenance de chacune des sondes (en l'absence de réseau Internet…, avec les difficultés politiques qui pouvaient s'ajouter quand il s'agissait de franchir le rideau de fer, dans un sens ou dans l'autre), atteignait deux mois ! Si un éclair visible s'était manifesté, il s'était eteint depuis longtemps lorsqu'on pouvait tourner les télescopes vers lui. Ceci n'était pas encore la solution, mais la laissait entrevoir : il fallait observer un sursaut, en déterminer immédiatement la position précise et la transmettre à des télescopes optiques disponibles pour observer une éventuelle contrepartie.

**Masque codé**

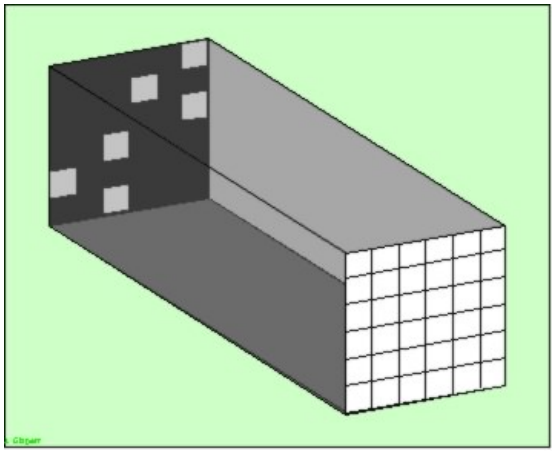
Il a fallu développer une nouvelle méthode pour déterminer la position précise du sursaut. Imaginons de diminuer l'ouverture du télescope. Si on la diminue jusqu'à un petit trou, on obtient le sténopée des anciennes chambres noires. On peut former une image de bonne qualité, mais au détriment de la luminosité. Jusqu'à maintenant, les détecteurs que nous avons considérés n'avaient qu'un seul pixel (le cristal détecteur ; on est loin des 5 à 15 méga pixels des appareils photo numériques grand public…). Si on remplace ce détecteur primitif par une gamma caméra, on obtient un véritable appareil photo gamma (sans objectif évidemment).



Télescope à sténopée et camera

La lumière entre par le sténopée (en haut à gauche du dessin), et vient sur la grille sensible (en bas à droite, au fond du télescope). Si la source est ponctuelle, un seul pixel sera excité, et la position de la source sera bien définie, avec une erreur qui ne dépend que de la taille des pixels, et de la distance du sténopée.

Avec ce principe, on obtient une excellente résolution (quelques minutes d'arc, ou même moins), mais une faible sensibilité. Si on perce un second trou, on augmente la lumière admise, mais on brouille l'image. Toutefois, on a montré qu'on peut percer de nombreux trous, à condition de les placer selon une mosaïque bien précise : c'est le **masque**. Alors, l'image produite est toute brouillée, mais une opération mathématique nommée *déconvolution* permet de reconstruire l'image correcte. Ainsi, on a gagné sur les deux tableaux : sensibilité et précision. C'est ce principe qui a révolutionné l'astronomie gamma, en passant la précision des positions de 10° à quelques minutes, ou quelques dizaines de secondes.



Le sténopée est remplacé par le masque codé

Sur le dessin, le masque présente une structure répétitive, dont l'utilisation permet de simplifier grandement les calculs pour effectuer la déconvolution. C'est pourquoi on lui donne le nom de *masque codé*. On pourrait aussi utiliser des masques aléatoires, mais les caculs seraient plus longs. La technique du masque codé a été imaginée dans les années 70.

**Les observations**

Les premières observations ont amené à la découverte des sursauts gamma. Elles n'avaient qu'un but militaire, pour lequel la direction importait peu. Les américains ont lancé à partir de 1963, une série de satellites, de nom générique *Vela* (de l'espagnol *veilleur*). Les Vela étaient lancés par couples, chacun observant une moitié du ciel : en orbite autour de la Terre, ils ne pouvaient pas voir ce qu'elle leur cachait, en particulier une explosion éventuelle de l'autre côté ; c'est ce qu'observait l'autre satellite. On n'envisageait pas la possibilité de phénomènes naturels émettant de tels rayonnements, donc il n'était pas nécessaire de déterminer précisément d'où venaient les rayons gammas éventuellement captés. Par contre, une couverture complète de l'environnement terrestre était primordiale.

Le premier événement reconnu comme tel a été enregistré le 2 juillet 1967. Entre juillet 69 et juillet 72, 16 événements ont été enregistrés, par les **deux** satellites de la paire ! Ces événements étaient donc visibles de deux positions opposées par rapport à la Terre, et donc ne provenaient pas de cette dernière. L'application du schéma donné plus haut (pour expliquer l'utilisation des réseaux) a permis de déterminer la position de l'émetteur à 10 degrés près. Et ces sources n'étaient effectivement pas dans l'environnement terrestre. Elles étaient bien naturelles. C'est ainsi que les sursauts gamma ont été identifiés. La première publication est parue le 1$^{er}$ juin 1973.

Un autre instrument était en orbite autour de la Terre en même temps. Il était destiné à la préparation des missions Apollo, en surveillant le Soleil, afin de prévoir les éruptions qui auraient pu être fatales aux astronautes. Pour atteindre son but, cet instrument devait déterminer l'énergie des photons gamma émis par le Soleil. Il a fourni des spectres de 6 des sursauts connus. Bien évidemment, les soviétiques étaient eux aussi sur la piste des sursauts gamma, mais leurs publications ne franchissaient par le rideau de fer.

Les 16 sursauts connus étaient des émissions brèves, comprises entre 0,1 s et 30 s. Leurs courbes de lumière (intensité en fonction du temps), les séparait en deux classes :

- courbes simples, présentant une montée brusque, suivie d'une descente exponentielle ;
- courbes complexes, avec des pics de durée parfois inférieure à 0,1 s.

Cette description apporte une information capitale sur la source : puisqu'elle varie en moins de 1/10$^{e}$ de seconde, sa dimension est inférieure à 0,1 c = 0,1 s × 300.000 km/s = 30.000 km (c'est la dimension maximale de la zone émissive ; ce n'est pas forcément la dimension de l'objet responsable, qui peut être plus petit). Elle est minuscule, à peine plus grosse que la Terre. Quels sont les objets connus, de si petite taille, et possédant suffisamment d'énergie pour émettre des rayons gamma ? Ceci donne une première piste, celle des objets compacts, étoiles à neutrons ou trous noirs (d'ailleurs, le Crabe était déjà associé à une émission gamma).

**Evénement du 5 mars 1979**

Cet événement est à plusieurs titres extraordinaire, et son impact sur la connaissance des sursauts gamma est capital.

A cette époque, de nombreux instruments gamma étaient en vol, à bord de diverses sondes interplanétaires européennes, soviétiques, ou américaines, dans le voisinage de la Terre et de Vénus. Neuf de ces instruments ont enregistré le sursaut, dans un intervalle de 25 secondes. Ils ont pu, grâce à leurs grandes capacités d'analyse temporelle, déterminer précisément l'instant de début. Ils ont été facilités dans ce domaine par la montée extrêmement rapide du signal, qui s'est produite en moins de 0,25 ms ! Ceci facilite la détermination de l'instant précis de début du signal. Cette précision a permi de calculer, connaissant la position exacte des différentes sondes, une position très précise du sursaut gamma dans le ciel. Mais il a fallu deux mois pour réunir les données et les traiter… Bien que tout ait été parfait sur le plan scientifique, il n'en a pas été de même sur le plan politique, ce qui a entraîné ce retard. La précision atteinte est de 1,25' d'arc, soit une centaine de fois mieux que ce que l'on faisait à l'époque avec un instrument isolé.

A bord des sondes Venera, le compteur de rayons gamma enregistrait un flux à peu près constant d'une centaine de coups par seconde. Mais brutalement, le taux de comptage est passé à 200.000 coups par seconde ! Les photons responsables étaient des gammas durs (haute énergie). Cette bouffée a été très brève (0,2 s), mais elle a été suivie par un flot de rayons gamma mous (énergie plus basse).

Après cet épisode, et pendant toute la durée (4 ans) de survie de leur instrument, les soviétiques ont enregistré 16 nouveau sursauts provenant de la même source. Tous étaient bien moins intenses et bien

plus courts que le premier.

Les sondes concernées sont : Venera 11 et 12, Prognoz 7 (Union Soviétique), Helios 2 (Allemagne), Pioneer Venus Orbiter, les satellites militaires Vela, Einstein (USA).

Mais l'important est que la boîte d'erreur, déterminée ainsi, contenait un reste de supernova, nommé N49 (SNR 0525-66.1). Un objet assez exotique se trouvait donc au même endroit que l'événement inconnu. La probabilité qu'il en soit l'origine était donc très forte, et l'association pratiquement acquise.

Mieux, ce sursaut était plus de 10 fois plus intense que les précédents. Il contenait beaucoup de photons de basse énergie. Mais tout ceci, bien que ce soit des données de type nouveau, qui précisaient la nature du phénomène, a été encore amélioré par la situation de l'objet dans le Grand Nuage de Magellan. Cette galaxie voisine de la nôtre est à 170.000 A.L. Pour la première fois, on connaissait la distance d'un sursaut gamma ! De la mesure de l'énergie reçue, il devenait possible de déduire l'énergie émise : elle s'élève à plus de $10^{36}$ Joules !

Si la source se trouvait dans notre Galaxie, à quelques centaines d'années-lumière seulement, l'énergie qu'elle rayonne, déduite de sa distance et de l'énergie effectivement reçue, se trouverait en-dessous de la limite d'Eddington d'une étoile normale. La source pourrait donc être une étoile tout à fait ordinaire, même si elle devait être de grande masse.

Mais sa situation dans le Grand Nuage de Magellan ruinait cette idée, car la luminosité réelle de l'objet était **un million de fois supérieure à la limite d'Eddington**. Aucune étoile normale ne pourrait exister dans de telles conditions.

En 0,2 secondes, le sursaut gamma du 5 mars 1979 a émis autant d'énergie que le Soleil en dispense pendant 10.000 ans !

Mais ce n'est pas fini, trois autres sursauts ont été enregistrés : le lendemain 6 mars (14 h 30 après le premier), et les 4 et 24 avril de la même année. Ces répliques étaient 2.000 fois moins intenses que le premier sursaut, et n'ont pu être observées que par les instruments soviétiques *Konus*, à bord des sondes *Venera*, seuls capables d'une telle sensibilité. L'événement était donc répétitif. Par conséquent, **il n'entraîne pas la destruction de sa source**.

Revenons à la montée en énergie du sursaut. En 0,25 ms, il atteignait sa valeur maximum, donc présentait un temps de variabilité inférieur à 0,25 ms. On sait très bien que la dimension d'un objet qui varie aussi vite est inférieure à 0,25 ms-lumière, c'est-à-dire $0{,}25\ 10^{-3}$ s × 300.000 km $s^{-1}$ = 0,25 × 300 km = 75 km… Vraiment, l'objet responsable de cette émission gamma est minuscule. Seul un objet compact, comme une étoile à neutrons ou un trou noir, peut être aussi petit et rayonner autant d'énergie.

Mieux encore, la phase de décroissance du sursaut a été périodique, avec une période de l'ordre de 8 secondes. Une telle périodicité, surtout si on l'applique à un objet compact, fait aussitôt penser à la rotation d'un astre dont l'axe magnétique ne coïncide pas avec l'axe de rotation, à un pulsar.

La périodicité de 8 secondes du signal émis élimine le trou noir des hypothèses envisageables. En effet, un trou noir n'a pas de structure apparente, et ne peut donc pas produire par lui-même une telle périodicité.

Donc, l'observation de ce phénomène isolé faisait déjà penser à une étoile à neutrons qui serait capable d'émettre des rayons gamma par bouffées. Mais comment expliquer l'intensité impressionante de l'émission ?

Il y avait un autre problème : la nébuleuse N49 correspondait à un reste de supernova récent, de moins de 5.000 ans. Or l'étoile à neutrons n'est pas au centre ! En si peu de temps, elle ne devrait pas pouvoir s'éloigner autant. De plus, un pulsar naît très rapide, et ralentit progressivement en rayonnant sur ses réserves d'énergie de rotation. Mais ceci prend beaucoup de temps, ce ralentissement est peu efficace. Ici, il n'explique pas une période aussi longue que 8 secondes.

Mais en général, on considère que l'explosion d'une supernova est à symétrie sphérique. Or les gaz éjectés possèdent une quantité de mouvement, qu'ils empruntent à l'étoile. Si maintenant on accepte l'idée que l'explosion pourrait ne pas être symétrique, alors il pourrait y avoir beaucoup plus d'énergie évacuée d'un côté de l'étoile que de l'autre. Et tout se passe comme si les couches éjectées par l'explosion étaient les gaz éjectés par la tuyère d'une fusée : ils communiquent une accélération à l'étoile. Une étude précise montre que l'étoile à neutrons qui subsiste de l'explosion pourrait très bien être accélérée à 1.000 km $s^{-1}$. Alors, une telle vitesse explique parfaitement que l'étoile à neutrons responsable du sursaut gamma se trouve si loin de son lieu de naissance. Voilà un problème résolu.

Le problème de la rotation lente est plus difficile. Mais si on considère que l'étoile est devenue une *magnétar*, avec un champ magnétique énorme, alors ce champ est tout à fait capable de ralentir très vite la rotation de l'étoile en communiquant son moment de rotation à la nébuleuse qui l'entoure.

**Magnétar**

Encore un nouveau type d'astre, dont le nom est formé sur le modèle de *pulsar*. Magnétar signifie évidemment *magnetic star* (nom donné par Duncan et Thompson ; le nom provenant d'un sigle anglais, il ne faudrait pas mettre d'accent à *magnetar*). Ce nom pourrait passer pour un pléonasme, puisque toute étoile développe un champ magnétique plus ou moins intense. Mais si on prend la peine de le préciser, c'est que l'intensité du champ atteint ici des sommets.

On imagine être en présence d'une supernova qui a explosé, et qui laisse un résidu sous la forme d'une étoile à neutrons. On sait très bien que le moment angulaire de rotation se conserve, et qu'il entraîne l'étoile à neutrons dans un ballet infernal, lui faisant faire parfois 1.000 tours par seconde… Mais juste avant l'explosion, l'étoile possédait déjà un champ magnétique.

Lorsque son noyau s'est contracté, le champ magnétique a été confiné dans un volume de rayon de plus en plus petit (divisé par 100.000), et s'est renforcé (comme le carré du rayon, donc par un facteur $100.000^2$ = 10.000.000.000). Par conséquent, partant d'un champ magnétique standard pour une étoile, on s'attend à observer un champ extrêmement puissant. Mais pourtant, si énorme soit-il, il n'est pas suffisant pour expliquer le débordement d'énergie des sursauts gamma. Alors ?

L'explication semble se trouver dans la physique de l'effondrement d'une étoile en étoile à neutrons. Lorsque la contraction commence, les simulations sur ordinateur montrent qu'une convection importante se développe dans l'enveloppe de l'étoile, convection n'ayant rien à voir avec celle des étoiles de la Séquence Principale. La période de convection (temps de cycle d'un élément de matière), est de 10 millisecondes. La densité du milieu est de $10^{14}$ g $cm^{-3}$. Bien que la matière en mouvement soit essentiellement neutronique (sans charge électrique), une petite fraction, de quelques pour cent, est encore constituée de protons et d'électrons. Elle suffit à produire un champ magnétique par effet dynamo, en considérant le même rendement de 10 % que dans le Soleil : 10 % de l'énergie des particules sont prélevés pour produire le champ magnétique. Ce champ s'ajoute au champ contracté de l'étoile. Mais la convection ne dure qu'une dizaine de secondes, car l'astre se refroidit très vite par perte de neutrinos. Lorsqu'elle cesse, elle ne produit donc plus de champ magnétique, mais celui qu'elle a engendré juste avant reste figé dans la matière maintenant stabilisée. Il s'ajoute donc au champ initial. Les simulations montrent que la convection peut produire un champ 1.000 fois plus intense qu'en son absence. Et là, le compte est bon. Ce champ exacerbé est suffisant pour expliquer les jets de matière et la production de rayons gamma.

Mais les pulsars *ordinaires* n'ont pas un champ magnétique si violent. D'où vient que deux étoiles fort semblables avant l'effondrement puissent donner deux astres aux propriétés si éloignées ? Une réponse est donnée par une théorie qui prend en compte la période R de rotation de l'étoile (après effondrement, mais liée à la période de rotation avant l'effondrement), et celle C des mouvements convectifs dans l'étoile à neutrons naissante. Si R est inférieure à C, l'étoile tourne très vite, la convection est entraînée et se développe globalement dans l'étoile, en bloc en quelque sorte. La rotation joue le rôle de chef d'orchestre pour synchroniser tous les mouvements. Les mouvements de convection produisent un effet dynamo, amplifié par la synchronisation.

Dans le cas contraire, la convection se développe localement seulement, chaque région indépendamment des autres ; chaque région produit donc son propre champ magnétique, les différents champs locaux ne partagent pas la même orientation, et s'annulent les uns les autres.

La période de la convection étant de l'ordre de 10 ms, une étoile à neutrons en formation dont la période de rotation est plus petite (plus de 100 tours par seconde), deviendra une magnétar. Dans le cas contraire, ce sera un simple pulsar. Le pulsar du Crabe tourne actuellement en 33 ms. D'après le ralentissement mesuré, on estime à 20 ms sa période au moment de sa formation (en 1054). Elle était donc bien supérieure aux 10 ms de la période de convection, ce qui justifie que le Crabe ne soit pas une magnétar.

Cette théorie explique donc la rotation lente de l'étoile à neutrons. Lorsqu'elle s'est formée, elle était rapide, et tournait plus de 100 fois par seconde. La convection y a développé un champ magnétique 1.000 fois plus intense que dans un pulsar, c'est devenu une magnétar. Le champ magnétique, en interagissant avec le milieu dans lequel baigne l'étoile, l'a ralentie suffisamment en transférant son moment de rotation à la nébuleuse environnante. Ce mécanisme est efficace, et justifie qu'une étoile à neutrons de moins de 5.000 ans puisse tourner en plus de 8 secondes.

Le tableau ci-dessous, pour fixer les idées, donne l'intensité du champ magnétique produit par quatre sources différentes. La seconde seule est artificielle, et correspond à ce qu'on sait faire de plus puissant aujourd'hui : c'est un électro-aimant équipant l'instrument Atlas à Genève, au LHC.

| source | intensité | rapport/Terre |
|---|---|---|
| Terre | $4{,}7\ 10^{-5}$ T | - |
| Aimant | 0,1 T | 2.000 |
| Electro-aimant supraconducteur (LHC) | 10 T | $10^5$ |
| Etoile normale (Séquence Principale) | $10^2$ T | $10^6$ |
| Etoile à neutrons normale | $10^8$ T | $10^{13}$ |
| Magnétar | $10^{11}$ T | $10^{16}$ |

**Energie dissipée**

Mais le champ magnétique d'une magnétar explique aussi l'énergie dégagée par le sursaut gamma qui est à l'origine de cette étude. Il faut se remettre en mémoire la structure d'une étoile à neutrons. Elle comprend une croûte solide de fer, qui surmonte un océan de neutrons. Cette croûte de fer est naturellement sensible au champ magnétique, qui la déforme et l'étire. Sous ces tensions, à la mesure du champ qui les produit, la croûte de fer arrive à casser à certains endroits. Il se produit les mêmes phénomènes que dans un tremblement de Terre, bien que ceux-ci trouvent leur énergie dans la tectonique des plaques et non dans le magnétisme. L'énergie dégagée en un temps extrêmement bref (de l'ordre de la milliseconde) sature l'espace entourant l'étoile. Il y a formation de paires électron-positron en abondance, et émission de rayons gamma doux.

> L'analyse des sursauts a montré qu'ils présentent le même comportement statistique que les tremblements de Terre ! Les plus intenses sont très rares, les plus fréquents sont de faible énergie. C'est ce qui a mis sur la piste de l'explication.
>
> De plus, l'évolution de l'énergie ressemble beaucoup à celle de nombreux systèmes proches d'un point de rupture, comme la neige avant une avalanche (ou la croûte terrestre avant un tremblement de Terre). La moindre perturbation provoque une transition brusque.

Les sursauts gamma de faible intensité sont bien expliqués ainsi. Mais pas les monstres comme celui du 5 mars 1979. Dans certains cas, le

champ magnétique devient globalement instable, et subit un réarrangement complet. C'est analogue à ce qui se passe dans l'atmosphère du Soleil, lorsque les lignes magnétiques se rapprochent, et finissent par se rejoindre en éjectant une boucle magnétique (reconnexion magnétique) qui s'élève en emportant du gaz chaud : ce sont les éruptions solaires. La formation des paires électron-positron est intense, les rayons gamma émis également. Tout ceci forme une boule de plasma, dont une partie s'élève en se refroidissant, le reste étant piégé par le champ magnétique. Les rayons gamma durs sont produits au tout début, par la reconnexion elle-même ; le refroidissement de la boule de feu donne au contraire des rayons gamma mous, pendant un temps bien plus long. La partie de la boule qui reste piégée dans le champ magnétique s'évapore progressivement, en produisant un rayonnement X.

**SGR, Sursauteurs gamma**

Lors d'une réunion tenue à Toulouse en juillet 86, les spécialistes ont décidé de donner un nom à ce genre d'objet, et se sont mis d'accord sur le terme *SGR* (*Soft Gamma Repeater*). Cette locution désigne donc un émetteur à répétition de rayons gamma mous (basse énergie). Pourtant, des gamma durs sont produits au début du sursaut. Mais bien que le terme ne soit pas parfait, c'est celui qui est utilisé. Les SGR sont nommés en français *sursauteurs gamma*.

Disposant enfin d'un nom générique associé au type d'objet, il fallait trouver un nom particulier pour chacun. Deux méthodes sont en vogue en astronomie pour fabriquer des noms : l'utilisation de la date, ou celle des coordonnées. Puisque les sursauts considérés sont répétitifs, la date ne convient pas. Ce sera donc la position sur le ciel qu'on choisira. Un objet sera désigné par les lettres SGR suivi de ses coordonnées équatoriales : ascension droite (deux chiffres pour l'heure, deux chiffres pour les minutes), suivi de la déclinaison (le signe + ou -, deux chiffres pour les degrés).

Le sursaut qui a servi pour tant d'études, celui du 5 mars 1979, est situé à 5 h 26 mn d'ascension droite, et -66° de déclinaison. Il est ainsi nommé SGR 0526-66. Etant de forte intensité, on conclut qu'il a été le résultat d'une reconnexion magnétique dans une magnétar. L'absence de contrepartie optique interdit d'interpréter cet objet comme une étoile à neutrons entourée d'un disque d'accrétion. La présence d'un tel disque ne pourrait passer inaperçue, ceci a été démontré par D.L. Kaplan en 2001.

D'autres magnétars ont été observées, associées à divers sursauts. En particulier SGR 1806-20, entre le Sagittaire et le Scorpion, est associé au reste de supernova G10.0-0.3 qui présente un pulsar jeune au centre, semblable au Crabe. Il se trouve à 50.000 AL de nous, et se trouve dans une grande région H II. Les rayons X émis par ce sursauteur ont une périodicité de 7,47655 s, ce qui précise l'association avec une étoile à neutrons. Sur les données reçues du satellite japonais *Asca*, comparées à celles de *RXTE*, la variation de période sur trois ans a été mesurée. La période a augmenté de 8 ms. Si l'objet n'était qu'un pulsar, ralentissant par la perte de l'énergie rayonnée, son éclat serait bien inférieur à ce qui est observé. Il faut bien une magnétar pour expliquer l'éclat reçu. Le 27 décembre 2004, cette magnétar a émis le sursaut le plus violent observé à ce jour : il a été 35 fois plus énergétique que celui du 5 mars 79. Ce sursaut a eu des conséquences sur la Terre : le taux d'électrons libres dans la haute atmosphère est passé brusquement de 4 / $m^3$ à 400.000 / $m^3$.

SGR 1900+14, associé au reste de supernova G 42.8+0.6, a donné un sursaut le 27 août 1998 comparable à celui du 5 mars 1979. Sa période est de 5,16 s. Il s'agit bien encore d'une magnétar.

| émetteur | date | énergie | période | distance | constellation |
|---|---|---|---|---|---|
| SGR 1900+14 | 27/08/98 | 2 $10^{37}$ J | 5,17 s | 16.000 AL | Aigle |
| SGR 0526-66 | 5/03/79 | 6 $10^{37}$ J | 8 s | 180.000 AL | Dorade (GNM) |
| SGR 1806-20 | 27/12/04 | 2 $10^{39}$ J | 7,46851 s | 50.000 AL | Sagittaire |

**Physique fondamentale**

L'étude de ces objets est très intéressante, car elle ouvre une voie d'investigation pour les physiciens : il est impossible sur Terre de produire des champs magnétiques aussi forts, et par conséquent d'expérimenter ce qui pourrait se produire dans un tel environnement. On est dans la même situation qu'avec les rayons cosmiques, qui atteignent parfois $10^{20}$ eV, plusieurs ordres de grandeur au-dessus de ce qu'on peut faire dans les grands accélérateurs de particules. Encore une fois donc, la physique expérimentale est dépassée, et la Nature nous offre le meilleur laboratoire possible. L'ennui dans ce genre de situation est l'aspect aléatoire : un événement se produit lorsque les conditions nécessaires sont réunies, pas lorsqu'on appuie sur un bouton… Et de plus il se produit où il peut, sans nous prévenir en général !

Pour donner une idée des problèmes de physique que cela pose, considérez un atome, avec son cortège d'électrons. Les électrons étant des particules chargées, sont sensibles à un champ magnétique. Dans les conditions habituelles, le champ produit par le noyau est prépondérant, et le cortège électronique prend une symétrie sphérique. Mais dans les champs extrêmes des magnétars, le cortège électronique serait très déformé, prenant une forme allongée dans le sens des lignes de champ. Que se passe-t-il alors ? La physique que nous connaissons bien s'applique-t-elle sans modificationsnbsp;?

## *Autres sursauts*

Les instruments placés à bord des diverses sondes spatiales ont détecté beaucoup de sursauts (quelques 500 sur 20 ans). Mais seuls quelques uns ont été étudiés particulièrement et ont amené à la définition des magnétars et des SGR. Ces sources présentaient une attaque très brusque, rendant beaucoup plus facile la détermination de leur début, donc de leur position. A partir de là, leur étude dans d'autres longueurs d'onde a été possible, et a débloqué la situation. Pour les autres sursauts, de loin les plus nombreux, le mystère subsiste. C'est à eux que les observations présentées ci-dessous se sont attaquées.

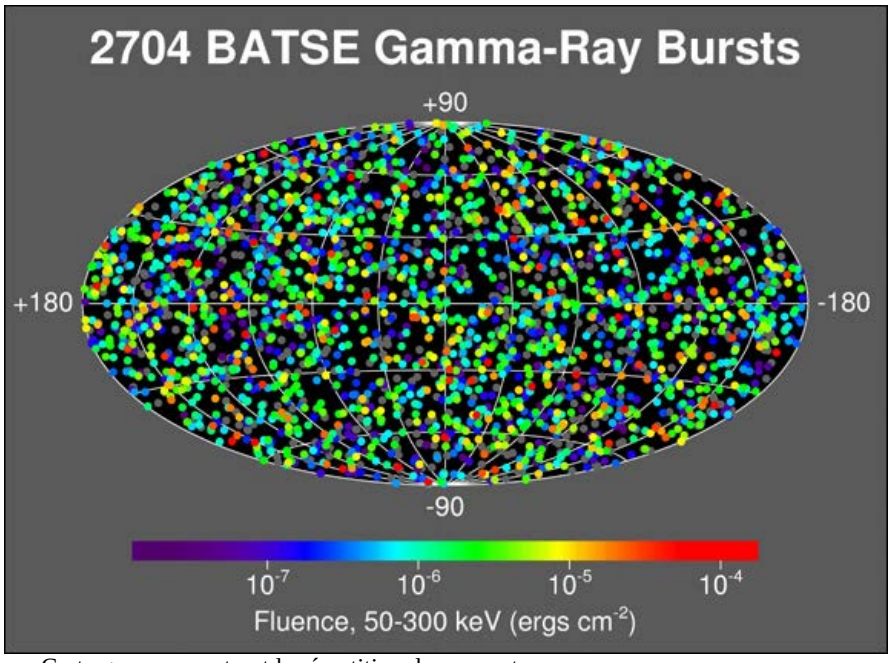
En 1976, le satellite européen *cosB* a fourni la première carte galactique en rayonnement gamma. Il a également établi un catalogue de sources, comprenant deux pulsars et un quasar à faible décalage spectral.

**Instrument BATSE**

Les sursauts gamma étudiés jusqu'ici sont associés à des restes de supernovæ, et le modèle théorique (SGR) implique la répétition des sursauts. Cette explication est-elle générale ? On nomme *GRB* (*Gamma Ray Burst*) un sursaut qui ne présente pas de répliques. La différence entre GRB et SGR est-elle réelle ? Considèrons un sursaut répétitif, comme SGR 1806-20, qui est relativement proche. En supposant qu'il soit beaucoup plus loin, son premier sursaut serait encore visible, mais les répétitions seraient bien trop faibles pour être détectées. Evidemment, la répétition observée n'est pas le critère pour distinguer entre les événements, et il restait du travail pour tout comprendre. On avait choisi les plus faciles à étudier ! Le profil temporel du sursaut devrait être un meilleur critère.

Les américains, qui n'avaient pas eu beaucoup de succès sur le plan observationel, ont voulu frapper un grand coup, et résoudre définitivement le problème… Ils ont enfin repris le principe des soviétiques, d'utiliser des instruments à réponse anisotrope (comme les *Konus*). Ils ont construit en 1991 le satellite *CGRO* (*Compton Gamma Ray Observatory*) spécialement destiné à l'étude des sursauts gamma, et comprenant plusieurs instruments. Tous les instruments avaient un pouvoir séparateur de l'ordre de plusieurs degrés, rendant illusoire toute identification de source. La masse de ce satellite atteignait 15.620 kg, excusez du peu… L'instrument qui nous intéresse particulièrement est *BATSE* (*Burst And Transient Source Experiment*). Il était 10 fois plus sensible que les instruments qui l'ont précédé.

Le satellite américain CGRO a échoué dans son but de résoudre les sursauts gamma, n'ayant rien apporté de nouveau dans leur explication. Toutefois, il a produit une carte du ciel, donnant la position approximative des 2.704 sursauts enregistrés, qui est d'un grand intérêt. La totalité des observations précédentes cumulait à peine 500 événements sur 20 ans.




Carte gamma montrant la répartition des sursauts image G. Fishman et al., BATSE, CGRO, NASA

Les couleurs des points sont des codes, correspondant au flux énergétique reçu = énergie totale pendant toute la durée du sursaut. Les sursauts longs et brillants sont en rouge, les faibles et courts en violet. Les points gris n'ont pu être mesurés. La taille des confettis sur la carte montre la faible précision de l'instrument, qui détermine les positions à quelques degrés près seulement. La répartition sur le ciel est pertinente, mais les positions inutilisables. Les observations de BATSE sont toutes comparables, puisqu'obtenues avec le même instrument, alors que les autres étaient acquises par une kyrielle d'instruments différents, induisant des erreurs dans la comparaison.

Cette carte est établie en coordonnées galactiques. Le centre de la Galaxie est donc au centre de l'image, et l'équateur galactique (le plan de la Galaxie) est la ligne centrale horizontale. Cette disposition permet de visualiser d'un coup d'œil le principal renseignement obtenu : il n'y a aucune concentration dans le plan galactique, mais bien une répartition aléatoire sur toute l'étendue du ciel. Si les sursauts sont produits par des restes de supernovæ, ils doivent être regroupés dans le plan de la Voie Lactée, puisque c'est là que se trouvent les étoiles pouvant leur donner naissance. Cette carte montre que ce n'est absolument pas le cas. Les sursauts proviennent de toutes les directions de l'espace, donc ils peuvent avoir leur origine dans des galaxies lointaines. Si on les voit de si loin, quelle est leur énergie ?

*Les sursauts gamma observés ne proviennent pas d'étoiles à neutrons, comme les études précédentes des SGR le donnaient à penser.*

Attention, cette répartition uniforme ne s'applique naturellement pas aux SGR, qui ne sont qu'un tout petit nombre, n'influencent pas les statistiques, et restent situés au voisinage du plan galactique.

BATSE a observé une moyenne de 0,8 sursaut par jour (2.704 sursauts en 9 ans). Puisque ces sursauts proviennent de l'Univers tout entier, ce sont des phénomènes rares ! **Brillants malgré l'éloignement et rares**, voici leurs caractéristiques essentielles.

Enfin, BATSE a classé les sursauts observés en deux catagories :

- **les courts**, dont la durée est comprise entre quelques millisecondes et quelques secondes (moyenne 0,3 s) ;
- **les longs**, dont la durée va de quelques secondes à quelques centaines de secondes.

L'homogénéité des sources autour de nous peut s'expliquer de trois façons différentes :

- soit les sources sont très proches, et entourent le système solaire ;
- soit elles constituent un halo autour de notre Galaxie, et sont donc relativement proches (moins de 300.000 AL) ;
- soit elles ont une origine lointaine, à des distances cosmologiques.

La première hypothèse est facilement éliminée, car des objets aussi énergétiques et si proches seraient forcément détectés par ailleurs, ce qui n'est pas le cas.

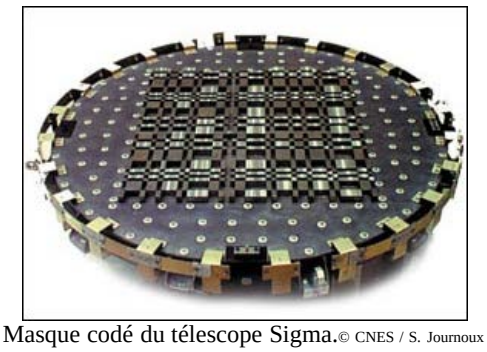
Dans les données de BATSE, les sursauts les plus faibles, qui pourraient être également les plus lointains, sont aussi les plus longs. Si cette propriété est réelle, et non due à un effet observationnel, elle pourrait indiquer une distance cosmologique. En effet, les sursauts les plus lointains sont donc animés de vitesses très importantes par rapport à la Terre, par l'effet de l'expansion de l'Univers. Et la Relativité nous dit que les durées mesurées augmentent avec la vitesse. **C'est donc un indice qui suggère une origine cosmologique**.

**Sigma et BeppoSAX**

Après l'échec américain pour expliquer les sursauts gamma, c'est un tout modeste satellite européen (coopération italo-hollandaise) qui a résolu le problème. Mais pour y parvenir, il a utilisé un principe qui avait été développé avant dans les rayons X.

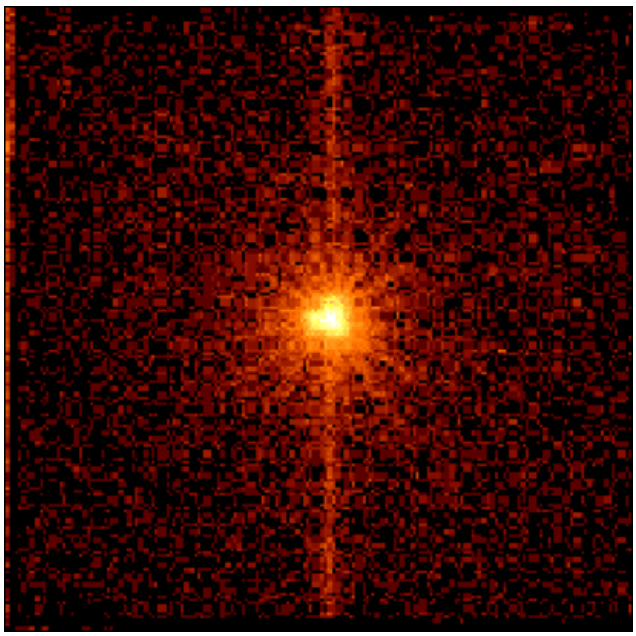
Quel est le problème ? Faire de l'optique en rayons X durs ou en gamma. Or ceci est impossible, puisque ces rayons pénètrent dans la matière. Il faut donc trouver un autre moyen de déterminer la direction précise d'une source. Le principe du masque codé a été appliqué en rayons X durs par les anglais, dans l'instrument XRT à bord de Spacelab en juillet 1985

Mais dans le domaine gamma, il a été mis en œuvre pour la première fois pas une équipe française (Jacques Paul), sur l'instrument **Sigma** (*Système d'Imagerie Gamma à Masque Aléatoire*). Remarquez que le sigle sonne bien, mais ne correspond pas à la réalité ! En effet, c'est un masque codé qui était utilisé sur Sigma et non un masque aléatoire… Cet instrument était dévolu à trouver la position précise d'une source gamma observée. Mais pour des raisons de poids en particulier, sa couverture sur le ciel était limitée à 0,5 % du ciel. Aussi la probabilité d'observer un sursaut gamma pendant la durée de vie du satellite était-elle très faible, et effectivement il n'en a observé aucun ! Sigma utilisait une caméra à scintigraphie, développée pour l'imagerie médicale. Ceci a singulièrement limité les coûts de production. Son pouvoir séparateur était de 15', et la précision de position d'une source était d'une minute seulement ! Donc quelques 100 fois mieux que CGRO.



Masque codé du télescope Sigma.© CNES / S. Journoux

Ce télescope a été envoyé à bord du satellite soviétique Granat (dédié aux rayons gamma) en 1990. Il a rapidement détecté une nouvelle source gamma proche du centre de notre Galaxie, et pu déterminer sa position à 27" d'arc près ! Cette excellente position a permi de l'associer à la source X IE 1740.7-2942 cataloguée par le satellite Einstein. Or le spectre de cette source X évoquait une étoile en orbite autour d'un trou noir, alimentant un disque d'accrétion. Grâce à cette excellente mesure de position, on a pu l'associer également avec une radio-source, observée au VLA, dont la structure était à peu près connue : l'image radio montre une source compacte, de laquelle partent deux jets opposés, terminés chacun par un lobe. Ainsi, on observe un objet qui présente la même structure qu'un quasar, mais qui se trouve dans notre Galaxie, à faible distance, et dont le centre est occupé par un trou noir de masse stellaire seulement. Ces ressemblances ont suggéré le nom de *microquasar*, qui a donc été donné à ce type d'objet.



Microquasar GRS 1758-258, XMM-Newton, photo Andrea Goldwurm

Le champ de cette image est de 11', autour du trou noir qui alimente le microquasar GRS 1758-258. La ligne verticale est un artefactdû à l'intensité de la source.

Plus un trou noir est massif, plus sa densité est faible. Ceci permet de comprendre que le disque d'accrétion (à son bord interne) autour d'un trou noir de masse stellaire est plus chaud que celui qui entoure un trou noir super massif, comme ceux présents au centre des quasars. C'est pourquoi les quasars émettent beaucoup de lumière dans le visible, et dans l'UV, alors que les microquasars émettent fortement dans des longueurs d'ondes bien plus courtes, caractéristiques de températures beaucoup plus élevées.

Après Sigma, le satellite italien SAX (*Satellite per l'Astronomia a raggi X*) était doté lui aussi d'un instrument à masque codé. Mais en plus, il emportait un instrument à large couverture (du même type que les premiers détecteurs installés sur les sondes interplanétaires), et un faisceau de caméras à champ étroit. Le but était de détecter un sursaut à l'aide de l'instrument à large couverture, qui donne une précision de quelques degrés. A partir de là, l'une des caméras à champ étroit doit observer le sursaut et préciser la position. Enfin, le masque codé donne la précision maximum. Tout ceci étant à bord du même satellite travaille en coordination, et donc trèsrapidement. Mais pas automatiquement. Lorsqu'un sursaut est observé par le détecteur à large couverture, le signal est envoyé au sol, où des astronomes l'analysent, et décident éventuellement de repositionner le télescope. Ceci prend du temps, et retarde l'étude du signal rémanent, mais bien moins que tout ce qui a été fait avant.

Le lancement de ce satellite a été retardé de 15 ans par l'explosion de la navette Challenger. Dès sa mise en orbite en 96, le satellite, développé par Livio Scarsi, a été renommé *BeppoSAX* en honneur de Giuseppe (diminutif *Beppo*) Occhialini, qui l'avait formé.

Le **28 février 1997**, un événement à été découvert dans les données transmises au sol. Leur analyse immédiate a montré un sursaut long de 80 secondes, d'intensité moyenne, dont la courbe de lumière était complexe. Mais l'une des caméras à grand champ avait aussi enregistré l'événement, ce qui a permi de construire une image du champ de l'objet, et d'en déduire une position de 3' quelques heures après le début du sursaut. Les caméras à champ étroit ont alors été pointées dans cette direction 8 heures exactement après le début. Une autre observation faite trois jours après à montré un rayonnement X, qui avait diminué d'intensité d'un facteur 20, et dont la position était déterminée avec une erreur de 50" seulement

De plus, les responsables du satellite ont immédiatement publié la position du nouveau sursaut, ce qui a incité Jan Van Paradijs à pointer le WHT (William Herschell Telescope, instrument de 4,2 m de diamètre), au cours de deux observations à une semaine d'intervalle. Sur la première photo, il y avait un objet visible, sur la seconde il avait disparu, définitivement. C'était la première fois qu'on observait la contre-partie visible d'un sursaut gamma. Mais, bien qu'associée au sursaut lui-même, elle n'était pas produite par le même mécanisme puisqu'elle ne brillait qu'assez longtemps après. On la nomme pour cela *émission rémanente*.

BeppoSAX a rapidement récidivé, et deux nouveaux sursauts ont été observés dans le visible également. Il a été possible, grâce aux plus grands télescopes actuels, de prendre un spectre de la contre-partie optique. Ces spectres ont montré à l'évidence que les sursauts gamma sont des objets cosmologiques, dont les distances se chiffrent en milliards d'années-lumière : le décalage spectral de GRB 971214 atteint 3,412 ! Il est donc à 11,9 milliards d'années-lumière.

Du coup, on pouvait détreminer l'énergie produite par ces phénomènes, et constater que c'était les explosions les plus violentes qu'on ait jamais observées. Il faut bien réaliser qu'on arrive à voir des éclairs qui ont été émis à l'autre bout de l'Univers observable  Les problèmes liés à l'observation des sursauts gamma étaient résolus, il restait à les expliquer !

**Modèle**

La luminosité de GRB 971214 vaut 1,22 $10^{47}$ Joules  Pour calculer cette valeur, on a supposé que le sursaut possédait la symétrie sphérique, c'est-à-dire qu'il émettait, dans toutes les directions, la même quantité d'énergie que vers nous. Si au contraire on suppose qu'il n'émet qu'un jet dans notre direction (par hasard), alors l'énergie émise est bien sûr considérablement diminuée. On peut estimer qu'elle serait 1.000 fois moindre. Mais même calculée ainsi, elle reste 1.000 à 10.000 fois plus importante que le plus puissant SGR connu. Le mécanisme qui explique les SGR ne peut donc pas convenir ici (ni par la répartition dans l'espace, ni par l'énergie). Les sursauts gammas sont donc d'une nature tout à fait différente.

Pour expliquer un tel débordement d'énergie, dans un temps si bref, on ne connait pas grand chose d'autre qu'un trou noir qui accrète de la matière en orbite autour de lui. Ce doit être le principe du moteur. La solution a été développée par Frédéric Daigne, dans sa thèse de Doctorat.

Un trou noir de masse stellaire (quelques masses solaires, formé à partir d'une étoile), entouré d'un disque de débris qui tourne en tombant, dégage une énergie qui est de l'ordre de 50 % de l'énergie de masse de cette matière ($E = m c^2$). L'énergie produite est donc $E = 10^{47}\ m$ Joules, où *m* est la masse accrétée en masses solaires. On voit qu'avec une masse solaire, on peut obtenir l'énergie nécessaire pour expliquer le phénomène. Cependant, ce n'est pas si simple.

Un trou noir n'est pas un objet rigide, sur lequel la matière en chute s'écraserait (comme sur une étoile à neutrons). En fait, un atome peut parfaitement traverser l'horizon sans rencontrer la moindre résistance, et donc sans dissiper d'énergie. Une fois la particule à l'intérieur de l'horizon, si elle dissipe son énergie, celle-ci restera confinée dans le trou noir, et n'apparaîtra nullement à l'extérieur. Elle est perdue. La question qui se pose est donc : la matière en chute sur le trou noir émettra-t-elle son énergie avant ou après la traversée de l'horizon ?

Frédéric Daigne a montré qu'elle pouvait être émise à l'extérieur, pour une fraction importante, à la condition que la matière forme un disque d'accrétion en rotation rapide ce qui est une condition raisonnable. En effet, accélérée par la contraction, en vertu de la conservation du moment angulaire, la matière tourne à un millier de tours/seconde ! Alors, la survie du disque est longue, elle dure plusieurs secondes ! Suffisamment pour créer les conditions du sursaut.

Lors de la contraction, le champ magnétique s'est également renforcé très fortement. Il entraîne une partie de la matière en chute sur le trou noir vers les pôles de rotation, et l'expulse en deux jets relativistes (vitesses proches de celle de la lumière).

A ce stade, il faut savoir d'où vient le trou noir dont on parle. La première origine est l'effondrement d'une étoile massive, lorsqu'elle n'a plus de carburant nucléaire. Nous verrons l'autre possibilité plus loin. Une étoile massive qui ne peut plus produire d'énergie est constituée d'un cœur massif, entouré d'une enveloppe assez massive, quoique très diminuée par un vent stellaire très violent qui en a expulsé une grande partie.

L'enveloppe est supportée par le cœur. Mais au moment de l'effondrement du cœur, qui se produit en une fraction de seconde, l'enveloppe se retrouve en suspension. Avec l'énorme gravité produite par le cœur effondré, elle va s'écrouler. L'étoile était en rotation, donc avec la contraction la rotation s'accélère. Mais elle avait une symétrie sphérique (sans doute un peu aplatie), qui n'a pas de raison de disparaître. Ceci signifie qu'il y a une matière dense au-dessus des pôles de l'étoile. Alors, les jets évoqués plus haut vont se heurter à cette matière, et produire une onde de choc ; ils ne pourront pas se frayer un passage vers l'extérieur, et il n'y aura pas de sursaut gamma à observer

Imaginons que l'étoile, avant son effondrement, tourne vite sur elle-même ; alors, elle aura une forme aplatie, et l'enveloppe sera fine au-dessus des pôles. Ceci suffit pour que les jets puissent la traverser et extraire l'énergie qu'ils emportent. Alors, des ondes de choc dans les jets libèrent de l'énergie, sous la forme de particules ultra-relativistes. Les photons gamma sont produits par les interactions entre ces particules et le milieu dans lequel elles baignent. Ce mécanisme explique bien les profils observés. Si l'observateur se trouve par hasard dans l'axe d'un jet, alors la vitesse d'approche produit un décalage vers le bleu, c'est-à-dire vers les grandes énergies, et décuple l'intensité du sursaut. Ceci permet d'expliquer la variété des observations.

Le modèle ainsi développé est nommé *modèle des chocs internes*, puisque les rayons gamma sont produits par des chocs dans les jets eux-même. Mais lorsque les jets atteignent le milieu interstellaire, ils sont animés de grandes vitesses encore. Et là se produit un nouveau choc. Le miracle est que ces chocs, qui se produisent avec un retard, expliquent très bien l'émission rémanente.

Enfin, il faut faire les comptes. Combien d'étoiles peuvent ainsi s'effondrer dans un temps donné, et produire un sursaut observable ? Puisque tout l'Univers observable est concerné, on évalue à un million le nombre d'effondrements d'étoile massives par jour ! Dans le modèle, seules les étoiles en rotation rapide pourraient être assez transparentes au niveau des pôles pour permettre les sursauts. On considère qu'une étoile sur 1.000 pourrait être dans ce cas. Il reste ainsi 1.000 sursauts produits par jour… Mais l'observation est très différente si on est aligné avec le jet ou pas. L'amplification résutant d'un bon alignement est telle, que seuls les sursauts qui se produisent dans la bonne direction seront observables. Alors, il faut calculer leur proportion. Un calcul simple de l'angle solide formé par les jets montre que, là encore, un sursaut sur mille pourrait être assez bien aligné pour être observé. Au bout du compte, on arrive à un ordre de grandeur de 1 sursaut par jour. Or CGRO a observé 2.704 sursauts en 9 ans = 3.280 jours, c'est-à-dire 0,8 sursauts par jour. C'est bien ce qu'on attendait.

Il nous reste à voir comment se comporte le modèle lorsque le trou noir se forme par coaslescence de deux étoiles à neutrons. Tournant l'une autour de l'autre, elles rayonnent des ondes gravitationnelles, et dissipent ainsi de l'énergie de rotation. Petit à petit, elles se rapprochent l'une de l'autre, tournent plus vite, et rayonnent davantage. Finalement, elles entrent fatalement en collision. Puisque chacune possède une masse supérieure à 1,4 masses solaires, la somme des deux dépasse les 2 à 3 masses solaires qui est la limite des étoiles à neutrons. L'astre résultant ne peut être qu'un trou noir. De plus, les simulations montrent que dans les dernières phases avant le choc, il y a formation d'un anneau de débris arrachés aux deux astres. On arrive alors à cette situation où un trou noir est entouré d'un disque d'accrétion, ses pôles étant libres. On est dans la bonne situation pour le modèle des chocs internes. La coalescence de deux étoiles à neutrons pourrait donc, à chaque fois, produire un sursaut gamma. Il ne reste que l'alignement avec les jets pour rendre l'observation possible.

Enfin, ces sursauts produiraient moins de rayons gamma, et seraient plus brefs que les autres. Il est alors tentant de croire que les sursauts brefs sont produits à partir de la coalescence, alors que les plus longs sont le résultat d'un effondrement. C'est en tout cas le paysage actuel.

**Nouvelles observations**

Après la définition du modèle des chocs internes, d'autres observations ont été faites, avec d'autres satellites. Elles ont confirmé le modèle. Citons simplement le satellite *Integral* (*INTErnational Gamma Ray Astrophysics Laboratory*), projet européen combinant un télescope gamma à masque codé, et un spectromètre destiné à mesurer précisément l'énergie des photons reçus. Un système d'alerte immédiate à permis à un petit télescope optique, *Tarot* (*Télescope à Action Rapide pour les Objets Transitoires*, 25 cm de diamètre), situé au sol, sur le plateau de Calern (près de Grasse), de réagir immédiatement. Il a observé le champ 19 secondes après le début du sursaut ! Le sursaut n'était pas encore terminé… Pas de chance, ce sursaut s'était produit derrière la Voie Lactée, empêchant de l'observer en optique. Mais la preuve était faite que l'on pouvait désormais étudier la lumière visible du sursaut lui-même.

Depuis, les américains ont construit et lancé le satellite Swift. Celui-ci a observé le sursaut gamma le plus lointain connu : GRB 050904 a été observé par Tarot sous la forme d'un astre de magnitude 18,5 encore visible dans son émission prompte. Son décalage spectral a été mesuré par le télescope Subaru : z = 6,295. L'étoile qui l'a produit s'est donc effondrée 900 millions d'années après le Big Bang.

Cette unique observation prouve que, moins d'un milliard d'années après ce début de l'Univers, il y avait déjà des étoiles massives qui s'effondraient. Donc que l'Univers n'était sans doute pas très différenrt de ce qu'il est aujourd'hui.

**Conclusion**

Il existe deux sortes de sursauts gamma :

- les sursauts répétitifs, dont la source est le réarrangement d'une magnétar :
  - rupture dans la croûte de fer ;
  - reconnexion magnétique dans l'atmosphère ;
- les sursauts non répétitifs, produits par la formation d'un trou noir :
  - par l'effondrement d'une étoile assez massive ;
  - par coalescence de deux étoiles à neutrons.

Pour vous souvenir : les sursauts COurts sont produits par COalescence, les longs par effondrement.

**Bibliographie**

*Explosions cosmiques*, Jacques Paul, éditions Ellipses, Paris 2007 ISBN 978-2-7298-3568-2

*L'Univers dans tous ses éclats*, Alain Mazure et Stéphane Basa, Quai des Sciences, éditions Dunod, Paris 2007

---=OO=---

# Loi de la Gravitation Universelle



Ce petit chapitre décrit (à peu de choses près) comment Newton a découvert la loi de la Gravitation Universelle.

Avant lui, Galilée avait découvert la loi de l'inertie :

*un objet, non soumis à des forces extérieures, reste au repos, ou conserve un mouvement rectiligne uniforme.*

Cette loi est une abstraction pure, car il est impossible d'en réunir les conditions à la surface de la Terre, puisqu'on est toujours soumis à une force extérieure : la gravité. Mais le champ de gravitation, dans l'espace restreint du laboratoire, est très uniforme, donc son action est la même partout. Et de plus, Galilée a utilisé des plans horizontaux très lisses, sur lesquels les frottements sont très faibles : il a extrapolé sur des frottements nuls.

Ensuite, Kepler a énoncé les lois du mouvement des planètes, dans ses fameuses 3 lois :

- *les planètes décrivent autour du Soleil des orbites planes elliptiques ;*
- *les aires balayées par le rayon-vecteur dans des temps égaux sont égales ;* (loi des aires)
- *les grands-axes et périodes sont dans la relation* $a^3/T^2$ *= cste.* (loi harmonique)

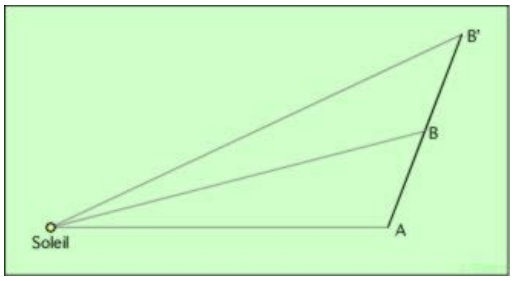
Enfin, Newton lui-même a fondé la dynamique en énonçant les lois :

- *le mouvement change proportionnellement à la force appliquée, et dans la direction de cette force ;*
- *les actions d'un corps sur un autre sont égales et opposées (loi de l'action et de la réaction).*

**Loi de la Gravitation Universelle**

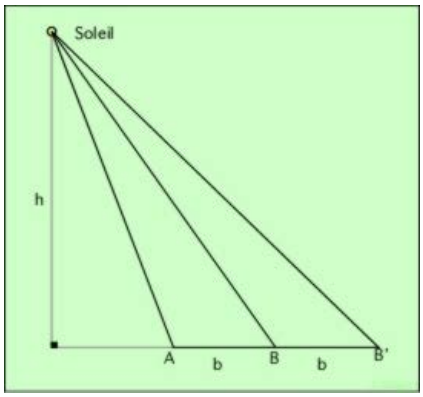
**Partant de la loi de l'inertie de Galilée et de sa seconde loi**, Newton a retrouvé la loi des aires de Kepler. Voici la démonstration :

Considérons le Soleil, et une planète placée en A, et se dirigeant vers B. On suppose que le Soleil **n'exerce aucune force** sur la planète. On considère le point B', aligné avec A et B, et tel que BB' = AB. D'après la loi de l'inertie, la planète conservera son mouvement rectiligne uniforme, et donc elle mettra le même temps pour aller de A à B et de B à B'.




On vérifie que les triangles SAB et SBB' ont des surfaces égales :

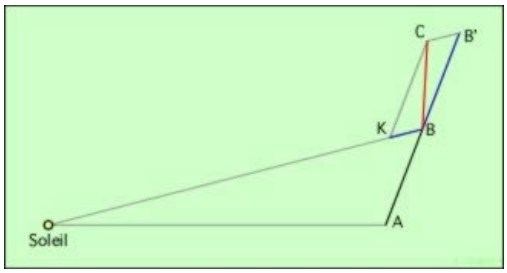
Prenons AB et BB' comme bases de ces deux triangles. La surface d'un triangle vaut 1/2 b h, où b est la base, et h la hauteur. Ici, les deux bases AB et BB'sont égales. Et les deux hauteurs sont confondues :



Les deux triangles ayant des bases égales, et la même hauteur, ont des aires égales.

> Remarquez que les aires balayées pendant des temps égaux sont égales ; c'est la limite de la seconde loi de Kepler lorsque la masse du corps central est nulle !

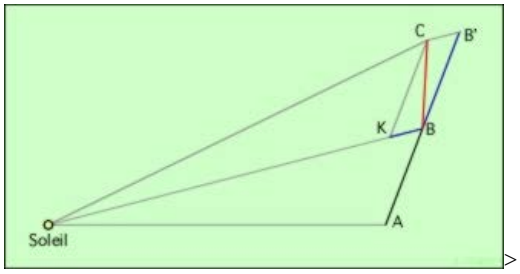
Maintenant, ajoutons la force exercée par le Soleil, et dirigée vers lui. Elle est portée par le segment BK (figure ci-dessous). Si le temps considéré est bref, on peut décomposer le mouvement réel de la planète en supposant qu'elle va de B à B', puis de B' à C. Pour calculer chacun de ces déplacements, il faut considérer le même temps t, puisqu'en fait ils sont simultanés.




Le premier de ces déplacements, de B à B', est fait sous l'action de l'inertie seule, aucune force n'intervenant (l'action de la force est reportée sur la seconde partie du mouvement). Il est donc dans le prolongement de AB, et son amplitude est simplement égale à AB par définition.

Pour la seconde partie de la décomposition, les choses sont un peu plus compliquées. La force appliquée en B aurait amené la planète en K (en l'absence d'inertie, comme nous avons considéré l'absence de force dans la première partie). Si on applique la force en B', le calcul semble être différent, en particulier la direction de la force n'est pas la même. Il faut imaginer le triangle SAB infiniment plat, avec un angle en S infiniment petit. Alors, on peut considérer que la force appliquée en B, d'amplitude BK, s'applique à l'identique en B', B' étant infiniment voisin de B. On dessine donc sur la figure un segment B'C, parallèle à BK, et de même longueur. C'est lui qui définit le chemin que suit la planète, à partir de B, sous l'action de la force. Ces deux parcours infinitésimaux BB' et B'C sont des vecteurs. Ils se composent pour donner comme somme la diagonale du parallélogramme, chemin qui sera réellement parcouru par la planète.

Quelle est l'aire du triangle SBC ?




Nous avons vu que le triangle SBB' a même aire que le triangle SAB : surface(SBB') = surface(SAB). Montrons maintenant que le triangle SBC a même aire que le triangle SBB'. C'est très simple, car ils ont un côté commun SB. Prenons-le pour base. La hauteur de chacun des triangles est la projection du troisième sommet (respectivement C et B') sur cette base, donc les projections de C et B' respectivement. Mais CB' est parallèle à KB par construction. Les points C et B' sont donc à la même distance de SB, et ces distances sont les hauteurs des deux triangles. Donc, les deux triangles ont même base et même hauteur, et leurs surfaces sont donc égales.

Puisque surface(SBB') = surface(SAB), et que maintenant surface(SBB') = surface(SBC), on obtient par transitivité que surface(SBC) = surface(SAB). Nos deux triangles ont donc bien la même aire.

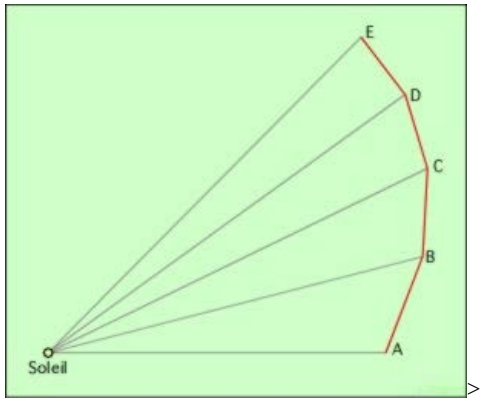
SA et SB étant les rayons-vecteurs de la planète, on a démontré que le rayon-vecteur balaye des aires égales en des temps égaux, **c'est-à-dire la seconde loi de Kepler** !

Mais aussi, les points S, A et B définissent un plan. Puisque K est sur SB, K est dans ce plan aussi. Par le principe d'inertie, B' est sur la ligne AB, donc dans le même plan également. Par conséquent, tout le parallélogramme ABB'C est dans ce plan, donc en particulier C. Ce qui montre que la trajectoire de la planète est dans un plan, **c'est la première loi de Kepler** !

De plus, la démonstration **ne dépend pas** de la longueur du segment BK, qui représente **l'intensité** de la force. Par conséquent, cette loi est valable pour toute force dirigée vers un centre, ce que l'on appelle une *force centrale*.

Enfin, remarquez que si l'on considère des instants de plus en plus brefs, les déplacements considérés sont de plus en plus petits, et la ligne brisée s'approche de plus en plus de l'orbite réelle. Cette remarque permet d'entrevoir le *calcul infinitésimal*, nommé maintenant *calcul différentiel*, inventé indépendamment par Newton et Liebniz. Toutefois, ces idées d'approximations successives étaient déjà présentes dans la pensée grecque antique, pour la mesure des surfaces.

> Historiquement, Newton est parti des travaux de Kepler, qui lui-même a utilisé les mesures de position de Mars de Tycho-Brahé. Kepler, par un raisonnement astucieux, a réussi à construire l'orbite de Mars point par point, ce qui est en fait le schéma (ci-dessous) dont est parti Newton.



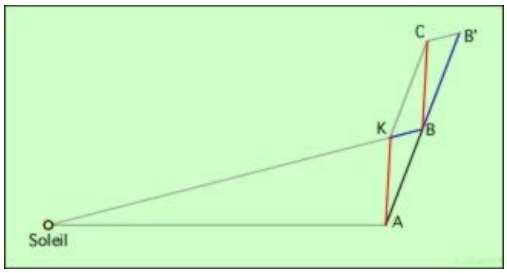

positions successives d'une planète

---

Un raisonnement géométrique de nature semblable a amené Newton à découvrir la loi de la Gravitation Universelle, c'est-à-dire la dépendance en $1/R^2$ de la force exercée par le Soleil.

Reprenant le dernier schéma, puisque les temps t entre A et B, et entre B et C sont égaux, on peut les considérer comme unitaires : t = 1. Alors, la vitesse de la planète entre A et B est égale à AB / t = AB / 1 = AB. De même pour tous les autres segments, puisque les temps sont égaux. Pour définir correctement la vitesse, il faut tenir compte de la direction de chacun des segments (ce sont les vecteurs vitesse).

Reprenons un schéma précédent, en y ajoutant le segment AK :




KBB'C est un parallélogramme, donc BB' = KC. D'autre part, AB = BB' par le principe d'inertie. Donc, AB = KC. De plus, ces segments sont parallèles. Donc, KCBA est aussi un parallélogramme. Par suite, AK = BC.

Or AB mesure la vitesse de la planète entre A et B, et BC mesure sa vitesse entre B et C. Donc, AK mesure la vitesse entre A et K ; l'égalité de AK avec BC montre que AK mesure aussi la vitesse entre B et C. La vitesse tient compte de la mesure et de la direction. Elle s'exprime par des vecteurs.

Si vous ajoutez les deux vecteurs $\overrightarrow{AB}$ et $\overrightarrow{BK}$, vous obtenez le vecteur $\overrightarrow{AB} + \overrightarrow{BK} = \overrightarrow{AK}$.

Ou encore : $\overrightarrow{BK} = \overrightarrow{AK} - \overrightarrow{AB}$.

Les deux vecteurs $\overrightarrow{AK}$ et $\overrightarrow{AB}$ représentant les vitesses en A et B, leur différence $\overrightarrow{BK}$ est la variation de vitesse. Donc, $\overrightarrow{BK}$ est d'autant plus long que la variation de vitesse $\Delta v$ de la planète entre les couples de points (A, B) et (B, C) est plus grande. La mesure de BK est proportionelle à $\Delta v$.

Si on change l'intervalle de temps, la variation de vitesse changera également. Donc, BK représente la variation de vitesse par unité de temps, et :

$$BK \quad \Delta v / \Delta t$$

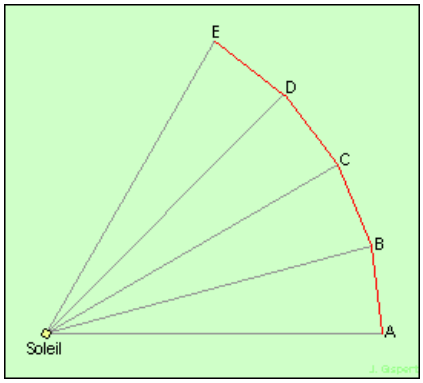
Et puisque BK est proportionnel à la force :

$$F \quad \Delta v / \Delta t$$

Newton a ainsi montré que la force est **proportionnelle à la variation de vitesse par unité de temps**, ce qu'on appelle l'accélération

| La constante de proportionalité est la masse de la planète. Cette loi est donc la loi fondamentale de la dynamique $F = m \gamma$ |
|---|

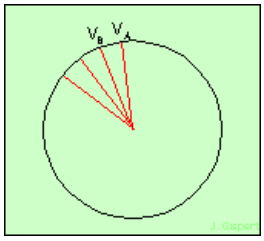
Considérons maintenant le cas particulier d'une orbite circulaire. Les différents rayons-vecteurs SA, SB, SC… sont tous égaux au rayon R de l'orbite. Les intervalles de temps étant toujours égaux, le schéma devient :




Lorsqu'on passe du point A au point B, on se retrouve à la même distance au Soleil (SB = SA). Même si la force qu'on recherche dépend de la distance au Soleil, elle ne change pas ici puisqu'on reste à la même distance. Le choix du cercle permet ainsi de s'affranchir de la dépendance de la force par rapport à la distance.

Passant de A à B, la figure a simplement tourné de 15° (ce nombre est un choix arbitraire pour le schéma ; il est bien évident que dans le calcul infinitésimal, il faut prendre un pas considérablement plus petit). On construit ainsi, pas par pas, un polygone régulier, qui approche le cercle.

Les segments AB, BC, CD… représentent chacun l'espace parcouru pendant l'unité de temps choisie. Donc la vitesse de la planète pendant cet intervalle. Ils sont tous égaux en longueur, donc la vitesse est constante en module. Par contre, elle est tout le temps variable en direction. Et lorsque la planète fait un tour complet, le vecteur vitesse fait aussi un tour complet. On peut représenter tous ces vecteurs vitesses en les plaçant à une même origine (le cercle dessiné par les extrémités des rayons-vecteurs est *l'hodographe* du mouvement) :




Les rayons rouges sont les segments AB, BC… du schéma précédent. Ils sont tous égaux au module v de la vitesse. Quelle est la variation de la vitesse au cours d'un intervalle de temps ? C'est le petit déplacement de l'extrémité du rayon, soit le chemin entre $V_A$ et $V_B$ sur le graphique (et qui correspond à BK sur le premier graphique). Pour une orbite complète, la variation totale de vitesse est donc $2 \pi v$. Et par unité de temps, c'est donc $\Delta v / \Delta t = 2 \pi v / T$, puisque la vitesse est constante.

F $\Delta v / \Delta t = 2 \pi v / T$.

D'autre part, la vitesse moyenne de la planète sur son orbite est la distance parcourue divisée par le temps mis pour cela. Le temps est la période T de la planète (son année). Et la distance parcourue est la circonférence de l'orbite $2 \pi R$. Donc, la vitesse moyenne est $v_m = 2 \pi R / T$. Puisque l'orbite est circulaire, la vitesse instantanée est égale à la vitesse moyenne $v = v_m = 2 \pi R / T$.

On remplace donc v par sa valeur :

F $2 \pi v / T = 2 \pi ( 2 \pi R / T) / T = 4 \pi^2 R / T^2$

Il est temps d'utiliser la troisième loi de Kepler :

$a^3 / T^2 = cste = R^3 / T^2$ puisque le demi grand-axe a est le rayon R du cercle. Et donc : $T^2 = R^3 / cste$. Reportons cette valeur dans l'expression précédente :

F $4 \pi^2 R / T^2 = 4 \pi^2 R / (R^3 / cste) = 4 \pi^2 cste / R^2$

En regroupant les constantes sous le même terme k :

$$F = k / R^2$$

Ainsi est trouvée la variation de la force gravitationnelle en $1 / R^2$. Elle résulte d'une longue chaîne de travail comprenant les excellentes observations de Mars par Tycho-Brahé, puis l'astucieuse exploitation de ces données par Kepler pour en déduire les lois du mouvement des planètes, et enfin l'abstraction de ces lois faite par Newton pour en déduire la force agissante.

- Les observations de Tycho-Brahé sont des **mesures d'angles**, qui ne tiennent pas compte des distances de la planète.
- Kepler en a déduit les distances, ce qui lui a permi d'écrire des **lois cinématiques** ;
- Enfin, Newton a écrit une loi qui constitue une première **formulation physique** des mouvements.

> La *cinématique* est l'étude mathématique des mouvements, indépendamment de leur cause physique. Elle étudie par exemple le mouvement circulaire uniforme sans se soucier de la force qui pourrait le produire. Circulaire indique sur quelle courbe le mobile se déplace, et uniforme indique que le module de la vitesse est constant. A partir de là, on peut résoudre le problème en donnant des formules qui vont indiquer où se trouve le mobile à un instant donné.

> La cinématique est à même de décrire des mouvements qui seraient physiquement impossibles, comme par exemple un changement de sens instantané, ou un virage à angle droit.

**Validation**

La loi obtenue par Newton lui a permi de démontrer les lois de Kepler. C'est-à-dire de faire la démarche inverse : admettant sa loi, démontrer celles de Kepler. Puisque celles-ci sont validées par l'observation, elles valident en retour la loi de Newton.

La démarche utilisée par Newton est de même nature géométrique. Elle se trouve, ainsi que les démonstrations précédente, dans un petit livre très intéressant de D. et J. Goodstein intitulé "Le mouvement des planètes autour du Soleil".

Ensuite, les lois de Kepler sont apparues comme des approximations, qui correspondent à un cas idéal. La loi de Newton a permis de prendre en compte un cas bien plus proche de la réalité, dans lequel on tient compte de l'influence de Jupiter et Saturne par exemple dans l'étude du mouvement de Mars. Mais la loi de Newton a montré aussi la difficulté du problème du mouvement gravitationnel, lorsque plus de deux corps sont en interaction : il n'existe pas de solution analytique au problème. Seules des solutions numériques (méthode des *perturbations spéciales*), ou des approximations sous forme de séries de fonctions (méthode des *perturbations générales*), sont possibles.

---=OO=---




**Table des matières**

**Première partie**
Introduction
Définition du calendrier
Principes généraux
Quelques définitions
La semaine ; les noms des jours
Histoire des calendriers
Préhistoire et monuments mégalithiques
L'histoire
Calendrier chaldéen ou babylonien
Calendrier égyptien
Calendrier hébreu ancien
Calendier israélite moderne
Calendrier musulman
Calendrier chinois
Calendrier maya
Calendrier aztèque
Calendrier persan
Calendrier grec
Calendrier romain
Calendrier julien
Calendrier grégorien
Calendrier républicain
Calendrier universel
Période julienne

**Deuxième partie**
Calcul de la règle solaire grégorienne
Cycle de Méton
Vers un calendrier solaire parfait
Calcul du Jour Julien, (date julienne)
Calcul du Jour Julien, (date grégorienne)
Jour julien modifié
Durée
Retrouvons le jour de la semaine
Comput Ecclésiastique
Cycle solaire
Indiction romaine
Nombre d'or
Lettre dominicale
Détermination du jour de la semaine
Calendrier lunaire
Calcul de l'épacte grégorienne
Calcul de la pleine lune pascale
Date de Pâques
Construction d'un almanach
Conclusion
Synthèse
Exercices
Schéma chronologique
Bibliographie
Index

**Introduction**

Le calendrier est un objet d'usage quotidien, que l'on pense bien connaître, et pour lequel toute explication semble inutile. En fait, il s'agit d'un objet complexe, dont l'élaboration se poursuit depuis l'aube de l'humanité. Il est basé sur l'étude de phénomènes astronomiques, mais prend en compte toutes les croyances et superstitions qui ont vu le jour au fil des âges. Une bonne compréhension d'un calendrier fait par conséquent intervenir, outre l'astronomie, l'histoire du peuple qui l'a créé, et cette histoire porte sur plusieurs millénaires…

Les religions ont toutes influencé la mesure du temps, ne serait-ce que pour préciser la date des fêtes à célébrer. Jusqu'à une époque très récente, elles ont joué un rôle moteur dans la compréhension des mouvements des astres. Les principes essentiels de ces religions doivent donc être connus.

Le calendrier est un substrat astronomique sur lequel se sont développés les besoins de l'humanité : techniquement, de multiples solutions sont possibles, elles sont départagées par les contraintes *a priori* que l'homme a ajouté. Un calendrier est inséparable de la civilisation qui l'a utilisé ou l'utilise.

Les débuts de l'astronomie ont été la mesure et la prévision des positions des astres. La bibliothèque d'Assurbanipal à Ninive (650 avant J.C.) contenait un grand nombre de tablettes d'argile consacrées à l'astronomie, les plus anciennes remontant au XX$^{e}$ siècle avant J.C. Elles mentionnent la marche en zig-zag des planètes, les constellations et les levers héliaques (tous les mots particuliers rencontrés dans cette introduction seront définis dans le corps du texte), une description précise du zodiaque tel qu'on le connait aujourd'hui, des tables des éclipses passées, et des tentatives de prévision des futures. On dispose d'un almanach de l'année 568 avant J.C. année 37 du règne de Nabuchodonosor II. Les positions de la lune et des planètes y sont bien mentionnées, ainsi que les conjonctions. Le ciel y est décomposé en 12 parties, au lieu de

4 auparavant (une par saison).

Mais à côté de cela, on trouve aussi des conseils prophétiques : "*quand Mercure sera visible au mois de Kislou, il y aura des voleurs dans le pays*" (comme nos astrologues actuels, ils ne se mouillaient pas beaucoup !). Les grecs ont fait de l'astronomie une science, dépouillée de toutes ces superstitions, et basée sur l'analyse raisonnée des observations.

La plus ancienne interprétation du mouvement des astres consiste à invoquer des puissances divines. De là à penser que ces puissances agissent par la même occasion sur le destin des humains, il n'y a qu'un pas qui a été franchi en Mésopotamie dès le III$^{e}$ millénaire avant J.C.

L'autre interprétation est celle des lois régissant les interractions des astres entre eux. Elle est de nature scientifique, et la précision impressionnante des trajectoires des sondes spatiales montre que cette approche est la bonne.

Les mouvements des astres sont lents (tout au moins leur déplacement apparent dans le ciel) ; aussi faut-il des observations s'étendant sur de très longues durées pour accéder à la précision nécessaire. Et pour repérer les époques de ces observations, un calendrier est requis.

Mais on aboutit vite à un cercle vicieux : pour définir ce calendrier, il faut connaître les mouvements des astres principaux, le Soleil et la lune… Il est alors évident que l'étude de ces mouvements et la définition des calendriers se sont élaborés en même temps, toute découverte d'un côté entraînant un progrès de l'autre.

Les erreurs, parfois graves, introduites dans la définition des premiers calendriers, ont produit des décalages au cours des années ou des siècles. Ces décalages, par leur mesure, ont permis en retour de corriger le calendrier, et de préciser la durée de l'année ou de la lunaison !

Tous les calendriers ont des défauts, provenant d'une connaissance astronomique très imparfaite pour les plus anciens, d'incompatibilités entre les mouvements des divers astres pour les suivants, et des contraintes sociales ou religieuses pour les plus récents. L'habitude fait que ces défauts ne nous apparaissent pas dans le calendrier que nous utilisons ; pire encore, ils font partie de notre patrimoine, et nous refuserions peut-être de les supprimer… Des tentatives de réforme ont été faites ; elles ont abouti à des échecs car elles rompaient avec la tradition.

**Définition du calendrier**

Le nom *Calendrier* vient du latin *Calendæ*, qui est le nom du premier jour du mois à Rome.

| | |
|---|---|
| **Petit Larousse :** | Tableau des jours de l'année / Système de division du temps |
| **Petit Robert :** | Almanach, Agenda / Système de division du temps en années, mois et jours. |

Le *calendrier* ; désigne donc d'une part le petit manuel représentant les jours d'une année particulière, et d'autre part, le système conventionnel de division du temps sur de longues périodes. Il n'est concerné par les courtes périodes que pour la définition du jour (début précis). La seconde partie de la définition du Petit Robert nous indique de plus que les éléments essentiels sont **le jour**, **le mois** et **l'année** ; ce sont eux qu'il faudra accorder de manière cohérente. On remarque que le jour est commode pour les durées courtes, le mois pour les durées moyennes, et l'année pour les longues durées.

Nous examinerons ces deux aspects du Calendrier, nous attachant d'abord à définir un système de division du temps satisfaisant certaines contraintes naturelles ou historiques, puis essayerons de produire un *almanach* particulier, correspondant au calendrier en usage actuellement dans la quasi-totalité des pays du monde.

Le mot almanach nous vient de l'arabe. C'est le nom donné à des calendriers égyptiens. Il a été introduit à Rome et en Grèce sous les formes *Almanachus* et *Almanakon*. L'almanach a longtemps été le seul livre laïque possédé par le peuple. Cette tradition de diffusion générale se maintient à l'heure actuelle par le calendrier des postes, qui a sa place dans de nombreux foyers. De nos jours, il a pris un aspect rébarbatif ; mais dans un passé pas si lointain, il était une émanation de l'art populaire, et reste en ce sens un témoin de son temps. Il subsiste encore en France quelques almanachs, en général rattachés à des traditions locales (*Armana Prouvençau*, *Almanach du Vieux Savoyard*, *le Messager Boiteux* …). Enfin, il est impossible d'omettre l'Almanch Vermot, avec un esprit si particulier !

**Principes généraux**

Un système de division du temps doit obéir à des règles de construction très strictes, sur lesquelles tout le monde est d'accord. Il doit permettre de **prévoir** certains événements importants, comme par exemple le début de l'année ou la date des fêtes. Nous verrons que ce caractère prédictif est d'apparition relativement récente.

Pour mesurer de longues durées, la première possibilité est une simple numérotation des jours. Mais elle fait vite apparaître de grands nombres, ce qui la rend très désagréable pratiquement. L'inaptitude des premiers peuples à gérer de tels nombres leur a interdit ce genre de solution ; aucun calendrier historique n'est basé sur ce principe si simple. Cependant, on a défini assez récemment la *Période Julienne*, qui est une telle numérotation ; mais elle est réservée à l'usage des chronologistes et des astronomes dans le cadre de leur travail.

Pour rendre une numérotation plus pratique, on peut définir des multiples de la base de numération utilisée : définir des groupes de jours, par exemple 10, 100 ou 1000… ces groupements artificiels n'ont aucun rapport avec la durée de l'année, et la lecture d'une date ne nous renseigne pas sur la saison à laquelle elle correspond. Une solution de ce genre a été utilisée par les Mayas.

Enfin, pour les peuples de l'Antiquité, qui avaient un contact avec la nature bien plus proche que nous, la présence et l'aspect des astres ont représenté des horloges naturelles bien plus attrayantes que les nombres abstraits. Aussi, tous les calendriers historiques, à l'exception de ceux d'Amérique centrale, sont basés sur les mouvements des astres.

Les deux astres les plus importants de notre ciel ont donc imposé leurs périodicités (La Genèse dit que Dieu créa la lumière le premier jour, le Soleil et la Lune le quatrième seulement. La Bible ne considère donc ces astres que comme signes du temps).

- l'année solaire
- le mois défini à partir des phases de la lune.

Le jour n'est pas simple, car il est variable au cours de l'année : la journée est pratiquement deux fois plus longue en été qu'en hiver pour les latitudes moyennes. Pourtant, il est le rythme biologique fondamental de tous les êtres vivants à la surface de la Terre.

L'année des saisons est évidente par le cycle des variations de température, mais très difficile à définir précisément. Les variations sont lentes, le Soleil ne change pas d'aspect au cours de l'année, seule sa position dans le ciel varie. Tous les phénomènes qui dépendent des saisons, comme la végétation ou le climat, n'ont qu'une périodicité approchée : la chaleur de l'été ne revient pas à date fixe. Cependant la hauteur du Soleil qui en est la cause a un cycle très précis. Il faut en tenir compte pour l'agriculture, et donc maîtriser sa connaissance.

Les premières civilisations ont eu de grandes difficultés pour déterminer la durée de l'année, du fait de leurs connaissances astronomiques très limitées. Surtout, il existe plusieurs sortes d'années (qui seront précisées plus loin), définies par des phénomènes astronomiques différents, et malheureusement celle qui détermine les saisons, l'*année tropique*, n'est pas directement accessible à l'observation.

Après le jour et l'année, la dernière unité de temps est le mois (la semaine sera définie plus loin). Il provient directement de l'aspect de la lune, et sa durée est variable et toujours proche de la lunaison (intervalle entre deux pleines lunes, qui vaut à peu près 29 jours et demi). Son origine lunaire est attestée par l'éthymologie : en grec, lune se dit μηνη (mêné) et mois μην (mên) ; en anglais, *Moon* et *month*, en allemand *Mond* et *monat*…

Le mois lunaire est aussi important que l'année, d'abord pour fournir un repère temporel plus court, ensuite parce que la lune est restée fort longtemps (jusqu'au XIX$^{e}$ siècle) le seul éclairage nocturne. La succession des phases est mieux marquée que les saisons, plus facilement observable, et de ce fait les premiers calendriers ont été lunaires. Près de l'équateur, les saisons sont moins marquées ; dans ces contrées, un calendrier primitif ne pouvait être que lunaire.

Mais la durée des lunaisons est très variable, aussi leur prévision correcte a été longtemps impossible. Tous les calendriers basés sur le mois lunaire étaient donc non prédictibles, sujets à des corrections empiriques destinées à les recaler lorsque les erreurs s'avéraient trop importantes. De plus, même en moyenne, le mois lunaire ne contient pas un nombre entier de jours.

| Soleil | lune |
|---|---|
| aspect toujours semblable<br>périodicité très floue<br>mais très régulière | aspect très changeant<br>périodicité très visible<br>mais très irrégulière |

La lune est le miroir aux alouettes des concepteurs de calendriers : elle semble très facile a aborder, mais c'est un piège mortel dans lequel la plupart des peuples sont tombés. Il leur a fallu ensuite des millénaires pour résoudre à peu près le problème. Par contre, la périodicité du Soleil (des saisons) est difficile à mesurer ; mais au cours du temps, l'observation des défauts du calendrier donne la solution pour le corriger.

Certains calendriers ont été établis à la fois sur la Lune et le Soleil, pour tenter de s'accorder aux deux astres simultanément. On les dit *mixtes* , ou *luni-solaires*. Les périodes solaire et lunaire étant incommensurables (il n'y a pas un nombre entier de lunaisons dans une année solaire, même en valeurs moyennes), ces constructions ne peuvent être qu'imparfaites.

Notre calendrier, pour sa partie qui ne concerne pas la date de Pâques, est exclusivement solaire. Nos mois sont des unités abstraites n'ayant plus aucun lien avec les phases de la Lune qui en sont l'origine. Cependant de nombreuses fêtes, d'origine religieuse mais donnant lieu à des jours chomés, dépendent de la date de Pâques, qui est liée à la lunaison. Notre calendrier grégorien est donc solaire, avec des fêtes luni-solaires.

Tout calendrier permettant de repérer les jours, implique la définition d'une origine. On appelle *ère* cette date, qui ne peut qu'être définie par rapport à un autre système, plus ancien.

La diversité des calendriers pose alors le problème de l'équivalence, c'est-à-dire du passage d'un calendrier à un autre. Si ce changement est facile à faire entre le calendrier grégorien et le calendrier julien en raison de leur lien de filiation, il en est tout autrement si on s'intéresse à un calendrier plus ancien, moins bien défini.

En particulier, pour ceux qui ont été élaborés de manière empirique pour suivre les phases de la lune ou les saisons, il est indispensable de posséder les tables de correction, ce qui est rare pour les plus anciens. On peut donc posséder des dates parfaitement définies dans un calendrier et ne pas pouvoir les rattacher à notre calendrier actuel, par conséquent être incapable de définir précisément la durée qui s'est écoulée depuis. Ce fait, à la rigueur tolérable pour l'historien, est parfois regrettable pour l'astronome qui a du mal à utiliser des observations anciennes.

Un peu en marge du calendrier, l'usage de l'heure d'été, avec un changement d'heure à date variable, ne se prête pas au calcul ; pour connaître l'instant d'un événement dans un temps uniforme, il faut recourir là aussi à des tables.

**Quelques définitions**

*Equinoxe* vient du latin *æqua nox* signifiant "nuit égale" (au jour). C'est le moment où les durées du jour et de la nuit sont égales. Cela se produit deux fois pas an, aux équinoxes de printemps et d'automne. Astronomiquement, les équinoxes sont définis par les instants où le centre du Soleil traverse le plan de l'équateur au cours de l'année. Les équinoxes sont donc les points de l'équateur où il coupe l'orbite de la Terre autour du Soleil.

*Solstice* vient du latin *sol stat*, signifiant que le Soleil est stationnaire, restant d'un jour à l'autre à la même hauteur au-dessus de l'horizon à midi. Les solstices sont relativement faciles à mesurer, à l'aide d'un *gnomon*, simple bâton planté dans le sol dont la longueur de l'ombre indique la hauteur du Soleil.

Les *Tropiques* ; sont deux cercles, sur la Terre ou sur la sphère céleste. Sur la sphère céleste, ils délimitent les points extrêmes, les plus proches des pôles, atteints par le Soleil au cours de l'année. Sur Terre, ce sont les endroits où le Soleil passe au zénith (exactement à la verticale) une fois et une seule dans l'année. Ceci se produit au moment des solstices: Tropique du Cancer dans l'hémisphère nord correspondant au solstice

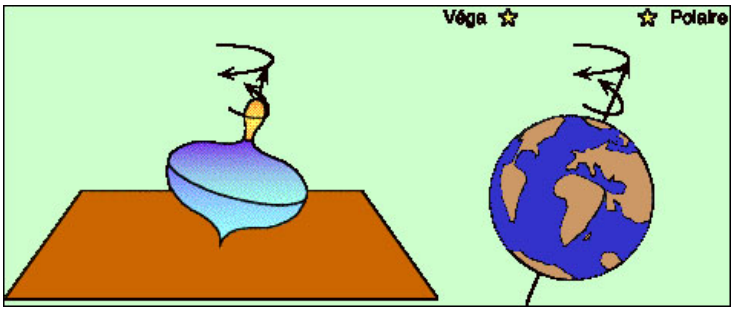
d'été, et Tropique du Capricorne dans l'hémisphère sud correspondant au solstice d'hiver. D'après Bigourdan, le mot tropique viendrait du grec "τροπαι ηλιου"(*tropaï éliou*), qui signifie *les révolutions du Soleil*. Le verbe τρεπω signifie *tourner* (τροπαι βορεαλ= solstice d'hiver); les grecs disent *après que le Soleil a tourné* pour *est passé en hiver* (ou en été). Pour indiquer la direction d'une île, Homère dit en effet qu'elle est *plus au nord que le tournant du Soleil*.

Trois valeurs déterminent les éléments essentiels du calendrier :

- *l'année tropique* est l'intervalle de temps entre deux équinoxes de printemps moyens consécutifs (l'équinoxe vrai est très légèrement variable). C'est l'année des saisons dont on a l'habitude, qui règle le calendrier. Sa durée est de 365,2422 jours, ce qui fait 365j 5h 48min 46s. Astronomiquement, on considère qu'elle commence lorsque la longitude tropique du Soleil atteint 280°, c'est-à-dire dans la journée du 31 décembre. ; mais ceci n'a aucun rapport avec le début conventionnel de l'année calendaire.
- *l'année sidérale* est l'intervalle de temps entre deux passages successifs du Soleil au même point par rapport aux étoiles. Sa durée est de 365j 6 h 9 min 10 s ou 365,25636 j.
- *la lunaison* ou *révolution synodique*, est l'intervalle de temps entre deux nouvelles lunes consécutives. Cet intervalle est ortement variable, car il dépend des positions relatives du Soleil, de la Terre et de la Lune, et cumule donc les inégalités de mouvement de ces astres. On définit donc la *lunaison moyenne*, dont la valeur est de : 29,53059 jours ou 29 j 12 h 44 min 2,9 s.

*Précession des équinoxes*. L'année sidérale est plus longue que l'année tropique de 365,25636 - 365,24220 = 0,01416 j (20 min 23,5 s). Donc le Soleil revient plus vite à l'équinoxe que devant une étoile donnée. Ou encore l'équinoxe se déplace lentement à la rencontre du Soleil. L'axe de rotation de la Terre, ou ligne des pôles, perpendiculaire à l'équateur, décrit donc un cône sur le ciel. Le pôle nord décrit donc sur la voûte céleste un cercle qui l'amènera à 27' de l'étoile α Umi (α UMi est dans la constellation de la Petite Ourse, en latin *Ursa Minoris*, nommée α parce que c'est la plus brillante, de magnitude 2,1) aux alentours de l'an 2100 ; il en est actuellement à un peu plus d'un degré, et c'est elle qui sert d'étoile polaire grâce à son éclat. Dans 12 000 ans, Véga sera la polaire !

Le mouvement de précession de la Terre est exactement le même que celui qui fait décrire un cône à l'axe d'une toupie. Vous pouvez imaginer que la toupie représente la Terre, et que son axe de rotation désigne à chaque instant un point du plafond, qui représente le pôle nord.




Tournant chaque année de 0,01416 j (20 min 23,5 s), l'équinoxe fait donc un tour complet en 365,25636 / 0,01416  25 795 ans *i.e.* à peu près 26 000 ans (période de la précession). La période de la précession étant très longue, on a l'impression de revoir exactement les mêmes étoiles au même moment de l'année ; en fait, il y a un décalage progressif, qui n'est sensible que sur de très longues périodes.

*Lever héliaque*. C'est un phénomène dont l'étymologie provient du nom grec du Soleil, *Helios*. Au cours de l'année, le Soleil parcourt tout le Zodiaque, et reste à peu près un mois dans chaque constellation. Lorsqu'il est dans le Lion par exemple, cette constellation est invisible, et en particulier l'étoile Régulus qui en fait partie. Lorsque le Soleil sort du Lion, Régulus va se dégager de plus en plus de la clarté solaire, jusqu'à redevenir visible dans l'aube. On appelle lever héliaque de Régulus le premier jour où elle peut être observée à nouveau.

Bien que l'observation d'un lever héliaque soit délicate, et parfois entachée d'erreur, c'est une méthode assez fine de détermination de l'année, par ailleurs très floue. Il faut noter toutefois que le lever héliaque d'une étoile se reproduit lorsque le Soleil reprend la même position par rapport aux étoiles, et qu'il mesure donc l'année sidérale et non l'année tropique. Mais la précision de sa détermination étant de l'ordre d'un jour, la différence de 20 minutes entre les deux types d'années n'est pas génante.

Un calendrier purement lunaire présente une année de l'ordre de 29,53059 × 12 = 354,36708 jours, qui se décale très vite par rapport aux saisons (définies par l'année tropique de 365,2422 jours, qui a donc 11 jours de plus). Par contre, la Lune est toujours nouvelle au début du mois, et pleine le 15, ce qui est en accord avec la définition du mois.

Inversement, un calendrier posant par principe que l'année est solaire, et qu'elle est toujours constituée du même nombre de mois (12 mois, fin de l'année correspondant avec la fin d'un mois) implique que le mois ne correspond plus à la lunaison (puisque 12 lunaisons ne comptent que 354 jours), et par conséquent la Lune peut être pleine à n'importe quelle date.

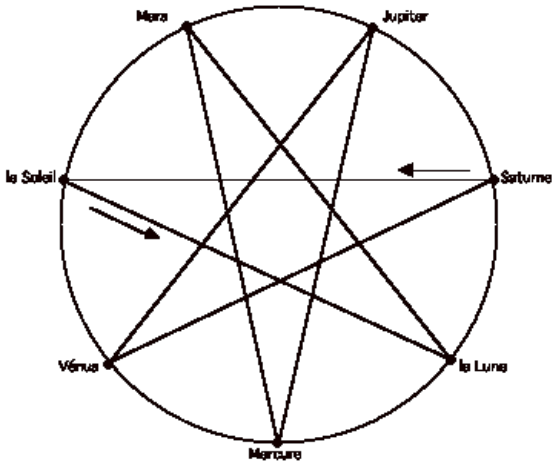
Une solution acceptant l'indépendance des deux phénomènes, avec de vrais mois lunaires et une année solaire, verrait la fin de l'année tomber à date variable, car janvier par exemple reviendrait tous les 354,36708 jours (et pas forcément en fin de jour). Dans ces conditions, si on fêtait une nouvelle année le 31 décembre à minuit, la suivante serait le 11 janvier à 8 heures 48… Aimeriez-vous réveillonner le 11 janvier à 8 h 48 du matin ?

Il faut bien comprendre que les contraintes à prendre en compte sont autant de nature humaine (fin de l'année = fin de mois = fin de jour, régularité des semaines, retour des anniversaires dans les mêmes circonstances…) que de nature astronomique (périodes moyennes, variabilité…).

**La semaine ; les noms des jours**

L'origine lointaine de la semaine, provenant des phases de la lune, se retrouve dans les textes babyloniens, avec les 7 jours différents, mais sans la continuité à laquelle nous sommes habitués. En fin de mois, on revenait au premier jour de la semaine pour inaugurer le mois suivant (comme si tous les premiers du mois chez nous étaient des lundis). Les Hébreux, héritant de cette tradition, ont fondé la semaine que nous connaissons, avec sa continuité. D'autres civilisations ont utilisé un groupement des jours différent : 4 jours en Afrique occidentale, 5 dans le centre de l'Asie, 6 en Assyrie, 10 en Egypte. Une coïncidence a voulu qu'à l'époque sept astres mobiles aient été connus (visibles à l'oeil nu). Le chiffre 7 a donc pris une signification importante, et les 7 jours de la semaine ont été associés à ces astres comme on peut le voir sur le schéma ci-après.

Cette association montre aussi l'intérêt que les Anciens portaient aux figures géométriques régulières (ici, un heptagone étoilé !). Les astres dont les noms figurent sur ce schéma sont les *Planètes* que connaissaient les anciens.




**Attention** : le Soleil et la Lune ne sont pas des planètes dans la terminologie moderne ; le mot planète vient du grec πλανητοσ (*planetos*), qui signifie *errant*. Dans ce sens étymologique, le Soleil et la Lune en font partie. Les planètes sont supposées tourner autour de la Terre, et l'ordre obtenu en suivant les branches de l'heptagone étoilé est celui de leurs distances supposées à la Terre. Il n'a bien sûr aucune justification astronomique, le centre réel du système étant le Soleil.

A partir de Saturne, en suivant la flèche on obtient successivement : le Soleil, la Lune, Mars, Mercure, Jupiter et Vénus. La correspondance entre les *planètes* ou dieux et les noms des jours est donnée par le tableau ci-dessous :

| **dieu ou *planète*** | | **nom du jour** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| latin | scandinave | latin | français | anglais | allemand | provençal | italien |
| Soleil | Soleil | Solis dies | dimanche | sunday | sonntag | dimenche | domenica |
| lune | lune | Lunae dies | lundi | monday | montag | dilun | lunedi |
| Mars | Tyr | Martis dies | mardi | tuesday | dienstag | dimar | martedi |
| Mercure | Odin | Mercurii dies | mercredi | wednesday | mittwoch | dimecre | mercoledi |
| Jupiter | Thor | Jovis dies | jeudi | thursday | donnerstag | dijou | giovedi |
| Vénus | Frigg | Veneris dies | vendredi | friday | freitag | divendre | venerdi |
| Saturne | Saterne | Saturni dies | samedi | saturday | samstag | disate | sabato |

On remarquera que les noms des jours (latin *dies* : jour, provenant d'une racine indo-européenne *diew* : lumière) dérivent du nom du dieu latin ou scandinave correspondant, ou de la *planète*. On notera cependant :

- dimanche vient de *Dies Dominica* = jour du Seigneur, ce qui est évident en italien ; ces mots ne dérivent pas du nom du Soleil. C'est le cas pourtant en anglais et en allemand.
- mittwoch signifie littéralement milieu de semaine ; donnerstag signifie jour de Thor ;
- en provençal, *di* (*dies*) est placé en tête (di-lun = jour-*de la* Lune) alors que *di* en français, *tag* en allemand et *day* en anglais sont placés après (sauf pour dimanche en français).

En Bulgare, les noms des jours sont formés de manière différente :
dimanche se nomme Nédélia ; c'est le nom d'une sainte orthodoxe.
lundi se dit *après dimanche* (Ponédelnik).
mardi, jeudi et vendredi se nomment d'après leur rang à partir du dimanche ;
mercredi se dit *milieu* (comme en allemand) ;
enfin, samedi dérive directement de Sabbat.

# Histoire des calendriers

## *La préhistoire et les monuments mégalithiques*

La préhistoire nous a laissé quelques monuments qui attestent déjà du soucis de comprendre le



mouvement des astres. Le plus célèbre d'entre eux est celui de Stonehenge (ci-contre), dont l'orientation permet, depuis le centre, de voir le Soleil se lever dans la plus grande porte au solstice d'été.

Une pierre de la Vallée des Merveilles ne laisse pénétrer le Soleil levant qu'aux équinoxes.

On trouve de tels alignements en Amérique centrale dans les grandes pyramides à degrés.

Des représentations picturales des astres principaux se trouvent dans le monde entier ; on peut penser que les intempéries ont détruit d'innombrables autres oeuvres, moins bien placées.

## *L'histoire*

Les plus anciens textes connus concernent l'observation du ciel et ont 6 000 ans. Ils proviennent de Mésopotamie. Ils sont à la base des calendriers égyptien, babylonien, hébreu ancien, donc indirectement du nôtre. D'autres calendriers anciens proviennent de Chine et d'Amérique latine.

Les renseignements à propos de ces calendriers sont parfois imprécis, et même faux ou contradictoires. Les notes qui suivent donnent des indications sur les plus importants, et nous développerons tout particulièrement les calendriers julien et grégorien, puisque ce dernier est en usage presque universel maintenant.

L'ordre de présentation choisi n'est pas l'ordre historique, ce qui serait difficile puisque plusieurs calendriers ont existé simultanément. Nous grouperons plutôt les grandes familles de calendriers, montrant ainsi les apports des uns aux autres et leur évolution. Pour les plus anciens, l'absence de traces écrites ne permet pas de préciser les influences ; ceci introduit une part d'arbitraire dans l'ordre de présentation.

### Calendrier chaldéen ou babylonien

Les plus anciennes tablettes d'argile datent de 3800 ans avant J.C., sous le règne de Sargon l'Ancien, et montrent que l'astronomie était déjà développée depuis longtemps.

Elles nous indiquent les plus anciennes observations astronomiques connues. La civilisation des Chaldéens ou Babyloniens remonte au moins à 4000 ans avant J.C. La précision de leur savoir a servi de base à la science grecque. Ils connaissaient le mouvement des planètes, les éclipses, la précession des équinoxes ; ils ont divisé le cercle en 360° et le degré en 60 minutes. Ils utilisaient le *gnomon* ; (bâton planté verticalement dans le sol, dont on mesure l'ombre ; il permet de définir les solstices) et le cadran solaire. Ils ont jeté les bases des premiers calendriers.

> Les peuples anciens ont naturellement compté sur leurs doigts, ce qui a donné la base de numération 10 ; mais 12 a aussi été utilisé car il possède 4 diviseurs propres, contre deux seulement pour 10. Dans le commerce, on utilise encore de nos jours la douzaine. De ces deux bases, on a dérivé la base 60, qui possède les diviseurs de 10 et ceux de 12.

Les Babyloniens ont défini le *zodiaque* : c'est la bande de ciel dans laquelle se meuvent les planètes. Pour indiquer où se trouve une planète à un instant donné, ils ont divisé le zodiaque en douze parties, et les ont nommées ; étant un peuple pastoral, ils ont choisi des noms évoquant leur travail agricole : la zone où se trouvait le Soleil au moment de la naissance des agneaux a pris le nom de *Bélier* ; celle où ils utilisaient les boeufs pour labourer s'est nommée *Taureau* ; celle dans laquelle le Soleil levant cesse de progresser vers le nord de jour en jour, pour redescencre vers le sud a pris le nom de l'écrevisse (*Cancer* = Crabe) qui marche à l'envers ; les *lions* qui s'approchaient des villes à une certaine époque ont donné leur nom à une zone ; la saison des pluies a donné le *Verseau* ; la *Balance* correspond à la période où nuit et jour sont égaux ; le *Sagittaire* indique la chasse aux bêtes sauvages… Ces noms d'animaux ont donné le nom de la bande : *zodiaque* vient du grec *zôô* vivre, *zoidon* figure d'animal, et *zoidiakos* qui concerne les constellations d'animaux

Ceci a été défini 4 300 ans avant J.C. ; le Soleil était alors dans le Taureau au moment de l'équinoxe de printemps. Mais depuis, les choses ont changé : avec la lente dérive de la précession des équinoxes, le Soleil est maintenant dans les Poissons au moment de l'équinoxe, et sera bientôt dans le Verseau (l'équinoxe faisant un tour complet en 26.000 ans, il parcourt 59° en 4.300 ans ; ce qui représente presque deux constellations, puisque chacune occupe 30° sur le ciel). Alors, les noms, ou signes, ne correspondent plus avec les constellations qui accueillent le Soleil.

Le calendrier babylonien est empirique, fondé sur l'observation au jour le jour, sans prévision possible ; il était suffisant pour la société pastorale qui l'utilisait. La Lune a imposé une unité de mesure en rapport avec son évolution : le mois. Les mois se succèdent avec des durées de 29 et 30 jours. Les Babyloniens ont essayé d'accorder leur calendrier sur les saisons, en utilisant une période de 12 mois, l'année. Les éléments essentiels étaient déjà en place. Ils découlent de manière évidente des phénomènes naturels les plus perceptibles.

Cette année dure $29 \times 6 + 30 \times 6 = 354$ jours, d'où un déficit de 11 jours par rapport à l'année solaire (définissant les saisons). Au bout de 3 ans, il manque 33 jours, à peu près un mois. Par décret royal, l'un des mois de l'année est redoublé pour combler ce déficit. En moyenne, le calendrier babylonien comptait donc deux années de 12 mois, suivies d'une de 13. L'adjonction étant empirique, et pas toujours correctement effectuée, la chronologie babylonienne est inutilisable. L'année de 13 mois porte le nom d'*année embolismique* (du grec το εμβολισμα = pièce rajustée à un vêtement).

Le calendrier babylonien est donc un calendrier lunaire, avec ajustement très approximatif sur le Soleil ; de ce fait, on peut le dire luni-solaire. A cause de l'empirisme des ajouts, il est impossible de donner une valeur moyenne de l'année, et on a constaté des années communes de 353, 354 et 355 jours, et des années embolismiques de 383, 384 et 385 jours (nous retrouverons ces valeurs dans le calendrier israélite, mais avec une plus

grande régularité ; cette similitude n'est cependant qu'apparente, car les causes sont toutes différentes).

Pour détecter la dérive, les Babyloniens utilisaient le lever héliaque d'une étoile brillante. Le mois embolismique sera utilisé par de nombreux peuples ; et l'ajout d'un jour bissextil procède de la même méthode, en donnant plus de souplesse à l'ajustement (les à-coups étant moins importants).

Le début du mois est déterminé également par l'observation : le grand prêtre déclare le mois commencé dès qu'il a pu observer le croissant de la Lune après le coucher du Soleil. Le mois et le jour commencent donc au coucher du Soleil. Si le ciel était nuageux le jour où la Lune aurait dû se montrer, il attendait le lendemain ; si le temps était encore défavorable, il déclarait malgré tout le mois commencé, de sorte que l'erreur n'excédait pas 1 jour. L'année commençait au printemps avec le mois de Nisanu.

Les mois ont, semble-t-il, été découpés en 6 périodes de 5 jours, avec des sacrifices à la fin de chaque période. Ceci serait en relation avec l'usage du système sexagésimal (à base 60, comme nos heures de 60 minutes, et nos minutes de 60 secondes) connu depuis la plus haute antiquité à Babylone (*Bab Iloû* : porte de Dieu).

Mais les mois ont été découpés d'autre part en semaines de sept jours, les deux derniers jours des mois de 30 jours ne portant pas de noms, et la semaine reprenant au début le mois suivant. Il n'y avait donc pas la continuité de la semaine que nous connaissons, qui se reproduit indéfiniment sans relation avec les mois et les années.

Chaque jour était dédié à l'une des planètes (au sens *astre errant*, incluant Lune et Soleil). Le dernier jour était consacré à Ea (Saturne) qui était censé apporter la paresse ; il est à l'origine du Sabbah, et de notre dimanche de repos ! L'Eglise dit que ce sont les apôtres qui ont transféré le jour de repos du Sabbah (samedi) au dimanche. Grâce aux tablettes d'argile, les noms babyloniens et assyriens des mois nous sont connus :

| n° | nom babylonien | nom assyrien | n° | nom babylonien | nom assyrien |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Nisanu | Nisanu | 7 | Tashritu | Tasritu |
| 2 | Aïru | Aïru | 8 | Arajshamma | Arah-Samna |
| 3 | Sivanu | Sivanu | 9 | Kisilivu | Kisilev |
| 4 | Douzu | Douzu | 10 | Thebitu | Tebetu |
| 5 | Abu | Abu | 11 | Shabatu | Sebatu |
| 6 | Eliulu | Ululu | 12 | Addaru | Adaru |

Une tablette d'argile datant de 2 000 ans avant J.C. témoigne d'un de ces ajouts, effectué par le roi Hammourabi. Une étude statistique des mois ajoutés montre que les Babyloniens utilisaient une période de 19 ans dès l'an 200 de Nabonassar, *i.e.* vers 550 avant J.C., comprenant 7 années embolismiques aux rangs 3, 6, 8, 11, 14, 17 et 19. Curieusement, l'année 17 du cycle est allongée par un redoublement du mois Ululu, alors que les autres le sont par un mois Adaru II.

**Calendrier égyptien**

Son origine remonte à 10 000 ans ! C'est le premier calendrier qui ait délaissé le rythme lunaire, pour se baser exclusivement sur le Soleil. Pour le peuple cultivateur égyptien, le retour de la crue fertilisante du Nil était bien plus important que les phases de la lune. Ce calendrier comprend néanmoins 12 mois de 30 jours divisés en 3 décades ($12 \times 30 = 360$ est l'origine de la division du cercle en 360 °). L'année est trop courte, et se décale très vite sur les saisons (1 mois en 6 ans).

Vers 4.230 avant J.C. lui succède le *calendrier vague*. Aux 12 mois de 30 jours précédents s'ajoutent 5 jours épagomènes, hors mois, pour totaliser 365 jours. Il a été utilisé pendant plus de 4.000 ans. Encore trop court de presque un quart de jour, ce calendrier n'est pas ancré sur les saisons. Au V$^{e}$ millénaire, à Memphis, le *lever héliaque* de Sirius coïncidait avec la crue du Nil. Le début de l'année, le 1$^{er}$ Thot, fut fixé à ce jour-là. Mais l'année étant trop courte, le lever héliaque de Sirius se fit le 2, puis le 3 Thot… Les Egyptiens constatèrent rapidement que la dérive était d'un jour en 4 ans. Ceci donnait une année de 365,25 jours, valeur connue 4.000 ans avant notre ère. Le décalage n'a pas arrêté les Egyptiens qui ont conservé leur calendrier. Au bout de 1.461 années vagues, l'accord se refit. On appelle cette durée *période Sothiaque* (*Sothys* est le nom égyptien de Sirius).

| nom de la saison | caractéristique | noms des mois | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Akhet | inondation | Thot | Phaophi | Athyr | Choiak |
| Peret | végétation | Tybi | Mechir | Phamenoth | Pharmuti |
| Shemon | récoltes | Pachon | Payni | Epiphi | Mesori |

La durée de l'année est fonction de l'observation de son début et de sa fin (début de la suivante). Si le lever héliaque de Sirius est connu à un jour près, l'erreur sur l'année est de deux jours. Mais sur les 4.000 ans d'usage du calendrier vague, l'erreur reste la même, et doit être divisée par 4.000. Les Egyptiens auraient pu connaître, au terme de l'emploi du calendrier vague, la valeur de l'année à 2 / 4.000$^{e}$ de jour près, *i.e.* à 2 / 4.000$^{me}$ de $24 \times 60 \times 60$ s = 43,2 s. Il faut bien remarquer que cette valeur ne dépend d'aucun appareil de mesure du temps !

L'année vague, sans aucun ajout empirique de jours ou de mois, est un excellent calendrier pour l'astronome, car toutes les années ont 365 jours. Pour calculer une durée, il suffit de multiplier le nombre d'années écoulées par 365. Ce n'est pas vrai avec les autres calendriers.

Le roi Ptolémée III Evergète (Evergète signifie : *le bienfaiteur*) a essayé d'améliorer le calendrier par le décret de Canope en 238 avant J.C. en ajoutant un jour épagomène tous les 4 ans. Ce calendrier préfigure le calendrier julien, pour lequel il a certainement été pris pour modèle. Mais le peuple ne l'a jamais utilisé.

Les Egyptiens ont divisé l'année en périodes de 10 jours, et ont associé à chaque décade une étoile dont le lever héliaque marquait le début. Ces étoiles étaient nommées *décans* (à cause des dix jours). Elles avaient un autre rôle : elles définissaient une division de la nuit. Le décan $D_1$ qui

marquait une décade se levait chaque jour un peu plus tôt ; puis un nouveau décan $D_2$ se levait à son tour, et marquait la décade suivante. Alors, le lever de $D_1$ indiquait le début de la dernière heure de la nuit, qui s'achevait au lever de $D_2$. Au cours d'une nuit d'été, 10 décans se levaient successivement, et divisaient la nuit en 10 heures ; auxquelles s'ajoutaient une heure de crépuscule et une d'aube, ce qui faisait 12. C'est là l'origine de nos journées de 24 heures.

**Calendrier hébreu ancien**

Les Hébreux ont emprunté leur calendrier aux Babyloniens ; il est donc essentiellement lunaire avec ajustement solaire. Les noms des mois sont semblables dès la sortie d'Egypte en 1645 avant J.C. au mois de Nisan ( avril). Moïse impose une année religieuse qui commence en ce mois. Le calendrier est défini par le code d'Hammourabi. Comparer les noms des mois Hébreux ci-dessous avec ceux des mois Babyloniens :

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Nisan | Iyar | Sivan | Tamouz | Ab | Elul |
| Tishri | Marchesvan | Kislev | Tebet | Sebat | Adar |

Les Hébreux attachaient une grande importance à la célébration des anniversaires dans les conditions qui entouraient l'événement. Ceci nécessite le rattachement au Soleil, qui se fait par ajout de mois entiers. Le 13$^{e}$ mois est aussi en usage chez les Macédoniens sous Alexandre.

La fête de Pâques (Pessah, signifiant *passage*) se célébrait le 15 Nisan, la Lune étant pleine (dans un calendrier lunaire, la Lune est toujours pleine le 15). Le 16 avait lieu une offrande d'orge précoce. Ces circonstances doivent donc se répéter aux anniversaires, chaque année. Lorsque les orges précoces ne mûrissaient pas à temps, le grand prêtre ordonnait le redoublement du mois Adar ( mars). Le calendrier hébreu est donc copié sur le calendrier babylonien, avec les mêmes défauts d'irrégularité et de non prévisibilité.

Afin qu'il n'y ait jamais deux jours de fêtes consécutifs, l'année ne pouvait commencer ni un mercredi, ni un vendredi ni un dimanche. Si le premier jour de l'année tombait sur l'un de ces jours, on le reculait d'un jour, augmentant l'année finissante d'un jour et diminuant d'autant l'année commençante. Ceci donne 6 sortes d'années :

communes de 12 mois { régulière de 354 jours ; abondante de 355 jours ; défective de 353 jours

embolismiques de 13 mois { régulière de 384 jours ; abondante de 385 jours ; défective de 383 jours

**Calendrier israélite moderne**

C'est l'évolution du calendrier hébreu. Les Juifs ont adapté le cycle de Méton dès qu'ils l'ont connu, c'est-à-dire au IV$^{e}$ siècle de notre ère. Les années de 13 mois prennent place aux rangs 3, 6, 8, 11, 14 et 19 du cycle. Il date du quatrième siècle de notre ère.

A l'heure actuelle, le calendrier israélite est toujours basé sur le même principe, mais en utilisant les phases calculées de la Lune et non plus observées. Les phases sont calculées par les tables astronomiques en usage à l'heure actuelle. On notera de ce fait une grande différence avec le calendrier grégorien, qui utilise un comput conventionel. Les années sont comptées à partir de la création du monde qui, dans la tradition juive, est datée de l'an 3761 avant notre ère.

**Calendrier musulman**

Avant l'Islam, les arabes définissaient une année de 12 mois, portant pour noms :

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Mutamer | Nadjir | Jawan | Sawan | Hinum | Ronna |
| Asam | Adel | Natik | Waghel | Hewah | Barak |

Les noms ont été changés sous le règne de Kêlab, trisaïeul de Mahomet, en 412 de notre ère. Ce calendrier dérivait sur les saisons, et à l'apparition de l'Islam, le pèlerinage à La Mecque, censé se faire en automne, se mit à dériver. On décida donc d'ajouter un mois pour rattrapper ; cet ajout n'étant pas suffisant, Mahomet fit son pèlerinage, 3 mois avant sa mort, en avril ; il interdit à l'avenir l'ajout du treizième mois, probablement pour mettre fin aux ajustements trop imprécis. Le calendrier est donc redevenu purement lunaire.

Les mois ont changé de noms :

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Mouharram | 30 | Safar | 29 | Rabi'-oul-Aououal | 30 | Rabi'-out-Tani | 29 |
| Djoumada-l-Oula | 30 | Djoumada-t-Tania | 29 | Radjab | 30 | Cha'ban | 29 |
| Ramadan | 30 | Chaououal | 29 | Dou-l-Qa'da | 30 | Dou-l-Hidjja | 29 ou 30 |

La durée de l'année musulmane est 6 × 30 + 6 × 29 = 354 jours (le dernier mois étant de 29 jours) ; 12 lunaisons moyennes comptent 12 × 29,530588 = 354,367056 jours. La différence avec l'année musulmane est 0,367056 jours *i.e.* 8 h 48 min 34 s par an. Au bout de 30 ans la différence atteint 0,367056 × 30 = 11,01168 jours. Le calendrier prévoit donc d'ajouter 11 jours dans un cycle de 30 années musulmanes. La différence est ainsi réduite à 11,01168 - 11 = 0,01168 jours *i.e.* 16 min 49 s. Au bout de 100 années musulmanes (un peu moins de 97 de nos années), elle correspond à 0,01168 × 100 = 1,168 jour. Depuis la création de leur ère, les musulmans ont donc été obligés de rattraper par un

autre mécanisme les divergences observées entre leur calendrier et la Lune réelle.

Les années de 354 jours sont appelées *années communes*, les années de 355 jours sont dites *années abondantes*. Dans le cycle de 30 ans, il y a 11 années abondantes. Par conséquent la durée moyenne de l'année musulmane est :

$$354 \times 19 + 355 \times 11 = 10.631 \text{ j} ;$$

$$10.631 / 30 = 354{,}366 \text{ j}$$

Ces 30 années lunaires comptant exactement 30 × 12 mois, la durée moyenne de la lunaison est :

$$10.631 / (30 \times 12) = 29{,}530556 \text{ j}$$

Il est bien évident que l'année de 354,366 jours se promène dans l'année solaire à grande vitesse. C'est ainsi que le mois de Ramadan, qui est celui du jeûne musulman, se déplace d'à peu près 11 jours chaque année solaire (donc par rapport au calendrier grégorien), ce qui fait en gros un tour complet en 30 ans. Notons que les musulmans ont basé leurs mois sur l'apparition du mince croissant dans le crépuscule. Celui-ci n'étant pas visible avant une trentaine d'heures après la conjonction, les mois musulmans sont décalés par rapport aux lunaisons.

Les musulmans utilisent bien sûr la semaine, et les noms des jours sont :

| dimanche | lundi | mardi | mercredi | jeudi | vendredi | samedi |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Youm el Ahad | Youm el Thani | Youm el Thaleth | Youm el Arbaa | Youm el Thamis | Youm el Djouma | Youm el Effabt |

L'ère musulmane est l'*Hégire*, dont l'origine est la fuite de Mahommet, qui est parti de la Mecque vers Médine où il est arrivé le vendredi 16 juillet 622 julien. Pour cela, Youm el Djouma est le jour de la grande prière.

**Calendrier chinois**

La définition d'un calendrier a été ordonnée par le roi Yao il y a plus de 4.000 ans. Ce calendrier lunaire divise l'année en 12 mois alternativement de 29 et 30 jours. Pour rester en accord avec les saisons, les chinois ajoutaient un mois de temps en temps. Ils ont connu la valeur de 365,25 jours pour l'année depuis la dynastie Shang au moins, ce qui reporte à 1600 ans avant J.C.

Grâce à leurs calculs, ils ont découvert le cycle de Méton avant l'heure, cycle qu'ils nommaient *Tchang*. Dans la période de 19 ans, ils intercalaient le treizième mois dans les années 3, 6, 9, 11, 14, 17 et 19. Le premier mois de l'année est celui qui voit l'entrée du soleil dans les Poissons. Depuis l'an 104 avant J.C., le début de l'année tombe entre le 21 janvier et le 20 février.

Les prévisions étant difficiles, il revenait au souverain, après consultation des astronomes, de fixer la longueur du mois et le moment d'intercalation d'un mois supplémentaire. Ceci ne donne pas une chronologie précise. Mais les chinois ont utilisé à côté de ce calendrier un cycle de 60, qui ignore l'astronomie, et donc n'est pas sujet aux difficultés induites par les astres. Cette chronologie-là est particulièrement fiable, et s'étend sur plus de 3 millénaires.

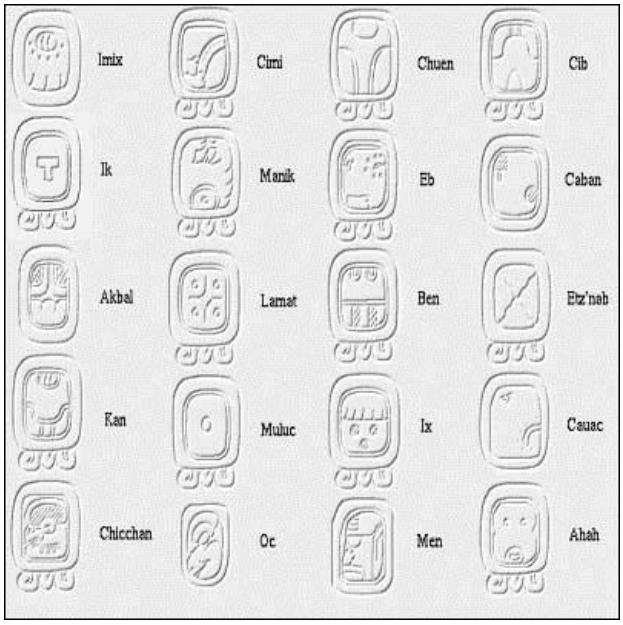
Les chinois ont défini les dix *troncs célestes*, nommés : *Jia* , *Yi*, *Bing* , etc. ; et les douze *rameaux terrestres*, nommés : *Zi*, *Chou* , *Yin*, etc. Des animaux sont associés aux rameaux terrestres depuis le sixième siècle. A chaque saut du cycle, on passe d'un tronc au suivant, et d'un rameau au suivant. On revient dans l'état initial après 60 combinaisons. Partant de *Jia*-*Zi*, la moitié des combinaisons possibles seulement est utilisée. Le tableau suivant donne le cycle :

| | | *rameaux terrestres* | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **Zi rat** | **Chou bœuf** | **Yin tigre** | **Mao lièvre** | **Chen dragon** | **Si serpent** | **Wu cheval** | **Wei chèvre** | **Shen singe** | **You coq** | **Xu chien** | **Hai cochon** |
| *troncs célestes* | **Jia** | 1 | | 51 | | 41 | | 31 | | 21 | | 11 | |
| | **Yi** | | 2 | | 52 | | 42 | | 32 | | 22 | | 12 |
| | **Bing** | 13 | | 3 | | 53 | | 43 | | 33 | | 23 | |
| | **Ding** | | 14 | | 4 | | 54 | | 44 | | 34 | | 24 |
| | **Wu** | 25 | | 15 | | 5 | | 55 | | 50 | | 35 | |
| | **Ji** | | 26 | | 16 | | 6 | | 56 | | 46 | | 36 |
| | **Geng** | 37 | | 27 | | 17 | | 7 | | 57 | | 47 | |
| | **Xin** | | 38 | | 28 | | 18 | | 8 | | 58 | | 48 |
| | **Ren** | 49 | | 39 | | 29 | | 19 | | 9 | | 59 | |
| | **Gui** | | 50 | | 50 | | 30 | | 20 | | 10 | | 60 |

C'est grâce à ce calendrier que les astronomes ont pu dater précisément l'explosion de la supernova qui a donné naissance à la nébuleuse du Crabe en 1054.

**Calendrier maya**

Les Mayas utilisaient une numération vigésimale (à base 20). Les nombres sont représentés par des têtes de divinités vues de profil (glyphes), associés à des chiffres. Cette pratique s'est étendue à leur calendrier. C'est le seul peuple de l'Amérique précolombienne qui nous ait laissé un système complet d'écriture. Le jour est appelé *kin* (Soleil en Maya), et à chacun sont associés un nom et un glyphe :



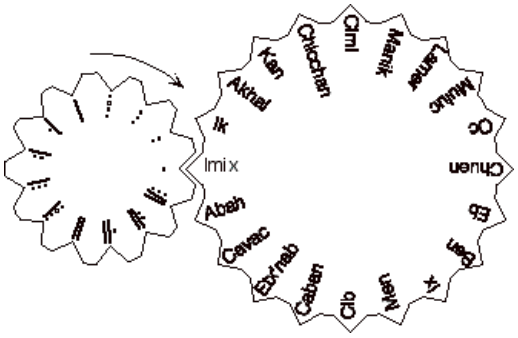




Il existe deux autres unités de rang supérieur, que nous pourrions par analogie appeler mois et année : un *uinal* comprend vingt jours, et un *tun (pierre)*, qui devrait comprendre naturellement 20 uinal (dans leur système à base 20), est ramené à 18 pour correspondre à peu près à l'année solaire (ceci totalise 360 jours au lieu de 365,24). Les mois portent aussi des noms et ont des glyphes associés.

Ci-contre, les glyphes et les noms des mois.

Pour les durées plus longues, les Mayas utilisent des groupes de 20 tun = *katun* (7.200 jours), et des groupes de 20 katun = *baktun* (144.000 jours). Une date est le compte de jours écoulés (écrit dans la numération vigésimale) depuis l'origine du calendrier Maya, 3113 avant notre ère. Cette date très ancienne est certainement antérieure à la civilisation Maya, et semble avoir été choisie pour des raisons obscures, sans doute religieuses. Le nombre de baktun, de katun, de tun, de uinal et de kin détermine une date.




Un système parallèle existe, qui indique le rang du jour dans un cycle de 260 jours. Il constitue *l'almanach rituel* des Mayas. Nommé *tzolkin* (cercle sacré), il indique également l'âge de la Lune, l'équivalence avec l'année solaire, et le nom de la divinité patronne du jour. Les Mayas connaissent la valeur de l'année solaire de 365,25 jours, mais ne l'utilisaient pas dans leur calendrier. Cependant, ils établissaient des corrections qui attestent de leurs connaissances astronomiques.

Schéma montrant l'association entre les noms des jours (dans un cycle de 20), et leur rang dans un cycle de 13. Au bout de 260 jours, on revient à la situation initiale.

La représentation des nombres figurée sur la roue de gauche est la suivante :




L'étude des mouvements de la Lune et de Vénus est très poussée, et a atteint des valeurs tout à fait correctes. Vénus était la plus importante de toutes les planètes, et était appelée *Quetzalcoatl Ku Kulcan*, serpent oiseau. Les Mayas avaient obtenu la valeur de 584 jours pour la révolution synodique de Vénus. Cette durée avait une grande importance religieuse. Le jour du lever héliaque était particulièrement risqué, et les rites qui l'accompagnaient très importants.

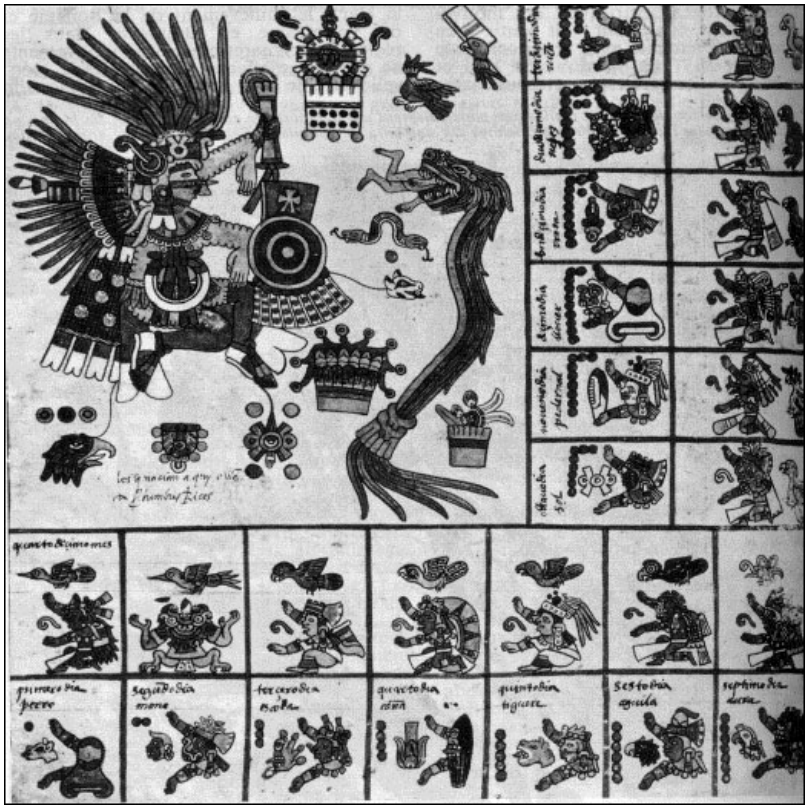
Pour obtenir ce résultat, les Mayas ne disposaient pourtant d'aucun instrument de mesure digne de ce nom, ils utilisaient l'architecture (soigneusement calculée) pour établir des alignements. C'est pourquoi leurs monuments ont des orientations précises, de même que certains détails architecturaux tels que des fenêtres placées pour viser une étoile particulière.

On a déterminé de telles orientations pour les pyramides d'Egypte. De là à penser que le volume de la grande pyramide divisé par la racine cubique de l'âge du dernier pharaon est exactement le nombre Pi…

**Calendrier aztèque**

Les aztèques ont hérité des Olmèques et des Mayas l'usage de la divination mêlée à l'astronomie. Ils rédigeaient des *tonalamatl* (= livre du destin), dans lesquels ils associaient aux jours les dieux auxquels ils étaient consacrés. Ils y faisaient figurer pour chaque jour le dieu de la lumière et le dieu de l'obscurité, et l'oiseau de ces divinités. Ce sont des calendriers rituels et divinatoires, divisés en 20 sections de 13 jours. Ils dérivent directement des tzolkins mayas.

L'année solaire était constituée de 18 mois de 20 jours, et de 5 jours considérés comme maléfiques, les *nemontemi*. On distingue donc 3 années, de longueurs différentes : une année divinatoire (de 260 jours), une année solaire (de 365 jours) et une année vénusienne de 584 jours (répétant les mêmes positions de la planète par rapport au soleil).



Encyclopédia Universalis, article"Calendrier" page 792

Page du Codex Borbonicus représentant l'une des 20 sections de 13 jours d'un tonalamatl. Remarquer les divinités et les oiseaux associés. (Bibl. Assemblée Nationale)

**Calendrier persan**

Les Perses ont adopté un calendrier solaire, ce qui est beaucoup plus facile à faire qu'un calendrier lunaire, du fait de la grande régularité du mouvement apparent du Soleil, si l'on parvient à mesurer la durée de l'année tropique. Ils ont trouvé une solution très astucieuse pour obtenir un calage à long terme sur les saisons, ce qui fait qu'ils connaissaient précisément, au moins implicitement, cette durée.

Leur principe de base est le même que le nôtre : des années communes de 365 jours, et des années longues de 366. Ils ajoutaient un jour à une année sur quatre. Mais ils faisaient cela sept fois de suite, donc pendant 28 ans ; ensuite, ils rompaient la série en ne mettant qu'un seul jour de plus dans les 5 années qui suivaient. Ceci nous donne une durée du cycle de : $7 \times (3 \times 365 + 366) + 4 \times 365 + 366 = 12.053$ jours répartis en $28 + 5 = 33$ ans.

La durée moyenne de l'année est donc de $12.053 / 33 = 365{,}24242424$ jours

Le nombre de jours ajoutés en 33 ans est de 8 ; donc la durée moyenne de l'année s'écrit aussi $365 + 8 / 33 = 365{,}24242424$ j. Nous verrons plus loin un calcul très simple permettant d'obtenir cette fraction. Cette valeur est vraiment très proche de l'année tropique réelle, et nous verrons que l'approximation obtenue est légèrement **meilleure** que celle de notre calendrier grégorien !

Les Perses auraient pu ajouter les huits jours supplémentaires en une seule fois, au terme de la période de 33 ans. Ceci aurait été une procédure extrêmement simple, avec le seul inconvénient de permettre un décalage croissant avec les saisons en cours de période.

**Calendrier grec**

Il y eut plusieurs calendriers grecs anciens, toutes les villes n'étant pas en accord sur ce sujet. Mais les différences étant minimes, nous nous intéresserons plus particulièrement à celui d'Athènes.

Le calendrier grec n'est pas directement à la base de notre calendrier actuel. Son intérêt principal tient à la participation de grands astronomes connus pour d'autres travaux : Eudoxe, Callipe, Hipparque, Ptolémée, Méton… Il montre aussi que des affinements successifs sur une durée importante ont permis d'obtenir des valeurs de l'année et surtout de la lunaison qui sont vraiment très proches des valeurs établies à l'heure actuelle. On remarquera ainsi que le calendrier a bien rendu à l'astronomie l'aide qu'elle lui a apportée.

Le calendrier grec fut d'abord purement lunaire, avec des mois de 30 jours, puis avec des mois alternés de 29 et 30 jours (bien que la durée des mois soit trop longue par rapport à la lunaison). Ceci donnait une année de 6 × 30 + 6 × 29 = 354 jours. L'ajustement aux saisons est resté très mauvais pendant longtemps.

Au 8$^{e}$ siècle avant J.C., Hésiode a composé un calendrier de la vie courante, destiné aux agriculteurs, indiquant le repère des étoiles par rapport aux cultures. Des prévisions météo s'y ajoutent, puis des indications sur les jours fastes et néfastes. Ce sont les *parapegmes*, ancêtres des almanachs (παραπηγμα : tables astronomiques, pour consigner la division du temps).

Les Grecs ont longtemps ajusté leur calendrier par rapport à l'année par adjonction empirique de mois. Ensuite, ils ont systématisé la correction en ajoutant un mois plein (30 jours) tous les deux ans. L'usage du mois embolismique a été adopté définitivement en 430 avant J.C. à Athènes.

Ceci donne une année trop longue. Par la suite, ils n'ont plus ajouté qu'un mois tous les 3 ans ce qui produit une année trop courte… Enfin, ils ont découvert *l'octaétéride*, comprenant 8 années, la 3$^{me}$, la 5$^{e}$ et la 8$^{e}$ ayant 13 mois. Les mois sont alternativement *pleins* (30 jours) et *caves* (29 jours) sauf les 3 mois complémentaires qui étaient pleins.

La durée de l'octaétéride est donc : 5 × (6 × 30 + 6 × 29) + 3 × (6 × 30 + 6 × 29 + 30) = 2.922 j sur 8 ans, ce qui fait 2.922 / 8 = 365,25 jours. Cette durée semble connue depuis -775. C'est exactement la même que celle du calendrier julien.

D'autre part, l'octaétéride utilise une valeur de la lunaison trop courte. En effet, le nombre total de mois dans l'octaétéride est : 8 × 12 + 3 = 99. Il leur correspond 2 922 jours, donc la durée moyenne d'un mois est de 2 922 / 99 = 29,51515. L'erreur par rapport à la lunaison moyenne est :

29,53059 - 29,51515 = 0,0154385 j ( *i.e.* 22 min 14 s).

Sur une octaétéride complète, l'erreur s'élève à 0,0154385 × 99 = 1,5284115 ; et sur 10 octaétérides (80 ans), elle atteint 15 jours, ce qui fait que la Lune est pleine quand le calendrier la voudrait nouvelle ! L'octaétéride semble connue dès le VIII$^{e}$ siècle avant J.C. en Grèce.

La solution fut une période de 19 ans nommée *cycle de Méton* (Méton, astronome grec qui vivait à Athènes vers 430 avant J.C.) qui indique que 19 ans = 235 lunaisons (voir la seconde partie de ce texte pour le calcul du cycle). Après 19 ans, les phases reviennent aux mêmes dates des mêmes mois. Cette découverte fut publiée en 433 avant J.C. Le cycle de Méton organise comme suit les 235 mois parmi les 19 années :

| | | | |
|---|---|---|---|
| 5 années de | 355 jours, qui totalisent | | 1.775 j |
| 7 | 354 | | 2.478 j |
| 6 | 384 | | 2.304 j |
| 1 | 383 | | 383 j |
| | | total | 6.940 j |

L'année moyenne correspondante fait 6.940 / 19 = 365,78 j ; la lunaison 6.940 / 235 = 29,5319 j.
Ces valeurs sont toutes deux trop longues. Elles sont moins bonnes que celles fournies par l'octaétéride, mais elles s'accordent mieux entre elles. Le décalage se fait maintenant par rapport au Soleil, mais il est plus difficile à détecter.

Les Athéniens, émerveillés, ont fait graver en chiffres d'or les nombres du cycle de Méton sur les colonnes du temple de Minerve. C'est pourquoi le rang d'une année dans le cycle de Méton porte le nom de *Nombre d'or* (les Babyloniens connaissaient probablement le cycle de Méton au VIII$^{e}$ siècle avant notre ère).

La connaissance de ce cycle en 433 avant J.C. est incertaine. Il est par contre sûr qu'il était utilisé en 342 avant J.C..

A cette époque, Callipe propose une amélioration en groupant 4 cycles en une seule période de 76 ans, mais en supprimant 1 jour ; donc la *période de Callipe* comprend 4 × 19 = 76 années. Elle compte d'autre part 6.940 × 4 - 1 jours = 27 759 jours. L'année de Callipe moyenne vaut : 27.759/76 = 365,25 j (comme l'année julienne).

De même, la période de Callipe comprend 235 × 4 = 940 lunaisons. D'où la lunaison moyenne de 27.759/940 = 29,53085 j. L'erreur sur la lunaison est : 29,53085 - 29,53059 = 0,00026 j (22 s) !

En 130 avant notre ère, Hipparque fut le premier à découvrir que l'année est plus courte que 365,25 jours. Sur 4 cycles de Callipe, il retrancha encore un jour ; ceci donne les chiffres suivants :

4 × 76 = 304 ans 4 × 27.759 - 1 = 111.035 j pour la période

donc 111.035 / 304 = 365,2467 jours (365 jours 5 h 55 min), ce qui fait 6 min d'erreur sur l'année.

Le nombre de lunaisons est 4 × 940 = 3.760 ;

La lunaison moyenne 111.035 / 3.760 = 29,5305851 j (29 jours 12 h 44 min 2 s)

ce qui correspond à moins d'une seconde d'erreur !! Ceci vers 130 avant J.C….

> On remarquera que pour augmenter la précision, on s'adresse à des périodes de plus en plus longues. Puisque l'élément correcteur est de durée constante (1 jour), pour effectuer des corrections plus fines, il faut diminuer son importance relative.

On peut remarquer aussi que la précision sur la lunaison est bien meilleure que sur l'année ; c'est parce que la lunaison est beaucoup plus facile à observer que les saisons, et que sa période est plus courte. La lune changeant rapidement d'aspect, il est facile de déterminer ses phases à moins d'un jour près.

Les Grecs n'ont cependant pas suivi ces résultats, et leur calendrier est resté approximatif et basé sur l'octaétéride. Ils n'utilisaient pas la semaine, mais la décade.

**Calendrier romain**

A la fondation de Rome (753 avant J.C.), les Romains ont utilisé l'année primitive dite de Romulus (premier roi de Rome). Elle comprenait 10 mois totalisant 304 jours (4 mois de 31 jours et 6 mois de 30). Ils la tenaient d'un ancien peuple, les Albains. Ce calendrier est curieux, avec des mois ne correspondant pas à la lunaison (et donc une dérive de la lune), et une année ne correspondant pas plus au soleil ! on pourrait presque dire que ce calendrier n'est ni solaire, ni lunaire… Les années sont numérotées à partir de la fondation de Rome, à partir de 1 (les Romains ne connaissaient pas le chiffre zéro).

| Martius | Aprilis | Maïus | Junius | Quintilis |
|---|---|---|---|---|
| 31 j | 30 j | 31 j | 30 j | 31 j |
| Sextilis | September | October | November | December |
| 30 j | 30 j | 31 j | 30 j | 30 j |

L'origine éthymologique des 4 premiers mois est la mythologie : Martius est le nom du dieu de la guerre ; Aprilis vient de Aperta, autre nom d'Apollon ; Maïus vient de Maïa, déesse mère de Mercure ; Junius vient de même de Junon, femme de Jupiter. Pour les autres, le nom est tout simplement leur numéro dans l'année : Quintilis = cinquième, Sextilis = sixième… On voit sur le tableau que l'année commençait le 1$^{e}$ mars.

Cette année étant beaucoup trop courte par rapport à l'année tropique, on ajoutait le nombre de jours suffisant pour rattraper l'erreur après le mois de December. Ce rattrapage était empirique, les jours ajoutés ne portaient pas de nom.

Sous Numa Pompilius (second roi de Rome, 715-673 av. J.C.) on systématisa le rattrapage en ajoutant deux mois, ce qui porta l'année à 355 jours (4 mois de 31 jours, 7 de 29 et 1 de 28). Ces mois ont pris les noms de Januarius (29 jours) et Februarius (28 jours), consacrés à Janus, roi du Latium et dieu de la paix, et à Febbruo, dieu des morts. Februarius fut placé après December, et Januarius après Februarius.

Vers l'an 400 de Rome (vers 350 avant J.C.) on déplaça Februarius entre Januarius et Martius. L'année est essentiellement lunaire, avec une durée de 355 jours. Bien que la longueur des mois ne cadre pas avec la lunaison, les 12 mois totalisent à peu près 12 lunaisons (355 jours contre 354,6). Pour les besoins de l'agriculture, il fallait cependant assurer un calage à peu près correct sur l'année des saisons, aussi il fut décidé d'ajouter un mois, nommé *Mercedonius*, de 22 ou 23 jours, et qui, curieusement, était placé au milieu de Februarius !

Les nombres impairs étaient censés plaire aux dieux. Les Romains ont donc déplacé des jours de manière à n'avoir que des mois de longueur impaire, sauf Februarius qui a la double infortune d'être le plus court et d'avoir un nombre pair de jours. La constitution d'une année commune, sans mois intercalaire, était donc :

| Martius | Aprilis | Maïus | Junius | Quintilis | Sextilis |
|---|---|---|---|---|---|
| 31 j | 29 | 31 j | 29 j | 31 j | 29 j |
| September | October | November | December | Januarius | Februarius |
| 29 j | 31 j | 29 j | 29 j | 29 j | 28 j |

Les jours portaient des noms :

*Calendes* (nouvelle lune)
*Nones* (premier quartier ; neuvièmes, nb de jours entre Nones et Ides)
*Ides* (pleine lune ; du verbe *Iduare* : diviser)

Calendes, en latin *Calendæ*, de *Calendus* = devant être appelé. Chaque 1$^{e}$ du mois, on convoquait solennellement le peuple de Rome pour lui faire connaître les jours fériés. Les Calendes étaient dédiés à la déesse Junon, qui a pris de ce fait le surnom de *Calendaris*.

La pleine lune devait tomber le 14 ou le 15. Mais les nombres pairs étant considérés comme néfastes, on préférait la faire tomber artificiellement le 13 dans le premier cas.

Pour désigner les autres jours, les Romains comptaient à l'envers ! Ainsi :

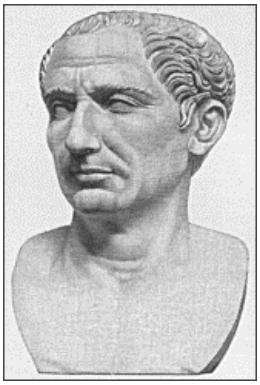
Le 2 était le IV$^{e}$ avant les Nones.
Le 3 était le III$^{e}$ avant les Nones
Le 4 était la veille des Nones

Le 3 est nommé 3$^{e}$ avant les Nones, car le jour des Nones lui-même est compté. Il en est de même avec les Ides et les Calendes. Nous verrons plus loin que cette numérotation a donné son nom au jour bissextil.

A l'époque républicaine, les Calendes sont consacrées à Junon et Janus, les Ides à Jupiter.

Incapables de recaler correctement leur calendrier sur les saisons, les Romains donnèrent au collège des Pontifes le droit de choisir la durée du mois intercalaire. Les Pontifes ont alors allongé ou raccourci l'année en cours pour favoriser les consuls en exercice ou leurs successeurs. Cette corruption appela la réforme du calendrier.

**Calendrier julien**



Jules César est né à Rome en juillet 101 avant J.C. De caractère ambitieux, la guerre des Gaules, qui a duré 9 ans, a été pour lui un moyen de prendre le pouvoir : il s'est constitué une armée solide et dévouée qui lui a, par la suite, permis de lutter contre ses adversaires en Italie même, et de prendre le pouvoir.

Bien qu'il n'ait pas fondé l'empire, son nom est resté comme symbole du pouvoir ; il a donné le mot allemand *Kaiser* (empereur) et le mot slave *Tsar* (qui signifie roi en Russe, Bulgare…).

Soupçonné de vouloir prendre le titre de roi, il a été assassiné aux Ides de mars 44 par une conjuration attachée à la République, menée par Brutus. Brutus était le fils de sa maîtresse Servilia, et César le considérait comme son propre fils. C'est pourquoi on lui prête cette exclamation : *Tu quoque, mi fili !* toi aussi, mon fils !

Caius Octavius, petit-neveu de César, est né à Rome en 63 avant J.C. Dans son testament, César l'a adopté et lui a donné son nom. Il a pris plus tard le nom d'Auguste (*Augustus*) sous lequel il est connu. C'est lui qui a réellement fondé l'empire romain, qui devait durer 5 siècles. Il est mort le 14 août 14 après J.C.

Pour mettre fin aux désordres du calendrier, Jules César, en l'an 708 de Rome (46 avant J.C.) impose une réforme qui apparaît à la fois audacieuse, car il a fixé les années sans l'intervention des pontifes, mais timide en ce qui concerne la structure des mois, qui ont conservé leurs irrégularités.

Pour calculer le calendrier, il fit venir d'Alexandrie l'astronome Egyptien Sosigène. Ils choisirent une durée de l'année moyenne de 365,25 jours, bien qu'un siècle plus tôt Hipparque savait déjà que cette valeur était trop forte. On a donc un cycle comprenant 3 années de 365 jours, suivies d'une année de 366.

Le jour ajouté doubla le 24 février (puisque c'est là qu'on insérait traditionellement Mercedonius). Le 24 février s'appelait 6$^{e}$ avant les Calendes de mars, *i.e. Sextius Ante Calendas Martias*. Donc en le redoublant, on obtint le ***Bis Sextius*** *Ante Calendas Martias*, d'où le nom de *bissextil*.

L'année 708 de Rome étant en grave désaccord avec les saisons, César l'allongea à 455 jours (une année anormale servira de nouveau quelques siècles plus tard pour réformer le calendrier julien et passer au grégorien). On la nomme *Année de confusion*. De plus, César a ramené le début de l'année au 1$^{e}$ janvier. *L'ère Julienne* (à ne pas confondre avec la période julienne, que nous verrons plus loin) débute le 1$^{e}$ janvier de l'an 45 avant notre ère. Mercédonius disparaît, et ses jours sont répartis aux mois de 29 jours. C'est ainsi que les mois, d'origine lunaire, ont perdu leur correspondance de durée approximative avec la lunaison. Cette structure de l'année est parvenue jusqu'à nous ; seul le début de l'année a connu au Moyen Age de nombreuses vicissitudes, au hasard des années et des pays. Les noms des mois de l'année julienne à l'origine étaient :

| Januarius | Februarius | Martius | Aprilis | Maïus | Junius |
|---|---|---|---|---|---|
| 31 j | 28 (29) j | 31 j | 30 j | 31 j | 30 j |
| Quintilis | Sextilis | September | October | November | December |
| 31 j | 31 j | 30 j | 31 j | 30 j | 31 j |

Les noms *Quintilis* (cinquième), *Sextilis* (sixième), *September* (septième), *October* (huitième), *November* (neuvième) et *December* (dixième) ne correspondent donc plus à leurs numéros. Ils subsistent néanmoins.

Aux Calendes de janvier, les Romains fêtaient la nouvelle année ; ils veillaient à ne pas prononcer de paroles de mauvais augure, se rendaient des visites, et échangeaient de menus cadeaux, nommés *strena*. C'est l'origine de nos étrennes.

La réforme de Jules César a été mal comprise, et mal appliquée pendant quelques années : les pontifes intercalèrent une année bissextile tous les trois ans. Il s'ensuivit un décalage auquel l'empereur Auguste remédia en décrétant qu'il n'y aurait pas d'années bissextiles pendant 12 ans.

En 44 avant J.C., Marc-Antoine donna au mois Quintilis, pendant lequel Jules César était né, son nom *Julius*, qui est devenu juillet. De même, en 8 avant J.C., le Sénat donna à Sextilis le nom de l'empereur Auguste : *Augustus*, qui est devenu août. *Julius* et *Augustus* n'ayant pas le même nombre de jours, ce qui ne plaçait pas les deux monarques sur pied d'égalité, quelques transferts subsidiaires ont amené l'année à ce que nous connaissons actuellement. La structure de l'année n'a pas changé depuis ; seule la répartition des jours bissextils sera légèrement modifiée plus tard. On peut donc dire que notre calendrier a plus de 2.000 ans.

La numérotation des jours par les Calendes a subsisté jusqu'au XVI$^{e}$ siècle. Ce sont les peuples Barbares qui ont institué la numérotation à l'aide des chiffres arabes.

L'année 0 n'existe pas. L'invention du zéro est d'ailleurs tardive, car c'est un concept abstrait ; elle est due aux hindous au V$^{e}$ siècle de notre ère. Le zéro est dérivé de la marque du vide, qui était nommée *sunya* et figurée par un petit cercle. Il est devenu *sifr* en arabe, puis *zephirum* en latin, qui donna *zephiro* et donc zéro. On note que le nom arabe du zéro, *sifr*, a donné le nom générique de tous les chiffres.

Le premier siècle a donc commencé avec l'an 1, et pour compter 100 ans, il s'est achevé **à la fin** de l'année 100. Le deuxième siècle a commencé au premier janvier 101. Par conséquent, le XXI$^{e}$ siècle commença le premier janvier 2001, et l'an 2000 est la dernière année du XX$^{e}$ siècle !

Arthur C. Clarke, auteur d'un livre, suivi par Stanley Kubrik qui en a tiré un film, ne s'y sont pas trompés : le titre est bien ***2001**, l'Odyssée de l'espace*. Ils ont placé l'action dans un futur proche, mais qui marquait une véritable rupture : le début d'un millénaire, un vaste avenir devant soi…

**Date de Noël**

Les fêtes célébrées actuellement dans la partie du monde de tradition chrétienne ont diverses origines, et leurs dates en découlent. Les deux principales fêtes sont Noël et Pâques, dont nous allons voir l'origine.

Très anciennement, dès que les hommes en ont été conscients, ils ont célébré le retour du soleil, au moment où les jours commençaient à rallonger, c'est-à-dire au solstice d'hiver ; les Romains célébraient à cette date *Dies Solis Invicti* (le jour du soleil invaincu). Au début de la chrétienté, le soucis d'éradiquer ces anciennes fêtes a conduit à les remplacer par d'autres, d'inspiration religieuse. Ce serait pourquoi *Noël* du latin *Natalis*) a été fixé au 25 décembre, qui est très proche du solstice. L'Eglise d'Orient a célébré la Nativité le 6 janvier jusqu'au 6$^{e}$ siècle. Un décret apostolique de l'an 376 a fixé la date du 25 décembre. En Espagne, le 6 janvier est toujours une grande fête.

**Date de Pâques**

La Pâque est une fête juive à l'origine (voir le calendrier hébreu). Elle est célébrée le 14$^{e}$ jour du mois de Nisan (début du printemps). Le calendrier israélite étant lunaire, la lune était toujours pleine à cette date, et son éclairage facilitait les déplacements. Le Christ célébrait la Pâque, et il est mort à l'heure où les prêtres égorgeaient les agneaux au temple. Mais la tradition chrétienne à Rome voulait qu'on célèbre la fête de Pâques (avec un s) un dimanche, car la résurection avait eu lieu ce jour-là. Après de très longues discussions, Pâques a été défini par le concile de Nicée en 325 de notre ère comme :

Le premier dimanche qui suit (strictement) la première pleine lune de Printemps.

A l'époque, la valeur connue de l'année est de 365,25 jours, et l'équinoxe tombait le 21 mars. Les membres du concile ont cru que cette date était définitive, et l'ont utilisée pour déterminer la date de Pâques. La règle ci-dessus devient donc : *le premier dimanche qui suit (strictement) la première pleine lune après le 21 mars*. Un procédé de calcul, nommé Comput (du latin *computare* = calculer), permet d'obtenir la date de Pâques à partir de cette formule.

| **Pâques est le dimanche qui suit le quatorzième jour de la Lune qui atteint cet âge au 21 mars ou immédiatement après** |
|---|

**Ere chrétienne**

En 532 julien, le moine Denys le Petit (*Dionysus Exiguus*) calcula que le Christ avait dû naître en 754 de Rome. Il en profita pour proposer cette année pour début d'une nouvelle ère. Cette proposition ne s'est imposée qu'au VIII$^{e}$ siècle sous Charlemagne dans le royaume des Francs.

Il résulte de cette modification que le calendrier julien était en vigueur avant même l'année choisie pour origine. Il existe donc des années avant J.C. Mais on n'a jamais défini d'année 0. Ainsi, l'année qui précède immédiatement l'année 1 après J.C. est l'année 1 avant J.C. Une autre façon de désigner les années antérieures à notre ère est la notation relative (avec des nombres négatifs). La correspondance est :

| … | -2 | -1 | **0** | 1 | 2 | 3 | **4** | … |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| … | 3 av. J.C. | 2 av. J.C. | **1 av. J.C.** | 1 ap. J.C. | 2 ap. J.C. | 3 ap. J.C. | **4 ap. J.C.** | … |

L'année 4 après J.C. est bissextile (son millésime est divisible par 4). Comptant 4 années vers le passé, on s'aperçoit que l'an 1 av. J.C. doit donc l'être aussi. Mais son millésime 1 n'est pas divisible par 4. Par contre, dans la notation relative, les années bissextiles sont bien les années 0, -4, -8 etc. dont les millésimes sont divisibles par 4.

Il est facile de calculer une durée dans la notation relative, par soustraction des millésimes, beaucoup moins dans l'autre. Toutefois, les historiens utilisent la première.

**Jésus-Christ est né avant J.C. !**

Le début de notre ère ayant été fixé par Denys le Petit au 1$^{e}$ janvier qui suit la naissance du Christ, celui-ci serait donc né le 25 décembre de l'an 1 avant J.C….ce qui est déjà bien étrange ! Mais il y a pire.

Il n'est pas possible de déterminer historiquement la date de naissance du Christ, les registres ayant été perdus. On peut la déterminer approximativement en recoupant avec d'autres événements. Rome a ordonné un recensement sous le règne d'Hérode le Grand, pour lequel Marie et Joseph se sont rendus à Bethléem, où Jésus est né. Or, Hérode est mort en l'an 4 avant J.C. (année 750 de Rome). Les Evangiles nous donnent aussi de nombreuses indications, qui mettent en évidence les années 747, 748 et 749 de Rome (donc 7, 6 ou 5 avant J.C.). Le début de l'ère chrétienne, qui était censé correspondre avec l'année de la naissance du Christ, est donc erroné. Et le Christ est né aux alentours de 5 av. J.C. !

**Autres éléments**

L'*indiction romaine* (voir le calendrier des postes) était une période de 15 ans intermédiaire entre le mois et l'année, un peu comme le lustre (5 ans). Elle servait pour les impôts ! passons… L'indiction donnée par le calendrier est le rang de l'année dans un cycle de 15 ans.

Le *cycle dominical*, ou *cycle solaire*, est le produit de deux cycles : la période de 7 correspondant aux jours de la semaine, et une période de 4 correspondant aux années communes et bissextiles. Au bout de 7 × 4 = 28 ans, les jours reviennent aux mêmes dates du mois.

Le troisième élément, le nombre d'or (voir le paragraphe relatif au calendrier grec) est utilisé pour le calcul de la date de Pâques, puisqu'il permet d'obtenir l'âge de la lune. La lunaison vraie s'écarte beaucoup de la lunaison moyenne. Ces variations rendent très difficile la prévision des phases, qui seule permet d'établir à l'avance un calendrier. Le calendrier julien et son successeur grégorien sont les seuls ayant des caractères lunaires à utiliser une méthode prédictive. A l'époque de Jules César, il n'était pas question d'établir une théorie de la lune. Le cycle de Méton a fourni une méthode alternative, basée sur la répétition. Par l'observation soignée des phases au cours d'un cycle, il est possible d'établir un tableau de prévision des phases des cycles suivants, avec une erreur de moins d'un jour sur une période de 320 ans. Le tableau ci-dessous donne donc toutes les nouvelles lunes d'un cycle de Méton en fonction du nombre d'or :

| **Nb d'Or** | **janv** | **fév** | **mars** | **avril** | **mai** | **juin** | **juil** | **août** | **sept** | **oct** | **nov** | **déc** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 23 | *21* | 23 | *21* | 21 | *19* | 19 | *17* | 16 | *15* | 14 | *13* |
| 2 | 12 | *10* | 12 | *10* | 10 | *8* | 8 | *6* | 5 | *4* | 3 | *2* |
| 3 | *1* | | *1* | 29 | 29 | *27* | 27 | *25* | 24 | *23* | 22 | *21* |
| 4 | 20 | *18* | 20 | *18* | 18 | *16* | 16 | *14* | 13 | *12* | 11 | *10* |
| 5 | 9 | *7* | 9 | 7 | 7 | *5* | 5 | *3* | *2* | 2,*31* | 30 | *29* |
| 6 | 28 | *26(27)* | 28 | *26* | 26 | *24* | 24 | *22* | 21 | *20* | 19 | *18* |
| 7 | 17 | *15* | 17 | *15* | 15 | *13* | 13 | *11* | 10 | *9* | 8 | *7* |
| 8 | 6 | *4* | *6* | 5 | 4 | 3 | *2* | 1,*30* | 29 | *28* | 27 | *26* |
| 9 | 25 | *23* | 25 | *23* | 23 | *21* | 21 | *19* | 18 | *17* | 16 | *15* |
| 10 | 14 | *12* | 14 | *12* | 12 | *10* | 10 | *8* | 7 | *6* | 5 | *4* |
| 11 | *3* | 2 | *3* | 2 | *1,31* | *29* | 29 | *27* | 26 | *25* | 24 | *23* |
| 12 | 22 | *20* | 22 | *20* | 20 | *18* | 18 | *16* | 15 | *14* | 13 | *12* |
| 13 | 11 | *9* | 11 | *9* | 9 | 7 | 7 | *5* | 4 | *3* | 2 | *1,31* |
| 14 | 30 | *28(29)* | 30 | *28* | 28 | *26* | 26 | *24* | 23 | *22* | 21 | *20* |
| 15 | 19 | *17* | 19 | *17* | 17 | *15* | 15 | *13* | 12 | *11* | 10 | *9* |
| 16 | 8 | *6* | 8 | *6* | 6 | 4 | 4 | *2* | *1* | 1,*30* | 29 | *28* |
| 17 | 27 | *25(26)* | 27 | *25* | 5 | *23* | 23 | *21* | 20 | *19* | 18 | *17* |
| 18 | 16 | *14* | 16 | *14* | 14 | *12* | 12 | *10* | 9 | *8* | 7 | *6* |
| 19 | 5 | *3* | *5* | 4 | *3* | 2 | 1,30 | *28* | 27 | *26* | 25 | *24* |
| **Nb d'Or** | **janv** | **fév** | **mars** | **avril** | **mai** | **juin** | **juil** | **août** | **sept** | **oct** | **nov** | **déc** |

Les lunaisons de 29 et 30 jours alternent presque toujours. Les chiffres en italique correspondent au début des lunaisons de 30 jours. Les parenthèses en février concernent les années bissextiles.

**Les fêtes mobiles**

Fêtes liées à Pâques :

| | |
|---|---|
| *Septuagésime* | neuvième dimanche avant Pâques |
| *Quinquagésime* | (dimanche de Carnaval) 7 semaines avant Pâques |
| *Mercredi des Cendres* | début du carême 3 jours après<br>Le Carême compte 40 jours, dimanches exclus |
| *Pentecôte* | (signifie Cinquantième) 7 semaines après Pâques |
| *Ascension* | le jeudi 10 jours avant la Pentecôte |
| *Trinité* | dimanche après Pentecôte |
| *Fête-Dieu* | dimanche après la Trinité |
| *Epiphanie* | elle était célébrée le 6 janvier (fête provenant de l'Eglise d'Orient) ;<br>elle a maintenant été fixée au premier dimanche de janvier. |

L'Avent est le début de l'année liturgique : le premier dimanche de l'Avent est le plus proche du 30 novembre ; c'est donc une fête légèrement mobile.

**Calendrier grégorien**

Nous avons vu que la durée de l'année choisie par César était trop longue : 365,25 jours au lieu de 365,2422 jours. Ceci fait une différence de 11 minutes par an. Bien que faible, cette erreur va s'accumuler, et en 129 ans atteindre un jour. Ainsi, à long terme, le calendrier dérive encore par rapport aux saisons. Une nouvelle réforme va s'imposer.

Cette nouvelle réforme du calendrier ne s'est pas faite en un jour, et n'est pas l'œuvre d'une seule personne. Dès le milieu du XIII$^{e}$ siècle, Jhon de Holywood, moine écossais, a proposé de modifier l'ajout des jours bissextils juliens. Puis des astronomes espagnols, sur ordre d'Alphonse X de Castille, ont déterminé la valeur de l'année tropique : 365 j 5 h 49 min 12 s (seulement 26 secondes de trop). Au XIV$^{e}$ siècle, le pape Clément IV fit faire une étude sur ce sujet, mais mourut avant de prendre une décision. Puis le cardinal Pierre d'Ailly saisit le concile de

Constance en 1417 sur ce problème, sans résultat. Le cardinal Nicolas de Cusa fit une proposition au concile de Bâle en 1439, sans succès encore. A la fin du XV$^{e}$ siècle, le pape Sixte IV fit venir Regiomontanus (Jean Muller de Koenigsberg) pour travailler sur la question, mais le malheureux est mort avant d'avoir donné ses résultats… Le concile de Latran en 1514, celui de Trente en 1563 ont remis la question sur le tapis. Pie V ne put venir à bout de la réforme. Enfin, ce fut Grégoire XIII qui, en 1582, parvint au but. On a donc donné son nom au nouveau calendrier. On peut cependant trouver dans les livres une autre appellation : la réforme grégorienne étant en fait une retouche du calendrier Julien, celui-ci a souvent été nommé *vieux style*, et le grégorien *nouveau style*.



Dès le début de son règne, Grégoire XIII a nommé une commission, composée de savants, dont Clavius et Aloïsio Lilio (auteur d'un projet qui servit de base de discussion). Pour remettre le calendrier en accord avec les saisons, il fallait supprimer des jours ; mais comment ? Au temps de Jésus, l'équinoxe tombait le 25 mars ; mais il tombait déjà le 21 lors de l'important concile de Nicée. Laquelle des deux dates choisir ? Le nombre de jours à retrancher n'était pas le même…

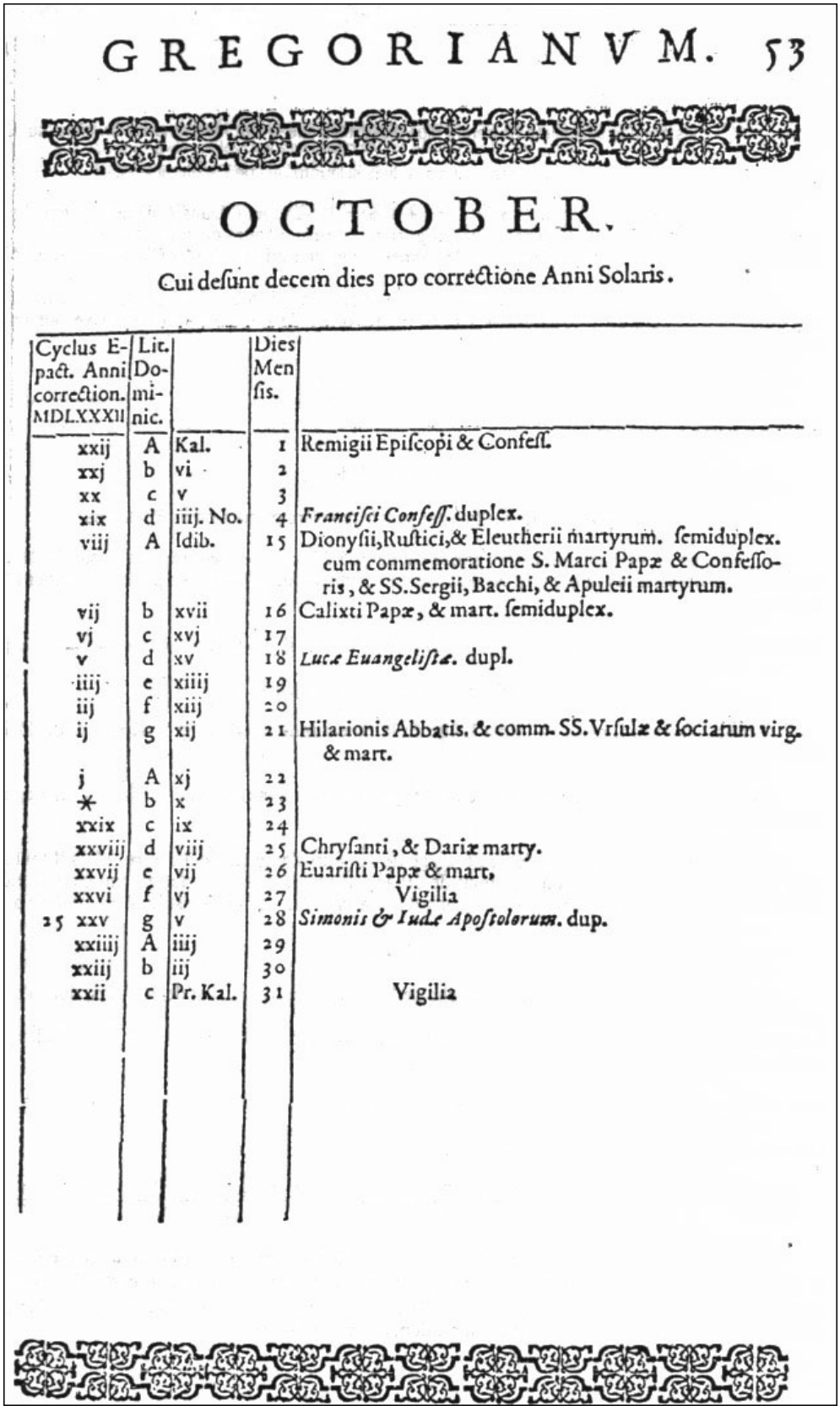
On peut signaler que la proposition de Clavius n'a pas fait l'unanimité ! En particulier François Viète, inventeur de l'algèbre, l'a pris à parti sur les principes de la réforme, employant des arguments pas toujours très judicieux. Viète a publié en 1600 un calendrier modifié, afin de corriger les erreurs qu'il imputait à Clavius : *Relatio Kalendarii vere gregoriani*.

Une fois la décision de retrancher 10 jours prise, à quel moment le faire ? En une seule fois (comme César en a rajouté pour *l'année de confusion*), ou bien en supprimant le caractère bissextil des années à venir, jusqu'à ce que l'accord se refasse (méthode analogue à celle employée par Auguste) ? Le pape a choisi le 21 mars pour date de l'équinoxe, et décidé de retrancher les 10 jours de recalage en une seule fois. Il en a averti les rois, les églises… Après leur consentement, il publia la bulle *Inter Gravissima* le 24 février 1582, qui instaura sa réforme. Ainsi, en Italie le lendemain du 4 octobre 1582 a été le 15 octobre 1582. En France, l'application a un peu tardé, et c'est seulement en décembre que la suppression a été faite : le lendemain du 9 décembre 1582 a été le 20 décembre (sous le règne d'Henri III).

L'ajustement étant refait, il fallait éviter qu'un nouveau décalage se produise ; grâce à la bonne valeur connue à l'époque pour l'année tropique, Clavius a montré qu'il fallait supprimer 1 jour bissextil tous les 400 ans ; ceci est très simple, et nous le verrons dans la seconde partie. Grégoire XIII a décidé, par soucis de simplicité, de supprimer le caractère bissextil des années séculaires (dont le millésime se termine par deux 0) si leur millésime n'est pas divisible par 400.

| | |
|---|---|
| Règle 1 | **les années séculaires ne sont bissextiles que si leur millésime est divisible par 400** |
| Règle 2 | **les années non séculaires sont bissextiles si leur millésime est divisible par 4** |

Donc, 1600 et 2000 restent bissextiles, alors que 1700, 1800 et 1900 ne le sont plus.



GREGORIANVM. 53

OCTOBER.

Cui desunt decem dies pro correctione Anni Solaris.

| Cyclus E-pact. Anni correction. MDLXXXII | Lit. Do-mi-nic. | | Dies Men-sis. | |
|---|---|---|---|---|
| xxij | A | Kal. | 1 | Remigii Episcopi & Confess. |
| xxj | b | vi | 2 | |
| xx | c | v | 3 | |
| xix | d | iiij. No. | 4 | *Francisci Confess.* duplex. |
| viij | A | Idib. | 15 | Dionysii, Rustici, & Eleutherii martyrum. semiduplex. cum commemoratione S. Marci Papæ & Confessoris, & SS. Sergii, Bacchi, & Apulei martyrum. |
| vij | b | xvii | 16 | Calixti Papæ, & mart. semiduplex. |
| vj | c | xvj | 17 | |
| v | d | xv | 18 | *Lucæ Euangelistæ.* dupl. |
| iiij | e | xiiij | 19 | |
| iij | f | xiij | 20 | |
| ij | g | xij | 21 | Hilarionis Abbatis. & comm. SS. Vrsulæ & sociarum virg. & mart. |
| j | A | xj | 22 | |
| * | b | x | 23 | |
| xxix | c | ix | 24 | |
| xxviij | d | viij | 25 | Chrysanti, & Dariæ marty. |
| xxvij | e | vij | 26 | Euaristi Papæ & mart. |
| xxvi | f | vj | 27 | Vigilia |
| 25 xxv | g | v | 28 | *Simonis & Iudæ Apostolorum.* dup. |
| xxiiij | A | iiij | 29 | |
| xxiij | b | iij | 30 | |
| xxii | c | Pr. Kal. | 31 | Vigilia |

page montrant le premier calendrier grégorien, pour le mois d'octobre 1592 ;
provenance inconnue…

*Cui defunt decem dies pro correctione Anni Solaris* : suppression de 10 jours pour corriger l'année solaire

La suppression de 10 jours est un rattrapage de même nature que l'ajout des jours bissextils ou des mois embolismiques. Simplement, il est plus brutal que ce à quoi nous sommes habitués. Rapellez-vous qu'Auguste a choisi une solution plus douce pour résoudre exactement le même problème, en supprimant l'ajout des jours bissextils pendant 12 ans.

La réforme, n'a pas été adoptée dans tous les pays en même temps. Par exemple :

| | |
|---|---|
| 1582 | Italie, Espagne, Portugal, France (sous Henri III, 9 - 20 décembre), Pays-Bas catholiques |
| 1584 | Autriche, Allemagne catholique, Suisse catholique |
| 1586 | Pologne |

| | |
|---|---|
| 1587 | Hongrie |
| 1610 | Prusse |
| 1700 | Allemagne protestante, Pays-Bas protestants, Danemark, Norvège |
| 1752 | Royaume-Uni, Suède |
| 1753 | Suisse protestante |
| 1873 | Japon |
| 1911 | Chine |
| 1917 | Bulgarie |
| 1919 | Roumanie, Yougoslavie |
| 1923 | URSS, Grèce |
| 1926 | Turquie |

Tous ces pays utilisaient antérieurement le calendrier julien, à l'exception de la Chine et du Japon qui avaient un calendrier national, et de la Turquie qui se servait du calendrier musulman.

L'examen de ces dates justifie une remarque de Kepler : *"Les protestants aiment mieux être en désaccord avec le soleil que d'accord avec le Pape"* ! Lorsqu'enfin ils se rallièrent au nouveau calendrier, ils modifièrent le calcul de la date de Pâques, modification connue sous le nom de *correction de Weigel*. Cette correction fut abandonnée en 1778 par Frédéric le Grand.

L'application de la réforme provoqua des troubles à Riga, à Londres… Le peuple n'admettait pas qu'on touche à son calendrier. Bien que le calendrier grégorien ait encore des défauts, une nouvelle réforme serait difficile à faire admettre !

Certaines dates historiques, concernant des pays non encore ralliés au calendrier grégorien, sont écrites dans les deux calendriers. Ainsi, on note 10/23 janvier 1920 (10 janvier 1920 julien = 23 janvier 1920 grégorien). Il faut noter qu'au Moyen Age on écrivait en latin ; et les noms romains des jours (Calendes, Ides, Nones) ont perduré jusqu'au XVI$^{e}$ siècle dans des actes publics.

Enfin, le calcul de la date de Pâques a été modifié pour tenir compte de ces changements :

- à chaque année séculaire non bissextile, on retranche un jour à l'Epacte. Cette règle se nomme *Métemptose*.
- pour corriger l'erreur du cycle de Méton, on ajoute une unité à l'Epacte tous les 300 ans quand une année séculaire arrive. Cette règle se nomme *Proemptose*. La première fut opérée en 1800.
- la Proemptose de l'an 4200 est retardée à l'an 4300 et il en est de même tous les 2.500 ans.

Deux remarques importantes :

- le caractère religieux du calendrier lui vient des fêtes ; à part elles, il suit le plus précisément possible le cours des saisons, et c'est ce qui le rend acceptable par tout le monde ;
- il est le mélange de nombreuses cultures et traditions : les Hébreux, les Romains, les Barbares (Thor…) ont participé à sa définition ; ce trait participe à son acceptation, et rendra très difficile son abandon.

Vous trouverez en seconde partie de cet opuscule des formules expliquées permettant de faire tous les calculs sur ce calendrier.

Le calendrier julien est parfois appellé "ancien style", par opposition au grégorien, qui est dit "nouveau style".

**Calendrier républicain**

La République a été proclamée le 22 septembre 1792, par hasard le jour de l'équinoxe d'automne. Ce hasard a amené les révolutionnaires à prendre ce jour pour début de l'ère républicaine (premier Vendémiaire an I). Le calendrier républicain a été créé le 6 octobre 1793. Les noms des mois ont été proposés par Fabre d'Eglantine ; ils sont magnifiques par leurs consonances, et sont en rapport avec la saison :

| mois | Etymologie des noms des mois | débute le | termine le |
|---|---|---|---|
| Vendémiaire | Vendemia (Latin) = vendange | 22 septembre | 21 octobre |
| Brumaire | brume (Français) | 22 octobre | 20 novembre |
| Frimaire | frimas (Français) | 21 novembre | 19 décembre |
| Nivôse | nivis (Latin) = neige | 21 décembre | 19 janvier |
| Pluviôse | pluviosus (Latin) = pluvieux | 20 janvier | 18 février |
| Ventôse | ventosus (Latin) = venteux | 19 février | 20 mars |
| Germinal | germination (Français) | 21 mars | 19 avril |
| Floréal | floraison (Français) | 20 avril | 19 mai |
| Prairial | prairie (Français) | 20 mai | 18 juin |
| Messidor | messis (Latin) = moisson | 19 juin | 18 juillet |
| Thermidor | thermos(Grec) = chaud | 19 juillet | 17 août |
| Fructidor | fructus(Latin) = fruit | 18 août | 16 septembre |

Les 12 mois comportent 30 jours (12 × 30 = 360). Les années normales comprennent 5 jours de plus, placés après Fructidor, et appelés *Sans-culottides*. Une année sur quatre est dite *sextile* ; elle comprend un jour de plus nommé *jour de la Révolution*. Ceci fait une année moyenne de

365,25 jours, comme l'année julienne. La période de quatre années est appelée *Franciade*, et se termine par le jour de la Révolution.

L'année commence le 1e Vendémiaire, pour la raison suivante : la royauté a été abolie par la Convention Nationale le 21 septembre 1792, et le décret est paru le 22. Or ce jour-là était l'équinoxe d'automne, où jour et nuit sont égaux, où la Terre entière (pôles compris) est éclairée par le Soleil. Le symbolisme avec l'égalité proclamée entre les citoyens était frappant, et a conduit les révolutionnaires à choisir cette date pour début de l'année et de leur ère. On pourrait y voir *a posteriori* une ombre au tableau : à l'équinoxe d'automne, la déclinaison du Soleil est décroissante…

La Révolution a donné des noms pour remplacer (et chasser) les noms des jours provenant de l'astrologie ancienne, et ceux des saints. Ainsi, la semaine est supprimée, et remplacée par la décade ; chaque jour de la décade sera doté d'un nom, selon un système très pratique. Le nom du jour est dérivé de son numéro dans la décade :

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1 primidi | 2 duodi | 3 tridi | 4 quartidi | 5 quintidi |
| 6 sextidi | 7 septidi | 8 octidi | 9 nonidi | 10 décadi |

Il était très simple de savoir quel jour on était (contrairement à notre calendrier grégorien) : si on est un quartidi, c'est le 4, le 14 ou le 24. Comme on sait toujours si on est au début, au milieu ou à la fin du mois, l'ambiguïté est levée.

L'erreur systématique du calendrier julien se retrouve ici ; de plus, les calculs du calendrier républicain sont approximatifs, car le début de l'année était fixé par l'observation de l'équinoxe d'automne ! Il renouait donc avec l'empirisme des anciens… Si on ajoute à cela que les noms des mois sont relatifs au climat de Paris, que les termes de Franciade, Sans-culottide… sont liés à un événement français, on voit que ce calendrier, contrairement au système métrique, n'avait aucun caractère d'universalité. Il n'est pas étonnant qu'il ait été rapidement abandonné.

**Calendrier universel**

Les réformes du calendrier ont souvent rencontré une forte opposition, due à la force des habitudes. Certaines ont été abandonnées, par exemple celle de Ptolémé III Evergète qui a réformé le calendrier vague, mais n'a pas été suivi par le peuple. De même, le calendrier Républicain n'a duré que 12 ans. Tout ceci montre quelles précautions il faut prendre lorsqu'on envisage de réformer le calendrier, même si cette transformation paraît nécessaire. Toute tentative dans ce sens doit prendre en compte les habitudes, et surtout ne pas rompre avec la chronologie. Les anniversaires font partie de la civilisation.

Nous avons vu que notre calendrier grégorien est un excellent calendrier solaire, et l'erreur qui subsiste sur la durée de l'année est plus faible que la variabilité de cette année ; nulle réforme ne s'impose sur ce plan. Les critiques qu'on pourrait lui faire portent sur la répartition des jours en mois, dont nous avons vu l'origine historique. Une plus grande régularité apporterait quelques améliorations, mais le prix à payer serait l'abandon d'une tradition. Dans ces conditions, il apparaît extrêmement difficile de fixer le calendrier.

On peut toutefois envisager des modifications par l'adoption de jours blancs, placés hors semaine. Le principe est de fixer les dates (le 28 mars serait toujours un jeudi…). L'année devrait pour cela être un multiple de la semaine. Or $7 \times 52 = 364$. Il manque donc un jour au moins.

Si on conserve l'essentiel du calendrier grégorien, qui a fait ses preuves avec plus de 400 ans d'existence, et qui est d'usage à peu près universel, on voit que le 1e janvier se décale d'un jour chaque année (car 365 jours = 52 semaines de 7 jours plus 1 jour ; le décalage est de 2 jours pour les années bissextiles). Si on désire que toutes les années commencent par le même jour (lundi par exemple) il est alors nécessaire d'envisager que le dernier jour des années communes ou le dernier jour et le bissextil des années bissextiles soient des jours blancs, hors semaine, *i.e.* sans nom.

Grégorien + dates fixes  brisure de la continuité de la semaine

Cette brisure étant admise, on peut considérer plusieurs arrangements des jours et des mois dans l'année :

- simple suppression du nom du 31 décembre (jeudi, mardi…)
- année de 12 mois, mais avec des trimestres identiques de 91 jours respectivement de 31, 30 et 30 jours, plus le jour blanc ; le bissextil est blanc aussi. C'est le calendrier universel (Armelin et Mamin, 1887 ; soutenu par Camille Flammarion).
- année de 13 mois égaux de 28 jours = 4 semaines ; $13 \times 28 = 364$ jours plus 1 jour blanc. C'est le calendrier fixe, dit *positiviste*, basé sur les propriétés subjectives des nombres, proposé par Auguste Comte en 1849. Cette solution est inacceptable, car des superstitions sont attachées au nombre 13, qui d'autre part est premier.

| **calendrier universel** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| janvier<br>avril<br>juillet<br>octobre | | | | | | | février<br>mai<br>août<br>novembre | | | | | | | mars<br>juin<br>septembre<br>décembre | | | | | | |
| D | L | M | M | J | V | S | D | L | M | M | J | V | S | D | L | M | M | J | V | S |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | . | . | . | 1 | 2 | 3 | 4 | . | . | . | . | . | 1 | 2 |
| 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |
| 29 | 30 | 31 | . | . | . | . | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | . | . | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |

31 décembre et 31 juin : jours blancs ; si l'année est bissextile, Pâques le 8 avril

Il existe une autre solution, sans jours blancs :

- 400 années tropiques = 400 × 365,2422 = 146.096,97 jours
- 400 années grégoriennes = 146.097 jours (voir le Calendrier Grégorien).

Il se trouve que 146.097 jours = 7 × 20.871 jours = 20.871 semaines. Donc il est possible de créer une période de 400 ans au cours de laquelle un minimum de calendriers distincts est nécessaire.

20.871 n'est pas divisible par 4, ce qui impose d'avoir des siècles de longueurs différentes : 3 siècles de 5.218 semaines, et un de 5.217. La répartition des semaines dans les années du siècle se fait en utilisant des années ayant un nombre entier de semaines : les années communes avec 52 semaines = 52 × 7 = 364 jours, suivies d'années longues ayant une semaine de plus (le caractère bissextil passe du jour à la semaine ; rapellez-vous que dans les temps anciens, on ajoutait des mois entiers). Une année plus longue d'une semaine tous les 5 ans convient, car 4 × 364 + (364 + 7) = 1.827 jours et 1.827 / 5 = 365,4.

Un calendrier de ce type est plus uniforme que le grégorien, mais marque des ruptures plus importantes. Est-il vraiment souhaitable d'atteindre une plus grande uniformité ? La diversité de notre calendrier n'a-t-elle pas un certain charme ? …

**Période Julienne**

Une solution très simple pour établir une chronologie consiste à numéroter les jours à partir d'une origine conventionnelle. Si cette méthode n'a été adoptée par aucune civilisation, c'est qu'elle amène l'emploi de grands nombre malcommodes à utiliser. Cependant, les astronomes sont habitués à ce genre d'exercice, et se servent d'une numérotation dont l'origine est le

1$^{e}$ janvier 4 713 avant J.C. à midi.

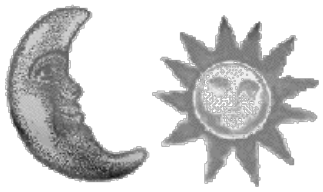
En plaçant le début du jour à midi, les astronomes occidentaux s'assuraient que toute une nuit d'observation s'étendait sur une même date. Cette numérotation présente par ailleurs un grand intérêt en histoire, pour établir la concordance entre les différents calendriers.

La *période julienne*, ou *période de Scaliger* a été imaginée par Joseph Scaliger en 1583, dans son ouvrage *Opus Novum de Emmendatione Temporum* (étude nouvelle de la correction du temps). C'est une suite de 7.980 ans, obtenue en multipliant le cycle dominical (28 jours) par le cycle de Méton (19 ans) et par l'indiction romaine (15 ans) : 28 × 19 × 15 = 7.980. En divisant le rang d'une année dans la période de Scaliger par 15, 19 et 28, les restes donnent l'indiction romaine, le nombre d'or et le cycle solaire.

Son origine, qui semble tout à fait arbitraire, est choisie parce que ce jour-là les trois nombres en question valaient 1 (lundi 1$^{e}$ janvier d'une année bissextile). Chaque année, l'annuaire du Bureau des Longitudes publie des tables de correspondance permettant un calcul facile de la période julienne pour une date donnée.

Le calcul des durées est le point fort de cette période : le nombre de jours séparant deux dates est obtenu par soustraction des valeurs correspondantes de la période julienne.

Le cycle actuel de Scaliger s'achèvera le 31 décembre 3 267 julien, ou le 22 janvier 3 268 grégorien.



## *Deuxième Partie*

Dans cette partie consacrée aux calculs du calendrier, nous utiliserons uniquement la division entière (appelée *division euclidienne*) pour représenter tous les calculs. Chaque formule sera amenée de manière logique, à partir des règles du calendrier ou des phénomènes astronomiques. Si l'aspect des formules peut paraître rébarbatif de prime abord, leur calcul est extrêmement simple.

L'utilisation de ces formules permettra de résoudre tous les problèmes liés au calendrier grégorien, en particulier quelques exercices amusants placés à la fin de la section. Le plus courant de ces problèmes consiste à retrouver, quelques années après, quel jour de la semaine correspond à une date donnée, de naissance par exemple.

**Calcul de la règle solaire grégoriene**

Le calendrier julien présente une dérive par rapport aux saisons, qui reste faible sur une courte durée, mais devient gênante à l'échelle du millénaire. Or un calendrier moderne doit atteindre cette portée. L'erreur se matérialise simplement en comparant les durées moyennes de l'année tropique et de l'année julienne :

| | | |
|---|---|---|
| Année Julienne | = | 365, 2500 jours |
| Année Tropique | = | 365, 2425 jours |
| différence | = | 0, 0075 jours |

La valeur de l'année tropique indiquée ici est celle connue en 1582 (voir le paragraphe sur le calendrier grégorien). L'année julienne est trop longue de 0,0075 jours. Le siècle julien est donc trop long de 0,75 jours = 3/4 jour. Donc 4 siècles juliens sont trop longs de 3 jours, ce qui justifie les deux premières règles grégoriennes (si on refait le calcul avec une valeur plus moderne de l'année tropique 365,2422 on ne change pas le résultat).

Dans un siècle julien, il y a 25 × (3 × 365 + 366) = 36 525 jours. Dans 4 siècles juliens il y en a donc 4 × 36 525 = 146 100. Or la réforme grégorienne retire 3 jours en 4 siècles, donc il en reste 146 100 - 3 = 146 097. La durée moyenne de l'année est donc ramenée à 146 097 / 400 = 365,2425.

Ce calendrier est donc exact par rapport à la valeur de l'année tropique qui a servi de base pour son calcul. Par rapport à la valeur moderne, l'erreur est de 365,2425 - 365,2422 = 0,0003 jours. Il subsiste une dérive de 3 jours en 10.000 ans. C'est du même ordre de grandeur que la dérive des valeurs astronomiques. On peut le considérer comme parfait sur ce plan-là.

**Cycle de Méton**

C'est une période raisonnable assurant une égalité approchée entre l'année solaire a et le mois lunaire l. Prenons comme valeurs a = 365,25, et l = 29,53. Ces valeurs sont à peu près ce qu'on pouvait connaitre à l'époque de Méton. Elles doivent vérifier :

$$29{,}53\ p = 365{,}25\ k \qquad \text{avec k et p entiers}$$

Divisant tout par 29,53 on obtient :

$$p = 365{,}25 / 29{,}53\ k = 12{,}3688\ k$$

$$\text{donc } p = 12{,}3688\ k = (12 + 0{,}3688)\ k = 12\ k + 0{,}3688\ k$$

k étant entier, 12 k l'est aussi. Pour que p soit entier, il suffit donc que 0,3688 k soit entier. On souhaite bien sûr que cet entier soit le plus petit possible. Pour déterminer la plus petite valeur acceptable, calculons les premiers multiples de 0,3688 :

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | **8** | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,3688 | 0,738 | 1,106 | 1,475 | 1,844 | 2,213 | 2,582 | **2,950** | 3,319 | 3,688 |
| 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | **19** | 20 |
| 4,057 | 4,426 | 4,794 | 5,163 | 5,532 | 5,901 | 6,270 | 6,638 | **7,007** | 7,376 |

Il faut rechercher les multiples les plus proches d'un entier. On voit que la valeur k = 8 donne 2,950 qui est approchée d'un entier à 5 centièmes près ; il lui correspond p = 12,3688 × 8 = 98,950, donc p = 99 à 50 millièmes près. C'est une période de 8 ans comptant 99 mois ; on vient de retrouver l'*octaétéride des Grecs*.

Le multiple 11 donne une approximation légèrement meilleure (43 millièmes) k = 11, p = 136. Le gain par rapport à l'octaétéride est très faible, et ne justifie pas vraiment l'allongement de la période de 8 à 11 ans. Le système n'a pas été employé.

Enfin, le multiple 19 donne une valeur entière approchée à 7 millièmes près ! C'est cette valeur qui a été trouvée par Méton, et qui est à la base du cycle portant son nom.

On a choisi donc k =19 ; p  12,3688 k = 12,3688 × 19 = 235,007  235.

Il s'ensuit que 19 années juliennes correspondent à 235 lunaisons :

$$19 \times 365{,}25 = 6\,939{,}75 \text{ jours} \qquad 235 \times 29{,}53059 = 6\,939{,}688 \text{ jours}$$

L'égalité est obtenue à 6 939,75 - 6 939,688 = 0,062 jours *i.e.* 1 h 29 min par rapport à l'année julienne. Par rapport à l'année tropique exacte, l'erreur est :

19 × 365,2422 = 6 939,6018 ; 6 939,688 - 6 939,6018 = 0,0862 jours *i.e.* 2 h 4 min.

Cette erreur se traduit par 1 jour d'écart entre la lune vraie et la lune calculée au bout de 228 ans :

0,0862 × N >= 1  N >= 1 / 0,0862 = 11,6009 ; N entier  N = 12 cycles, donc 12 × 19 = 228.



Les calculs présentés sont assez sensibles aux valeurs de la lunaison et de l'année. Il faut surtout les voir comme un moyen de recherche pour guider l'intuition. Il est difficile de savoir quelles valeurs de l'année et de la lunaison Méton a pu utiliser.

L'erreur du cycle de Méton, faible mais non négligeable, présente toutes les caractéristiques lunaires du calendrier julien : elle autorise le calcul de la date de Pâques, mais porte en elle la nécessité de la réforme Grégorienne. Au bout de 3 × 228 ans = 684 ans, l'erreur était de 3 jours et passait difficilement inaperçue.

**Quelques solutions vers un calendrier solaire parfait**

Pour l'année solaire, on peut calculer directement, de manière très simple, diverses solutions possibles. Il suffit de mettre la durée de l'année tropique 365,2422 jours, sous la forme 365 + a / b avec a et b entiers bien sûr. Ainsi, nous saurons immédiatement qu'il faut ajouter *a* jours dans une période de *b* années. En effet, s'il faut par exemple rajouter la fraction 7/29 de jours par an, sur une période de 29 années, il faudra rajouter 7 jours.

La recherche empirique de ces nombres peut être fastidieuse et aléatoire, mais il existe une façon très simple de les trouver :

**1-** a = 365,2422 ; si on néglige la partie décimale, on obtient **a 365.** Elle correspond à une année fixe de 365 jours, meilleure approximation entière utilisée dans de nombreux calendriers primitifs. L'erreur par rapport à l'année tropique est de 0,2422 jour *i.e.* **5 h 48 min**.

**2-** Le calendrier julien utilise une année de 365 j 1/4. C'est une valeur approchée ; il faudrait à la place de 4 un nombre un peu plus grand, que nous appellerons p. Cherchons sa valeur :

$$a = 365,2422 = 365 + \frac{1}{p}$$

d'où :

$$\frac{1}{p} = 365,2422 - 365 = 0,2422$$

et :

$$p = \frac{1}{0,2422} = 4,12882$$

La valeur exacte est donc

$$a = 365,2422 = 365 + \frac{1}{4,12882}$$

Ceci signifie qu'il faudrait ajouter 1 jour tous les 4,12882 ans ; ce n'est pas très pratique !

En négligeant 0,12882 on retrouve l'approximation julienne 365 + 1 / 4. On ajoute 1 jour dans chaque période de 4 ans, ce qui donne une année moyenne de 365,25 j. L'erreur par rapport à l'année tropique est de 365,25 - 365,2422 = 0,0078 jour *i.e.* **11 min**.

**3-** Refaisons le même travail sur le nombre obtenu 4,12882 :

$$4,12882 = 4 + \frac{1}{p_1}$$

d'où

$$\frac{1}{p_1} = 4,12882 - 4 = 0,12882$$

et

$$p_1 = \frac{1}{0,12882} = 7,76282$$

donc

$$4,12882 = 4 + \frac{1}{7,76282}$$

Reportons cette valeur dans l'expression trouvée plus haut :

$$a = 365,2422 = 365 + \frac{1}{4,12882} = 365 + \frac{1}{4 + \frac{1}{7,76282}}$$

En négligeant 0,76282 on obtient une approximation :

$$a \approx 365 + \frac{1}{4 + \frac{1}{7}} = 365 + \frac{7}{29}$$

En calculant la fraction, on obtient 365,24138 jours. L'erreur par rapport à l'année tropique est de 365,24138 - 365,2422 = -0,00082 jour *i.e.* **1 min 11 s**.

C'est une approximation dans laquelle on aurait une année commune de 365 jours, avec adjonction de 7 jours supplémentaires en 29 ans.

**4-** Pour faire toujours mieux , on utilise encore le même procédé avec le nombre 7,76282 :

$$7,76282 = 7 + \frac{1}{p_2}$$

d'où

$$p_2 = \frac{1}{7,762820 - 7} = 1,3109$$

a = 365,2422 = **365** + 1/(**4** +1 / (**7** + 1 / **1**,3109))

$$a = 365,2422 = 365 + \frac{1}{4 + \frac{1}{7 + \frac{1}{1,3109}}}$$

si on néglige la partie décimale, on obtient

$$a \approx 365 + \frac{1}{4 + \frac{1}{7 + \frac{1}{1}}} = 365 + \frac{1}{4 + \frac{1}{8}} = 365 + \frac{8}{33}$$

L'année moyenne vaut 365,2424. L'erreur par rapport à l'année tropique est de 365,2424 - 365,2422 = 0,0002 jour *i.e.* **17 s**.

On reconnait là la solution utilisée par le calendrier Persan. L'histoire ne nous dit pas s'ils ont utilisé cette méthode pour l'obtenir. La méthode utilisée est connue sous le nom de *fractions continues*.

Le tableau suivant donne les résultats de ce calcul poussé à 12 itérations, sous forme synthétique. Les coefficients sont ceux de la fraction obtenue, par exemple 4 et 7 à la troisième ligne ; p donne le nombre de jours à ajouter, au cours d'une période de q année ; p / q représente l'excès à 365 jours, et doit être aussi proche que possible de 0,2422 ; enfin, la colonne validité indique le nombre d'années au bout duquel la dérive atteint 1 jour. La valeur donnée dépend fortement de la valeur de l'année tropique. Pour les grandes valeurs, il ne faut y voir qu'un ordre de grandeur.

| coefficients | | | | | | | | | | | | p | q | p/q | validité (années) | calendrier |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 365 | | | | | | | | | | | | 0 | 1 | 0.000000000000 | 4 | vague |
| 365 | 4 | | | | | | | | | | | 1 | 4 | 0.250000000000 | 128 | julien |
| 365 | 4 | 7 | | | | | | | | | | 7 | 29 | 0.241379310345 | 1 221 | - |
| 365 | 4 | 7 | 1 | | | | | | | | | 8 | 33 | 0.242424242424 | 4 420 | persan |
| 365 | 4 | 7 | 1 | 3 | | | | | | | | 31 | 128 | 0.242187500000 | 95 000 | - |
| 365 | 4 | 7 | 1 | 3 | 5 | | | | | | | 163 | 673 | 0.242199108470 | 900 000 | - |
| 365 | 4 | 7 | 1 | 3 | 5 | 1 | | | | | | 194 | 801 | 0.242197253433 | 1 000 000 | - |
| 365 | 4 | 7 | 1 | 3 | 5 | 1 | 1 | | | | | 357 | 1474 | 0.242198100407 | 10 000 000 | - |
| 365 | 4 | 7 | 1 | 3 | 5 | 1 | 1 | 4 | | | | 1622 | 6697 | 0.242197999104 | 1 000 000 000 | - |
| 365 | 4 | 7 | 1 | 3 | 5 | 1 | 1 | 4 | 24 | | | 39285 | 162202 | 0.242198000025 | 40 000 000 000 | - |
| 365 | 4 | 7 | 1 | 3 | 5 | 1 | 1 | 4 | 24 | 1 | | 40907 | 168899 | 0.242197999988 | 84 000 000 000 | - |
| 365 | 4 | 7 | 1 | 3 | 5 | 1 | 1 | 4 | 24 | 1 | 2 | 121099 | 500000 | 0.242198000000 | ∞ | - |

On remarquera que la fraction 1.622 / 6.697 a une durée de validité qui atteint déjà le milliard d'années… la dernièredivision est exacte, et donne le nombre de départ.

Cette méthode ne donne pas tous les calendriers envisageables ; la meilleure preuve en est que le calendrier grégorien n'y figure pas… mais elle permet de trouver une approximation aussi précise qu'on le souhaite de la valeur connue de l'année tropique. L'absence du calendrier grégorien tient à la complexité des ajouts : tous les 4 ans, sauf… On remarque tout de même que la fraction 194/801 consiste à rajouter 194 jours en 801 ans. Or le calendrier grégorien ajoute 194 jours en 800 ans !

Il ne faut cependant pas aller trop loin dans la précision : tous ces calculs sont basés sur la valeur de l'année tropique, qu'on connaît avec une certaine erreur de mesure. Il est inutile que le calendrier soit plus précis. Même en supposant qu'on soit capable de faire une mesure parfaite, elle serait valable à un instant donné ; or les paramètres de l'orbite terrestre varient dans le temps, ce qui fait que la durée de l'année tropique n'est pas non plus constante. Il serait donc illusoire de rechercher une précision beaucoup plus grande que celle fournie par le calendrier grégorien.

**Calcul du Jour Julien, à partir d'une date julienne**

La période julienne (période de Scaliger) que nous avons vue plus haut, est un repère continu du temps, basé sur une numérotation des jours ; elle est étendue par un codage de l'heure. Elle s'exprime par un nombre décimal, dont la partie entière est le rang du jour, et la partie décimale indique l'heure. Nous allons rechercher d'abord une formule donnant le rang d'un jour, pour le calendrier julien.

Supposons que toutes les années aient 365 jours ; on aurait la correspondance :

premier janvier -4712 JJ = 0 × 365
premier janvier -4711 JJ = 1 × 365

JJ signifie jour julien

premier janvier -4710 JJ = 2 × 365
premier janvier -4709 JJ = 3 × 365

365 est multiplié par le nombre d'années écoulées depuis l'origine, qui peut s'écrire a + 4712 pour l'année a. Donc on peut déjà noter :

premier janvier a JJ = (a + 4712) × 365

Prenons maintenant en compte les années bissextiles. Il y en a une régulièrement tous les 4 ans, et la première année (-4712) est bissextile. Il faut donc ajouter au compte de jours le nombre d'années bissextiles écoulées AVANT l'année considérée. Il ne faut pas ajouter 1 pour -4712, mais à partir de la suivante. Donc on ajoute un terme de la forme :

**{**(a + 4712 + k) / 4**}**

où les accolades indiquent la partie entière.

On détermine la valeur de k de telle sorte que ce terme prenne la valeur 1 pour a = -4711. Donc il faut que -4711 + 4712 + k = 4, donc 1 + k = 4 et k = 3.

premier janvier a JJ = (a + 4712) × 365 + **{**(a + 4712 + k) / 4 **}**

Cette formule donne le JJ du premier janvier de toute année julienne a. Il faut maintenant l'étendre pour obtenir le JJ d'une date quelconque dans l'année.

Commençons par le jour j de janvier ; si j = 1, il ne faut rien ajouter ; si j = 2, il faut ajouter 1… donc de manière générale, il faut ajouter j - 1.

Si maintenant on s'adresse à un jour d'un autre mois, il faut ajouter encore le nombre de jours totalisés par les mois précédents. Soit le tableau, que nous nommerons VM pour 'veille du mois' :

| janv | fév | mars | avril | mai | juin | juil | août | sept | oct | nov | déc |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 31 | 59 | 90 | 120 | 151 | 181 | 212 | 243 | 273 | 304 | 334 |

Il faut donc ajouter : VM[m] + j - 1

Enfin, si l'année est bissextile, le jour bissextil étant intercalé en février, il faut l'ajouter pour les 10 derniers mois de l'année. Donc il faut un terme qui ajoute 1 pour tous les jours des mois de mars à décembre des années bissextiles. On notera biss(a, m) ce terme qui dépend de l'année (pour savoir si elle est bissextile) et du mois :

$$\text{biss}(a,m) = \begin{cases} 1 \text{ si a est bissextile et si m} > 2 \text{ ( m = 1 janvier, m = 2 février…) ;} \\ 0 \text{ sinon} \end{cases}$$

Le JJ pour un jour quelconque j/m/a de l'année est :

j/m/a = JJ = (a + 4712) x 365 + **{**(a + 4712 + 3) / 4**}** + VM[m] + biss(a, m) + j - 1

Enfin, il faut convertir l'heure et les minutes en fractions de jours. Si h est l'heure, h / 24 est la fraction de jour recherchée ; pour h = 24, elle donne 1 ; pour h = 12, elle donne 0,5. Pour les minutes, puisqu'il y en a 24 × 60 = 1440 par jour, la fraction est min / 1440. On en profite pour caler le début du jour à midi en retranchant 12 h. De ce fait :

JJ = (a + 4712) × 365 + **{**(a + 4712 + 3) / 4**}** + VM[m] + biss(a, m) + j - 1 + (h - 12) / 24 + min / 1440

Cette formule est valable jusqu'au 4 octobre 1582 inclus.

**Calcul du Jour Julien, à partir d'une date grégorienne**

Il y a continuité et similitude entre les calendriers julien et grégorien. Donc il suffit d'adapter la formule ci-dessus (on le fait d'abord en ignorant le terme correspondant à l'heure). Pour cela, on retranche d'abord les 10 jours supprimés par Grégoire XIII :

1/1/a = JJ = (a + 4712) × 365 + **{**(a + 4712 + 3) / 4**}** - 10

Puis on supprime les jours bissextils du calendrier julien qui ne le sont plus dans le grégorien. Ils concernent les années séculaires dont le millésime n'est pas divisible par 400. Il faut retrancher 1 pour chaque année séculaire, donc retrancher un terme de la forme :

**{**(a + k) / 100**}**

Ce terme doit prendre la valeur 1 pour la première fois l'année qui suit la première année séculaire après 1582. Donc il vaut 1 en 1601 (il compte le nombre d'années bissextiles AVANT l'année considérée). En remplaçant a par 1601, on trouve :

1601 + k = 100, donc k = -1501 ; le terme cherché est : **{**(a - 1501) / 100**}**

Maintenant, il faut ajouter 1 pour chaque année séculaire qui reste bissextile dans le calendrier grégorien. Même procédé, terme semblable : il doit prendre la valeur 1 pour l'année qui suit la première année séculaire bissextile, donc 1601 (car 1600 est divisible par 400) :

Sa forme est : **{**(a + k) / 400**}**

1601 + k = 400, donc k = -1201 et le terme est : **{**(a - 1201) / 400**}**

La formule devient donc :

JJ = (a + 4712) × 365 + **{**(a + 4712 + 3) / 4**}** - 10 - **{**(a - 1501) / 100**}** + **{**(a - 1201 / 400**}** + VM[m] + biss(a, m) + j -1

Il est possible de simplifier cette formule, en utilisant une propriété simple de la division :

$$\{(a + b\,k / k\} = \{a / k\} + b$$

**Preuve** : Soit

| | | | |
|---|---|---|---|
| q = **(**(a + b k) / k**)** | alors a + b k = q k + r | avec $0 \leq r < k$ | (div. euclidienne) |
| donc | a = q k - b k + r = (q - b) k + r | avec $0 \leq r < k$ | |
| donc | q - b est le quotient entier de a par k | q - b = **(**a / k**)** | q = **(**a / k**)** + b |

**{**(a + b k) / k**}** = **{**a / k**}** + b **cqfd**

On peut appliquer cette transformation pour le terme **{**(a + 4712 + 3) / 4**}** en le réécrivant **{**(a + 3 + 4712) / 4**}** et en remarquant que 4712 = 4 × 1178 :

**{**(a + 4712 + 3) / 4**}** = **{**(a + 3) / 4**}** + 1178

De même, **{**(a - 1501) / 100**}** = **{**(a - 1 - 1500) / 100**}** = **{**(a - 1) / 100**}** - 15

et **{**(a - 1201) / 400**}** = **{**(a - 1 - 1200) / 400**}** = **{**(a - 1) / 400**}** - 3

Le jour julien devient :

JJ = (a + 4712) × 365 + **{**(a + 3) / 4**}** + 1178 - 10 - **{**(a - 1) / 100**}** + 15 + **{**(a - 1) / 400)**}** - 3

JJ = (a + 4712) × 365 + **{**(a + 3) / 4**}** - **{**(a - 1) / 100**}** + **{**(a - 1) / 400**}** + 1180

et enfin, en remettant les termes correspondant au jour et à l'heure :

$$\begin{aligned} JJ = {} & (a + 4712) \times 365 + \{(a + 3) / 4\} - \{(a - 1) / 100\} + \{(a - 1) / 400\} + 1180 + \\ & VM[m] + biss(a, m) + j + \\ & (h - 12) / 24 + min / 1440 \end{aligned}$$

La formule est présentée sur trois lignes, pour séparer les termes correspondant au premier janvier (première ligne), à un jour quelconque de l'année (seconde ligne), et à l'heure.

Cette formule est valable à partir du 15 octobre 1582.

N.B. On ne peut pas effectuer la même simplification sur la formule julienne, à cause des années négatives.

**Exemple** : 17 décembre 1999 à 20 h 30

(1999 + 4712) × 365 + **{**(1999 + 3) / 4**}** - **{**(1999 - 1) / 100**}** + **{**(1999- 1) / 400**}** + 1180 = 2449515 + 500 - 19 + 4 + 1180 = 2 451 180

JJ = 2 451 180 + VM[12] + biss(1999, 12) + j - 1 + ((20 - 12) / 24) + (30 / 1440) = 2 451 530,35417

Le jour julien commençant à midi est à cheval sur deux journées en temps universel. Si JJ représente un instant quelconque du 11 octobre 1989, on a $2\,447\,811{,}5 \leq JJ < 2\,447\,812{,}5$

**Jour julien modifié**

Le jour julien produit de grands nombres, inutiles si la durée considérée est raisonnable. D'autre part, l'ancien usage des astronomes qui commençaient le jour à midi ne correspond pas aux habitudes civiles, et est abandonné même en astronomie.

On définit donc le *jour julien modifié* en retranchant 2 400 000,5 au jour julien. On écrit MJD pour *modified julian date*. L'origine de cette échelle est le 17 novembre 1858 à 0 h. Cette nouvelle échelle a été reconnue par l'Union Astronomique Internationale en 1973.

Exemple : le même 17 décembre 1999 à 20 h 30 a pour MJD 2 451 530,35417 - 2 400 000,5 = 51 529,85417

**Durée**

Le grand intérêt du jour julien est l'absence de rupture dans la numérotation des jours. Le jour julien est le nombre de jours écoulés depuis le 1er janvier -4712. Si on retranche les JJ (ou les MJD) correspondants à deux dates différentes, on obtiendra le nombre de jours écoulés entre elles.

**Exemple** : la comète de Halley est passée au périhélie le 16 novembre 1835, et le 20 avril 1910. Quelle est sa période approximative ?

| | |
|---|---|
| pour le 20 avril 1910 à midi | $JJ_1 = 2\ 418\ 782$ |
| pour le 16 novembre 1835 à midi | $JJ_0 = 2\ 391\ 599$ |
| la durée est : | $JJ_1 - JJ_0 = 27\ 183$ jours *i.e.* **74 ans 154 jours** |

**Retrouvons le jour de la semaine**

Le JJ étant le nombre de jours écoulés depuis le 1$^e$ janvier -4712, on le divise par 7 ; le quotient est le nombre de semaines entières écoulées, et le reste est le décalage par rapport à l'origine, qui est un lundi (voir la définition du JJ). Avant de faire la division, il faut cependant ajouter 0,5 pour recaler sur un jour civil, et supprimer les chiffres après la virgule, qui représentent les heures :

$$s = \mathbf{[}\ JJ + 0{,}5\ \mathbf{]}_7$$

Les parenthèses indiquent qu'il faut prendre la partie entière. La correspondance sera :

| lundi | mardi | mercredi | jeudi | vendredi | samedi | dimanche |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |

**Attention**, ce n'est pas le même tableau que précédemment (l'origine choisie n'est pas la même).

**Exemple** : pour le 17 décembre 1999 à 20 h 30, nous avons trouvé JJ = 2 451 530,35417

donc $\mathbf{[}\ 2\ 451\ 530{,}35417 + 0{,}5\ \mathbf{]}_7 = \mathbf{[}\ 2\ 451\ 530{,}85417\ \mathbf{]}_7 = \mathbf{[}\ 2\ 451\ 530\ \mathbf{]}_7 = 4$ c'est donc un vendredi

**Comput Ecclésiastique**

C'est sous ce nom que l'on désigne l'ensemble des calculs relatifs au calendrier grégorien. Son but premier est la date de Pâques, mais il comprend également la lettre dominicale, le nombre d'or, le cycle solaire et l'indiction romaine. Ces indications figurent, en tout petits caractères, sur le calendrier des postes. De Pâques, découlent toutes les fêtes mobiles (Pentecôte en particulier).

**Caractère bissextil**

Dans le calendrier julien, une année est bissextile si et seulement si son millésime est divisible par 4 (le reste de sa division par 4 est nul), autrement dit si la formule :

$$\mathbf{[}a\mathbf{]}_4 = 0$$

est vraie.

Dans le calendrier grégorien, le rattrapage qui élimine le caractère bissextil de certaines années séculaires complique un peu. Une année est bissextile si et seulement si son millésime vérifie la formule :

$$(\mathbf{[}a\mathbf{]}_{400} = 0)\ \textbf{ou}\ ((\mathbf{[}a\mathbf{]}_{100} \neq 0)\ \text{et}\ (\mathbf{[}a\mathbf{]}_4 = 0))$$

Le premier terme est vrai si une année est séculaire et son millésime est divisible par 4. Le seconde terme est vrai si l'année n'est pas séculaire ($\mathbf{[}a\mathbf{]}_{100} \neq 0$) et si son millésime est divisible par 4.

**Cycle solaire**

C'est une période de 4×7 ans = 28 ans, qui regroupe le cycle des années bissextiles (1 sur 4), et le cycle des jours de la semaine, qui se décalent d'un par an (voir le calendrier julien). Ses valeurs vont de 1 à 28, et reprennent ensuite à 1, 2…

Tout d'abord, notons que l'année origine de la période julienne est l'année 4713 av. J.C., qu'elle commence par un lundi, et qu'elle est bissextile. On va déduire les caractéristiques d'une autre année à partir de celle-là. En notation relative, elle correspond à -4712. Considérant une année *a* quelconque, le nombre d'années écoulée avant *a* est donné par *a* + 4712. Par exemple, si *a* = -4712, on obtient 0 ; si *a* = -4711, on obtient 1…

Le tableau ci-dessous donne, pour quelques années, les valeurs de *a* + 4712, le quotient q de *a* + 4712 par 28, leur reste r, et enfin le cycle solaire cherché S :

| **a** | **a + 4712** | **q** | **r** | **S** |
|---|---|---|---|---|
| -4712 | 0 | 0 | 0 | 1 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| -4711 | 1 | 0 | 1 | 2 |
| -4710 | 2 | 0 | 2 | 3 |
| … | … | … | … | … |
| -4686 | 26 | 0 | 26 | 27 |
| -4685 | 27 | 0 | 27 | 28 |
| -4684 | 28 | 1 | 0 | 1 |
| -4683 | 29 | 1 | 1 | 2 |
| … | … | … | … | … |

On voit très simplement que le cycle solaire recherché S s'obtient en calculant le reste de la division de *a* + 4712 par 28, et en lui ajoutant 1. Ce qui se résume par la formule :

$$S = \mathbf{[}\ a + 4712\ \mathbf{]}_{28} + 1$$

Les crochets $\mathbf{[\ ]}_{28}$ signifient que l'on prend le reste de la division par 28. La formule se lit donc :

a + 4712 modulo 28, plus 1.

**Exemple** : a = 1999 ; a + 4712 = 1999 + 4712 = 6711 ; 6711 divisé par 28 donne un quotient de 239 et un reste de 19 ; donc $\mathbf{[}6711\mathbf{]}_{28} = 19$, et enfin : $S = \mathbf{[}\ 1999 + 4712\ \mathbf{]}_{28} + 1 = 19 + 1 = \mathbf{20}$.

**Indiction romaine**

C'est une période de 15 ans, intermédiaire entre l'année et le siècle, en usage à Rome. Ses valeurs vont de 1 à 15 ; elle vaut 1 en -4712. C'est le même calcul que pour le cycle solaire, en remplaçant 28 par 15 :

$$I = \mathbf{[}\ a + 4712\ \mathbf{]}_{15} + 1$$

**Exemple** : a = 1999 ; a + 4712 = 6711 ; 6711 divisé par 15 donne un quotient de 447 et un reste de 6; donc $[6711\ \mathbf{]}_{15} = 6$, et enfin : $S = \mathbf{[}\ 1999 + 4712\ \mathbf{]}_{15} + 1 = 6 + 1 = \mathbf{7}$.

**Nombre d'or**

Le nombre d'or est le rang de l'année dans le cycle de Méton, de période 19 ans. Il vaut également 1 en -4712, puisque cette année a justement été choisie parce que tous ces cycles valent 1. En procédant comme ci-dessus pour l'indiction, on obtient :

$$N = \mathbf{[}\ a + 4712\ \mathbf{]}_{19} + 1$$

Ceci appelle une remarque : on a procédé toujours de la même façon, mais il se trouve que 4712 est divisible exactement par 19 ; le reste est 0. C'est pourquoi la formule simplifiée $N = \mathbf{[}\ a\mathbf{]}_{19} + 1$ ne présente que le millésime *a* dans les crochets.

**Exemple** : a = 1999 ; 6711 divisé par 19 donne un quotient de 353 et un reste de 4 ; donc $\mathbf{[}6711\mathbf{]}_{19} = 4$, et enfin : $N = \mathbf{[}6711\ \mathbf{]}_{19} + 1 = 4 + 1 = 5$.

**Lettre dominicale**

La *Lettre Dominicale* sert à indiquer quel jour de la semaine est le premier janvier. De lui découle toute l'année. Son origine est à rechercher dans l'habitude des Romains de placer, dans leurs calendriers, une lettre à partir du A en face de chaque jour, en recommençant au A après le G (voir l'illustration du calendrier pour octobre 1582). Voici un début du calendrier correspondant à quelques années (par exemple 1988, 1932, 1802 à gauche, et 1987, 1789, 1852 à droite) :

| | | |
|---|---|---|
| A | 1 | vendredi |
| B | 2 | samedi |
| **C ou CB** | **3** | **dimanche** |
| D | 4 | lundi |
| … | … | |

| | | |
|---|---|---|
| A | 1 | jeudi |
| B | 2 | vendredi |
| C | 3 | samedi |
| **D ou DC** | **4** | **dimanche** |
| … | … | … |

La lettre dominicale pour les années à gauche sera C si elles sont communes (1802), ou CB si elles sont bissextiles (1988, 1932), et à droite D (1987, 1789) ou DC (1852). A partir de là, on peut connaître tous les jours de l'année. Nous allons maintenant établir une formule permettant de trouver la lettre dominicale en fonction du millésime.

L'année commune vaut 365 jours = 7×52 + 1 *i.e.* 52 semaines entières + 1 jour. Donc si une année commence un lundi, la suivante commencera

un mardi, etc. Les jours sont donc décalés d'une quantité L qui est proportionnelle au millésime a :

$$L_0 = a$$

La règle julienne ajoute un jour bissextil tous les 4 ans. Donc le nombre de jours bissextils ajoutés est le quotient de a par 4. Ce qui produit un décalage supplémentaire (ce terme représente le nombre d'années bissextiles avant l'année a, **a comprise**) :

$$L_1 = L_0 + \mathbf{\{}a / 4\mathbf{\}} = a + \mathbf{\{}a / 4\mathbf{\}}$$

La règle grégorienne **supprime** le caractère bissextil des années séculaires dont le millésime n'est pas divisible par 400, ce qui revient à :

supprimer un jour par année séculaire : $L_2 = L_1 - \mathbf{\{}a / 100\mathbf{\}}$

ajouter un jour par année séculaire bissextile : $L_3 = L_2 + \mathbf{\{}a / 400\mathbf{\}}$

> le jour bissextil étant compté dans L, la valeur obtenue concerne la fin d'une année bissextile ; pour janvier et février (année bissextile seulement), il faut prendre L - 1.

$L_3 = L_2 + \mathbf{\{}a / 400\mathbf{\}} = L_1 - \mathbf{\{}a / 100\mathbf{\}} + \mathbf{\{}a / 400\mathbf{\}} = a + \mathbf{\{}a / 4\mathbf{\}} - \mathbf{\{}a / 100\mathbf{\}} + \mathbf{\{}a / 400\mathbf{\}}$

Enfin, $L_3$ donne le décalage total. Puisqu'il n'y a que 7 jours de la semaine, il faut prendre le reste de la division de $L_3$ par 7 (LG signifie Lettre dominicale *Grégorienne*) :

$LG = \mathbf{[}\ a + \mathbf{\{}a / 4\mathbf{\}} - \mathbf{\{}a / 100\mathbf{\}} + \mathbf{\{}a / 400\mathbf{\}}\ \mathbf{]}_7$

Pour 1999, le calcul donne : $L_3 = 1999 + \mathbf{\{}1999 / 4\mathbf{\}} - \mathbf{\{}1999 / 100\mathbf{\}} + \mathbf{\{}1999 / 400\mathbf{\}} = 1999 + 499 - 19 + 4 = 2483$ ;

$LG = \mathbf{[}\ 2483\ \mathbf{]}_7 = 5$

Nous savons (il suffit de regarder un calendrier) que le 1er janvier était un vendredi (on peut faire cela pour n'importe quelle année). Donc 5 correspond au vendredi. On en déduit le tableau de correspondance entre les valeurs trouvées et les noms des jours :

| dimanche | lundi | mardi | mercredi | jeudi | vendredi | samedi |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |

Pour une année quelconque, on appelle A le 1er janvier, B le 2, C le 3 etc. Par conséquent, il faut mettre A en face du numéro qu'on vient de trouver (dans l'exemple de 1999, en face de 5). Ensuite on met B en face du chiffre suivant… jusqu'à tomber sur le dimanche.

| | dimanche | lundi | mardi | mercredi | jeudi | vendredi | samedi |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| LG = 6 | B | | | | | | A |
| LG = 5 | C | | | | | A | B |
| LG = 4 | D | | | | A | B | C |
| LG = 3 | E | | | A | B | C | D |
| LG = 2 | F | | A | B | C | D | E |
| LG = 1 | G | A | B | C | D | E | F |
| LG = 0 | A | | | | | | |

Si LG = 2 par exemple, on met A en face de la colonne 2 (mardi). Donc B en face de 3 etc. et F en face de 0 (dimanche). La lettre dominicale est donc F dans ce cas. On a donc le tableau de correspondance :

| LG | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| lettre | A | G | F | E | D | C | B |

Pour 1999 nous avons trouvé LG = 5. Donc la lettre dominicale est C.

Pour les années bissextiles, le calcul de LG ajoute 1 pour toutes les années bissextiles avant a, **y compris a** (par le terme a / 4). Par conséquent, on obtient la lettre correspondant à la **deuxième partie** de l'année (après le 29 février). Pour janvier et février, il faut une autre lettre dominicale, donnée par LG - 1 et placée avant. Les lettres sont donc celles correspondant à LG - 1 et L. Attention, la lettre correspondant au début de l'année est valable jusqu'au 24 février inclus, car l'Eglise a gardé l'habitude, depuis César, de redoubler le 24 février et non le dernier jour du mois. La seconde lettre est donc valable dès le 25 février.

Pour 1984, $LG = \mathbf{[}\ 1984 + \mathbf{\{}1984 / 4\mathbf{\}} - \mathbf{\{}1984 / 100\mathbf{\}} + \mathbf{\{}1984 / 400\mathbf{\}}\ \mathbf{]}_7$

$LG = \mathbf{[}\ 1984 + 496 - 19 + 4\ \mathbf{]}_7 = \mathbf{[}\ 2465\ \mathbf{]}_7 = 1$

1984 n'est pas une année séculaire, et son millésime est divisible par 4, donc elle est bissextile. Ses lettres dominicales sont AG.

Le calcul précédent a été fait pour le calendrier grégorien. Pour le calendrier julien, il suffit dans l'expression de supprimer les deux termes correspondant aux années séculaires, et de retrancher 10 pour compenser les 10 jours supprimés à octobre 1582. La formule est donc (LJ est la Lettre dominicale *Julienne*) :

$$L\,J = \mathbf{[}\ a + \mathbf{\{}a / 4\mathbf{\}} - 10)\mathbf{]}$$

L'utilisation de la formule est identique.

Dans la suite, on utilisera simplement la lettre L pour désigner la lettre dominicale. Ceci se justifie car elle joue le même rôle dans les deux calendriers.

**Détermination du jour de la semaine**

Connaissant la lettre dominicale, qui correspond au premier dimanche de l'année, il est facile de déterminer le jour de la semaine correspondant à n'importe quelle date. Il suffit d'ajouter le nombre de jours écoulés depuis le premier janvier jusqu'à la date recherchée, et de lui retrancher toutes les semaines entières possibles (autrement dit, de prendre le reste de la division par 7 de ce nombre). Nous avons déjà vu pour le calcul du jour julien, l'expression du nombre de jours écoulés dans une années à une date donnée ; on l'ajoute donc à L :

$$S = L + VM[m] + biss(a,m) + j - 1$$

et on prend le reste :

$$s = \mathbf{[}\ L + VM[m] + biss(a, m) + j - 1\mathbf{]}_7$$

**Exemple** : recherchons quel jour était le 21 juillet 1969 :

$$L = \mathbf{[}\ 1969 + \mathbf{\{}1969 / 4\mathbf{\}} - \mathbf{\{}1969, 100\mathbf{\}} + \mathbf{\{}1969, 400\mathbf{\}}\ \mathbf{]}_7 = \mathbf{[}\ 1969 + 492 - 19 + 4\ \mathbf{]}_7 = \mathbf{[}\ 2446\ \mathbf{]}_7 = 0$$

$$s = \mathbf{[}\ 0 + 181 + 0 + 21 - 1\mathbf{]}_7 = \mathbf{[}\ 201\mathbf{]}_7 = 5$$ c'est donc un vendredi.

**Calendrier Lunaire**

Nous avons vu comment était définie la date de Pâques, qui constitue l'essentiel du calendrier lunaire grégorien. Il reste maintenant à établir les formules permettant de la calculer pour une année quelconque.

La lunaison moyenne est de 29,53059 jours. Dans une année, il y a 12 lunaisons moyennes pleines :

29,53059 ×12 = 354,36708 jours

365,2422 - 354,36708 =10,87512 ; il reste 11 jours. L'âge de la lune augmente donc grossièrement de 11 jours d'une année à l'autre.

On appelle *Epacte* l'âge de la lune au 1$^{e}$ janvier (*i.e.* le nombre de jours écoulés depuis la dernière Nouvelle lune).

L'épacte se calcule à l'aide de ce décalage de 11 jours d'une année à l'autre. Mais il faut aussi tenir compte du cycle de Méton. Au bout de 19 ans, les phases de la lune reviennent aux mêmes dates, donc l'épacte doit revenir aussi. Au lieu de relier l'épacte au millésime, on la relie au nombre d'or. Nous allons d'abord faire le calcul dans le calendrier julien.

Le nombre entier de jours le plus proche de la lunaison moyenne est de 30 jours, donc l'épacte prendra 30 valeurs, de 0 à 29. Le nombre d'or croît d'une unité chaque année, jusqu'à retomber à 1. L'épacte croît de 11 chaque année, elle est donc de la forme :

$$e = \mathbf{[}\ 11\ n + b\ \mathbf{]}_{30}$$

b est une constante d'ajustement à déterminer. On choisit pour cela une année dont on connaît l'épacte (prise dans un annuaire par exemple) :

pour 1924, e = 3 donc b = -3 $e = \mathbf{[}\ 11\ n - 3\ \mathbf{]}_{30}$ épacte julienne

Les valeurs obtenues en calculant cette formule sont :

| Nombre d'or | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Epacte | 8 | 19 | * | 11 | 22 | 3 | 14 | 25 | 6 | 17 | 28 | 9 | 20 | 1 | 12 | 23 | 4 | 15 | 26 |

L'épacte 0 est notée * par convention. Ce tableau, et la formule qui permet de l'établir, sont valables pour le calendrier julien, avant la réforme.

**Calcul de l'épacte grégorienne**

- à chaque année séculaire non bissextile, on retranche un jour à l'Epacte. Cette règle se nomme *Métemptose*.

- pour corriger l'erreur du cycle de Méton, on ajoute une unité à l'Epacte tous les 300 ans, quand une année séculaire arrive. Cette règle se nomme *Proemptose*. La première fut opérée en 1800.

- la Proemptose de l'an 4200 est retardée à l'an 4300 et il en est de même tous les 2500 ans.

L'épacte brute est de la forme : $e_1 = 11\ n$ n est le Nombre d'Or

La Proemptose se traduit par :

$e_2 = e_1 + \{a / 300\}$ ajoute 1 tous les 300 ans quand arrive une année séculaire.

La Métemptose se traduit par 2 termes:

$e_3 = e_2 - \{a / 100\} + \{a / 400\}$ retrancher un jour à chaque année séculaire non bissextile :

- retrancher 1 à chaque année séculaire.
- ajouter 1 à chaque année séculaire bissextile ;

Enfin, pour obtenir des valeurs de 0 à 29, il faut prendre le reste de la division par 30 de ce terme :

$$e = [\ 11\ n - \{a / 100\} + \{a / 400\} + \{a / 300\} + c\ ]_{30}$$

c constante pour ajuster la série

Si a = 1977, n = 22, e = 10 (valeur prise dans une table, ou sur le calendrier des postes) c = -3

$$e = [\ 11\ n - \{a / 100\} + \{a / 400\} + \{a / 300\} - 3]_{30}$$

Cette formule ne tient pas compte de la règle de retardement de la Proemptose, qui ne sera probablement jamais appliquée. Elle est valable à partir de 1583, et jusqu'en 4199 inclus. Il serait assez simple de modifier la formule pour en tenir compte, mais cette règle ne sera sans doute jamais appliquée, car une réforme du calendrier interviendra probablement avant. Aussi nous ne ferons pas ce travail.

| |
|---|
| L'épacte grégorienne ne tient compte du caractère bissextil de l'année que par l'intermédiaire du nombre d'or, dont les valeurs changent tous les 365,2425 jours. |

**Calcul de la pleine lune pascale**

Pâques est le dimanche qui suit le 14$^e$ jour de la lune qui atteint cet âge au 21 mars ou immédiatement après.

L'épacte e donnant l'âge de la lune au matin du premier janvier, son âge au matin du 21 mars est A = e + 80 (décalage dû à janvier, février et 21 jours de mars, sans tenir compte ici non plus des années bissextiles)

- Si e = 23, $[A]_{30} = 13$ (la lune a 14 jours, elle n'est pas encore pleine) le décalage d = 0.
- Si e = 24, $[A]_{30} = 14$ (la lune est alors pleine le matin du 21 mars), la pleine lune pascale est la suivante, donc retardée de d = 29 jours.
- Si e = 25, $[A]_{30} = 15$, elle est retardée de d = 28 jours…

On peut vérifier que e + d = 53, à 30 près (pour e ≤ 23, il faut ajouter 30). Puisqu'on prend le reste de la division par 30, les multiples de 30 seront éliminés. Donc d = 53 - e. La date de la pleine lune est :

$$PL = 21 + [53 - e]_{30}$$

Malgré la précision excellente sur le mouvement moyen de la Lune, l'épacte n'est pas suffisante pour suivre fidèlement le mouvement réel qui est très complexe. Une autre correction, de nature empirique, se fait lors de l'utilisation de l'épacte. Voici cette modification sur le calcul de PL :

- Pour les épactes de 0 à 23, et de 26 à 29, PL est donnée par la formule générale.
- Pour e = 24, la formule donne PL = 50, on la corrige en prenant PL = 49.
- Pour e = 25, la formule donne PL = 49.
  - On conserve cette valeur si le nombre d'or n ≤ 11.
  - Si n > 11, on prend PL = 48.

**Date de Pâques**

Maintenant qu'on connait la date de la pleine lune pascale, il faut calculer le jour de la semaine lui correspondant. PL étant une date en mars, on applique la formule vue plus haut. Le jour de la pleine lune $J_{PL}$ est :

$$J_{PL} = \mathbf{[}\ PL - 1 + 3 + L\ \mathbf{]}_7 = \mathbf{[}\ PL + L + 2\ \mathbf{]}_7$$

Pâques ne pouvant tomber le 21 mars, considérons le lendemain : $J_{PL} + 1$.

Si $J_{PL} + 1 = 0$ (dimanche) c'est Pâques ; si $J_{PL} + 1 = 1$, Pâques est 6 jours plus tard ; etc.

Donc le décalage de Pâques par rapport au lendemain de la pleine lune est :

$$\mathbf{[}\ - J_{PL} - 1\ \mathbf{]}_7 = \mathbf{[}\ - PL - L - 2 - 1\ \mathbf{]}_7 = \mathbf{[}\ 4 - PL - L\ \mathbf{]}_7$$

PL pouvant atteindre 49, et L 6, afin d'avoir toujours une valeur positive il faut ajouter un multiple de 7 plus grand : 56 est le plus petit qui convient. La date de Pâques est donc :

Si Pâques ≤ 31, c'est la date de Pâques en mars. Sinon, il faut retrancher 31 pour obtenir la date en avril.

**Construction d'un almanach**

Les formules précédentes se prêtent très bien à la l'écriture d'un programme permettant d'éditer le calendrier pour une année quelconque. Mais si on ne dispose pas d'un ordinateur, ou si on ne se sent pas très à l'aise dans ce genre de sport, on peut faire les calculs à la main, ils ne sont pas trop longs ni compliqués. Voici comment procéder :

On détermine d'abord si l'année est bissextile ou non (formule). Puis on calcule les indications du comput : cycle solaire, indiction romaine, nombre d'or et lettre dominicale (ou les 2 lettres si l'année est bissextile). On passe alors au calendrier lunaire, avec pour but le calcul de la date de Pâques. Nous avons obtenu le nombre d'or, on en déduit l'épacte, puis la pleine lune pascale et enfin la date de Pâques en incluant les petites corrections qui s'imposent si l'épacte est 24 ou 25 (voir les explications détaillées plus haut).

Il ne reste plus qu'a construire le calendrier lui-même. Nous utiliserons pour cela un modèle très simple et très compact. Le résultat pourra tenir sur le format d'une carte de crédit. Nous écrirons les noms des mois en abrégé : Jv, Fv, Ms, Av, Mi, Jn, Jl, At, Sp, Oc, Nv, Db. Nous allons commencer par ordonner les mois : on écrit sur une ligne à gauche Jv (pour janvier) ; février commence 31 jours plus tard, 31 = 4 × 7 + 3. Donc février commence 4 semaines et trois jours plus tard, par conséquent on décale février de trois cases vers la droite :

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Jv | | | Fv | | | |

Février comptant 28 jours (on suppose l'année commune), mars arrive exactement 4 semaines plus tard ; il sera dans la même colonne que février :

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Jv | | | Fv<br>Ms | | | |

Ensuite, mars comptant 31 jours, avril sera 3 cases plus loin vers la droite :

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Jv | | | Fv<br>Ms | | | Av |

En continuant ainsi, on obtient facilement le tableau pour tous les mois d'une année commune (lorsque le décalage nous amène à sortir du tableau vers la droite, on continue de compter à partir du début) :

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Jv<br>Oc | Mi | At | Fv<br>Ms<br>Nv | Jn | Sp<br>Db | Av<br>Jl |

Pour une année bissextile, il faut refaire la même chose, mais en comptant 29 jours pour février. On obtient donc :

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Jv<br>Av<br>Jl | Oc | Mi | Fv<br>At | Ms<br>Nv | Jn | Sp<br>Db |

Maintenant, nous pouvons mettre les noms des jours en face des noms des mois. Mais ceci dépend de l'année. Prenons l'exemple de 1999 ; le premier janvier était un vendredi ; nous mettrons donc vendredi (Ve) en face de janvier. Dans la case suivante, samedi (Sa), etc.

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Jv<br>Oc | Mi | At | Fv<br>Ms<br>Nv | Jn | Sp<br>Db | Av<br>Jl |
| Ve | Sa | Di | Lu | Ma | Me | Je |

On constate alors que le premier mai est un samedi, le premier septembre un mercredi… Les 8, 15, 22 et 29 sont le même jour que le premier ; donc :

| 1999 | | | | | | Jv Oc | Mi | At | Fv Ms Nv | Jn | Sp Db | Av Jl |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 8 | 15 | 22 | 29 | | Ve | Sa | Di | Lu | Ma | Me | Je |

Complétons le tableau avec les autres jours, en décalant vers le bas pour les quantièmes 2, 3… et en décalant les noms des jours dans la partie droite :

| 1999 | | | | | | Jv Oc | Mi | At | Fv Ms Nv | Jn | Sp Db | Av Jl |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 8 | 15 | 22 | 29 | | Ve | Sa | Di | Lu | Ma | Me | Je |
| 2 | 9 | 16 | 23 | 30 | | Sa | Di | Lu | Ma | Me | Je | Ve |
| 3 | 10 | 17 | 24 | 31 | | Di | Lu | Ma | Me | Je | Ve | Sa |
| 4 | 11 | 18 | 25 | | | Lu | Ma | Me | Je | Ve | Sa | Di |
| 5 | 12 | 19 | 26 | | | Ma | Me | Je | Ve | Sa | Di | Lu |
| 6 | 13 | 20 | 27 | | | Me | Je | Ve | Sa | Di | Lu | Ma |
| 7 | 14 | 21 | 28 | | | Je | Ve | Sa | Di | Lu | Ma | Me |

Cet exemple concerne l'année 1999 ; pour une année commençant par un autre jour, il suffit de mettre l'abréviation du jour dans la première case, et de compléter vers la droite et vers le bas en décalant d'un jour à chaque fois. Bien sûr, le tableau pour une année bissextile se construit exactement de la même manière.

Nous avons établi plus haut la correspondance entre la valeur de L et le jour de la semaine (reproduit ici avec les abréviations) :

| Di | Lu | Ma | Me | Je | Ve | Sa |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |

Pour commencer le remplissage, nous mettrons dans la première case l'abréviation indiquée par la valeur trouvée de L (si l'année est bissextile, on considérera seulement la première des deux lettres). Il ne reste plus qu'à reporter les indications du comput. Voici à titre d'exemple les almanachs obtenus pour les années 2000 et 2001 (une bissextile et l'autre commune) :

| 2000 bissextile | | | | | Ja Av Jl | Oc | Mi | Fv At | Ms Nv | Jn | Sp Db |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | **8** | **15** | **22** | **29** | Sa | Di | Lu | Ma | Me | Je | Ve |
| **2** | **9** | **16** | **23** | **30** | Di | Lu | Ma | Me | Je | Ve | Sa |
| **3** | **10** | **17** | **24** | **31** | Lu | Ma | Me | Je | Ve | Sa | Di |
| **4** | **11** | **18** | **25** | | Ma | Me | Je | Ve | Sa | Di | Lu |
| **5** | **12** | **19** | **26** | | Me | Je | Ve | Sa | Di | Lu | Ma |
| **6** | **13** | **20** | **27** | | Je | Ve | Sa | Di | Lu | Ma | Me |
| **7** | **14** | **21** | **28** | | Ve | Sa | Di | Lu | Ma | Me | Je |
| **LD** : BA **NO** : 6 **CS** : 21 **IR** : 8<br>**Epacte** : 24 **Pâques** le 23 avril | | | | | | | | | | | |

| 2001 | | | | | Ja Oc | Mi | At | Fv Ms Nv | Jn | Sp Db | Av Jl |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | **8** | **15** | **22** | **29** | Lu | Ma | Me | Je | Ve | Sa | Di |
| **2** | **9** | **16** | **23** | **30** | Ma | Me | Je | Ve | Sa | Di | Lu |
| **3** | **10** | **17** | **24** | **31** | Me | Je | Ve | Sa | Di | Lu | Ma |
| **4** | **11** | **18** | **25** | | Je | Ve | Sa | Di | Lu | Ma | Me |
| **5** | **12** | **19** | **26** | | Ve | Sa | Di | Lu | Ma | Me | Je |
| **6** | **13** | **20** | **27** | | Sa | Di | Lu | Ma | Me | Je | Ve |
| **7** | **14** | **21** | **28** | | Di | Lu | Ma | Me | Je | Ve | Sa |
| **LD** : G **NO** : 7 **CS** : 22 **IR** : 9<br>**Epacte** : 5 **Pâques** le 15 avril | | | | | | | | | | | |

Les opérations décrites ci-dessus se prêtent bien à la programmation, dans tout langage informatique. On peut par exemple les appliquer dans un tableur, en définissant quelques cellules auxilières cachées. Voici une version en php, qui permet le calcul en direct.

**Conclusion**

Pratiquement tous les calendriers anciens sont exclusivement lunaires, parce que les phénomènes lunaires sont plus faciles à observer. Pour ajuster le retour des saisons (nécessaire pour les fêtes du solstice, l'agriculture …), on remarque qu'un groupe de 12 lunaisons les ramène grossièrement. Mais la dérive est trop importante pour être tolérée. Alors on ajoute un 13$^{e}$ mois lorsque c'est nécessaire.

Cette première correction introduit dans la représentation du phénomène continu de la révolution des astres, une discontinuité qui sera le principe de tous les calendriers plus évolués. La question sera seulement de savoir quand l'introduire, et de quelle durée. Cette première approche peut être rapide, les erreurs qu'elle corrige étant très importantes (11 jours par an). Ensuite, les modalités d'ajout d'un mois supplémentaire sont

difficiles, à cause de la grande variabilité de la Lune.

On constate donc une longue période de tâtonnements, qui dans les bons cas (si la civilisation qui a créé le calendrier n'est pas éteinte, ou si les principes religieux ou les habitudes prises ne l'empêchent pas) aboutit à la connaissance de cycles, ou groupes d'années qui ramènent à peu près les mêmes conditions. Dès lors, le tableau des phénomènes observés pendant l'un des cycles permet de prévoir les suivants. Mais bien sûr, cette répétition n'est qu'approchée, et elle marque à peu près le terme de l'évolution des calendriers luni-solaires. La connaissance de ces cycles qui s'étalent sur de longues périodes (quelques dizaines d'années) permet d'obtenir de très bonnes valeurs pour les durées de l'année et de la lunaison.

A partir de là, il devient possible d'établir un calendrier purement solaire, débarrassé des difficultés inhérentes à l'accord avec la Lune, et dont la précision peut être très grande. Les exceptions à ce schéma sont :

- le calendrier vague, qui est exclusivement solaire dès le début, mais s'appuie sur l'année sidérale et non sur l'année tropique ;
- le calendrier musulman qui reste exclusivement lunaire.

**Synthèse**

| **calendrier** | **origine** | **type** | **année[1] moy.** | **ajout[4]** | **subdiv.** |
|---|---|---|---|---|---|
| Babylonien | 4 000 av. J.C. | lunaire | | 1 m / ¼ 3 a | semaine |
| Egyptien | 10 000 av. J.C | solaire | 360 j | aucun | décade |
| Vague | 4 236 av. J.C. | solaire | 365 j | aucun | décade |
| Hébreu | 1 645 av. J.C. | lunaire | | 1 m / ¼ 3 a | semaine |
| Israélite | | lunaire | | 1 m / ¼ 3 a | semaine |
| Musulman | 16 / 7 / 622 jul. | lunaire | 354,366 | 11 j / 30 a | semaine |
| Chinois | 4 000 av. J.C. | lunaire | 365,05 | 7 m / 19 a | cycle 60 j |
| Maya | | aucun[3] | 360 | aucun | 260 j |
| Maya rituel | | vigésimal | 260 j | aucun | |
| Persan | | solaire | **365,2424 j** | 8 j / 33 a | |
| Grec | | lunaire puis mixte | 365,25 | 3 m /8 a | décade |
| Romain | 753 av. J.C. | lunaire | 304 puis 355 | 1 m / ? | décade |
| Julien | 46 av. J.C. | mixte[2] | 365,25 | 1 j / 4 a | semaine |
| Grégorien | 1 582 | mixte[2] | 365,2425 | 97 j / 400 a | semaine |
| Républicain | 22 / 9 / 1792 | solaire | 365,25 | 1 j /4 a | décade |

1. Pour les calendriers empiriques, il n'est pas possible de définir une durée moyenne de l'année.
2. Les calendriers julien et grégorien sont solaires, avec des fêtes lunaires.
3. Le calendrier Maya comporte 18 mois de 20 jours ; il est basé sur la numération vigésimale, et non sur l'astronomie.
4. Ajout de rattrapage, en nombre de jours par an : m pour mois, j pour jour. Le symbole ¼ signifie que le calendrier est empirique, et que le nombre d'années qui suit est approximatif. Pour le calendrier romain, les ajouts ont été trop variables pour donner une période.

Les chinois ont découvert de leur côté le cycle de Méton.

Ce texte n'est pas exhaustif, et laisse de côté quelques calendriers intéressants. Le but était de faire une étude assez représentative de la diversité dans ce domaine. Pour quelques compléments, voir le site de l'IMCCE.

**Exercices**

Les formules données plus haut décrivent les liens qui existent entre les différents éléments du calendrier grégorien. Grâce à elles on peut maintenant résoudre tous les problèmes concernant le calendrier :

- trouver quel jour de la semaine vous êtes né ;
- déterminer quel jour tombe Noël en l'an 2 000 ;
- trouver quels sont les vendredi 13 de 1999 ;
- trouver la date de Pâques pour une année quelconque ;
- déterminer les années de naissance de l'arrière grand-père, du grand-père, du père et du fils (qui est un de mes amis…) sachant qu'ils sont nés tous les 4 un dimanche 29 février ;
- Shakespeare et Cervantes sont tous deux morts le 23 avril 1616. Lequel est mort avant l'autre ?
- un dicton nous dit que les jours s'allongent : "pour S$^{te}$ Luce, du saut d'une puce ; pour S$^{t}$ Antoine du repas d'un moine" ; l'ennui, c'est que S$^{te}$ Luce est le 13 décembre, avant le solstice d'hiver qui tombe vers le 23 (donc quand les jours diminuent encore)… où est l'erreur ?
- construire le calendrier de l'année 2000 en utilisant la méthode donnée plus haut, et comparer le résultat avec celui proposé ;
- etc.

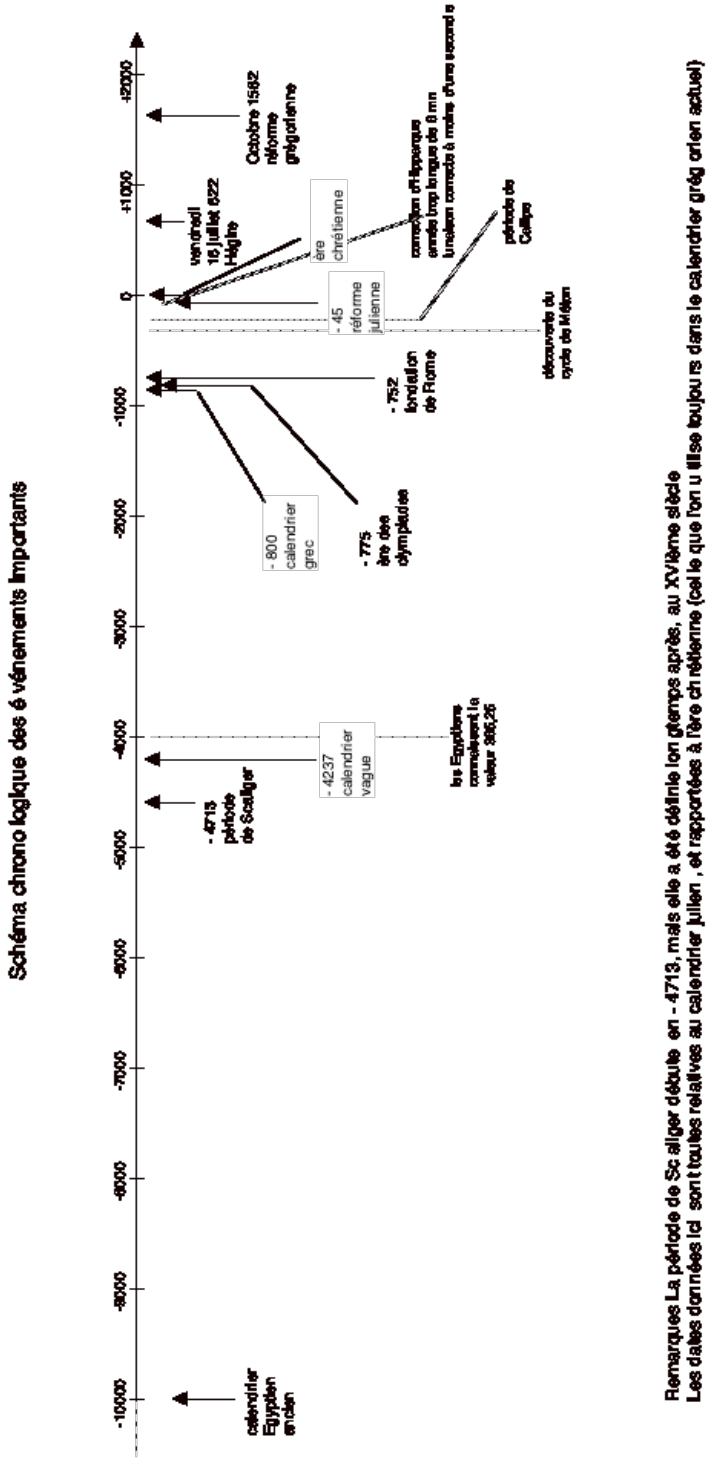
**Quelques réponses**

Shakespeare est mort le 23 avril 1616 en Angleterre, où la réforme grégorienne n'a été appliquée qu'à partir de 1752. Il s'agit donc du 23 avril Julien.

Cervantes est mort le 23 avril 1616 en Espagne, où la réforme a été appliquée dès 1582. Donc il s'agit ici du 23 avril grégorien.

Et puisqu'on a supprimé 10 jours au calendrier julien pour obtenir le grégorien, le 15 octobre 1582 grégorien avance de 10 jours sur le même 15 octobre julien. Il en sera de même jusqu'à ce qu'une année séculaire non bissextile dans le calendrier grégorien accroisse l'écart. Mais l'année 1600 est bissextile dans les deux calendriers ; l'écart en 1616 est resté de 10 jours. Donc, Cervantès est mort 10 jours avant Shakespeare !

Le dicton relatif à S$^{te}$ Luce est ancien, il date d'avant la réforme grégorienne. A ce moment-là, le solstice d'hiver tombait 13 jours plus tôt, le 12 décembre. Pour S$^{te}$ Luce, les jours rallongeaient donc de quelques secondes…




**Bibliographie**

| | | | |
|---|---|---|---|
| Chauve-Bertrand | *La question du Calendrier* | La renaissance du livre | Paris 1920 |
| Paul Couderc | *Le Calendrier* | Que Sais-je ? | 1946 |
| Lucien Tartois | article *Le Calendrier* | Encyclopédie la Pléïade | Paris 1962 |
| | article *Le Calendrier* | Encyclopedia Universalis | |
| | article *Connaissances scientifiques* | Quid ? | |
| Caratini Roger | *L'astronomie* | Bordas | |
| | article *Le Calendrier* | Encyclopédie atlas du ciel | édition Atlas |
| André Danjon | *Astronomie Générale*, p127 et 128 | Albert Blanchard | 1980 |
| Oudin J.M. | *Les secrets des calendriers à la portée de tous* | imp. St Luc | Tournai 1939 |
| Lévy J. | *La date de Pâques* | annuaire du bureau des longitudes | 1975 |
| | *Données sur les calendriers* | annuaire du Bureau des Longitudes | année en cours |
| Bigourdan G. | | annuaire du Bureau des Longitudes | 1917 |
| Jean Lefort | *La saga des calendriers* | bibliothèque Pour la Science | 1998 |
| Jean-Pierre Verdet | *Une histoire de l'astronomie* | collection Point, ed. Seuil | |
| Agnès Acker | *Astronomie, introduction* | Masson | 1992 |
| | *La semaine a-t-elle une origine astronomique ?* | Ciel et Espace | janv-fév 1987 |
| Emile Biémont | *Rythmes du temps* | De Boeck | |


**Index**


A

almanach

année :

- abondante (hébreu ancien)
- commune
- babylonienne
- hébreu ancienne
- musulmane
- persanne
- romaine
- embolismique (hébreu ancien)
- sidérale
- tropique

B

baktun

bissextil

C

calendrier

- aztèque
- des postes
- égyptien
- grégorien
- hébreu ancien
- julien
- persan
- romain
- universel

cycle

- dominical
- de Méton
- solaire

D

décans

E

Epacte

Equinoxe

ère

H

Hégire

I

indiction romaine

J

jour de la Révolution

K

katun

kin

L

Lever héliaque

lunaison

lunaison moyenne

luni-solaires

M

Mayas

mixtes

O

octaétéride

P

parapegmes

période

- julienne
- de Callipe
- de Scaliger
- sothiaque

planètes

précession des équinoxes

R

révolution synodique

S

Sans-culottides

semaine

solstice

Sothys

T

tonalamatl

tun

tzolkin

U

uinal

V

Vénus

vieux style

| | | |
|---|---|---|
| chaldéen ou babylonien | mois | Z |
| chinois | N | zodiaque |
| grec | nemontemi | |
| israélite moderne | Noël | |
| maya | Nombre d'or | |
| musulman | nouveau style | |
| républicain | | |
| vague | | |




Planche représentant les constellations australes, extraite de l'édition de 1554 de l'Almageste de Claude Ptolémée.
Cet ouvrage a été imprimé pour la première fois en 1538.

Ce texte a fait l'objet d'une publication dans la revue de l'Association Marseillaise d'Astronomie (AMAs), sous l'ISSN 1287 - 8278

---=OO=---




## *Chimie*

Le but de ce chapitre n'est pas de se lancer dans la chimie au sens strict, mais d'aborder la chimie physique. Celle-ci tente d'expliquer la structure électronique des divers éléments, qui permet à son tour de comprendre :

- les liaisons chimiques, par les propriétés électriques des électrons ;
- les raies spectrales des éléments autres que l'hydrogène (généralisation du modèle d'atome d'hydrogène de Bohr) ;
- la constitution du tableau de Mendeleev.

Les deux premiers domaines intéressent l'astronomie, le premier pour l'étude des molécules qui se forment dans les atmosphères froides de certaines étoiles, dans celles des planètes ou dans leur sol, ou encore dans le milieu interstellaire ; le second par l'importance capitale que représente la spectroscopie dans l'étude de tous les astres. Le tableau de Mendeleev enfin, est l'outil fondamental de l'étude des éléments. Il résume une grande partie de leurs propriétés.

### Tableau de Mendeleev

Les éléments qui sont dans une même colonne possèdent des propriétés chimiques très semblables, et forment une *famille*. Ainsi, la colonne de gauche est celle des *alcalins* : Li, Na, K, Rb, Cs, Fr. La colonne de droite est celle des *gaz rares* ou *gaz nobles* : He, Ne, Ar, Kr, Xe, Ra. L'avant-dernière à droite celle des *halogènes* : F, Cl, Br, I, At.

Les lignes de ce tableau représentent des *périodes*.

### Energie d'ionisation

Les atomes sont attachés les uns aux autres, dans les molécules chimiques, par la force électromagnétique. Pour comprendre la chimie, il faut donc étudier les propriétés électroniques des atomes.

L'énergie d'ionisation est la première notion importante. Lorsqu'un atome est neutre, son noyau est entouré d'un nombre d'électrons égal à son nombre de protons, et ces électrons sont liés par la force électromagnétique. Mais cette force est limitée, et l'atome peut perdre un ou plusieurs électrons. Tout dépend de l'énergie disponible. Plus un électron est lié fortement, plus il faut d'énergie pour l'arracher à son atome. Et cette énergie se mesure. Un atome ayant en général plusieurs électrons (sauf l'hydrogène), les divers électrons n'ont pas le même comportement. On utilise le modèle en couches, dans lequel les électrons se répartissent selon des niveaux d'énergie, correspondant à des orbitales autour du noyau. L'électron sur l'orbitale la plus externe est le plus susceptible de quitter l'atome, l'énergie nécessaire pour cela est nommée *énergie de première ionisation*. Pour l'hydrogène, l'énergie de première ionisation est de 13,6 eV (il n'y en a pas d'autres, puisque l'hydrogène n'a qu'un seul proton).

L'énergie d'ionisation est toujours positive : pour arracher un électron lié à son atome, il faut en fournir.Lorsqu'un premier électron a été arraché, un second peut être enlevé à son tour. Il faut pour cela disposer de l'énergie de seconde ionisation. Pour la chimie, l'énergie de première ionisation joue un rôle important : elle détermine la capacité d'un atome à perdre un électron.

Réciproquement, un atome peut gagner un électron. Si son cortège électronique n'est pas complet, l'acquisition d'un électron s'accompagne de l'émission d'une énergie égale à celle nécessaire pour arracher l'électron. Cette énergie est sous la forme d'un photon, d'énergie bien précise, et elle donne lieu à une raie d'émission.

### Energie d'attachement

Un atome peut-il acquérir plus d'électrons qu'il n'a de protons ? Oui, car en fait il crée autour de lui un champ électromagnétique positif, qui attire les électrons sans distinction. La limitation vient de la

répulsion que les électrons produisent entre eux. Mais dans certains cas, le nombre d'électrons peut donc dépasser le nombre de protons. On a alors ce qu'on appelle un ion négatif (lorsqu'on arrache des électrons à un atome, on obtient un ion positif).

Si un atome gagne un électron en plus de son quota (égal au nombre de protons), cet ajout se fait avec un échange d'énergie, nommée *énergie d'attachement*. Mais alors que l'énergie d'ionisation est toujours positive, **l'énergie d'attachement peut être positive ou négative**. Ceci a une grande importance : un système physique, quel qu'il soit, tend toujours à se placer dans son état d'énergie minimale. Par conséquent, si l'état de l'atome avec un électron en plus est moins énergétique que son état avec le nombre standard d'électrons (égal au nombre de protons), alors l'ion négatif est plus stable que l'atome neutre.

Les atomes qui sont dans ce cas sont donc plus stables s'ils ont un électron en plus ! Et cet électron, ils pourraient le prendre à un autre atome… pourvu que ce dernier soit dans la situation inverse, c'est-à-dire que son état neutre soit plus stable.

L'*énergie d'attachement* correspond à l'énergie échangée lors de l'attachement du premier électron **supplémentaire**. Cette notion est symétrique de l'énergie de première ionisation

**Electronégativité**

Cette nouvelle notion est dérivée de la précédente, c'est l'*électronégativité*. Elle compare l'énergie d'ionisation (faculté de perdre un électron), à l'énergie d'attachement (faculté d'en gagner un). Il y a deux définitions différentes de l'électronégativité, qui donnent le même classement des éléments chimiques. Nous en choisirons une, celle de Mulliken pour des raisons de simplicité. Elle définit l'électronégativité comme la moyenne arithmétique de l'énergie d'ionisation et de l'énergie d'attachement. Cette moyenne est une énergie. Or l'électronégativité est simplement une *tendance* à acquérir ou perdre des électrons. Mulliken a donc multiplié cette moyenne par une constante exprimée en $eV^{-1}$. Ainsi, le produit n'a pas d'unité :

$$\chi = k_M (E_{i,1} + E_A) / 2$$

L'électronégativité représente le comportement chimique des éléments. Ainsi, leur caractère réducteur ou oxydant lui est lié :

| | |
|---|---|
| L'aptitude à **céder** des électrons (énergie de 1re ionisation faible) | caractère **réducteur** |
| l'aptitude à **gagner** des électrons (énergie de 1re ionisation forte) | caractère **oxydant** |

Dans le tableau de Mendeleev, l'électronégativité croît de la gauche vers la droite : les *alcalins* (colonne de gauche) sont peu électronégatifs ; les halogènes (avant-dernière colonne à droite) le sont fortement. Verticalement, l'électronégativité croît de bas en haut.

Prenons le fluor en exemple. C'est un oxydant très puissant. Il se trouve en haut et à droite du tableau de Mendeleev. Son électronégativité de Mulliken est la plus élevée, et vaut 3,90. A l'inverse, le rubidium a une électronégativité de Mulliken de 0,50 seulement. Il est tout à gauche dans le tableau de Mendeleev, dans la colonne des alcalins. Il est très réducteur.

**Réactions élémentaires**

Pour qu'une réaction chimique se produise, il faut que des molécules se rencontrent. Certaines réactions mettent en jeu un grand nombre de molécules. Si c'était la réalité physique, la probabilité qu'elles se produisent serait infiniment faible, puisqu'elle nécessiterait la rencontre simultanée de toutes ces molécules. En fait, les réactions très probables sont celles qui ne mettent en jeu que deux molécules. Les réactions à trois molécules peuvent encore se produiren beaucoup plus rarement. Pour un nombre plus grand, la probabilité est si faible que le taux de réaction est totalement négligeable.

Il faut alors admettre que ce que nous voyons en observant les réactifs d'une part, et les produits de l'autre (c'est-à-dire avant et après la réaction), ne décrit pas ce qu'il se passe dans le réacteur (pendant). La réaction ne se produit en général pas comme on la décrit, mais elle est la somme d'une suite de réactions plus simples, que l'on appelle *réactions élémentaires*.

Par analogie, vous pouvez considérer en physique nucléaire la chaîne proton-proton, qui s'écrit globalement $4\ {}^{1}H \rightarrow {}^{4}He$, mais qui est en fait une succession de réactions élémentaires. La probabilité que 4 protons donnent directement un noyau d'hélium est infiniment petite.

La vitesse de réalisation d'une réaction est donc conditionnée par la plus lente des réactions élémentaires qui la constituent. Aussi, pour calculer cette vitesse est-il nécessaire d'analyser la réaction.

**Nombres quantiques**

Nous avons vu les propriétés optiques de l'atome d'hydrogène dans le chapitre consacré à la lumière. Pour expliquer les raies d'émission (ou d'absorption), on a utilisé un nombre entier qui définit des niveaux d'énergie ; lorsque l'électron change de niveau d'énergie, il émet ou absorbe un photon d'énergie correspondant à la différence entre les deux niveaux. Si la différence est négative, il émet un photon, sinon il l'absorbe. L'atome d'hydrogène possèdant un unique proton, on conçoit que ses propriétés soient plus simples que celles des autres, et c'est d'ailleurs pourquoi il a été pris comme premier sujet d'étude, et comme exemple.

Le nombre entier défini pour l'atome d'hydrogène est appellé *nombre quantique principal*, et il est noté *n*.

L'extrapolation de ce modèle simple aux autres atomes ne donne pas de résultats en accord avec l'expérience. Un niveau d'énergie, définit par le nombre *n*, peut accueillir deux électrons, de spins opposés. Pas plus. Donc, en extrapolant ce raisonnement pour des noyaux lourds, le second niveau d'énergie ne doit contenir que 2 électrons. Or ceci est contredit par la spectroscopie : le second niveau d'énergie accueille 8 électrons !

Comment concilier le modèle de l'atome d'hydrogène, qui le décrit si bien, avec ce résultat incompatible ? Les principes utilisés pour l'hydrogène sont : **quantification de l'énergie** (par le nombre *n*), et **principe d'exclusion** qui interdit que deux électrons soient dans le même état. Le spin permet d'avoir deux électrons au même niveau d'énergie. Pour en accepter plus sur un même niveau, en conservant ces idées, il est assez naturel d'introduire un nouveau nombre quantique, qui permettra de différencier des états sans lui semblables.

On a donc introduit le *nombre quantique azimutal*, noté *l*. Physiquement, il correspond à l'opérateur de moment angulaire, et donc à la forme des orbitales. Ceci impose une contrainte sur ses valeurs.

Enfin, pour tenir compte de certains effets, comme l'effet Zeeman (dédoublement magnétique des raies spectrales), on doit introduire un dernier nombre, nommé *nombre quantique magnétique*, et noté $m_l$. Il représente l'orientation de l'atome dans l'espace. Le nombre quantique magnétique doit, lui aussi, satisfaire à des contraintes déduites de la théorie.

L'état d'un électron est donc totalement décrit par les 4 nombres quantiques suivants :

| | | |
|---|---|---|
| nombre quantique principal | $n$ | $n \geq 1$ |
| nombre quantique azimutal | $l$ | $0 \leq l \leq n - 1$ |
| nombre quantique magnétique | $m_l$ | $-l \leq m_l \leq +l$ |
| nombre quantique de spin | $m_s$ | $m_s = -1/2$ ou $m_s = +1/2$ |

**Electrons appariés, électrons célibataires**

Lorsqu'une orbitale est peuplée par deux électrons, ceux-ci, pour respecter le principe d'exclusion, doivent obligatoirement être de spins opposés. On dit qu'ils sont *appariés*. Si un électron se trouve seul sur son orbitale, on le dit *célibataire*. Electrons célibataires et appariés jouent des rôles différents dans les liaisons chimiques.

## *Hiérarchie*

**Couches**

En ne considérant tout d'abord que le nombre quantique principal *n*, on obtient les *couches électroniques*. Elles prennent pour nom une lettre majuscule, en commençant par K :

| **n** | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **symbole** | K | L | M | N | O | P | Q |

**Sous-couches**

Prenant ensuite en compte le nombre quantique azimutal (en conjonction avec *n*), on définit la notion de *sous-couche*. Pour chaque couche *n*, il y a une sous-couche par valeur différente de *l*. Les sous-couches sont nommées par une lettre minuscule, attachée au nombre quantique azimutal :

| $l$ | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|---|
| sous-couche | s | p | d | f | g |

La signification des lettres, provenant de la spectroscopie, est la suivante : s = sharp ; p = principal ; d = diffuse ; f = fondamental. Pour la suite, il n'y a plus de signification particulière, et on prend simplement les lettres suivantes dans l'ordre alphabétique : g, h, i…

La caractérisation complète d'une sous-couche fait apparaître le nombre quantique principal $n$ et le nombre quantique azimutal, le premier précédant l'autre exprimé par sa lettre. Ainsi, on aura les sous-couches 1s, 2s, 2p, 3d… Le tableau ci-dessous tient compte de la contrainte qui pèse sur $l$ ($0 \leq l \leq n$ - 1) pour définir les sous-couches possibles :

| ***n* \ *l*** | **0** | **1** | **2** | **3** | **4** |
|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 1s | | | | |
| **2** | 2s | 2p | | | |
| **3** | 3s | 3p | 3d | | |
| **4** | 4s | 4p | 4d | 4f | |
| **5** | 5s | 5p | 5d | 5f | 5g |

Toute sous-couche est donc caractérisée par un couple ($n$, $l$), formé par les deux premiers nombres quantiques : 1s : (1, 0) ; 2s : (2, 0) ; 2p : (2, 1) ; 3s : (3, 0) ; 3p : (3, 1) ; 3d : (3, 2) ; etc.

Les sous-couches représentent la possibilité d'accueillir un (ou plusieurs) électron(s). Elles peuvent être vides, ou en partie pleines. Si elles le sont en totalité, on dira qu'elles sont saturées. Il est important d'indiquer le nombre d'électrons qui peuplent effectivement une sous-couche. Ceci se fait en indiquant ce nombre en exposant à droite de la désignation de la couche. Ainsi, $1s^1$ indique que la couche 1s contient 1 électron. $1s^2$ indique qu'elle en contient 2, elle est alors saturée. Lorsqu'on précise l'état d'un atome, on indique toutes les couches partiellement ou totalement remplies, et on omet les vides.

**Niveaux d'énergie**

**Les sous-couches représentent les niveaux d'énergie**. Pour une même valeur de $n$, il y a autant de niveaux d'énergie que de sous-couches, c'est-à-dire autant que de valeurs différentes de $l$ soit $n$ valeurs (puisque $0 \leq l \leq n$ - 1). Un niveau d'énergie, pour les atomes plus lourds que l'hydrogène, est donc défini par le couple ($n$, $l$). Pour le niveau $n$, ce sont donc les couples ($n$, 0), ($n$, 1), … ($n$, $n$-1).

**Orbitales**

Pour l'atome d'hydrogène, nous avons parlé d'orbite de l'électron, et pour être plus correct dans le langage de la Mécanique Quantique, d'orbitale. L'électron est sur une orbitale, et en change par émission ou absorption de photons. Dans ce cadre, nous avons toujours confondu orbitale et niveau d'énergie. C'est possible, car l'atome d'hydrogène est le plus simple. Mais pour les autres atomes, il convient de bien distinguer : à un niveau d'énergie correspondent en général plusieurs orbitales, distinguées par leur nombre quantique magnétique (leur orientation dans l'espace).

La caractérisation complète d'une orbitale fait donc intervenir les trois premiers nombres quantiques, et correspond au triplet ($n$, $l$, $m_l$). La contrainte de définition de $m_l$ étant $-l \leq m_l \leq +l$, la table ci-dessous donne toutes les orbitales pour les couches K, L, M et N ($n$ = 1, 2, 3, 4).

Tableau 1 : les orbitales

| ***couches*** | **sous-couches / orbitales** | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **K** | 1s | | | | | | | | | | | | | | |
| | (1, 0, 0) | | | | | | | | | | | | | | |
| **L** | 2s | 2p | | | | | | | | | | | | | |
| | (2, 0, 0) | (2, 1, -1) | (2, 1, 0) | (2, 1, +1) | | | | | | | | | | | |
| **M** | 3s | 3p | | | 3d | | | | | | | | | | |
| | (3, 0, 0) | (3, 1, -1) | (3, 1, 0) | (3, 1, +1) | (3, 2, -2) | (3, 2, -1) | (3, 2, 0) | (3, 2, +1) | (3, 2, +2) | | | | | | |
| **N** | 4s | 4p | | | 4d | | | | | 4f | | | | | |
| | (4, 0, 0) | (4, 1, -1) | (4, 1, 0) | (4, 1, +1) | (4, 2, -2) | (4, 2, -1) | (4, 2, 0) | (4, 2, +1) | (4, 2, +2) | (4, 3, -3) | (4, 3, -2) | (4, 3, -1) | (4, 3, 0) | (4, 3, +1) | (4, 3, +2) | (4, 3, +3) |

Les couches K, L, etc sont indiquées à gauche. Les sous-couches sont notées dans les cellules du haut de chaque couche (1s, 2s, 2p, etc). Enfin, les orbitales sont données par les triplets qui les représentent.

**Le spin**

Le dernier nombre quantique, le spin, intervient maintenant. Sur chaque orbitale, l'atome peut accueillir 2 électrons et non un seul,à la condition que leurs spins soient différents. L'état complet d'un électron est donc défini, finalement, par les 4 nombres quantiquesnotés par un quadruplet tel par exemple (4, 3, -2, +1/2) ou (4, 3, -2, -1/2). On peut alors déterminer le nombre d'électrons par couches : 2 pour K, 8 pour L, 18 pour M, 32 pour N… Les parties grisées du tableau sont vides, car elles sont en-dehors des contraintes sur les nombres quantiques. Par exemple, pour la couche K ($n = 1$), $l \leq n$ - 1 implique que $l$ ne peut prendre que la seule valeur 0.

Toutes les orbitales qui sont dans la même sous-couche ont le même niveau d'énergie. Dans chaque cellule du tableau, on devrait remplacer le triplet ($n$, $l$, $m_l$) par les deux quadruplets ($n$, $l$, $m_l$, $s$), où $s$ prend les valeurs +1/2 et -1/2. Ainsi, chaque cellule du tableau représente au plus deux électrons. La sous-couche 3p par exemple peut contenir jusqu'à $3 \times 2 = 6$ électrons.

**Ordre de remplissage**

Un atome peut être totalement ionisé, c'est-à-dire avoir perdu la totalité de ses électrons. Il suffit pour cela qu'il soit plongé dans un milieu assez chaud. Si la température baisse alors, il va capturer un électron, puis un second… Le premier électron ira tout naturellement dans le niveau d'énergie fondamental, qui correspond à l'énergie minimale. Le second ira dans la première sous-couche disponible (ce sera la même que pour le premier si le spin peut les différencier). Ainsi, le remplissage se fait par ordre d'énergie de liaison croissante, de l'orbitale la plus liée à la moins liée (*principe d'aufbau* = construction). Ceci est tout à fait normal. Mais la difficulté vient du fait que cet ordre ne correspond pas exactement à l'ordre lexicographique des sous-couches (ordre des nombres quantiques croissants que nous avons utilisé jusque-là).

**Règle de Klechkowski**

L'ordre qui semble naturel est celui dans lequel on a tendance à les écrire, par $n$ croissant, et par $l$ croissant en cas d'égalité de $n$. Mais il ne correspond pas à l'ordre des énergies décroissantes. Par exemple, la sous-couche 4s possède une énergie plus élevée que la sous-couche 3d ! Ainsi, elle sera remplie avant. Klechkowski a proposé une règle facile à retenir :

> Le remplissage se fait par valeurs de $n + l$ croissant ;
> lorsque deux sous-couches présentent la même valeur de cette somme, c'est celle de plus petit $n$ qui est remplie la première.

Ecrivons d'abord les sous-couches dans l'ordre naturel, en plaçant en-dessous la somme $n + l$ :

| **sous-couche** | 1s | 2s | 2p | 3s | 3p | 3d | 4s | 4p | 4d | 4f | 5s | 5p | 5d | 5f | 5g |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **état ($n$, $l$)** | (1, 0) | (2, 0) | (2, 1) | (3, 0) | (3, 1) | (3, 2) | (4, 0) | (4, 1) | (4, 2) | (4, 3) | (5, 0) | (5, 1) | (5, 2) | (5, 3) | (5, 4) |
| ***n* + *l*** | 1 | 2 | 3 | 3 | 4 | 5 | 4 | 5 | 6 | 7 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |

Entre 2p et 3s, la somme ne change pas. La règle indique qu'il faut choisir le $n$ minimum, et cela correspond à l'ordre naturel.

Entre 3d et 4s, la somme décroît. La règle impose donc de permutter ces deux sous-couches, ce qui correspond à l'énergie croissante. On doit alors comparer 3d et 4p, ce qui revient à conserver cet ordre, puisqu'il est celui des $n$ croissants.

| **sous-couche** | 1s | 2s | 2p | 3s | 3p | 4s | 3d | 4p | 4d | 4f | 5s | 5p | 5d | 5f | 5g |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **état ($n$, $l$)** | (1, 0) | (2, 0) | (2, 1) | (3, 0) | (3, 1) | (4, 0) | (3, 2) | (4, 1) | (4, 2) | (4, 3) | (5, 0) | (5, 1) | (5, 2) | (5, 3) | (5, 4) |
| ***n* + *l*** | 1 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 | 6 | 7 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |

La couche 5s, de somme 5, doit rétrograder de deux places.

| **sous-couche** | 1s | 2s | 2p | 3s | 3p | 4s | 3d | 4p | 5s | 4d | 4f | 5p | 5d | 5f | 5g |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **état ($n$, $l$)** | (1, 0) | (2, 0) | (2, 1) | (3, 0) | (3, 1) | (4, 0) | (3, 2) | (4, 1) | (5, 0) | (4, 2) | (4, 3) | (5, 1) | (5, 2) | (5, 3) | (5, 4) |
| ***n* + *l*** | 1 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 6 | 7 | 6 | 7 | 8 | 9 |

On doit permuter 4f et 5p :

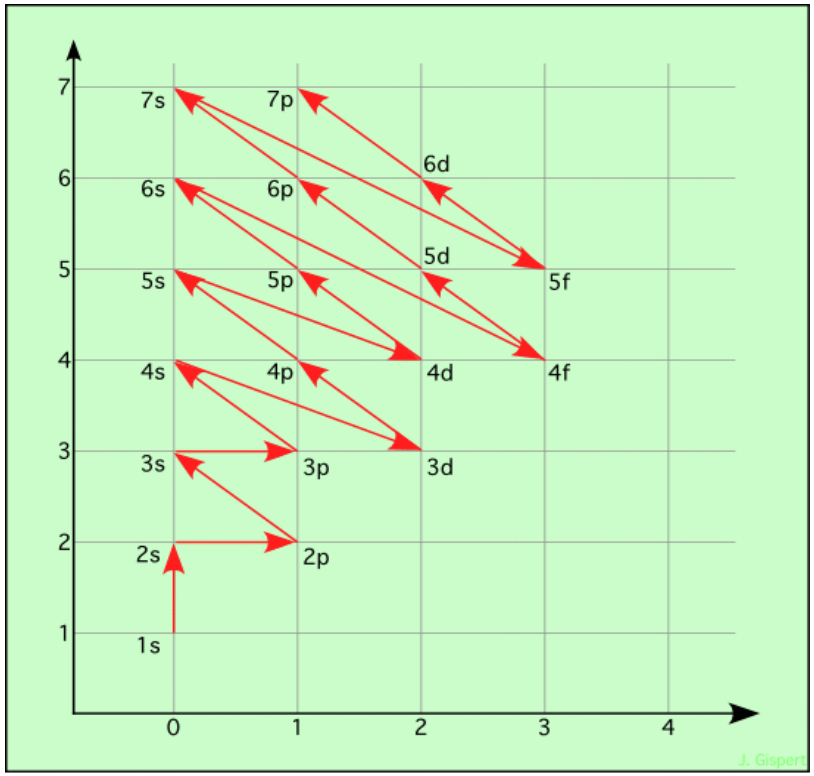
| **sous-couche** | 1s | 2s | 2p | 3s | 3p | 4s | 3d | 4p | 5s | 4d | 5p | 4f | 5d | 5f | 5g |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **état (*n*, *l*)** | (1, 0) | (2, 0) | (2, 1) | (3, 0) | (3, 1) | (4, 0) | (3, 2) | (4, 1) | (5, 0) | (4, 2) | (5, 1) | (4, 3) | (5, 2) | (5, 3) | (5, 4) |
| ***n* + *l*** | 1 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 6 | 6 | 7 | 7 | 8 | 9 |

Maintenant, les sous-couches que nous avons considérées sont dans l'ordre de remplissage qui correspond à l'ordre des énergies décroissantes (en valeur absolue), jusqu'à 5p. En effet, la somme $n + l$ pour 5p est $5 + 1 = 6$, et celle de 6s, que nous n'avons pas représentée dans le tableau, vaut $6 + 0 = 6$ également. Elle va donc venir après 5p, puisque son $n$ est supérieur, et immédiatement après puisque les suivants sont plus élevés :

Tableau 2 : ordre de remplissage

| **sous-couche** | 1s | 2s | 2p | 3s | 3p | 4s | 3d | 4p | 5s | 4d | 5p | 6s | 4f | 5d | 5f |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **état (*n*, *l*)** | (1, 0) | (2, 0) | (2, 1) | (3, 0) | (3, 1) | (4, 0) | (3, 2) | (4, 1) | (5, 0) | (4, 2) | (5, 1) | (6, 0) | (4, 3) | (5, 2) | (5, 3) |
| ***n* + *l*** | 1 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 6 | 6 | 6 | 7 | 7 | 8 |

Maintenant, le tableau est dans l'ordre jusqu'à 5f. On peut imaginer comment ordonner la suite, sans même écrire la suite du tableau. On construit un graphe de remplissage :




Comme on le constate, le remplissage est loin d'être aussi simple qu'on pouvait le supposer *a priori*. Mais la règle de Klechkowski est d'application aisée, et donne facilement la solution.

Remarquez que, historiquement, le schéma a été construit sur les données expérimentales, et la règle de Klechkowski en a été déduite. Elle se voit très clairement par le parcours : $n$ a tendance à augmenter globalement. Lorsque ce n'est pas le cas, c'est $l$ qui augmente. Il est assez facile de constater que leur somme est vraiment croissante. Et les seuls cas où elle est stationnaire, $n$ augmente.

**Organisation des électrons**

On doit maintenant se demander comment les électrons peuplent les différentes sous-couches. Les sous-couches s sont caractérisées par $l = 0$, donc $-l \leq m_l \leq +l$ devient $-0 \leq m_l \leq +0$, donc une seule orbitale correspondant à $m_l = 0$. Mais les autres sous-couches se décomposent en plusieurs orbitales, puisque pour elles des valeurs > 0 sont possibles.Comment les électrons vont-ils peupler ces orbitales ? L'ordre défini par la règle de Klechkowski ne répond pas. Réécrivons le tableau ci-dessus, en remplaçant la somme $n + l$ par le nombre d'électrons que la sous-couche peut accueillir (deux par orbitale, en respectant le principe d'exclusion naturellement).

| **sous-couche** | 1s | 2s | 2p | 3s | 3p | 4s | 3d | 4p | 5s | 4d | 5p |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **état** | (1, 0) | (2, 0) | (2, 1) | (3, 0) | (3, 1) | (4, 0) | (3, 2) | (4, 1) | (5, 0) | (4, 2) | (5, 1) |
| **nombre d'orbitales (*-l .. +l*)** | 1 | 1 | 3 | 1 | 3 | 1 | 5 | 3 | 1 | 5 | 3 |
| **Nombre d'électrons** | 2 | 2 | 6 | 2 | 6 | 2 | 10 | 6 | 2 | 10 | 6 |

**Configuration électronique des éléments**

| 1s | 2s | 2p | | | 3s | 3p | | | 4s | 3d | | | | | 4p | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (1, 0, 0) | (2, 0, 0) | (2, 1, -1) | (2, 1, 0) | (2, 1, +1) | (3, 0, 0) | (3, 1, -1) | (3, 1, 0) | (3, 1, +1) | (4, 0, 0) | (3, 2, -2) | (3, 2, -1) | (3, 2, 0) | (3, 2, +1) | (3, 2, +2) | (4, 1, -1) | (4, 1, 0) | (4, 1, +1) |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5s | 4d | | | | | 5p | | | 6s | 4f | | | | | | | 5d … |
| (5, 0, 0) | (4, 2, -2) | (4, 2, -1) | (4, 2, 0) | (4, 2, +1) | (4, 2, +2) | (5, 1, -1) | (5, 1, 0) | (5, 1, +1) | (6, 0, 0) | (4, 3, -3) | (4, 3, -2) | (4, 3, -1) | (4, 3, 0) | (4, 3, +1) | (4, 3, +2) | (4, 3, +3) | … |

Le tableau contient les différentes sous-couches dans l'ordre de remplissage vu plus haut. Les orbitales sont indiquées. Voyons comment elles se remplissent.

- L'hydrogène (Z = 1) n'a qu'un électron, qui va dans la première sous-couche 1s. On le note $1s^1$.
- L'hélium (Z = 2) en a deux, qui tiennent aussi dans la sous-couche 1s avec leurs spins opposés. Il est noté $1s^2$.
- Le lithium (Z = 3) initie le remplissage de la seconde couche, en plaçant son troisième électron en 2s : $1s^2 2s^1$.
- Le bérylium (Z = 4) place son quatrième électron sur la même orbitale, avec son spin opposé : $1s^2 2s^2$. La deuxième sous-couche est maintenant saturée.
- Le bore (Z = 5) initie le remplissage de la troisième sous-couche, en plaçant son cinquième électron en 2p : $1s^2 2s^2 2p^1$.

Pour cet élément, un problème se pose. Pour le cinquième électron, trois orbitales se présentent, toutes vides : les (2, 1, -1), (2, 1, 0) et (2, 1, +1). Laquelle sera occupée ? Les trois orbitales ne se distinguent que par leur orientation spatiale, et partagent exactement la même énergie. De ce fait, la probabilité d'occupation des trois orbitales est la même, et l'électron se place sur l'une quelconque des trois.

**Règle de Hund**

L'élément suivant est le carbone (Z = 6). Le sixième électron est placé devant un choix : soit occuper la même orbitale que le précédent, en ayant un spin opposé ; soit occuper une autre orbitale, les spins étant alors libres. Les spins tendent à se placer parallèles plutôt qu'antiparallèles (minimum d'énergie). Cette particularité donne lieu à la *règle de Hund* :

> *Quand un niveau d'énergie est dégénéré, et que le nombre d'électrons est insuffisant pour le saturer, les électrons utilisent le maximum d'orbitales possibles, avec les spins non appariés parallèles.*

Parmi les configurations possibles, celle qui **maximise le spin total** (la somme des spins des électrons considérés) est celle qui **minimise l'énergie**. C'est ce qui justifie la règle de Hund. Les spins pouvant valoir +1/2 ou -1/2, c'est la configuration avec tous les spins +1/2 (si elle est possible), qui est celle de moindre énergie.

> L'explication physique de cette situation est que les électrons distribués sur le maximum d'orbitales, avec les spins parallèles, minimisent l'effet d'écrantage entre eux, augmentant donc l'attraction du noyau positif. L'attraction plus forte diminue la distance au noyau, et donc aussi l'énergie de l'électron.

Un noyau tout seul produit dans son voisinage un champ électromagnétique de symétrie sphérique (à la distance à laquelle se trouvent normalement les électrons, la distribution des protons est pratiquement sphérique). Si un électron est autour du noyau, le champ est modifié : vu de l'extérieur, le champ négatif de l'électron masque le champ positif du noyau. Comme si un écran était intreposé, c'est pourquoi on nomme ce phénomène *écrantage*. Un second électron, plus loin du noyau, ressent donc un champ positif affaibli, et sa liaison au noyau s'en trouve affaiblie.

| ***couches*** | **sous-couches / orbitales** | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **K** | 1s | | | | | | | | | | | | | |
| | (1, 0, 0) | | | | | | | | | | | | | |
| **L** | 2s | 2p | | | | | | | | | | | | |
| | (2, 0, 0) | (2, 1, -1) | (2, 1, 0) | (2, 1, +1) | | | | | | | | | | |
| **M** | 3s | 3p | | | 3d | | | | | | | | | |
| | (3, 0, 0) | (3, 1, -1) | (3, 1, 0) | (3, 1, +1) | (3, 2, -2) | (3, 2, -1) | (3, 2, 0) | (3, 2, +1) | (3, 2, +2) | | | | | |
| **N** | 4s | 4p | | | 4d | | | | | 4f | | | | | | | |
| | (4, 0, 0) | (4, 1, -1) | (4, 1, 0) | (4, 1, +1) | (4, 2, -2) | (4, 2, -1) | (4, 2, 0) | (4, 2, +1) | (4, 2, +2) | (4, 3, -3) | (4, 3, -2) | (4, 3, -1) | (4, 3, 0) | (4, 3, +1) | (4, 3, +2) | (4, 3, +3) |

On peut considérer cet ordre de remplissage pour un atome ionisé, qui récupère au fur et à mesure des électrons. Mais il est également l'ordre dans lequel les différents atomes remplissent leurs couches. Ainsi, l'hydrogène (un seul proton, Z = 1) reçoit son électron au niveau 1s. L'atome d'hydrogène neutre peut donc se représenter par $1s^1$, le 1 en exposant rappelant qu'il y a un électron.

Pour l'hélium, les deux électrons coexistent sur la couche 1s, avec leurs spins antiparallèles : +1/2 pour l'un, -1/2 pour l'autre. La représentation est : $1s^2$. Remarquez que l'hélium ionisé une fois est représenté par $1s^1$, comme l'hydrogène neutre. Plus généralement, tout atome ionisé auquel ne reste qu'un unique électron possède la même configuration électronique : $1s^1$. Ces ions sont nommés, pour cela, *hydrogénoïdes*.

Le lithium possède 3 protons (Z = 3), donc la première couche est saturée : $1s^2$. Il reste un électron à caser ; il ira dans la sous-couche 2s : $2s^1$. La notation complète pour le lithium sera donc : $1s^2 2s^1$.

L'élément suivant, le berylium Be, possède 4 protons. Les deux premiers électrons iront saturer la sous-couche 1s, les deux autres trouveront leur place dans la sous-couche 2s, et seront naturellement antiparallèles (principe d'exclusion). Ensuite, le bore B possède 5 protons ; il aura la même configuration pour les 4 premiers électrons, et logera le cinquième dans une nouvelle sous-couche.

| $_1$H | $_2$He | $_3$Li | $_4$Be | $_5$B | $_6$C | $_7$N | $_8$O | $_9$F | $_{10}$Ne |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $1s^1$ | $1s^2$ | $1s^2 2s^1$ | $1s^2 2s^2$ | $1s^2 2s^2 2p^1$ | $1s^2 2s^2 2p^2$ | $1s^2 2s^2 2p^3$ | $1s^2 2s^2 2p^4$ | $1s^2 2s^2 2p^5$ | $1s^2 2s^2 2p^6$ |

| $_{11}$Na | $_{12}$Mg | $_{13}$Al | $_{14}$Si | $_{15}$P | $_{16}$S | $_{17}$Cl | $_{18}$Ar |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$ | $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$ | $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$ | $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$ | $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^3$ | $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^4$ | $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^5$ | $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$ |

La suite du remplissage serait fastidieuse, car on observe que la configuration électronique s'allonge de plus en plus. Mais on peut faire une remarque : on a rempli le tableau jusqu'au troisième gaz rare, l'argon. Et il apparaît que les éléments qui suivent chaque gaz rare reprennent la configuration électronique de ce dernier, en lui ajoutant de nouveaux électrons. Le premier gaz rare est l'hélium, $1s^2$. Tous les éléments, du lithium jusqu'au néon, ont leur configuration électronique qui commence comme celle de l'hélium. Alors, au lieu de répéter celle-ci, on note à sa place le symbole du gaz rare, mis entre crochets : la configuration du lithium est $[He]2s^1$, celle du berylium $[He]2s^2$, celle du bore $[He]2s^2 2p^1$, etc.

Il en est de même après les autres gaz rares. Ainsi, le sodium Na est représenté par $[Ne]3s^1$, etc. on peut réécrire le tableau sous cette nouvelle forme, en le complétant :

| $_1$H | $_2$He | $_3$Li | $_4$Be | $_5$B | $_6$C | $_7$N | $_8$O | $_9$F | $_{10}$Ne |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | |

| $1s^1$ | $1s^2$ | $[He]2s^1$ | $[He]2s^2$ | $[He]2s^22p^1$ | $[He]2s^22p^2$ | $[He]2s^22p^3$ | $[He]2s^22p^4$ | $[He]2s^22p^5$ | $[He]2s^22p^6$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

| $_{11}Na$ | $_{12}Mg$ | $_{13}Al$ | $_{14}Si$ | $_{15}P$ | $_{16}S$ | $_{17}Cl$ | $_{18}Ar$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $[Ne]3s^1$ | $[Ne]3s^2$ | $[Ne]3s^23p^1$ | $[Ne]3s^23p^2$ | $[Ne]3s^23p^3$ | $[Ne]3s^23p^4$ | $[Ne]3s^23p^5$ | $[Ne]3s^23p^6$ |

| $_{19}K$ | $_{20}Ca$ | $_{21}Sc$ | $_{22}Ti$ | $_{23}V$ | $_{24}Cr$ | $_{25}Mn$ | $_{26}Fe$ | $_{27}Co$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $[Ar]4s^1$ | $[Ar]4s^2$ | $[Ar]4s^23d^1$ | $[Ar]4s^23d^2$ | $[Ar]4s^23d^3$ | $[Ar]4s^23d^4$ | $[Ar]4s^23d^5$ | $[Ar]4s^23d^6$ | $[Ar]4s^23d^7$ |
| $_{28}Ni$ | $_{29}Cu$ | $_{30}Zn$ | $_{31}Ga$ | $_{32}Ge$ | $_{33}As$ | $_{34}Se$ | $_{35}Br$ | $_{36}Kr$ |
| $[Ar]4s^23d^8$ | $[Ar]4s^23d^9$ | $[Ar]4s^23d^{10}$ | $[Ar]4s^23d^{10}4p^1$ | $[Ar]4s^23d^{10}4p^2$ | $[Ar]4s^23d^{10}4p^3$ | $[Ar]4s^23d^{10}4p^4$ | $[Ar]4s^23d^{10}4p^5$ | $[Ar]4s^23d^{10}4p^6$ |

| $_{37}Rb$ | $_{38}Sr$ | $_{39}Y$ | $_{40}Zr$ | $_{41}Nb$ | $_{42}Mo$ | $_{43}Tc$ | $_{44}Ru$ | $_{45}Rh$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $[Kr]5s^1$ | $[Kr]5s^2$ | $[Kr]5s^24d^1$ | $[Kr]5s^24d^2$ | $[Kr]5s^24d^3$ | $[Kr]5s^24d^4$ | $[Kr]5s^24d^5$ | $[Kr]5s^24d^6$ | $[Kr]5s^24d^7$ |
| $_{46}Pd$ | $_{47}Ag$ | $_{48}Cd$ | $_{49}In$ | $_{50}Sn$ | $_{51}Sb$ | $_{52}Te$ | $_{53}I$ | $_{54}Xe$ |
| $[Kr]5s^24d^8$ | $[Kr]5s^24d^9$ | $[Kr]5s^24d^{10}$ | $[Kr]5s^24d^{10}5p^1$ | $[Kr]5s^24d^{10}5p^2$ | $[Kr]5s^24d^{10}5p^3$ | $[Kr]5s^24d^{10}5p^4$ | $[Kr]5s^24d^{10}5p^5$ | $[Kr]5s^24d^{10}5p^6$ |

On s'arrêtera là, juste après avoir indiqué l'élément suivant, le césium : $[Xe]6s^1$.

On doit admettre que la règle de Klechkowski échoue dans quelques cas. Empirique, elle n'a pas de base théorique parfaitement sûre, et c'est là le problème. Les éléments dont la configuration est en rouge dans le tableau sont mal définis.

Pour le chrome, $[Ar]4s^23d^4$ doit être remplacé par $[Ar]4s^13d^5$. On constate qu'il s'agit simplement de déplacer un électron de l'orbitale 4s à l'orbitale 5d. Ce déplacement provient des interactions complexes entre les électrons, que la règle modélise de façon approchée.

Pour le cuivre, $[Ar]4s^23d^9$ devient $[Ar]4s^13d^{10}$

Le tableau précédent corrigé (pour la partie concernée) est :

| $_{19}K$ | $_{20}Ca$ | $_{21}Sc$ | $_{22}Ti$ | $_{23}V$ | $_{24}Cr$ | $_{25}Mn$ | $_{26}Fe$ | $_{27}Co$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $[Ar]4s^1$ | $[Ar]4s^2$ | $[Ar]4s^23d^1$ | $[Ar]4s^23d^2$ | $[Ar]4s^23d^3$ | $[Ar]4s^13d^5$ | $[Ar]4s^23d^5$ | $[Ar]4s^23d^6$ | $[Ar]4s^23d^7$ |
| $_{28}Ni$ | $_{29}Cu$ | $_{30}Zn$ | $_{31}Ga$ | $_{32}Ge$ | $_{33}As$ | $_{34}Se$ | $_{35}Br$ | $_{36}Kr$ |
| $[Ar]4s^23d^8$ | $[Ar]4s^13d^{10}$ | $[Ar]4s^23d^{10}$ | $[Ar]4s^23d^{10}4p^1$ | $[Ar]4s^23d^{10}4p^2$ | $[Ar]4s^23d^{10}4p^3$ | $[Ar]4s^23d^{10}4p^4$ | $[Ar]4s^23d^{10}4p^5$ | $[Ar]4s^23d^{10}4p^6$ |

| $_{37}Rb$ | $_{38}Sr$ | $_{39}Y$ | $_{40}Zr$ | $_{41}Nb$ | $_{42}Mo$ | $_{43}Tc$ | $_{44}Ru$ | $_{45}Rh$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $[Kr]5s^1$ | $[Kr]5s^2$ | $[Kr]5s^24d^1$ | $[Kr]5s^24d^2$ | $[Kr]5s^14d^4$ | $[Kr]5s^14d^5$ | $[Kr]5s^24d^5$ | $[Kr]5s^14d^7$ | $[Kr]5s^14d^8$ |
| $_{46}Pd$ | $_{47}Ag$ | $_{48}Cd$ | $_{49}In$ | $_{50}Sn$ | $_{51}Sb$ | $_{52}Te$ | $_{53}I$ | $_{54}Xe$ |
| $[Kr]5s^04d^{10}$ | $[Kr]5s^14d^{10}$ | $[Kr]5s^24d^{10}$ | $[Kr]5s^24d^{10}5p^1$ | $[Kr]5s^24d^{10}5p^2$ | $[Kr]5s^24d^{10}5p^3$ | $[Kr]5s^24d^{10}5p^4$ | $[Kr]5s^24d^{10}5p^5$ | $[Kr]5s^24d^{10}5p^6$ |

Les irrégularités sont toujours de même nature : on pourrait dire qu'elles sont régulières ! Il s'agit du transfert d'un électron, que la règle prévoirait sur l'orbitale s, vers l'orbitale d. C'est presque toujours le second électron s qui est déplacé. Mais dans le cas du palladium, ce sont les deux.

Règle de Klechkowski, règle de Hund, exceptions… On peut considérer que les configurations électroniques sont bien compliquées. Et c'est la réalité ! Les interactions entre les protons et les électrons d'un atome, qui sont tous en mouvement, constituent un problème vraiment difficile de Mécanique Quantique : c'est un problème à N corps. En fait, ce qui est surprenant, c'est au contraire qu'on puisse décrire ces configurations à l'aide de deux règles, et quelques exceptions. Leur existence montre qu'il y a, derrière toute cette difficulté, des régularités profondes dont les équations de la Mécanique Quantique tiennent compte.

**Tableau périodique**

On peut remarquer qu'après chaque gaz rare, on ouvre la couche suivante. Tous les éléments entre deux gaz rares ont leurs orbitales sur la couche ouverte par le premier d'entre eux ou en-dessous : du lithium au néon, la formule est [He]2s… ; du sodium à l'argon, la formule est [Ne]3s… ; du potassium au krypton, la formule est [Ar]4s… ; du rubidium au xénon, la formule est [Kr]5s… Etant donné que les lignes du tableau de Mendeleev (les périodes), construites par ressemblances chimiques, sont justement limitées par les gaz rares, on constate que l'on ouvre une nouvelle ligne du tableau à chaque fois qu'on commence le remplissage d'une nouvelle couche.

Le modèle des couches quantiques ainsi exposé permet de comprendre le tableau de Mendeleev. Mais la correspondance n'est pas simple. En particulier, les couches K, L, M… correspondent aux périodes (les lignes du tableau), jusqu'à la troisième incluse. Au-delà, nous avons vu que le remplissage se faisait en diagonale, et non plus par nombre quantique principal croissant (c'est $n + l$ qui est croissant). Ce qui signifie qu'on laisse le remplissage de certaines sous-couches pour la période suivante.

**Tableau de Mendéléev**

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| H<br>hydrogène<br>1,0079<br>1<br>$1s^1$ | | | | | | | | | | | | | | | | | He<br>hélium<br>4,0026<br>2<br>$1s^2$ |
| Li<br>lithium<br>6,941<br>3<br>$[He]2s^1$ | Be<br>bérylium<br>9,0122<br>4<br>$[He]2s^2$ | | | | | | | | | | | B<br>bore<br>10,811<br>5<br>$[He]2s^2 2p^1$ | C<br>carbone<br>12,011<br>6<br>$[He]2s^2 2p^2$ | N<br>azote<br>14,007<br>7<br>$[He]2s^2 2p^3$ | O<br>oxygène<br>15,999<br>8<br>$[He]2s^2 2p^4$ | F<br>fluor<br>18,998<br>9<br>$[He]2s^2 2p^5$ | Ne<br>néon<br>20,18<br>10<br>$[He]2s^2 2p^6$ |
| Na<br>sodium<br>22,99<br>11<br>$[Ne]3s^1$ | Mg<br>magnésium<br>24,305<br>12<br>$[Ne]3s^2$ | | | | | | | | | | | Al<br>aluminium<br>26,982<br>13<br>$[Ne]3s^2 3p^1$ | Si<br>silicium<br>28,085<br>14<br>$[Ne]3s^2 3p^2$ | P<br>phosphore<br>30,974<br>15<br>$[Ne]3s^2 3p^3$ | S<br>soufre<br>32,065<br>16<br>$[Ne]3s^2 3p^4$ | Cl<br>chlore<br>35,453<br>17<br>$[Ne]3s^2 3p^5$ | Ar<br>argon<br>39,948<br>18<br>$[Ne]3s^2 3p^6$ |
| K<br>potassium<br>39,098<br>19<br>$[Ne]4s^1$ | Ca<br>calcium<br>40,078<br>20<br>$[Ne]4s^2$ | Sc<br>scandium<br>44,956<br>21<br>$[Ne]4s^2 3d^1$ | Ti<br>titane<br>47,867<br>22<br>$[Ne]4s^2 3d^2$ | V<br>vanadium<br>50,941<br>23<br>$[Ne]4s^2 3d^3$ | Cr<br>chrome<br>51,996<br>24<br>$[Ne]4s^1 3d^5$ | Mn<br>manganèse<br>54,938<br>25<br>$[Ne]4s^2 3d^5$ | Fe<br>fer<br>55,845<br>26<br>$[Ne]4s^2 3d^6$ | Co<br>cobalt<br>58,933<br>27<br>$[Ne]4s^2 3d^7$ | Ni<br>nickel<br>58,693<br>28<br>$[Ne]4s^2 3d^8$ | Cu<br>cuivre<br>63,546<br>29<br>$[Ne]4s^1 3d^{10}$ | Zn<br>zinc<br>65,38<br>30<br>$[Ne]4s^2 3d^{10}$ | Ga<br>gallium<br>69,723<br>31<br>$[Ne]4s^2 3d^{10} 4p^1$ | Ge<br>germanium<br>72,64<br>32<br>$[Ne]4s^2 3d^{10} 4p^2$ | As<br>arsenic<br>74,922<br>33<br>$[Ne]4s^2 3d^{10} 4p^3$ | Se<br>sélénium<br>78,96<br>34<br>$[Ne]4s^2 3d^{10} 4p^4$ | Br<br>brome<br>79,904<br>35<br>$[Ne]4s^2 3d^{10} 4p^5$ | Kr<br>krypton<br>83,798<br>36<br>$[Ne]4s^2 3d^{10} 4p^6$ |
| Rb<br>rubidium<br>85,468<br>37<br>$[Kr]5s^1$ | Sr<br>strontium<br>87,62<br>38<br>$[Kr]5s^2$ | Y<br>ytrium<br>88,906<br>39<br>$[Kr]5s^2 4d^1$ | Zr<br>zirconium<br>91,224<br>40<br>$[Kr]5s^2 4d^2$ | Nb<br>niobium<br>92,906<br>41<br>$[Kr]5s^1 4d^4$ | Mo<br>molybdène<br>95,96<br>42<br>$[Kr]5s^1 4d^5$ | Tc<br>technétium<br>98,00<br>43<br>$[Kr]5s^1 4d^6$ | Ru<br>ruthénium<br>101,07<br>44<br>$[Kr]5s^1 4d^7$ | Rh<br>rhodium<br>102,91<br>45<br>$[Kr]5s^1 4d^8$ | Pd<br>palladium<br>106,42<br>46<br>$[Kr]4d^{10}$ | Ag<br>argent<br>107,87<br>47<br>$[Kr]5s^1 4d^{10}$ | Cd<br>cadmium<br>112,41<br>48<br>$[Kr]5s^2 4d^{10}$ | In<br>indium<br>114,82<br>49<br>$[Kr]5s^2 4d^{10} 5p^1$ | Sn<br>étain<br>118,71<br>50<br>$[Kr]5s^2 4d^{10} 5p^2$ | Sb<br>antimoine<br>121,76<br>51<br>$[Kr]5s^2 4d^{10} 5p^3$ | Te<br>tellure<br>127,60<br>52<br>$[Kr]5s^2 4d^{10} 5p^4$ | I<br>iode<br>126,9<br>53<br>$[Kr]5s^2 4d^{10} 5p^5$ | Xe<br>xénon<br>131,29<br>54<br>$[Kr]5s^2 4d^{10} 5p^6$ |
| Cs<br>césium<br>132,91<br>55<br>$[Xe]6s^1$ | Ba<br>baryum<br>137,33<br>56<br>$[Xe]6s^2$ | La<br>lanthane<br>138,91<br>57<br>$[Xe]6s^2 5d^1$ | Hf<br>hafnium<br>178,49<br>72<br>$[Xe]6s^2 4f^{14} 5d^2$ | Ta<br>tantale<br>180,95<br>73<br>$[Xe]6s^2 4f^{14} 5d^3$ | W<br>tungstène<br>183,84<br>74<br>$[Xe]6s^2 4f^{14} 5d^4$ | Re<br>rhénium<br>186,21<br>75<br>$[Xe]6s^2 4f^{14} 5d^5$ | Os<br>osmium<br>190,23<br>76<br>$[Xe]6s^2 4f^{14} 5d^6$ | Ir<br>iridium<br>192,22<br>77<br>$[Xe]6s^2 4f^{14} 5d^7$ | Pt<br>platine<br>195,08<br>78<br>$[Xe]6s^1 4f^{14} 5d^9$ | Au<br>or<br>196,97<br>79<br>$[Xe]6s^1 4f^{14} 5d^{10}$ | Hg<br>mercure<br>200,59<br>80<br>$[Xe]6s^2 4f^{14} 5d^{10}$ | Tl<br>thalium<br>204,38<br>81<br>$[Xe]6s^2 4f^{14} 5d^{10} 6p^1$ | Pb<br>plomb<br>207,2<br>82<br>$[Xe]6s^2 4f^{14} 5d^{10} 6p^2$ | Bi<br>bismuth<br>208,98<br>83<br>$[Xe]6s^2 4f^{14} 5d^{10} 6p^3$ | Po<br>polonium<br>209<br>84<br>$[Xe]6s^2 4f^{14} 5d^{10} 6p^4$ | At<br>astate<br>210<br>85<br>$[Xe]6s^2 4f^{14} 5d^{10} 6p^5$ | Rn<br>radon<br>222<br>86<br>$[Xe]6s^2 4f^{14} 5d^{10} 6p^6$ |
| Fr<br>francium<br>223<br>87 | Ra<br>radium<br>226<br>88 | Ac<br>actinium<br>227<br>89 | Rf<br>rutherfordium<br>261<br>104 | Db<br>dubnium<br>262<br>105 | Sg<br>seaborgium<br>266<br>106 | Bh<br>bohrium<br>264<br>107 | Hs<br>hassium<br>277<br>108 | Mt<br>meitnérium<br>268<br>109 | Ds<br>damstadtium<br>271<br>110 | Rg<br>roetgenium<br>272<br>111 | Uub<br>unumbium<br>277<br>112 | Uut<br>ununtrium<br>284 ?<br>113 | Uuq<br>ununquadium<br>289 ?<br>114 | UUp<br>ununpentium<br>288 ?<br>115 | Uuh<br>ununhexium<br>293 ?<br>116 | Uus<br>ununseptium<br>291 ?<br>117 | Uuo<br>ununoctium<br>294 ?<br>118 |

**Remarque** Le lanthane, de numéro atomique 57, est immédiatement suivi par le hafnium, de numéro 72. Tous les éléments situés entre ces deux sont nommés *lanthanides*, et sont placés généralement dans une ligne en-dessous du tableau (cette ligne n'est pas figurée ici). La ligne du lanthane contient explicitement 18 éléments. Si on leur ajoute les lanthanides, au nombre de 14, on obtient une ligne complète de 32 éléments. C'est bien le nombre qu'on avait trouvé plus haut en étudiant le remplissage des orbites.

Pareillement, à la ligne en-dessous, l'actinium 227 est suivi par le rutherfordium 261. Les éléments entre eux sont les actinides, placés aussi dans une ligne en-dessous. Là aussi, le compte total est de 32 éléments.

**Electrons de cœur, électrons de valence**

Les électrons qui entourent le noyau sont plus ou moins liés, selon leur niveau d'énergie. Ceux qui participent aux liaisons chimiques sont les moins liées. On les appelle *électrons de valence*. Par opposition, les autres électrons sont les *électrons de cœur*.

Comment les reconnaître ?

Lorsqu'une sous-couche est pleine, elle atteint une grande stabilité. Et de ce fait, les électrons qui s'y trouvent ne participent plus aux liaisons chimiques. Les électrons actifs sont ceux qui sont les plus éloignés du noyau, donc ceux qui présentent le numéro principal le plus élevé.

Les électrons de valence sont ceux dont le nombre quantique principal *n* est le plus élevé, ou qui appartiennent à des couches en cours de remplissage.

## *Molécules*

Les molécules sont des édifices polyatomiques. La liaison qui retient ces atomes ensemble est l'interaction électromagnétique entre les protons et électrons des atomes concernés. Les électrons qui réalisent ces liaisons sont les électrons de valence, les électrons de cœur n'interviennent pas. Les molécules obéissent elles aussi au principe d'énergie minimum habituel en physique : un ensemble d'atomes évolue vers l'état qui minimise son énergie.

**Modèle et représentation de Lewis**

Le modèle de Lewis a été proposé en 1916, avant que les principes de la Mécanique Quantique qui nous ont permi de comprendre à peu près la structure des atomes ne soient connus. Lewis a supposé que les liaisons se faisaient entre deux atomes par la mise en commun de deux électrons (éventuellement de plusieurs paires). C'est le principe d'exclusion qui justifiera *a posteriori* cet appariement des électrons (notez que les paires d'électrons se retrouveront bien plus tard dans l'explication de la supraconductivité ; ce sont les paires de Cooper).

Les deux électrons d'une paire peuvent provenir :

- chacun de l'un des deux atomes ; la liaison est dite *covalente* ;
- du même atome ; les deux électrons étaient alors sur la même orbitale, et de spins opposés. L'autre atome possédait une orbitale externe libre. Cette liaison est dite *liaison de coordination*.

Lorsque les deux atomes mettent en commun deux paires d'électrons, on parle de *liaison double* ; lorsqu'ils partagent trois paires, il s'agit d'une *liaison triple*.

La molécule de dioxygène présente une double liaison, celle de diazote une triple liaison.

**Règle de l'octet**

L'hélium ne possède que deux électrons, qui saturent sa couche 1s. Mais tous les autres gaz rares ont le même type de structure électronique : leur configuration électronique se termine par $ns2np6$, où $n$ est leur numéro quantique principal. Ils ont donc tous leur dernière couche saturée, consituée de 4 paires d'électrons (chaque paire se trouve sur une sous-couche). Ces 4 paires forment elles-même un *octet* d'électrons.

La règle de l'octet stipule que les atomes, lorsqu'ils se groupent en molécules, tendent à saturer leur dernière couche non vide. Pour cela, ceux dont la structure électronique est légèrement déficitaire en électrons auront tendance à en récupérer pour la compléter ; ceux qui au contraire ont leur dernière couche presque vide, chercheront à vider cette couche, en associant les électrons en trop à leur voisin.

La règle s'énonce ainsi :

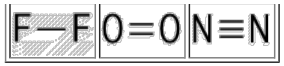
| Les atomes d'une molécule tendent à partager autant de paires d'électrons qu'il est nécessaire pour la réalisation de leur octet |
|---|

Lorsque cette configuration est atteinte, ils présentent tous deux une couche extérieure de gaz rare, forme la plus stable possible.

La représentation de Lewis est un graphisme indiquant les électrons de valence des atomes. Elle permet donc de déterminer les réactions possibles, selon que les atomes peuvent céder ou accepter des électrons.

Sans entrer dans le détail de cette représentation, indiquons seulement que la double liaison, par exemple du dioxygène, se représente avec un doubletrait entre les deux atomes :






## *Conclusion*

Tout ce qui précède montre comment la Mécanique Quantique permet de comprendre (et de représenter assez simplement) les diverses structures des atomes. Ces structures permettent à leur tour de calculer (difficilement) les niveaux d'énergie des différents atomes, et ces niveaux d'énergie permettent à leur tour, par leurs différences, de déterminer les raies spectrales des atomes plus lourds que l'hydrogène. Mieux, le calcul permet de trouver les longueurs d'onde des raies interdites qui, comme leur nom l'indique, ne peuvent être produites au laboratoire. La spectroscopie est donc tributaire de la chimie-physique.

---=OO=---




**Historique**

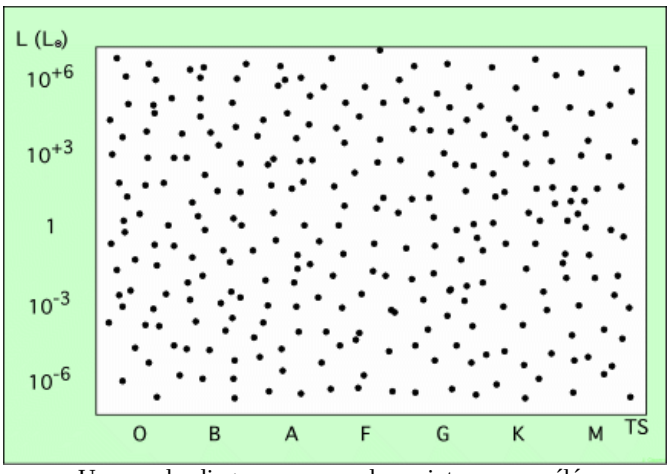
Dans toutes les sciences en création, la classification joue un rôle essentiel. Avant de comprendre les phénomènes en action, il faut reconnaître les similarités et les différences entre les objets étudiés. Prenons deux exemples :

- on jete des aiguilles de Mikado par terre. Quelle est l'orientation de ces aiguilles ? Clairement, il n'y en a pas, chacune étant orientée totalement au hasard ;
- même question avec des aiguilles en fer aimantées. Chacune se comportant comme l'aiguille d'une boussole, il est évident qu'elles vont montrer une orientation globale vers le pôle nord.

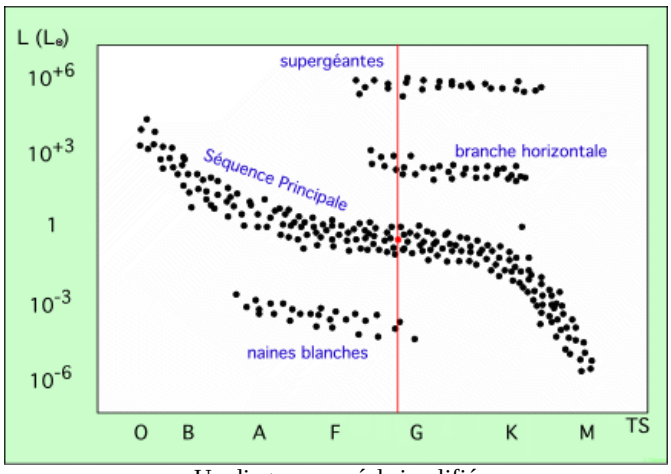
Ainsi, le comportement collectif des objets d'étude peut mettre en lumière une propriété cachée, dans notre exemple le magnétisme. Si on refaisait l'expérience avec un mélange d'aiguilles en bois et en fer, on constaterait que les aiguilles de bois se répartissent au hasard, alors que les aiguilles de fer s'orientent. Ceci définit deux populations de comportement différent. Par contre, dans chaque population, le comportement est le même. Cette observation n'explique pas **pourquoi** les aiguilles se comportent ainsi. Mais elle montre qu'il y a un phénomène à rechercher.

Les sciences de la Vie ont d'abord étudié minutieusement les particularités des êtres vivants, pour les regrouper selon la taxonomie. Plus tard, la génétique a permi de comprendre l'origine des différences et des similitudes.

L'astrophysique n'a pas échappé à cette méthode. Créé par Ejnar Herzsprung et Henry Russell, le *diagramme HR* (ou *diagramme Hertzsprung-Russel*) est l'outil essentiel de l'astrophysique pour la classification des étoiles et leur évolution. Il place ces dernières sur un graphique à deux dimensions : le type spectral et la luminosité. Si ces deux propriétés n'avaient pas de lien entre elles, les points représentatifs des étoiles dans le diagramme seraient répartis au hasard. Une concentration, au contraire, met en lumière un lien. C'est ce qu'il s'est produit lorsque ces deux astronomes ont, chacun de son côté, opéré ce classement. Prenons par exemple les étoiles de type solaire (type spectral G2) ; sur un large échantillon, on s'aperçoit qu'une grande proportion d'entre elles présentent à peu de choses près la même luminosité. Il en est de même pour les autres types spectraux : à type spectral donné, luminosité correspondante.



Un pseudo-diagramme avec des points non corrélés



Un diagramme réel simplifié

Le schéma de gauche montre ce que serait le diagramme HR si la luminosité des étoiles était indépendante de leur température. Les points seraient répartis au hasard, on n'y voit aucune information. Par contre, le schéma de droite est proche d'un schéma réel, et montre des concentrations des points représentatifs des étoiles. On y voit en premier la ligne en S couché, qui représente la Séquence Principale. 80 % des étoiles observées se trouvent là, parce que les étoiles y passent la plus grande partie de leur vie.

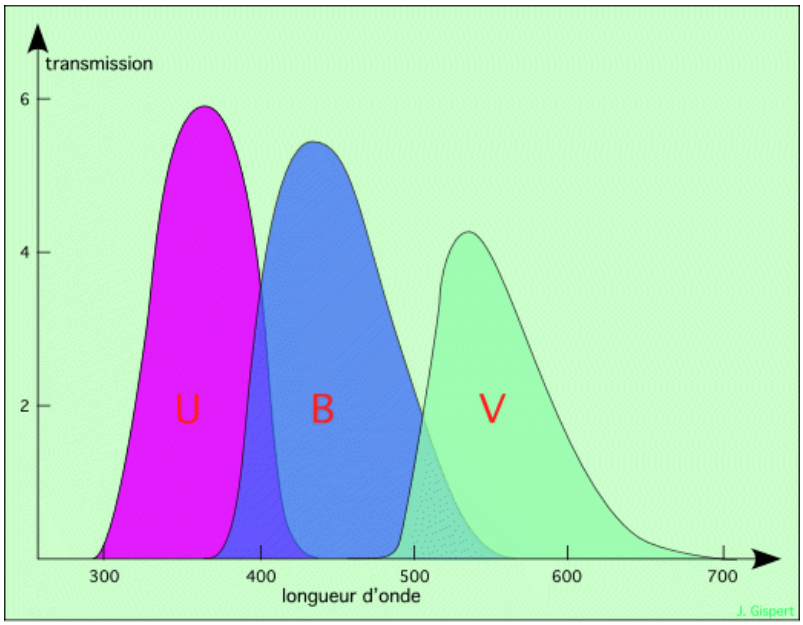
Au-dessus de la Séquence Principale, on voit une ligne horizontale formée par des étoiles plus brillantes que le Soleil. Elles forment la Branche Horizontale. Plus haut encore, on voit la zone des supergéantes (explication plus loin). Enfin, en-dessous de la Séquence Principale, on voit la zone des Naines Blanches. Ce nom est doublement mal choisi, car ces étoiles ne sont pas des naines (les naines sont les étoiles de la Séquence Principale). Elles sont bien plus petites. Et blanches, elles ne le sont pas non plus ; elles le sont juste à leur formation, lorsqu'elles sont encore très chaudes. Mais en se refroidissant (puisqu'elles n'ont plus de source d'énergie pour maintenir leur température), elles deviennent jaunes, puis rouges, jusqu'à disparaître au regard. Mais ce refroidissement est très lent.

La répartition particulière des étoiles dans ce diagramme montre qu'il est pertinent, qu'il y a des liens physiques entre ses deux paramètres, type spectral (qui caractérise la physique de l'étoile) et luminosité (qui indique la puissance de l'étoile). La connaissance, la mesure, de l'un donne une idée de la valeur de l'autre. Si toutes les étoiles d'un même type spectral se regroupaient, ce lien serait une équivalence. Ce n'est pas le cas, ce qui montre qu'**un autre paramètre joue également un rôle**, nous le verrons plus loin.

La ligne rouge verticale qui traverse le diagramme figure le type spectral du Soleil (G2). Elle coupe la Séquence Principale, mais aussi la Branche Horizontale et la branche des supergéantes. Elle sera expliquée plus loin. Le point rouge représente le Soleil.

**Construction d'un diagramme HR**

A l'origine, le diagramme créé par les deux astronomes était un diagramme couleur-magnitude. Mais la couleur est une notion quelque peu subjective. Pour lui donner une consistance, on photographie l'étoile en noir et blanc à travers deux filtres différents, B (bleu ; centré sur 442 nm, déborde sur l'UV) et V (visible ; centré sur 540 nm, au centre du domaine visible). La différence d'éclat entre les deux photos, nommée *indice B-V*, indique si l'étoile est plus ou moins bleue. C'est une véritable mesure physique. Précisément, B est la magnitude de l'étoile photographiée à travers le filtre B (idem pour V).



Transmission des filtres U, B et V (longueurs d'onde en nanomètres)

Au lieu de photographier une étoile unique, on photographie un amas entier sur les mêmes pellicules (en B et V). On a donc deux clichés en moir et blanc, mais quand on les compare, on voit que certaines étoiles sont plus brillantes sur l'un que sur l'autre.

Prenons par exemple une étoile plus brillante sur le cliché B que sur le cliché V. Sa lumière contient davantage de violet et de bleu, que de vert et de jaune. Son maximum d'éclat se trouve par conséquent du côté bleu, et c'est de cette couleur qu'elle nous apparaît dans un télescope. On peut mesurer sa brillance sur le cliché B. Ce que l'on mesure ainsi est la quantité de lumière qui a traversé le filtre B, c'est donc la luminosité $L_B$ de l'étoile, modulée par la distance à laquelle elle se trouve.

L'*indice de couleur B-V* est par définition la différence des magnitudes : $B\text{-}V = m_B - m_V$. Or la magnitude est d'autant plus grande que la luminosité est plus faible (une étoile de magnitude 6 est à la limite de la visibilité, alors qu'une autre de magnitude 1 est bien brillante). Donc, plus il y a de lumière, plus la magnitude est petite. C'est-à-dire que :

| **luminosités** | **dominante** | **magnitudes** | **B-V** |
|---|---|---|---|
| $L_V < L_B$ | bleu domine | $m_B < m_V$ | $B\text{-}V < 0$ |
| $L_V = L_B$ | pas de dominante | $m_B = m_V$ | $B\text{-}V = 0$ |
| $L_V > L_B$ | vert domine | $m_B > m_V$ | $B\text{-}V > 0$ |

$B\text{-}V = m_B - m_V$ est : négatif s'il y a plus de bleu que de vert, nul s'il y en a autant, et positif s'il y en a moins.

La magnitude s'obtient à partir de la luminosité par la loi de Pogson : $m = -2{,}5 \log L + cste$.

On obtient donc la magnitude en B par $m_B = -2{,}5 \log L_B + cste$, où $L_B$ est le résultat de la mesure.

On procède de même en V, pour obtenir $m_V$. L'indice de couleur B-V est la différence entre ces deux magnitudes :

$$B\text{-}V = m_B - m_V = (-2{,}5 \log L_B + cste) - (-2{,}5 \log L_V + cste) = 2{,}5 \log (L_V / L_B)$$

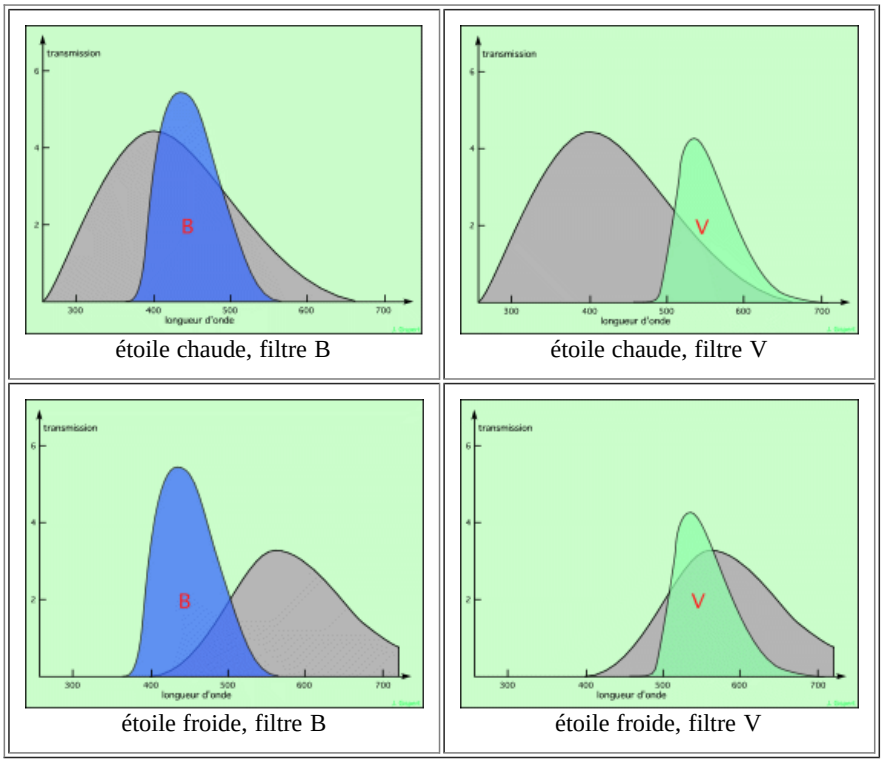
Prenons maintenant une étoile qui nous paraît plus brillante sur l'autre cliché, en V. A l'œil, elle nous apparaît plutôt jaune. Puisqu'elle est plus brillante en V, sa magnitude en V est plus petite qu'en bleu : $m_V < m_B$ ; donc B-V est positif.

**Résumé :**

Une étoile qui nous paraît plus brillante sur le cliché pris avec le filtre V est telle que $L_B < L_V$, donc $m_B > m_V$ et $m_B - m_V = B\text{-}V > 0$.

Une étoile qui, au contraire, est plus brillante en bleu est telle que $L_B > L_V$, donc $m_B < m_V$ et $m_B - m_V = B\text{-}V < 0$.

L'indice de couleur B-V nous renseigne sur la couleur de l'étoile, mais nous renseigne de façon chiffrée, c'est-à-dire comparable entre deux étoiles. Alors que, dire qu'une étoile est plus bleue que l'autre, ne nous apprend pas grand chose...




étoile chaude, filtre B — étoile chaude, filtre V

étoile froide, filtre B — étoile froide, filtre V

Les quatre schémas ci-dessus montrent un spectre de corps noir, en gris, correspondant à une étoile chaude en haut (maximum vers 400 nm, température de 7.200 K, type spectral F1), et à une étoile plus froide en bas (maximum vers 570 nm, température de 5.000 K, type spectral G9). Le premier schéma montre la partie de lumière qui passe le filtre B : c'est celle qui correspond à la surface en bleu soutenu. Plus cette surface est grande, plus importante est la lumière reçue de l'étoile dans ce domaine ; et plus petite est la magnitude correspondante. De même, le schéma de droite en haut montre la partie de lumière qui passe le filtre V. Elle définit la magnitude V. La surface en bleu soutenu est plus grande que celle en vert soutenu, donc B < V, donc B-V < 0.

Les deux schémas du bas montrent la même chose, mais pour une étoile plus froide. Du fait du décalage du spectre vers les grandes longueurs d'onde, les choses sont inversées : B > V, donc B-V < 0.

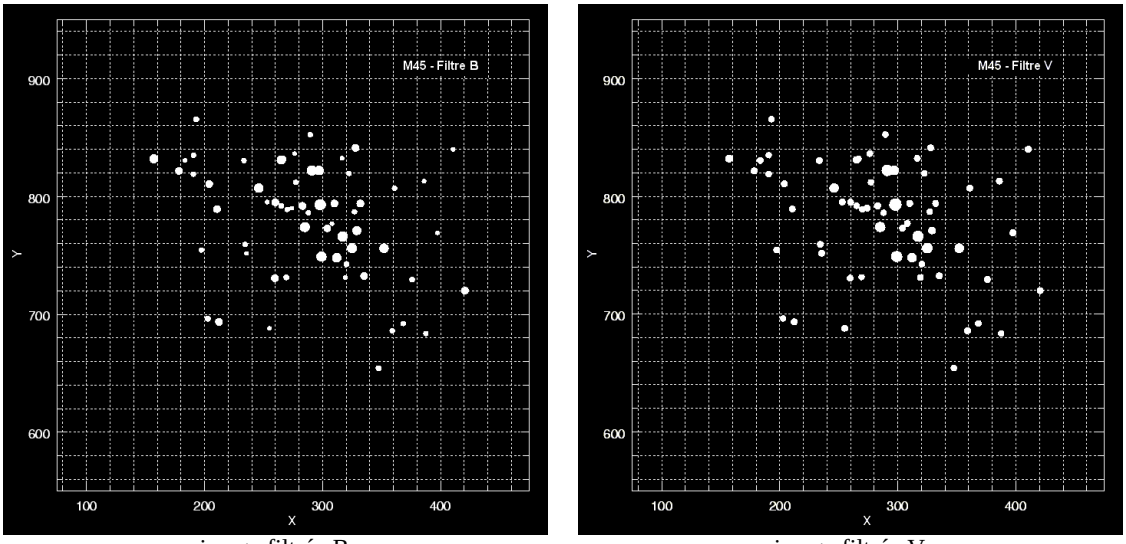



image filtrée B — image filtrée V

Il ne reste plus qu'à faire ces mesures patiemment pour toutes les étoiles du cliché... et à les reporter sur un graphique.

Maintenant que nous sommes passés à la photo numérique, les clichés peuvent très bien être de fichiers électroniques. Et ces fichiers peuvent être analysés automatiquement par un logiciel relativement facile à écrire... qui donne les valeurs de B (ou de V) directement pour chaque étoile. Il ne reste plus alors qu'à compléter le programme pour qu'il analyse successivement les deux clichés, et calcule les différences. Pour construire le diagramme HR de l'amas, il reste une difficulté : les mesures que nous venons de faire dépendent de la distance de l'amas. Il est possible de calibrer le logiciel, en lui faisant analyser un amas dont les magnitudes sont connues, pour ajuster les valeurs qu'il donne. Mais les magnitudes

calculées seront toujours des magnitudes apparentes ! Et la distance des étoiles est bien difficile à mesurer...

Toutefois, nous avons choisi de photographier un amas. C'est bien naturel, puisqu'on a une foule d'étoiles sur le même cliché. Mais il y a un avantage de plus : toutes ces étoiles se sont formées en même temps, au même endroit. Evidemment, elles sont à une certaine distance l'une de l'autre, distance que nous ne connaissons pas. Mais de toutes façons, cette distance est petite par rapport à la distance d'ensemble de l'amas. On peut donc considérer, en faisant une erreur minime, que toutes les étoiles sont à la même distance de nous, et que leur lumière est affaiblie pareillement. Donc, leur magnitude absolue diffère de leur magnitude apparente d'une même constante, qui ne dépend que de la distance de l'amas. Ne cherchons pas à déterminer celle-ci, il nous suffira d'avoir un axe vertical gradué en magnitudes apparentes... Gardons ce problème pour plus tard !

La lumière qui a impressioné la pellicule est celle qui a traversé le filtre. Elle est donc proportionnelle à la surface du spectre dont nous avons parlé plus haut, et donc à la luminosité de l'étoile. Ce qui a été dit plus haut s'applique donc pareillement à l'image de l'étoile sur la pellicule. Pour mesurer la magnitude apparente, il suffit de mesurer le diamètre de l'image de l'étoile. En effet, plus il y a de lumière, plus celle-ci diffuse dans la pellicule, ou dans le capteur numérique. A une étoile plus brillante correspond une tache plus grosse. Notre logiciel est tout à fait capable de mesurer les diamètres, donc d'obtenir les magnitudes apparentes de toutes les étoiles.

Nous avons maintenant les magnitudes et les couleurs. Il ne reste qu'à reporter ces valeurs dans un graphique, ce que le logiciel peut faire encore très facilement.

Les pionniers l'ont fait, pour leur part, à la main...

Le diagramme ci-dessous a été fait à l'aide d'un tel logiciel. Comment le trouvez-vous ?

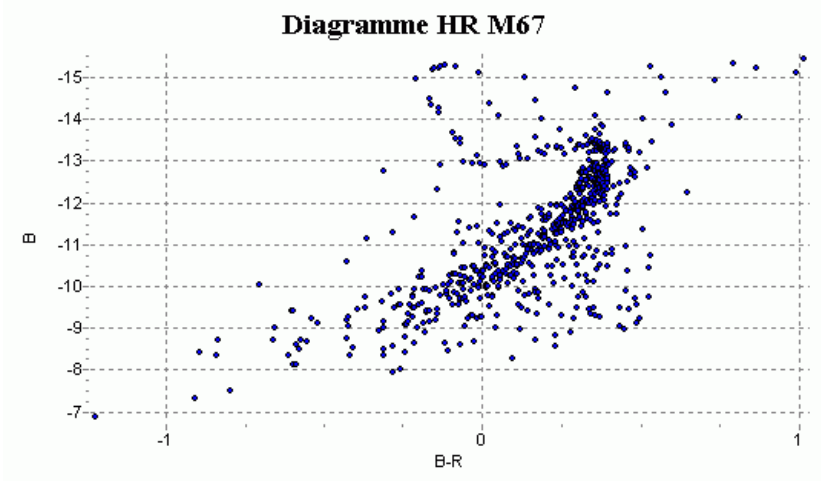



diagramme généré automatiquement Marc Deldem, sur un forum

**Variantes**

Le diagramme HR se décline en diverses formes, selon le choix que l'on fait pour les deux paramètres. Le type spectral et la luminosité étant les choix de base, on peut les remplacer par d'autres, qui sont équivalents, liés par la physique des étoiles.

Considérons tout d'abord l'axe horizontal :

- **La température effective**. Le type spectral d'une étoile se définit par les raies d'absorption (et éventuellement d'émission), qui se forment dans sa basse atmosphère. Ces raies dépendent directement des conditions physiques qui y règnent : par exemple, pour ioniser un atome d'hélium, il faut une énergie assez importante, donc une température élevée. La présence de raies caractéristiques de l'hélium ionisé permet donc d'estimer la température de l'étoile. Il en est de même pour les autres raies spectrales, et l'analyse d'un spectre permet de retrouver la température de la photosphère, c'est-à-dire la température effective de l'étoile. Réciproquement, si les conditions de température sont réalisées, les raies spectrales se produiront. La température effective de l'étoile est donc bien liée à son type spectral, sans ambiguïté. On peut donc remplacer le type spectral par la température effective dans le diagramme HR.

- **La couleur**. La photosphère d'une étoile est un bon corps noir, les écarts provenant essentiellement des raies spectrales (absorption et émission). Un corps noir est caractérisé par sa température (c'est même le seul paramètre qui le définit). A chaque couleur correspond une température précise (et réciproquement). Donc, température et couleur sont deux propriétés équivalentes, et puisque la température effective est utilisable, la couleur l'est également. La couleur étant une notion quelque peu subjective, on lui donne une consistance physique en utilisant la méthode spectrométrique vue plus haut, à travers des filtres tels que U, B et V. L'indice de couleur qu'on en déduit, par exemple B - V, peut donc remplacer le type spectral dans un diagramme HR.

La théorie du fonctionnement des étoiles montre que leur masse est le paramètre essentiel qui définit toutes leurs propriétés (c'est le théorème de Vogt-Russell), mais il existe une dépendance secondaire selon la composition chimique de l'étoile. La masse peut donc être substituée aux autres données citées, **si on néglige l'influence de la composition chimique**. Ce n'est donc qu'une approximation qui n'a pas de véritable caractère scientifique, mais qui peut donner une idée générale.

Considérons maintenant l'axe vertical : la luminosité de l'étoile est la quantité de lumière qu'elle émet, l'énergie produite. Elle a un sens physique. Cette lumière se répartit sur une sphère de très grande surface à la distance de la Terre. Et nos télescopes en captent une petite partie, qui correspond à la surface du miroir. C'est cette petite quantité de lumière qui définit la magnitude apparente de l'étoile. Cette donnée est bien sûr inutilisable, puisqu'elle dépend de la distance. La magnitude apparente, corrigée pour ramener l'étoile à une distance standard de 10 parsecs, définit la **magnitude absolue**, qui est équivalente à la luminosité, puisque débarrassée de la distance. On peut donc l'utiliser en lieu et place de la

luminosité.

Avec ces paramètres, on peut définir divers types de diagrammes HR. La figure ci-dessous les regroupe tous, pour illustrer le propos.

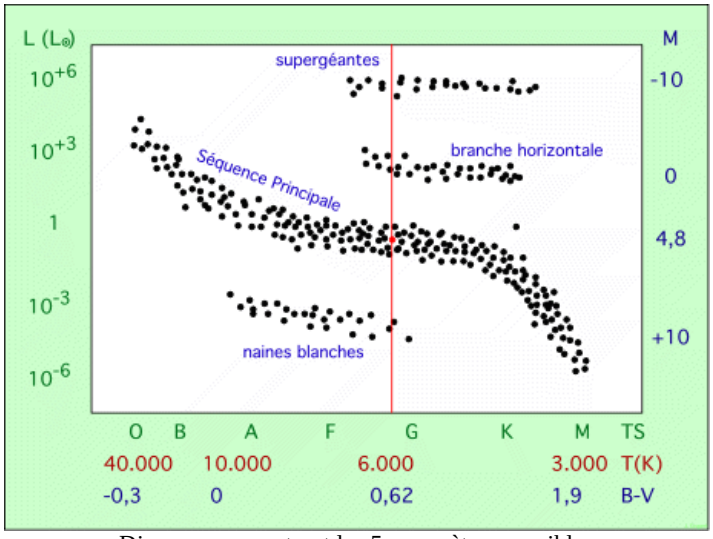


Diagramme montrant les 5 paramètres possibles

Les transformations pour passer d'un paramètre à un autre ne sont pas parfaitement définies, et la conversion introduit toujours de petites erreurs.

On remarque que la température effective croît de la droite vers la gauche, ce qui est assez inhabituel. La raison est que le type spectral a été utilisé historiquement avant, et que celui-ci est basé sur un ordre alphabétique initial, par la suite corrigé. C'est le reste de cet ordre, OBAFGKM, qui détermine le sens gauche-droite du diagramme. Quand on passe du type spectral à la température, pour ne pas symétriser le diagramme, on admet une croissance de droite à gauche.

**Choix des paramètres**

Puisque plusieurs paramètres peuvent être utilisés sur chaque axe, y a-t-il un choix standard ? Ce serait bien pratique, puisque tous les diagrammes HR se ressembleraient. Mais ce n'est pas le cas. En effet, si on fait une étude théorique, on préférera utiliser le type spectral, qui est le paramètre permettant de classer les étoiles. Mais si on construit le diagramme à partir de données observationnelles, ce sont des paramètres directement issus de l'observation qui seront utilisés, ne nécessitant pas de transformation qui induirait inévitablement de petites erreurs. Dans ce cas, la magnitude absolue est le paramètre le plus direct, mais il nécessite cependant la détermination de la distance, qui n'est pas toujours disponible. Aussi, l'utilisation des filtres B et V est souvent préférée, et c'est l'indice de couleur qui sera préféré. A une soustraction près, il est directement le résultat d'une mesure.

**Classes de luminosité**

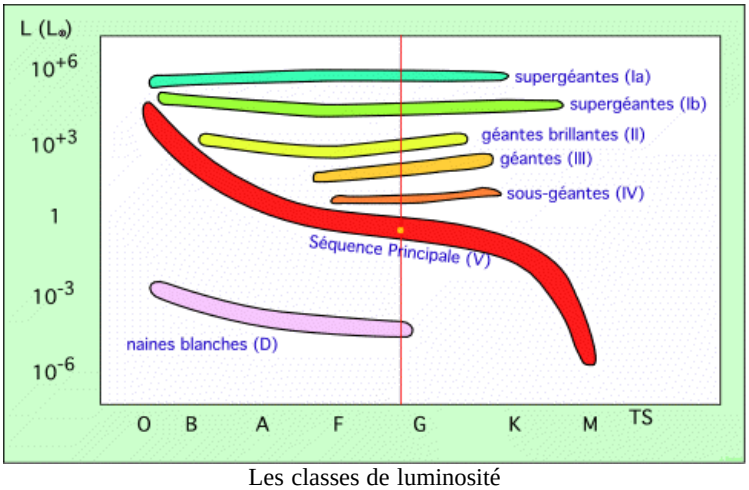
Nous avons envisagé d'utiliser la masse d'une étoile comme paramètre en abscisse. Pourrions-nous, avec la même approximation, envisager le rayon de l'étoile ? Le premier examen du diagramme nous indique que non. Si c'était le cas, à une température donnée (une ligne verticale dans le diagramme) correspondrait une position (une luminosité) unique dans le diagramme. Or nous voyons que, pour la température du Soleil par exemple de 5.800 K, on trouve de nombreuses étoiles autour de la luminosité du Soleil, mais on en trouve aussi bien plus haut et bien plus bas dans le diagramme. Il ne s'agit pas, comme pour la masse, d'une approximation, mais d'un problème bien plus important : à une température donnée correspondent plusieurs luminosités différentes !

Les étoiles situées plus haut sont bien plus lumineuses, en ayant la même température superficielle. Or la température effective donne la luminosité par unité de surface (loi de Stefan-Boltzmann énergie $E = \sigma T^4$). Pour avoir, à une température donnée, une luminosité plus grande, il faut présenter une surface émissive plus grande. Surface plus grande signifie rayon de l'étoile plus grand. Ces étoiles qui se placent en haut du diagramme ont donc une taille plus grande que leurs voisines placées plus bas. Symétriquement, les étoiles moins lumineuses qui se trouvent en-dessous sont plus petites.

Lorsqu'on a découvert ces étoiles plus grosses que la "normale", on les a assez naturellement nommées *géantes*. Et par opposition, on a nommées *naines* les étoiles normales.

Ceci est la base de la définition des classes de luminosité. On distingue :

- la séquence principale, qui contient 80 % des étoiles. Ce sont les naines, et leur classe de luminosité est la classe V (cinq) ;
- la branche horizontale vue plus haut, contient les étoiles qui brûlent l'hélium en carbone par réaction triple alpha dans leur cœur. Ce sont les sous-géantes, classe IV ;
- les géantes, classe III ;
- les géantes brillantes, classe II ;
- les supergéantes, classe I.




Les classes de luminosité

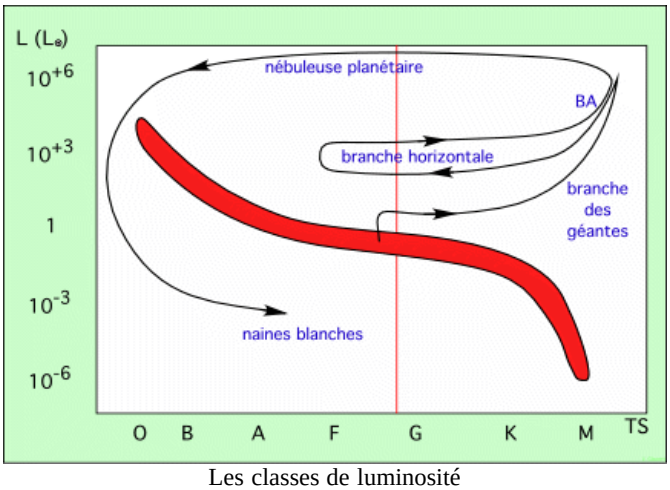
A ces classes définies d'abord, se sont ajoutées la classe D des naines blanches, les étoiles de rayon le plus petit. La classe Sd des sous-naines, copie moins lumineuse de la Séquence Principale (non représentée, elle se situe entre la Séquence Principale et les naines blanches). Enfin, la classe I des supergéantes a été subdivisée en Ia et Ib, la seconde correspondant à une luminosité plus faible, et une classe O a été ajoutée pour les hypergéantes (au-dessus des supergéantes).

**Effet de la composition chimique**

Les étoiles considérées jusqu'ici sont des étoiles du voisinage solaire, c'est-à-dire formées dans la même région de la Galaxie, à une époque comparable. C'est la population II, de métallicité voisine de 2 %. Les étoiles qui se sont formées longtemps avant ont une métallicité très faible, et constituent la population I. Comme l'indique le théorème de Vogt-Russel, ces étoiles ont un fonctionnement un peu différent. La raison en est que, en l'abscence de carbone, le cycle du carbone ne peut se réaliser, et l'étoile ne tire son énergie que de la chaîne proton-proton. Il s'ensuit que ces étoiles sont un peu moins lumineuses que celles de la Séquence Principale, et donc se placent dans le diagramme HR en-dessous de cette dernière. C'est la classe des sous-naines.

## *Evolution des étoiles*

Le fonctionnement d'une étoile consiste à trouver un équilibre entre la gravité qui tend à les écraser, et la pression développée par les réactions nucléaires internes. Toute variation de cet équilibre, par disparition progressive de l'hydrogène initial, se traduit par des changements de leur température superficielle et de leur luminosité. Et par conséquent, le point qui représente l'étoile dans le diagramme HR se déplace : vers le haut si la luminosité augmente, vers la gauche si c'est la température. Par conséquent, l'évolution de l'étoile, depuis sa formation jusqu'à sa fin, se traduit par une ligne courbe dans le diagramme. Et l'observation de cette ligne permet de comprendre le chemin évolutif suivi par l'étoile. Seul défaut, le diagramme HR ne représente pas le temps, et la vitesse est variable le long du chemin évolutif. Certains segments sont parcourus à grande vitesse (quelques centaines ou quelques milliers d'années), alors que d'autres sont parcourus à vitesse très faible (en quelques milliards d'années).




Les classes de luminosité

Il n'est pas question de représenter toutes les évolutions possibles sur un diagramme. A titre d'exemple, nous prenons une étoile de 1,2 M , à la limite entre les parties basse et haute de la Séquence Principale (limite de la domination de la chaîne proton-proton au bénéfice du cycle de carbone) :

- L'étoile quitte la Séquence Principale, devient une sous-géante en allant vers la branche des géantes, qu'elle monte (elle devient de plus en plus lumineuse à cause de son diamètre croissant, à température pratiquement constante, ce qui donne une branche presque verticale).
- Arrivée en haut de la branche des géantes, elle subit le flash de l'hélium.
- Puis elle descend vers la branche horizontale, qu'elle parcourt dans les deux sens.
- Ensuite, à l'épuisement de l'hélium, elle reprend son ascension le long de la branche asymptotique, puis repart horizontalement (cette fois, sa luminosité est constante, c'est sa température effective qui augmente). En traversant cette portion horizontale, elle éjecte une grande partie de son enveloppe : elle donne une nébuleuse planétaire.

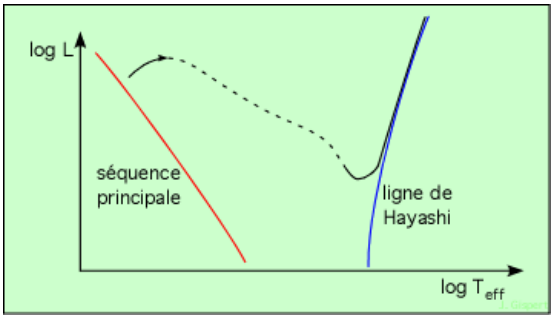
- Ayant de moins en moins d'enveloppe, son cœur se trouve de plus en plus exposé, c'est pourquoi sa température effective augmente. Mais elle tient maintenant sur ses réserves, car elle n'est pas assez massive pour amorcer la fusion du carbone. Elle ne peut donc que rayonner de moins en moins, ce qui provoque sa descente dans le diagramme.
- Arrivée en bas, elle est encore chaude, mais elle est devenue une naine blanche. En équilibre définitif par la pression de radiation des électrons, elle ne changera plus de diamètre, mais va simplement se refroidir en perdant peu à peu l'énergie qu'il lui reste. Lentement, elle ira donc de gauche à droite dans le diagramme, pour finir à l'état de naine noire, mais ceci prendra des milliards d'années.

**Formation à partir d'un nuage**

Les étoiles se forment de la contraction d'un nuage de gaz (H et He) et de poussières, qui est au départ à une température très basse de 10 K. La densité de ce nuage, forte par rapport au milieu environnant, est cependant très faible, et les chocs entre atomes très rares. La contraction commence donc sans échange d'énergie entre les atomes, c'est-à-dire en chute libre. La température du nuage n'augmente donc pas, c'est une contraction isotherme. Il ne brille pas non plus, si ce n'est un faible rayonnement de corps noir à 10 K. Plus tard, la densité commence à augmenter, et les chocs se font moins rares. Ce qui a pour effet d'augmenter la température. Mais le nuage reste transparent, et cette élévation très faible. La densité augmentant toujours, le gaz commence à s'opacifier. Dès lors, l'énergie s'échappe plus difficilement, et la température augmente. Le centre du nuage commence à briller. Par conséquent, le point représentatif du nuage dans le diagramme HR part d'une région où la température est très basse, donc très loin à droite (en dehors de tout diagramme dessiné !), et très bas puisque la luminosité est extrêmement faible. Dans la contraction, luminosité et température augmentent, et donc le point représentatif se déplace vers la gauche et vers le haut. L'opacité du gaz devient très importante, et le rayonnement ne passe plus. Si l'énergie restait vraiment piégée dans le gaz, sa température monterait très vite, et s'opposerait à la contraction. Mais cette chaleur crée une instabilité, et un mécanisme de convection se met en place. La totalité du gaz est ainsi brassée, et on a une protoétoile totalement convective. Lorsque c'est le cas, son point représentatif se trouve juste à droite de la Séquence Principale. Il est aisé de comprendre que l'énergie produite par cette protoétoile est d'autant plus importante que sa masse est plus forte. Mais l'efficacité du refroidissement par convection détermine une température qui est pratiquement indépendante de la masse. Et donc, les étoiles à ce stade snt représentées dans le digramme HR par une ligne presque verticale (température identique partout), et s'étalant en hauteur sur l'étendue des températures possibles.

**Trajet de Hayashi**

Cette ligne n'est pas visible sur un diagramme HR réel. En effet, elle est théorique, et bien que les étoiles y passent lors de leur formation, elles n'y restent que très peu de temps, et à un instant donné il n'y en a donc qu'un tout petit nombre.



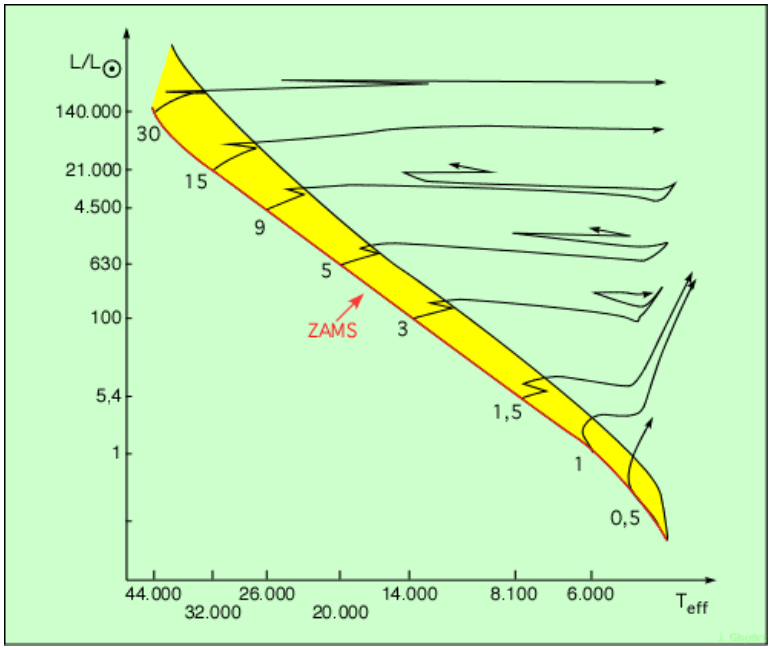
Le trajet de Hayashi

Les protoétoiles dans cette région continuent de se contracter, en brillant par leur énergie gravitationnelle. Mais le cœur se contracte plus vite que l'enveloppe, et sa température monte rapidement. Le point représentatif se déplace donc vers la gauche. La brillance de la protoétoile dépend de sa masse, et donc aussi la hauteur du point qui la représente. Rapidement, la protoétoile parvient à une temprature centrale qui permet le déclenchement des réactions de fusion de l'hydrogène. Elle devient alors une véritable étoile, et se trouve sur la Séquence Principale.

**ZAMS**

La ZAMS est la ligne inférieure de la Séquence Principale. Celle-ci présente une épaisseur : pour un type spectral donné, on voit plusieurs points sur la ligne verticale correspondante. Si les étoiles ne changeaient absolument pas sur la Séquence Principale, celle-ci serait une ligne fine. Mais cette phase dans la vie de l'étoile correspond à la fusion de l'hydrogène dans son cœur. Et l'hydrogène est comme le carburant d'une voiture : plus on en consomme, plus la voiture s'allège. De même, l'étoile subit quelques changements mineurs au cours de cette phase, qui se traduisent dans le diagramme HR par une ligne évolutive à l'intérieur même de la Séquence Principale.

La ligne inférieure de la Séquence Principale est celle sur laquelle les étoiles arrivent au moment où elles commencent la fusion de l'hydrogène. On a pour habitude de dater l'âge des étoiles à partir de cet instant. Par conséquent, les étoiles qui se trouvent sur cette ligne ont un âge nul, ce qui a donné le sigle ZAMS : *Zero Age Main Sequence*, ou *Séquence Principale d'Age Zéro*.



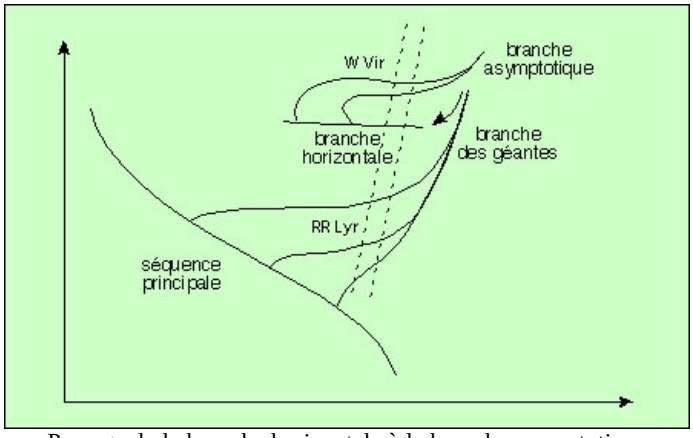
La ZAMS dans le diagramme HR

Ce schéma se trouve dans le chapitre consacré à l'évolution des étoiles.

Les flèches qui partent de la SP représentent le trajet évolutif des étoiles lorsque, l'hydrogène central étant épuisé, elles doivent trouver d'autres sources d'énergie pour maintenir leur équilibre. Mais ceci entraîne des modifications profondes, qui se font rapidement. Selon leur masse, indiquée par les nombres sous la ZAMS, ces étoiles auront des destins différents.

**Branche asymptotique**

Quittant la Séquence Principale, l'étoile monte la branche des géantes (rouges), au sommet de laquelle elle subit éventuellement le flash de l'hélium. Redescendant alors, elle vient se stabiliser sur la Branche Horizontale. Elle parcours celle-ci de la droite vers la gauche, augmentant sa température effective, puis dans l'autre sens en se refroidissant. Ceci montre que l'équilibre sur cette branche (fusion de l'hélium) n'est pas très stable, en tous cas moins que sur la Séquence Principale.



Passage de la branche horizontale à la branche asymptotique

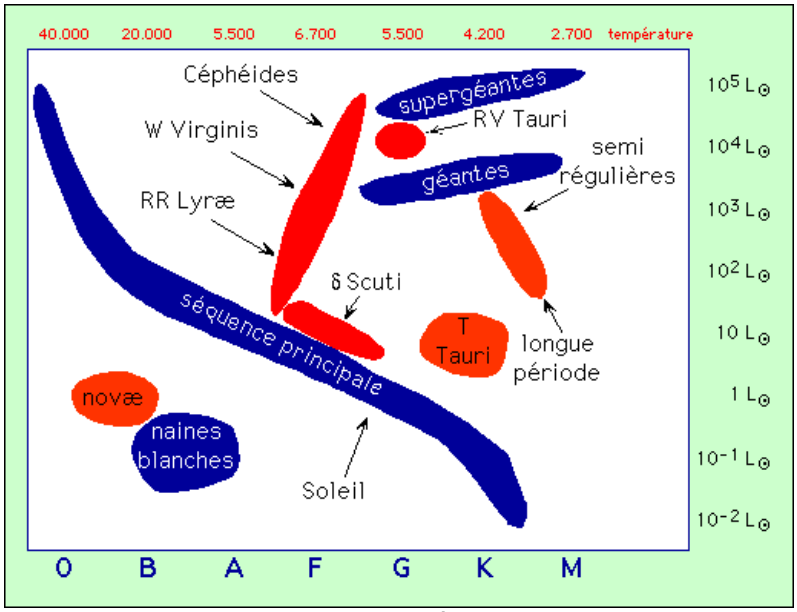
Lorsque l'hélium s'épuise à son tour, l'étoile doit modifier son équilibre. Le cœur se contracte encore, la température centrale augmente. L'étoile s'approche, si elle le peut (masse suffisante) de la fusion du carbone. Elle monte encore dans le diagramme HR, son enveloppe se dilate encore un peu, elle va devenir une supergéante si elle est massive, sinon, elle éjectera son enveloppe sous forme de nébuleuse planétaire et redescendra le diagramme sur la gauche, en direction de la zone des naines blanches, sous la Séquence Principale.

Cette montée se fait sur la banche asymptotique. Celle-ci est ainsi nommée parce qu'elle part de la branche horizontale, et s'approche asymptotiquement du trajet de Hayashi. La raison en est que, lorsque l'étoile se transforme par contraction du cœur, l'énergie produite augmente, et sa dissipation devient de plus en plus difficile. Le transfert radiatif laisse progressivement le pas à un échange convectif. L'étoile devient peu à peu totalement convective, et donc s'approche du trajet de Hayashi. Mais elle ne peut le franchir, et donc s'en approche de plus en plus, et de moins en moins vite.

Après avoir monté cette branche, l'étoile la redescend pour aller se stabiliser sur la branche des supergéantes. Qu'elle quittera pour devenir une supernova...

**La bande d'instabilité**

Si la Séquence Principale est une phase très stable, les autres le sont moins. Et les étoiles qui traversent la branche horizontale subissent des soubressauts, à l'aller et au retour. On a montré qu'elles traversent en fait une zone de turbulences, qui est nommée *bande d'instabilité*.




Passage de la branche horizontale à la branche asymptotique

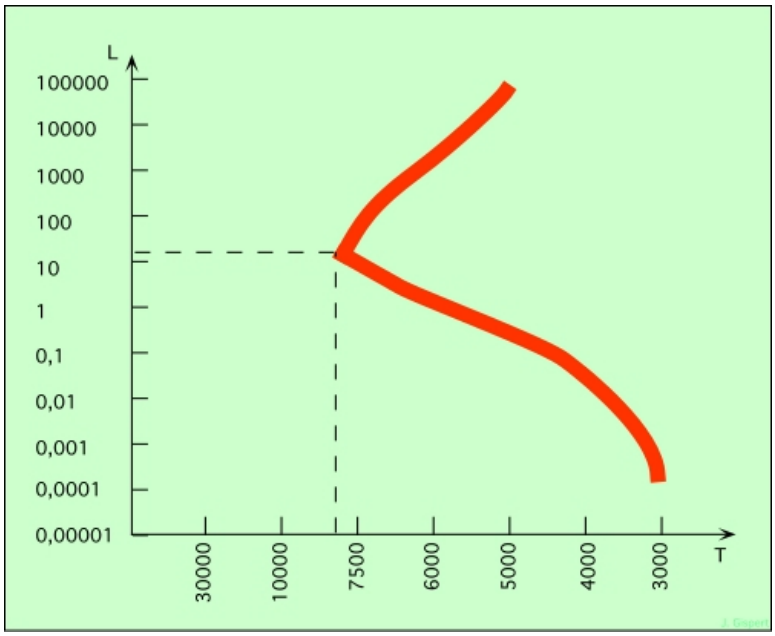
La bande d'instabilité est la zone rouge diagonale qui contient les Céphéides, les W Virginis, et les RR Lyræ.

**Utilité du diagramme HR**

Il y a de multiples usages du diagramme, plus ou moins directs. Le plus évident est le suivi de l'évolution stellaire. Mais un usage plus subtil permet de déterminer l'âge d'un amas stellaire.

**Age d'un amas**

On considère que toutes les étoiles d'un amas se sont formées aux dépends d'un même nuage moléculaire, de son effondrement. Elles ont donc toutes le même âge. Il s'en est formé de toutes masses. Mais les étoiles de grande masse évoluent beaucoup plus vite que les étoiles de faible masse. Comme des coureurs qui auraient des vitesses très différentes. Partant au même moment, le plus rapide arrive le premier. L'étoile la plus massive quitte la Séquence Principale la première, et devient géante rouge. Les étoiles les plus massives se trouvant à gauche de la Séquence Principale, celle-ci s'en trouve raccourcie de ce côté-là. Plus le temps passe, plus elle s'use par la gauche... Alors, il devient très simple de déterminer l'âge d'un amas, simplement en regardant où sa Séquence Principale est coupée. Le point de coupure donne le type spectral des étoiles les plus massives qui n'ont pas encore quitté la Séquence Principale. Et comme la théorie nous dit combien de temps une étoile y passe, selon son type spectral, l'âge de l'amas s'en trouve défini.




Le coude dans le diagramme HR d'un amas

Si on estime la luminosité des étoiles du coude sur le schéma, on mesure à peu près 15 fois la luminosité du Soleil. Comme la luminosité croît avec la puissance 3,5 de la masse, ceci nous donne une masse de 2,2 masses solaires. En reprenant la formule qui donne la durée de vie, on obtient $V = 10 / M^{2,5}$ = 1,4 milliards d'années. C'est l'ordre de grandeur de l'âge de l'amas.

Ceci est détaillé dans le chapitre évolution des étoiles.

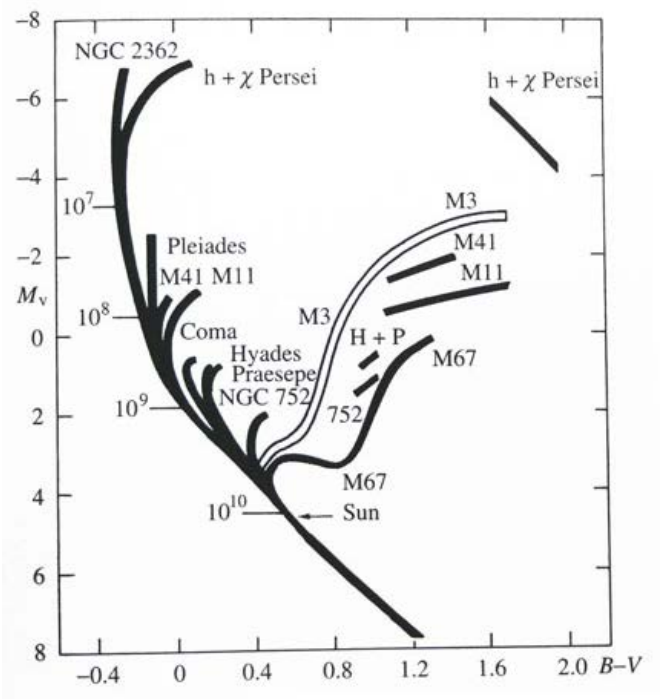



Diagramme HR d'un amas.Source : Fundamental astronomy, Karttunen

**Distance d'un amas**

Le problème des magnitudes absolues est resté en suspend dans le second paragraphe, relatif à la construction d'un diagramme. Nous avons construit le diagramme sans connaître les magnitudes absolues, à partir des magnitudes apparentes, toutes définies par la même distance. Et nous avons obtenu un beau diagramme HR, avec une séquence principale bien dessinée. Quelle est la distance de l'amas ?

Ce n'est pas l'âge du capitaine !! Prenons un diagramme HR de référence, qui a été établi pour un amas de distance connue (proche, accessible à la méthode des parallaxes). Superposons les deux diagrammes. Le premier se trouve certainement ou trop haut, ou trop bas. Faisons-le glisser verticalement pour l'amener en correspondance avec l'autre. La quantité dont on le fait glisser correspond à la différence entre les magnitudes apparentes et absolues !! Et cette valeur est l'indicateur de distance. On vient de mesurer la distance de l'amas...

**Rougissement interstellaire**

Considérons un amas d'étoiles assez lointain. La lumière qui nous parvient de lui traverse l'espace qui nous en sépare, et les nuages et poussières qu'il contient. Les interactions entre la rayonnement et la matière produisent un rougissement de la lumière. Comment évaluer la quantité de matière traversée ? Le diagramme HR nous donne évidemment la solution. Toutes les étoiles de l'amas subissent le même effet. Donc leur lumière est changée pareillement. Elle devient plus rouge. Prenant un diagramme HR normal, que devient-il si la lumière de toutes les étoiles devient plus rouge ? Le rouge est à droite sur le diagramme, le bleu à gauche. Un rougissement décale donc le diagramme, dans son ensemble, vers la droite. Et ceci d'autant plus que le rougissement est plus intense. Donc, si on constate un décalage entre le diagramme HR de cet amas et un diagramme normal, non rougi, l'écart entre les deux mesure le rougissement, donc la quantité de matière interstellaire traversée.

**Apparence d'un diagramme HR**

Lorsqu'on présente le diagramme HR, il est logique d'indiquer tout ce qu'on peut y trouver. Mais trouve-t-on vraiment tout dans un diagramme réel ? La réponse est souvent non.

Pour l'illustrer, considérons un amas d'étoiles qui vient de se former. Toutes les étoiles sont nées en même temps, quelle que soit leur masse. Considérons l'amas d'âge zéro, lorsque ses étoiles viennent d'arriver sur la Séquence Principale. Le diagramme HR correspondant contient la Séquence Principale complète. Mais il ne peut contenir aucune étoile plus évoluée, puisqu'elles n'en ont pas eu le temps. Pas de géantes rouges, pas de supergéantes, et *a fortiori* pas de naines blanches. Si vous voyez un diagramme d'amas qui ne contient que la Séquence Principale, c'est bien celui d'un amas d'étoiles jeune.

Plus tard, les étoiles les plus massives quittent la Séquence Principale, petit à petit, et leur évolution les mène vers la branche des géantes rouges, en passant par la zone des sous-géantes. On voit une chaîne d'étoiles partant de la SP et allant vers la branche des géantes. Corrélativement, la SP se trouve amputée de ses étoiles massives sur la gauche.

Plus tard encore, la branche des géantes est peuplée, la SP encore plus courte. Comme on l'a vu plus haut, la position du coude dans le diagramme HR indique l'âge de l'amas.

Le temps passant encore, les zones supérieures du diagramme se remplissent à mesure que la SP se dépeuple. Des supernovæ explosent, des étoiles moins massives se déplacent vers la gauche du diagramme en haut, puis descendent vers la zone des naines blanches en-dessous de la SP.

On pourrait imaginer que toutes les étoiles vont finir leur vie, et le diagramme ne plus montrer que des naines blanches. Mais ceci n'est pas possible pour deux raisons. La première est que les plus petites étoiles, celles en-dessous de quelques dixièmes de masse solaire, ont une durée de vie (sur la SP) plus longue que l'âge de l'Univers. Il ne peut donc y en avoir, et la SP ne peut jamais être totalement vide.

La seconde raison est que les phases avancées des amas ne peuvent pas s'observer pour les amas ouverts tels que les Pléïades, parce que la durée

de vie de l'amas est inférieure au temps nécessaire pour cela. En effet, placées dans le disque galactique, les étoiles sont soumises aux perturbations des étoiles environantes. Et la rotation différentielle de la Galaxie n'arrange pas les choses, puisque les étoiles de l'amas les plus éloignées du centre tournent moins vite que les plus proches, et donc se laissent peu à peu distancer : l'amas s'effiloche.

---=OO=---




# 134340 Pluton

Cette dénomination est celle d'un astéroïde…

## Carte d'identité de Pluton

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| diamètre | 2.300 km | | demi grand-axe | $5.914\ 10^6$ km |
| | 0,18 Terre | | | 39 UA |
| diamètre angulaire max | < 1" | | excentricité | 0,25 |
| aplatissement | 0 | | inclinaison de l'orbite | 17° 12' |
| période de rotation | 6 j 9 h 17 mn | | année sidérale | 248 ans 244 j |
| inclinaison axe de rotation | 98° 18' | | vitesse orbitale | 4,7 km/s |
| masse | $1,29\ 10^{22}$ kg | | révolution synodique | 366,74 j |
| | 0,002 Terre | | jour solaire moyen | semblable à Uranus |
| masse volumique | $2,07$ g/cm$^3$ | | sens | - |
| | 0,37 Terre | | pression au sol | 0 ? |
| pesanteur | 0,4 m/s/s | | température min | -236° |
| | 0,04 Terre | | température max | -236° |
| vitesse de libération | 1,1 km/s | | albédo | 0,5 |
| nombre de satellites | 4 | | composition atmos. | |

Pluton a été découverte en 1930, par Clyde Tombaugh.

Après le magnifique succès de la Mécanique Céleste, couronné par la découverte de Neptune, il était assez logique de continuer la recherche de nouvelles planètes, encore plus éloignées. La même méthode, par l'analyse fine du mouvement de Neptune, a été essayée, mais les résultats n'ont pas été suffisants pour mettre en évidence une nouvelle planète. C'est donc par hasard, bien qu'à la suite d'une patiente recherche systématique, que le nouvel objet a été aperçu.

Depuis la 26$^e$ assemblée générale de l'Union Astronomique Internationale d'août 2006, Pluton est désignée comme *planète naine*, et numérotée 134.340. On la désigne donc maintenant sous le terme "134.340 Pluton", comme 1 Céres.

A ce sujet, André Brahic nous fait remarquer que Jules César disait "*il vaut mieux être le premier dans son village, que le second à Rome*". Ainsi, Pluton a été promue au rang de Premier Objet de la Ceinture de Kuiper, alors qu'elle n'était avant que la neuvième planète…

Le système solaire comprenait : des *planètes*, des *astéroïdes* et des *comètes*. L'observation de Chiron en particulier, qui était un astéroïde, a montré qu'il pouvait développer une queue cométaire faible. La frontière entre les deux types d'objets venait de tomber. Maintenant, notre système contient donc : des *planètes*, des *planètes naines* et des *petits corps*.

**Orbite**

Pluton est plus lointaine que toutes les planètes principales, et elle est particulière à plus d'un titre ; son orbite est très elliptique, ce qui l'amène à vagabonder de 7 milliards de km à l'aphélie, à 4,5 milliards de km au périhélie. D'ailleurs, quand elle est au plus près du Soleil, elle en est plus proche que Neptune ; c'était le cas récemment depuis 1979, mais elle a recoupé l'orbite de Neptune en 1999, redevenant vraiment la *planète* la plus lointaine.

L'orbite de Pluton est tout à fait particulière :

- son excentricité est énorme, comparée à celle des autres planètes : les excentricités sont toutes comprises entre celles de Vénus (0,01) et celle de Mars (0,09), sauf pour Mercure (0,21) et Pluton (0,25). Pluton est donc bien la championne toutes catégories de ce côté-là.
- sa période de révolution autour du Soleil vaut 248 ans 157 j = 248,4301 j ; celle de Neptune vaut 164 ans 288 j = 164,79 j. Calculons le

rapport de la période de Pluton à celle de Neptune :

248,4301 / 164,79 = 1,507

ce rapport vaut 3/2. Il ne peut pas être fortuit. Il résulte d'une perturbation de Pluton par Neptune, et d'un effet de résonnance.

- son inclinaison sur le plan de l'écliptique est de 17° 12'.Les inclinaisons des autres planètes vont de 0° 46' pour Uranus, à 7° pour Mercure. Là encore, Pluton bat tous les records avec une inclinaison 2,5 fois plus forte que la plus forte des autres !

Pour terminer, constatons que Pluton a son axe de rotation incliné de 122° sur l'orbite et, comme Uranus, elle roule sur son orbite.

Tout ceci fait beaucoup de particularités accumulées pour une seule planète ! Tous ces faits la mettent vraiment à part des autres planètes, et donnent à penser que Pluton ne s'est pas formée exactement de la même manière que les autres planètes. Mais l'histoire en reste là pour l'instant.

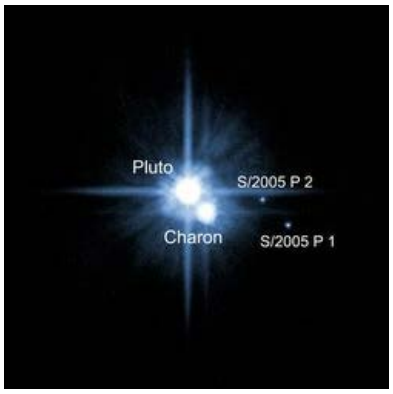
Si on considère les orbites de Neptune et Pluton en projection sur un plan (celui de l'écliptique), on a l'impression qu'elles se recoupent. Cette impression est très trompeuse. L'inclinaison très forte de l'orbite de Pluton fait que, lorsqu'elle se trouve proche de son périhélie (entre les deux points de croisement), elle est en fait très loin du plan de l'écliptique. La distance minimum entre les deux orbites est de plusieurs Unités Astronomiques. A son périhélie, Pluton est à 8 UA du plan de l'écliptique, et s'en éloigne encore plus, jusqu'à 13 UA, à son aphélie.

Losque Pluton est au voisinage de son aphélie, elle est doublée par Neptune, dont la vitesse est supérieure. Mais Pluton se trouve alors vers 49 UA du Soleil, et 13 UA au-dessus de l'écliptique. La distance entre Neptune et Pluton est donc très grande, et il n'y a aucune interaction gravitationelle significative.

**Satellites**

En 1978 on a trouvé un satellite à Pluton ; nommé Charon, son diamètre de 1.200 km vaut la moitié de celui de Pluton. C'est le plus gros satellite de tout le système solaire, en proportion à sa planète (encore une particularité…). La découverte d'un satellite est très importante, car l'application des lois de la mécanique céleste à son mouvement permet de déterminer précisément la masse de la planète, ce qui fut fait pour Pluton.

Mais le 31 octobre 2005, des images données par le télescope spatial ont montré la présence de deux nouveaux objets proches de Pluton. Il s'agit de deux satellites jusqu'alors inconnus. Provisoirement nommés S/2005 P1 et S/2005 P2, ils orbitent autour de Pluton à une distance de 2 à 3 fois supérieure à celle de Charon.

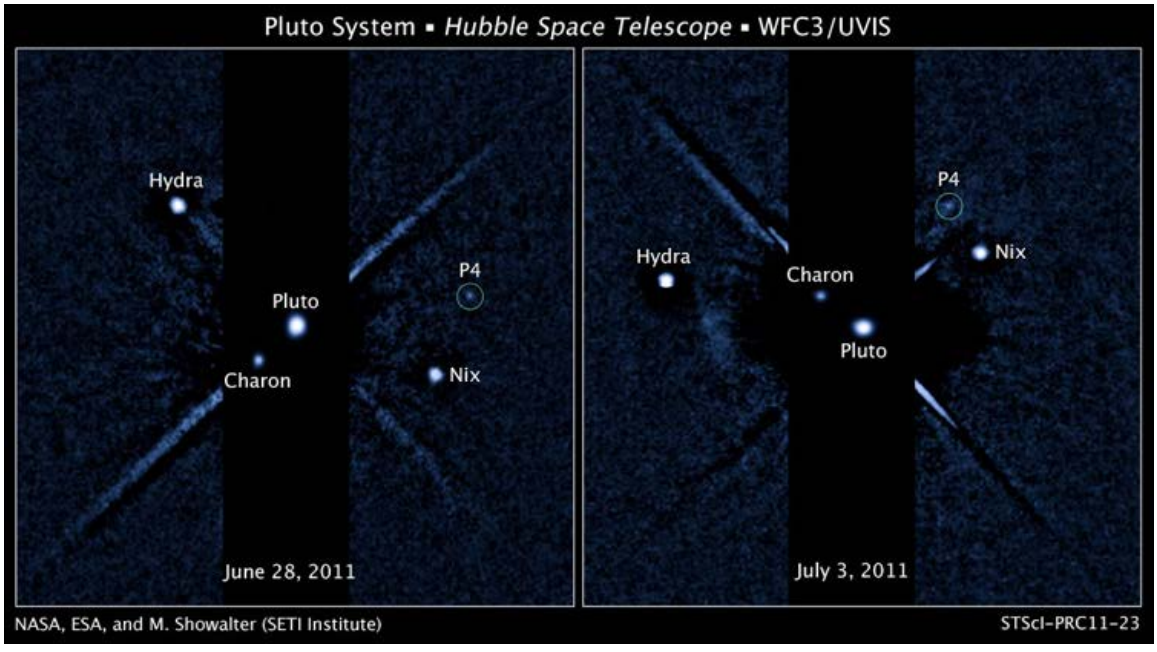



Ces deux objets sont 5.000 fois moins lumineux que Pluton…
Ils ont été nommés Nix et Hydra.

Cette photo montre les deux satellites, alors qu'ils n'avaient pas encore reçu leurs dénominations définitives. S/2005 P1 est Hydra, et S/2005 P2 est Nix.

NASA, ESA, H. Weaver (JHU/APL), A. Stern (SwRI), and the HST Pluto Companion Search Team

En 2011, un quatirème satellite de Pluton a été découvert par le télescope spatial :

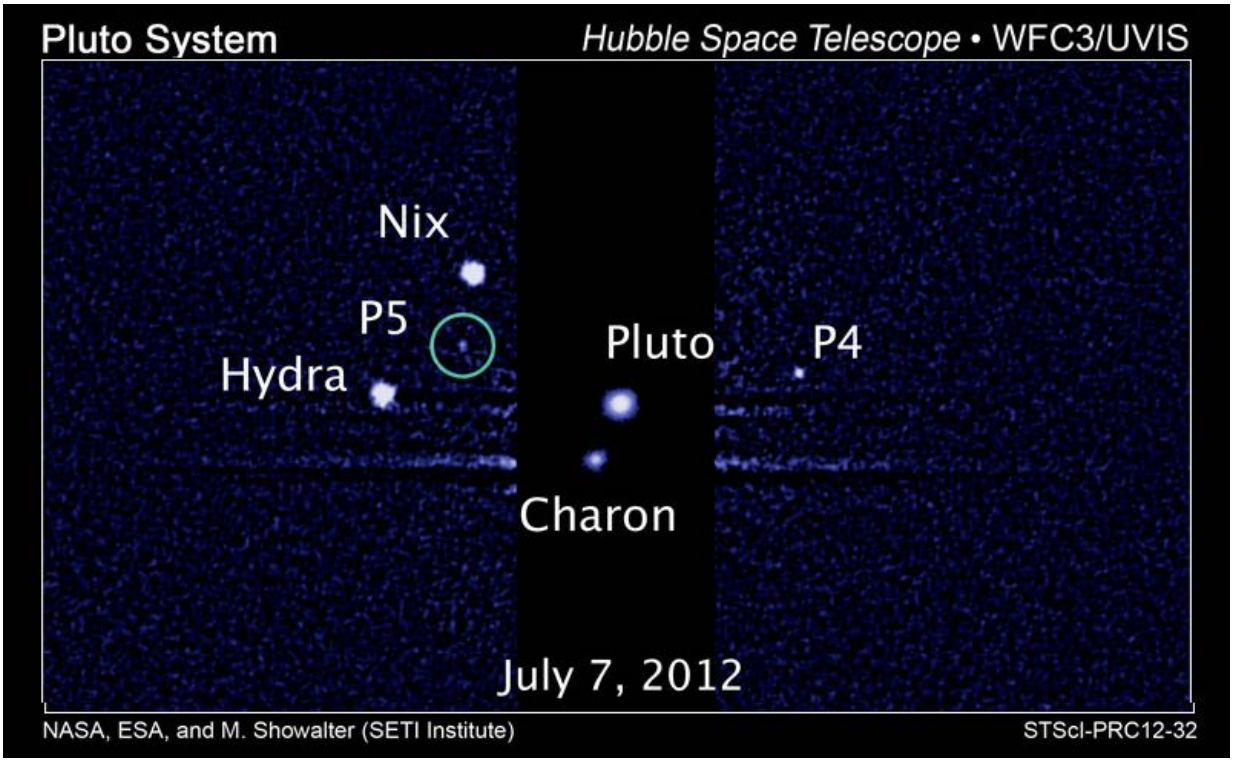



Cette photo est composite, car le nouveau satellite est beaucoup moins brillant que Pluton. Sur une photo exposée pour montrer Pluton, il serait

invisible, et sur une photo exposée pour lui, Pluton serait complètement surexposé. C'est pourquoi on distingue une bande sombre verticale, qui correspond à la photo peu exposée de Pluton et Charon. Le reste de l'image est pris avec un temps de pose bien plus long, qui permet d'atteindre le nouveau satellite. Les lignes brillantes en croix sont des artefacts, dus au télescope. Les taches bleues éparpillées sont du bruit, produites par des électrons aléatoires dans le matériau de la caméra elle-même, à cause de très long temps de pose.

Le nouveau satellite est petit, son diamètre étant estimé entre 13 et 34 kilomètres. Il est de plus bien sombre, ce qui lui donne un éclat très faible. Et l'ensemble est à quelques 5 milliards de kilomètres de nous. Le voisinage de Pluton se montre finalement plus encombré que ce que l'on croyait. Dans l'hypothèse où nous aurions maintenant fait le tour de la question, ce serait un objet de plus à observer grâce à la sonde New Horizons, qui doit passer à proximité en 2015. Mais il ne faudrait pas que de nombreux corps plus petits, non détectables aujourd'hui, se trouvent encore à proximité de Pluton, car la sonde risquerait de ne pas y résister…

Et justement, en juillet 2012, un cinquième satellite, encore plus petit et moins brillant, a encore été observé :




Les nouveaux satellites n'ont encore que leur dénomination provisoire

**Le globe**

Le peu qu'on sache de Pluton est qu'elle est de petite taille, plus petite que Mercure (elle n'en fait pas la moitié), avec un diamètre de 2.300 km. Du fait de sa taille et de son éloignement, elle est très faible et il faut untélescope de plus de 20 cm pour espérer la percevoir. Encore faut-il savoir exactement où elle se trouve, sinon il est impossible de la distinguer des étoiles. Et son déplacement sur le ciel est si lent, qu'il ne peut la mettre en évidence qu'au bout d'un temps très long.

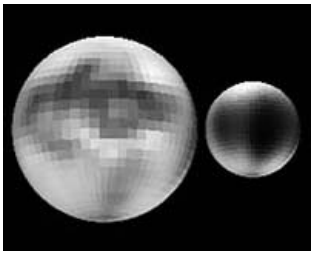
Sa température moyenne est de -236 .

L'échec de la méthode des perturbations pour trouver la planète montre que sa masse est faible, mais ne permet justement pas de la déterminer précisément.

L'observation de l'orbite de Charon a permis de déterminer la masse de Pluton : elle atteint à peine le $500^{e}$ de la masse de la Terre. C'est presque 30 fois moins massif que Mercure, la moins massive des autres planètes ; de plus en plus étrange.

Connaissant sa masse et son diamètre, on a pu en déduire sa masse volumique, qui est de 2,07 $g/cm^3$. Cette faible valeur incite à penser que Pluton est recouverte d'une épaisse couche de glace de méthane (ce qui est confirmé par spectroscopie), et la rapprocherait plus des comètes que des planètes. Si on compare aux autres planètes, elle est très au-dessous de la masse volumique des planètes telluriques (moyenne 5,2), et au-dessus de celle des trois premières géantes. Seule Uranus présente une masse volumique légèrement plus élevée : 2,2 $g/cm^3$. Mais les quatre planètes géantes sont essentiellement gazeuses, alors que Pluton ne retient qu'une vague trace d'atmosphère. Dans le cas des planètes géantes, la masse volumique représente une moyenne entre le noyau dense, et l'atmosphère très légère, alors que pour Pluton il s'agit de la masse volumique du corps solide uniquement. Ce qui ne peut s'expliquer que par des matériaux solides beaucoup plus légers que ceux qui constituent les autres planètes.

On sait que la surface de Pluton n'est pas uniforme, parl'observation de la courbe de lumière dans le visible. Le télescope spatial a même donné des images de cette surface, avec une définition très mauvaise due à la distance :



Pluton et Charon photo Marc W. Buie/Lowell Observatory

Sur ces photos, les faces visibles sont celles qui se font face dans l'espace. On distingue bien les irrégularités de surface, qui se traduisent par des variations de brillance.

Une étude française de mai 2000 a montré des variations de température superficielle. L'intrument ISOPHOT du satellite ISO (European Space Agency) a permi de déterminer pour la première fois la courbe de lumière du couple Pluton-Charon dans l'infra-rouge. Cette courbe montre des variations semblables à celle du visible, mais en opposition de phase : les parties brillantes de Pluton sont les plus froides !

La brillance maximum se trouve à la longitude 220°, et le minimum infrarouge est à 240° ; la brillance minimum est à 100°, et le maximum IR est à 80°. Cette opposition s'explique parfaitement : les couleurs sombres absorbent davantage la chaleur. Le sol plus chaud émet davantage d'infra-rouge. La différence de température atteint 25° entre ces deux points.

L'opposition n'est toutefois pas parfaite : on note un décalage entre le maximum d'une courbe et le minimum de l'autre. Ce décalage est dû à l'inertie thermique du sol de Pluton. Sa valeur nous donne donc un renseignement sur la texture du sol : la région la plus sombre de celui-ci devrait être poreuse.

**L'atmosphère**

Pluton possède une très légère atmosphère, dont la pression est le 1/100.000$^{e}$ de celle de la Terre. De plus, l'orbite étant très excentrique, la température varie du périhélie à l'aphélie, suffisament pour qu'une partie de l'atmosphère se gèle au sol lorsque la planète est la plus éloignée du Soleil (ce phénomène se produit également avec les saisons de Mars).

Aucune sonde n'est encore allé voir Pluton et Charon de près, et les images télescopiques prises du sol ne permettent même pas de distinguer le satellite. Le télescope spatial, hors de l'atmosphère terrestre, a donné des images sur lesquelles il est impossible de discerner des détails, et il faudra sans doute attendre la première mission vers Pluton pour apprendre quelque chose sur cet astre lointain. Cette mission, nommée *Pluto-Kuiper Express*, devait partir au tout début du siècle, mais les crédits sont en baisse…. Elle a été remplacée par la mission *New Horizons*, qui a quitté la Terre en 2006, et arrivera en vue de Pluton en 2015. Elle pratiquera un simple survol, et continuera sa route vers d'autres objets de la Ceinture de Kuiper.

**Jour solaire**

L'inclinaison de l'axe de rotation de Pluton sur son orbite produit un phénomène semblable à celui qui se produit sur Uranus.

Mais il y a encore plus ! Le plus gros satellite de Pluton est seulement deux fois plus petit ; à une distance de moins de 20.000 km, il apparaît sous un angle de 1° 44', plus de trois fois plus gros que la Lune pour nous. Et qui plus est, il est toujours au même endroit dans le ciel ! Comme la lune tourne toujours la même face vers la Terre, Charon tourne toujours le même cratère vers Pluton, mais ce dernier en fait tout autant : ils tournent l'un autour de l'autre, comme si un cable les reliait. Ceci est l'aboutissement du travail des marées, qui a bloqué la rotation de Pluton tout autant que celle de Charon. Pour la Terre, le mécanisme n'a pas encore abouti, car en comparaison la Lune est beaucoup plus petite. Mais là-bas, les deux objets étant du même ordre de taille, ont subi tous deux ce phénomène. En conséquence, Pluton et Charon tournent tous deux sur leur axe en 6 j et 9 h, mais ils tournent également l'un autour de l'autre dans ce même temps. Pluton est toujours au même endroit dans le ciel de Charon, et Charon est toujours au même endroit dans le ciel de Pluton.

**La suite**

Découverte d'Uranus, puis découverte de Neptune, puis de Pluton. Le système solaire est passé de 6 à 7, puis 8, 9 planètes… Pourquoi pas 10 ?

Bien sûr, après la découverte de Pluton on s'est mis rechercher la planète X (X comme inconnue ou chiffre romain 10 ?). Mais on ne l'a pas trouvée ! N'existe-t-elle donc pas ?

Non ! Si !!

Elle n'existe sans doute pas au sens où on l'entendrait : une belle planète comme Vénus ou Saturne. Mais il existe de nombreux objets beaucoup plus petits, qui tournent autour du Soleil.

---

## *La ceinture de Kuiper*

Carte d'identité

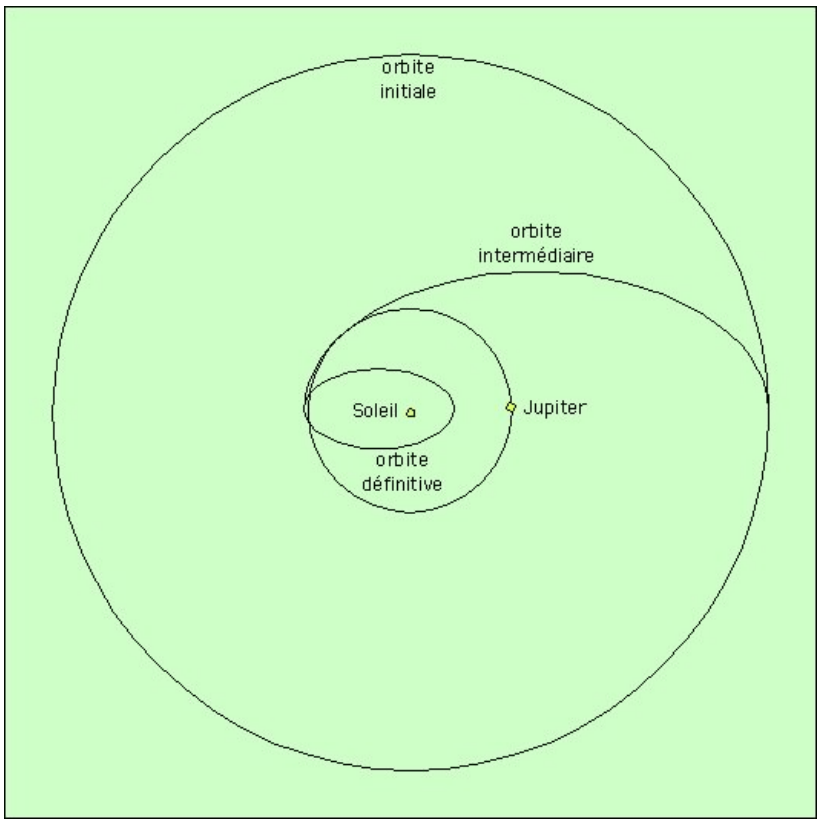
| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| bord interne | 30 UA | | premier objet découvert | 1992 QB1 |
| | 4,5 $10^{9}$ km | | nombre estimé d'objets de plus de 100 km de diamètre | 35.000 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| bord externe | 50 UA | nombre d'objets connus en 2004 | 800 |
| | 7,5 $10^9$ km | inclinaison des orbites | < 30° |
| masse totale estimée | ≈ $1^{23}$ kg | types | plutinos (résonnance 2:3) |
| | ≈ 1/50 Terre | | résonnants (autre résonnance) |
| masse volumique | ≈ 2 g/$cm^3$ | | classiques |
| | ≈ 1/3 Terre | | épars (e très élevé) |

La Ceinture de Kuiper est un anneau de petits corps qui se trouvent au voisinage de Pluton et un peu au-delà ; on en a découvert à peu près 800 jusqu'à 2004. Pluton est lui-même un élément de la ceinture de Kuiper. Ceci explique les différences essentielles qui existent entre sa composition et son orbite, et celles des planètes géantes ses voisines.

Il s'agit d'une idée de l'astronome Gerard Kuiper, qui lui est venue par l'observation des comètes périodiques. Au lieu de prévoir la marche future de ces objets, il a calculé leurs orbites passées. Ce faisant, il a montré que ces comètes étaient passées il y a plus ou moins longtemps à proximité d'une planète géante, la plupart du temps Jupiter, qui les avait perturbées. Il est alors possible de remonter à l'orbite avant perturbation et d'en calculer les paramètres. Les orbites initiales ainsi trouvées sont des ellipses fortement excentriques, dont l'aphélie se situe toujours dans une zone au-delà de l'orbite de Neptune. L'idée de base avait déjà été proposée par l'irlandais Kenneth E. Edgeworth en 1943 et 1949.

Une analyse plus fine montre que des perturbations, toujours dues aux planètes géantes, et plus anciennes encore, ont pu transformer des orbites relativements circulaires dont les rayons correspondent aux distances aphéliques en de telles orbites elliptiques.




Des objets circulant sur des orbites circulaires (ou presque) à ces grandes distances du Soleil ont pu être perturbées par les planètes géantes, et expédiées sur des orbites à forte excentricité qui coupent l'orbite de Jupiter. Un second coup de pouce de cette planète amène alors l'objet sur une orbite semblable à celles des comètes périodiques habituelles.

Cette constatation a amené G. Kuiper à supposer l'existence d'un réservoir d'objets qui tournent autour du Soleil sur des orbites pratiquement circulaires, au-delà de Neptune. Au hasard des perturbations, leurs orbites se transforment et elles viennent former de nouvelles comètes périodiques, de courte période (< 200 ans). Les orbites de ces objets ne sont pas très éloignées de l'écliptique, et constituent un système assez plat. On l'a nommé *ceinture de Kuiper*.

D'hypothétique, elle est devenue bien réelle par la découverte récente de plusieurs centaines de petits corps qui circulent effectivement sur de telles orbites. La première découverte date de 1992 (David Jewitt et Jane Luu).

Il fallait s'y attendre, la réalité est moins simple que les idées de base. On a vite vu que les objets de la ceinture de Kuiper ne circulent pas tous sur des orbites semblables.

**Les objets de Kuiper**

On les désigne par le sigle KBO, Kuiper Belt Objets.

On suppose l'existence de 7.000 objets dans la ceinture de Kuiper, de diamètre supérieur à 100 km. Leur localisation devrait être comprise entre

30 et 50 UA. Ils sont regoupés dans une bande proche de l'écliptique.

Parmi eux, on compte Quaoar, Varuna (dont le diamètre atteint la moitié de celui de Pluton), Chaos (encore assez gros), et Sedna (presque aussi gros que Pluton).

Connaissant les orbites réelles (et non plus calculées) de ces objets, on a vu que l'orbite de Pluton leur ressemblait : son excentricité est très forte pour une planète, ainsi que son inclinaison sur l'écliptique. Le couple Pluton-Charon semblait bien être en fait le plus gros objet (connu) de la ceinture de Kuiper. Dans ce cas, ce n'est donc pas vraiment une planète, et le système solaire n'en compte donc que 8. Ou alors tous ces objets sont des planètes, et on en perd le compte…

Quaoar a été découvert en juin 2002 à l'aide du télescope de 1,20 m du Mont Palomar. Son diamètre vaut approximativement 1.300 km, plus de la moitié de celui de Pluton. Il a été mesuré par le télescope spatial, car il est au-dessus de son pouvoir séparateur : 0,04" d'arc. Il orbite à une distance de 43,4 UA ou 6,5 milliards de km du Soleil, l'excentricité de son orbite est de 0,04, et son inclinaison de seulement 8° sur l'écliptique (seulement, pas comparaison à Pluton). Son année vaut 285 ans.

Une analyse spectrale faite à l'aide du télescope Keck a montré qu'il y avait de la glace d'eau sur Quaoar. Quaoar est le nom d'une divinité créatrice amérindienne, du peuple Tongva qui habitait l'actuelle région de Los Angeles.

Les KBO connus s'étendent sur 12 milliards de km au-delà de l'orbite de Neptune.

Varuna et AW197 mesurent chacun 900 km (diamètre estimé d'après les mesures de lumière, aucun télescope actuel ne pouvant les résoudre). Varuna orbite à 43 UA du Soleil.

2001 KX76 est un corps glacé perdu à 39 UA du Soleil. Ce n'est absolument pas un astéroïde, et pourtant sa taille doit être autour de 1.200 km au moins.

2004 DW

- son diamètre est estimé entre 840 et 1.800 km ;
- son orbite est elliptique, avec un périhélie à 4,355 milliards de km du Soleil et un aphélie à 7,580 millards de km ;
- l'année de cet objet doit être autour de 252 ans.

2002 AW197 est aussi gros que Varuna.

**Statistiques**

On connait maintenant un millier d'objets dans la ceinture de Kuiper, la plupart atteignant à peine 100 km de diamètre. La masse totale des KBO pourrait être 100 fois supérieure à celle des astéroïdes. Rien n'interdirait de trouver dans la ceinture de Kuiper un petit nombre d'objets plus gros que Pluton.

Les objets de la ceinture de Kuiper sont supposés constitués de roches et de :

- glace d'eau
- glace de méthane
- alcool gelé
- glace carbonique ($CO_2$)
- glace de CO
- etc.

Pour déterminer le diamètre, on peut utiliser le rayonnement infrarouge. Un objet blanc renvoie beaucoup de lumière visible, et peu d'infrarouge parce qu'il est froid. Par contre, un objet noir renvoie peu de visible et beaucoup plus d'IR parce qu'il a absorbé beaucoup plus d'énergie et s'est donc chauffé davantage. L'écart entre l'énergie rayonnée dans le visible et l'IR permet donc de calculer si l'objet est blanc ou noir, et d'en déterminer le diamètre.

**Les objets de Kuiper de 1.000 km**

| nom | mag abs | albedo | Diamètre km | Type d'orbite |
|---|---|---|---|---|
| Pluton | -1 | 0,6 | 2320 | plutino |
| Charon | 1 | 0,4 | 1270 | plutino |
| 2004 DW | 2,2 | 0,04/0,12 | ~1500 | plutino |
| Quaoar | 2,6 | 0,12 | 1200+/-200 | classique |
| Ixion | 3,2 | 0,09 | 1065+/-165 | plutino |
| 2002 AW197 | 3,2 | 0,1 | 890+/-120 | épars |
| Varuna | 3.7 | 0,07+/-0,02 | 900+/-140 | classique |

**Mesure du diamètre**

La détemination du diamètre d'un objet de Kuiper est difficile, car les moyens actuels ne nous permettent pas de les résoudre. Seule donc la luminosité nous donne un renseignement. Bien évidemment, la distance au Soleil joue un rôle important dans la brillance apparente. Il est donc nécessaire de connaître précisément l'orbite de l'objet à mesurer, afin d'avoir sa distance au Soleil précise. Mesurant sa magnitude apparente, et

corrigeant par la distance, on obtient la magnitude absolue de l'objet. Elle ne dépend plus de la distance, mais elle dépend de l'albedo et de la surface de l'objet (la surface étant proportionelle au carré du rayon).

Si on connaissait l'albedo, on obtiendrait alors la surface, donc le diamètre de l'objet. Le problème est que l'albedo est une caractéristique physique à laquelle nous n'avons pas accès aujourd'hui.

La méthode utilisée consiste à mesurer la magnitude dans deux domaines : visible et infra-rouge. Si un objet est brillant dans le visible, il renvoie presque toute la lumière reçue du Soleil, et celle-ci ne le chauffe pas. Il est donc froid, et sombre en infra-rouge. Réciproquement, un objet qui renvoie peu de lumière dans le visible l'absorbe et se réchauffe, par suite il brille dans l'infrarouge. La différence de brillance dans le visible et l'infra-rouge permet donc d'estimer l'albedo. On peut dire autrement que l'énergie reçue doit être évacuée ; l'albédo modifie simplement la proportion de visible de d'infrarouge réémis.

Une autre difficulté se présente : la très basse température de ces objets leur donne (loi du corps noir) un rayonnement maximum à grande longueur d'onde, vers 60 à 70 µm. Mais l'atmosphère terrestre est opaque dans ce domaine. Alors, il a fallu se rabattre sur une longueur d'onde plus courte, et les mesures ont été faites à 10 et 20 µm. Il faudra attendre des mesures spatiales pour avoir une plus grande précision en utilisant le bon domaine.

Cette méthode étant difficile à appliquer, peu d'objets ont été mesurés précisément. La précision est de l'ordre de 20 % dans les bons cas. Varuna a été mesuré en 2001, son diamètre est de l'ordre de 1.000 km. Quaoar a un albedo de 0,12 alors que Charon atteint 0,4. Il y a donc de grands écarts entre les albedos des différents objets, et donc une estimation pure et simple ne donne qu'une indication sur le diamètre : 2004 DW est un objet de Kuiper dont on n'a pas mesuré l'abedo. S'il est semblable à celui de Quaoar (0,12), son diamètre atteint 1.500 km, alors que s'il est de 0,4 comme celui de Charon, le diamètre tombe à 750 km.

Pour l'instant, il faut donc garder en mémoire que les diamètres indiqués sont des estimations, la plupart du temps entachées d'une erreur importante. Dans un avenir proche, il sera possible de faire certaines études physiques sur les objets de Kuiper dépassant les 1.000 km de diamètre.

---

**Sedna : 2003 VB12**

Découvert en 2003 (par C. Trujillo, M. Brown, D. Rabinowitz), c'est le plus gros connu des objets de Kuiper. Il pourrait dépasser les 2.000 km de diamètre, ce qui le ferait presque aussi gros que Pluton (2.300 km). Sedna pourrait donc retenir une faible atmosphère, comme Pluton. D'autre part, lors de la découverte, il était plus loin du Soleil que tous les autres découverts avant lui.

Sedna possède une autre particularité : son orbite excentrique l'amène très loin du Soleil, et le place entre la ceinture de Kuiper et le nuage de Oort.

| | |
|---|---|
| demi grand axe | 547 UA |
| excentricité | 0,861 |
| périhélie | 76 UA |
| aphélie | 1.018 UA |
| année | 10.500 ans |
| inclinaison | 11,9° |

Au périhélie, cet objet se trouve donc presque deux fois plus loin que Pluton, et à l'aphélie 25 fois plus loin !

On est cependant encore très loin du nuage de Oort, qui s'étend jusqu'à 1/2 AL (on est à 0,015 AL). Sedna est donc un objet intermédiaire, qui irait du bord externe de la ceinture de Kuiper (périhélie) au bord interne du nuage de Oort (à l'aphélie).

La température de surface ne doit pas dépasser les -140 .

Dans la mythologie Inuit, Sedna est la déesse de la glace, vivant dans l'océan Arctique.

Le KBO 2000 OO67 est sur une orbite très elliptique, atteignant 1.000 UA à l'aphélie.

---

## *Familles de KBO*

**Les Plutinos**

La connaissance d'un nombre conséquent de ces objets permet de faire certaines remarques d'ordre statistique. La plus impressionante aujourd'hui est sans doute la présence de nombreux objets dans la résonnace 3:2 par rapport à Neptune, tout comme Pluton (2 ans d'un plutino = 3 ans de Neptune). Pluton étant le plus ancien connu, et pour l'instant le plus gros de ces objets, on a donné le nom de *plutinos* à ces corps. Ce nom se rattache donc à la similitude des orbites, et non à une composition similaire.

| Objet | a | e | i | q | Q |
|---|---|---|---|---|---|

| | UA | | deg. | UA | UA |
|---|---|---|---|---|---|
| Pluton | 39,61 | 0,25 | 17,17 | 29,58 | 49,30 |
| Orcus | 39,19 | 0,226 | 20,6 | 30,41 | 48,05 |
| 1996 TP66 | 39,71 | 0,34 | 5,7 | 26,38 | 53,05 |
| 1993 SZ4 | 39,82 | 0,26 | 4,7 | 29,57 | 50,07 |
| 1996 RR20 | 40,05 | 0,19 | 5,3 | 32,55 | 47,55 |
| 1993 SB | 39,55 | 0,32 | 1,9 | 26,91 | 52,18 |
| 1993 SC | 39,88 | 0,19 | 5,2 | 32,24 | 47,52 |
| 1993 RO | 39,61 | 0,20 | 3,7 | 31,48 | 47,73 |
| 1993 RP | 39,33 | 0,11 | 2,8 | 35,00 | 43,66 |
| 1994 JR1 | 39,43 | 0,12 | 3,8 | 34,76 | 44,11 |
| 1994 TB | 39,84 | 0,32 | 12,1 | 27,05 | 52,63 |
| 1995 HM5 | 39,37 | 0,25 | 4,8 | 29,48 | 49,26 |
| 1997 QJ4 | 39,65 | 0,22 | 16,5 | 30,83 | 48,47 |
| 1995 KK1 | 39,48 | 0,19 | 9,3 | 38,67 | 46,98 |
| 1995 QZ9 | 39,77 | 0,15 | 19,5 | 33,70 | 45,85 |
| 1995 YY3 | 39,39 | 0,22 | 0,4 | 30,70 | 48,08 |
| 1996 TQ66 | 39,65 | 0,13 | 14,6 | 34,59 | 44,71 |

a : demi grand axe ; e : excentricité ; i : inclinaison
q : distance périhélique ; Q : distance aphélique

La résonnance protège les plutinos des perturbations de Neptune. En effet, ayant un demi-grand axe voisin de celui de Neptune, ces objets pourraient normalement s'en approcher suffisamment pour être éjectés de leur orbite (éventuellement être capturés ou tomber sur Neptune). Mais au moment où un tel objet croise l'orbite de Neptune, cette dernière est toujours loin ! C'est en particulier le cas de Pluton : lors du passage au périhélie, Neptune était de l'autre côté du Soleil. On a montré déjà que c'est aussi le cas des objets 1993 SB, 1994 TB, 1995 QY9, ce qui les rapproche encore de Pluton !

On estime que le quart des objets de la ceinture de Kuiper sont des plutinos. Ceux de plus de 100 km devraient donc être au nombre de 1.400. Toutefois, il existe un biais observationnel, car par définition les plutinos sont les KBO les plus proches, donc les plus faciles à détecter.

Quelques autres objets doivent être dans des résonnances différentes avec Neptune : par exemple la résonnance 4:3 pour 1995 DA2.

L'inclinaison des orbites semble être inférieure à 20° (le maximum serait donc atteint par Pluton). La présence des résonnances, les inclinaisons, sont compatibles avec la théorie de la migration des planètes lors de la formation du système solaire. Cette théorie, imaginée pour expliquer les systèmes exoplanétaires découverts depuis 1995, se trouverait alors renforcée.

---

**Les objets de Kuiper classiques**

La plupart des KBO ne sont pas des plutinos ; on les appelle les KBO classiques. Leur périhélie est nettement plus loin que l'orbite de Neptune. Leurs excentricités sont faibles, comme on pourrait l'attendre pour des corps formés dans un disque d'accrétion calme. Le prototype des KBO classiques est 1992 QB1. Leur demi grand-axe est compris entre 42 et 48 UA. Leur éloignement les préserve des perturbations de Neptune, et donc leur durée de vie est supérieure à l'âge du système solaire. Il n'y en a pas au-delà de 50 UA.

Par contre, leurs inclinaisons sont souvent fortes, et atteignent 30° (les dépassent pour 1996 RQ20 et 1997 RX9). Ces inclinaisons ne sont pas expliquées par la théorie de base de formation du système solaire, et il faut invoquer un autre mécanisme (perturbations par un planétésimal massif - il aurait aussi perturbé les plutinos ; ou bien perturbations par une étoile proche - les passages sont actuellement rares, mais le Soleil a pu se former dans un amas).

---

**Les objets de Kuiper épars**

Ce sont des objets de Kuiper ayant leur périhélie autour de 35 UA, et des orbites très excentriques, et inclinées sur l'écliptique. Leur désignation anglaise est *Scattered Kuiper Belt Objects* (*SKBO*).

Leur modèle est 1996 TL66 :

| **1996 TL66** | |
|---|---|
| **excentricité** | 0.59 |
| | |

| | |
|---|---|
| **demi grand-axe** | 85 UA |
| **inclinaison** | 24° |
| **magnitude** | 21 |
| **albedo** | 0,04 |
| **diamètre** | 500 km |

On note aussi 1999 CV118, 1999 CY118 et 1999 CF119.

2003 EL61,

**136199 Eris (2003 UB313)**, découvert le 1 octobre 2003, par M. E. Brown, C. A. Trujillo, D. Rabinowitz.

Demi grand-axe = 67,709 UA, e = 0,4416, inclinaison 44°, période 557 ans. Les mesures photométriques donnent un diamètre compris entre 4.400 et 9.900 km. En supposant qu'il renvoie la totalité de la lumière reçue, son diamètre serait encore supérieur à celui de Pluton. C'est donc un objet nettement plus gros. On l'évalue à 2.600 km contre 2.250 pour Pluton. Une évaluation plus récente à l'aide du télescope bolométrique MAMBO, donne un diamètre de l'ordre de 3.000 km. Une estimation due au télescope spatial ramène cette valeur à 2.400 km.

Le spectre de cet objet est dominé par les raies du méthane, caractéristique partagée avec Pluton.

Eris possède un satellite, nommé Dysnomia.

Eris est la déesse de la discorde dans la mythologie grecque. Dysnomia est sa fille, c'est l'un des fléaux qui se sont jetés sur la Terre lorsque Pandore a ouvert sa boîte…

**La course**

Les objets épars seront difficiles à suivre au cours de leur évolution orbitale, étant donné qu'ils sont découverts près de leur périhélie (éclat maximum), et ensuite leur éclat diminue. Les aphélies étant très éloignés, les objets ne seront pas visibles avec les moyens actuels. Il est bien évident que les orbites ne seront pas assez bien connues pour retrouver facilement un tel objet à la position prédite à son retour au périhélie : une erreur très faible sur l'arc observé actuellement peut donner une erreur très importante après un tel parcours.

La question est de savoir si les télescopes gagneront en puissance assez vite pour ne pas perdre ces objets. Il est vrai que ceci ne se produira pas avant quelques centaines d'années… Les astronomes du futur auront sans doute la joie de découvrir de "nouveaux" objets !

Mais un regard rétrospectif vers les progrès instrumentaux du XX$^{e}$ siècle nous donne le vertige : les miroirs ont grossi de 1,5 m à 10 m, les temps de pose sont passé de la dizaine d"heure à quelques minutes (CCD), et surtout la magnitude limite de 15 à 30. Il est possible que les progrès soient assez rapides pour suivre les principaux KBO jusqu'à leur aphélie.

**Nombre d'objets**

Il est impossible de déterminer combien d'objets se trouvent dans ces régions de l'espace. Mais ceux que nous connaissons ont été trouvés à l'aide de recherches automatiques (télescope automatique, couplé à un ordinateur qui analyse les images obtenues afin de déterminer les objets en mouvement). Le nombre d'objets trouvés dans la surface explorée permet d'extrapoler à tout le ciel. On en déduit un nombre probable d'objets visibles aujourd'hui. Mais ces objets passent presque tout leur temps très loin du Soleil ; ils sont beaucoup plus lents à l'aphélie. Donc, il doit exister une forte proportion d'objets qui sont actuellement trop loins pour être détectés (on calcule cette proportion). On en déduit le nombre total d'objets SKBO existant.

Les découvreurs de 1996 TL66 ont ainsi estimé qu'il devait exister quelques 10.000 objets de Kuiper épars de taille semblable. Il doit y avoir aussi de nombreux objets plus petits. L'ensemble pourrait avoir une masse totale de l'ordre de celle de la Terre.

**Age des objets**

Les objets de Kuiper, si loin du Soleil, sont probablement des objets très primitifs, qui sont restés inchangés depuis la formation du système solaire. Sauf si…

On a envisagé qu'ils aient pu subir des collisions entre eux, des gros se fragmentant, et les débris étant les objets observés aujourd'hui. Il n'est guère possible de vérifier une telle hypothèse actuellement. S'il y a eu fragmentation, il y avait dans les premiers temps du système solaire des objets plus gros. Ces derniers ont alors subi un réchauffement (énergie de contraction, énergie des collisions, radioactivité) et se sont transformés par différenciation ou modification chimique. Ils ne seraient pas tout aussi primordiaux que ce que l'on pensait. Il faudra des études précises de composition chimique, donc des moyens d'observations beaucoup plus puissants, pour départager ces théories.

**Origine**

Lors de la formation du système solaire, des objets en grand nombre ont dû se former dans ces zones éloignées. Leurs orbites devaient être à peu près quelconques. Ensuite, rapidement, les perturbations de Neptune ont agit, et modifié les orbites. Il est probable que les objets dont les périodes de révolutions étaient proches des 3/2 de celle de Neptune ont été forcées à cette valeur précise, donnant les plutinos.

Par contre, les objets moins réguliers, qui passaient près de Neptune, ont été fortement perturbés, et envoyés sur des orbites très différentes ; certains ont percuté la planète, d'autres ont été éjectés du système solaire. Ce tri par les perturbations devrait s'étaler sur une très courte période, de l'ordre de quelques millions d'années. Parmi les objets qui ont gagné de l'énergie, et dont l'aphélie s'est éloigné du Soleil, ceux qui sont

restés raisonnablement proches (moins de 100 UA) n'ont plus subi de perturbations (à l'aphélie, celles de Neptune sont négligeables, et celles des étoiles proches et de la Galaxie aussi), et ceux qui s'en sont très éloignés ont constitué le nuage de Oort. Des simulations numériques montrent ce phénomène.

Les objets épars de Kuiper, au périhélie, s'approchent de Neptune. Mais leurs orbites étant très excentriques, leur vitesse est alors grande, donc ils restent peu de temps dans cette zone dangereuse. Si Neptune se trouve là par hasard au moment du passage périhélique, la perturbation sera importante, et l'objet peut être précipité dans le système solaire interne. C'est probablement l'origine des comètes à courte période qui viennent nous rendre visite de temps en temps. En effet, s'approchant du Soleil, leurs glaces superficielles vont se sublimer, et former les deux queues caractéristiques des comètes.

**Evolution des idées**

Lors de sa découverte en 1930, Pluton a été la neuvième planète du système solaire. Ceci est resté vrai jusqu'à une période récente. Mais depuis 1992, la théorique ceinture de Kuiper devient un objet réel. Et ses propriétés sont les mêmes (pour une partie de la ceinture au moins) que celles de Pluton…

Beaucoup d'objets de la ceinture de Kuiper sont, comme Pluton, en résonance 2:3 avec Neptune. Tous ces corps ont donc une origine commune, une même constitution, et une même histoire. Il est normal de les réunir. Pluton étant le premier découvert, son nom désigne l'ensemble : les objets de la ceinture de Kuiper en résonnance 3:2 avec Neptune sont par définition les plutinos.

---

Les petites planètes qui ont un nom définitif (septembre 2008) sont : Cérès, Pluton, Haumea, Eris et Makemake. Seule Cérès se trouve dans la ceinture principale, les autres sont dans la ceinture de Kuiper.

---=OO=---




**Prélude**

Les étoiles symbiotiques ont été découvertes dans les années 30 par Paul Merril et Milton Humason. Ils ont décrit trois étoiles de type M (rouges) à émission He II λ4686 (couleur : bleue). Ces étoiles étaient des variables à longue période. Certaines étaient de plus des binaires spectroscopiques. Par la suite, d'autres étoiles ont été ajoutées à cette première liste.

> Milton Humason a un point commun important avec Jean-Louis Pons : tous deux ont commencé leur carrière comme concierge de leur observatoire !
> Jean-Louis Pons d'abord, en 1789 fut embauché comme concierge à l'Observatoire de Marseille, dont il devint en 1813 astronome-adjoint, puis après un séjour comme directeur de l'observatoire de Marlia, il dirigea celui de Florence. Il reste le plus grand découvreur de comètes à l'œil nu.
> De son côté, Milton Humason a été embauché comme concierge à l'Observatoire du Mont Wilson en 1917. Il a été nommé astronome en 1919, puis il a été l'assistant de Hubble, qu'il a grandement aidé dans son travail sur les spectres des galaxies.

Certaines de ces étoiles ont montré un phénomène de type nova, avec des éruptions allant de 1 à 3 magnitudes. Leur étude a montré que **les spectres sont combinés : ils présentent à la fois les caractéristiques d'une géante rouge, et celles d'une nébuleuse planétaire**. Par ailleurs, dans tous les cas où la mesure a été possible, on a conclut qu'il s'agissait d'étoiles doubles. Merrill a proposé en 1941 le nom d'*étoiles symbiotiques*, qui leur est donné depuis.

Comme on peut l'imaginer, le terme symbotique provient de la biologie. Une symbiose est une association de deux organismes qui échangent des substances chimiques, au profit des deux. Ici, ce sera une association de deux étoiles qui échangent de la matière. Mais l'analogie n'est pas parfaite, le transfert de matière se fait dans un seul sens. Quand à dire quelle étoile en *profite*, c'est une autre histoire...

> Une géante rouge est associée à une étoile plus chaude et plus compacte.
> Elle déverse de la matière à la surface de celle-ci.
> La composante chaude donne un continuum faible du côté bleu du spectre.

Les étoiles symbiotiques se sont ainsi montrées importantes, car elle permettent d'étudier :

- la perte de masse des géantes rouges et la formation de nébuleuses planétaires ;
- l'accrétion de matière sur une étoile compacte et l'évolution du phénomène de nova ;
- la photoionisation et le transfert radiatif dans une nébuleuse planétaire.

Les conditions physiques qui règnent dans de tels milieux sont souvent extrêmes, aussi ces étoiles sont de bons laboratoires pour étudier les phénomènes qu'elles produisent.

La perte de masse est en général étudiée par deux de ses manifestations : *le rayonnement infrarouge des poussières* et *le rayonnement radio des molécules*, les unes et les autres produites par le refroidissement du vent stellaire. On peut donc, par l'intensité des absorptions, connaître la densité de ces poussières et molécules. Mais elles ne représentent qu'une petite fraction de la matière éjectée, de l'ordre de 1 %, sans plus de précision. Il n'est donc pas possible d'extrapoler sérieusement à toute la matière perdue par vent stellaire.

## *Les observations*

**R Aqr**

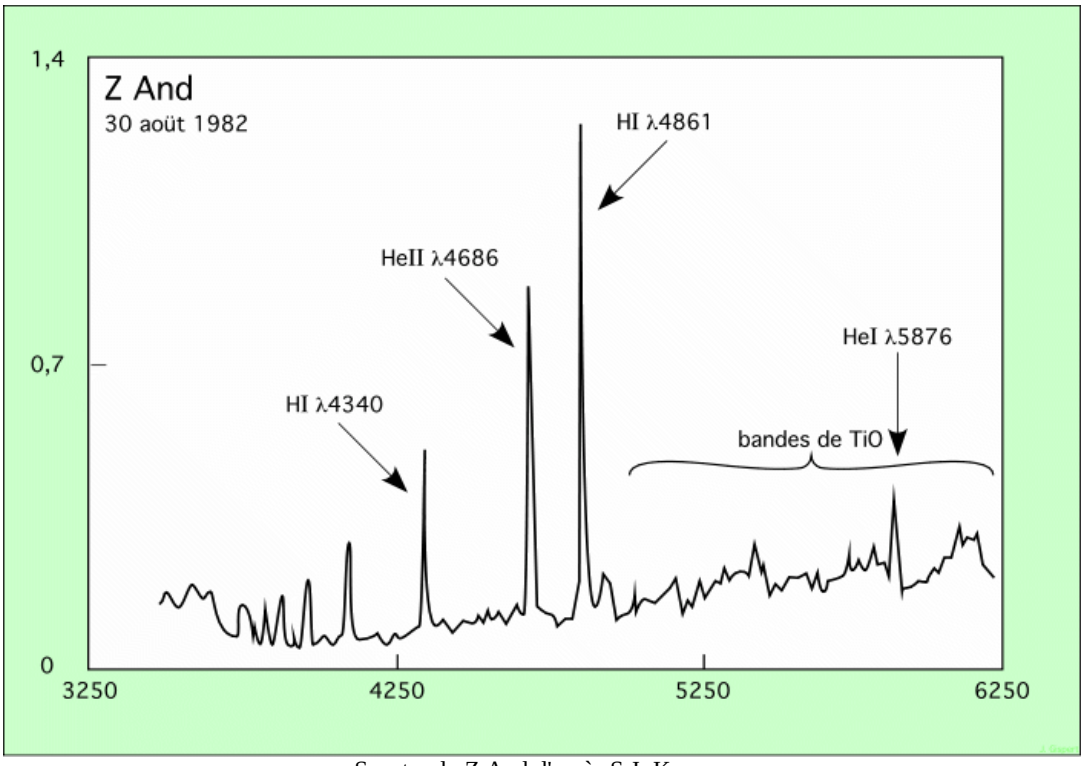
Etudiée par Merrill, *R Aqr* est une **variable à longue période de type Mira**, qui présente un spectre :

- normal de type M (rouge) en absorption, avec de fortes bandes d'absorption de TiO, et les raies de H I en émission, brillantes et étroites.
- un spectre nébulaire superposé en émission, avec en particulier la raie interdite de l'oxygène [O III] apparue un mois avant le maximum, et les raies He II, C III, N III, **visibles pendant sept ans**.

**Z And**

Z And, étudiée par Plaskett dans la même période, présente aussi un spectre composite :

- stellaire avec raies d'émission étroites de Fe II, Ti II et métaux ionisés une fois ;
- nébulaire, avec raies d'émission larges de He II, N III et [O III].




Spectre de Z And d'après S.J. Kenyon

Z And a montré des sursauts de 2 magnitudes, avec changements significatifs dans le spectre, le continuum effaçant presque les raies d'absorption de type M. En même temps, la plupart des raies d'émission disparaissaient, et les raies en émission H I et He I présentaient un profil P-Cygni. Cette dernière caractéristique a amené les astronomes à considérer que toutes ces étoiles devaient être des binaires.

La rapidité de variation de ces étoiles les distingue des autres géantes rouges variables, dont les périodes sont beaucoup plus longues.

**Emission et absorption**

La présence simultanée de raies d'émission et d'absorption trahit l'existence de deux milieux aux propriétés physiques distinctes.

Les raies d'absorption sont le résultat du passage de la lumière dans un milieu froid, dont les atomes vont s'exciter par absorption des longueurs d'onde correspondant à leurs niveaux d'énergie. En se désexcitant, ces atomes vont rayonner bien sûr la même énergie que celle reçue, mais d'une part elle peut être transformée en rayonnement de plus grande longueur d'onde par phénomène de cascade (elle apparaîtra alors dans une autre partie du spectre), et d'autre part ce rayonnement est produit dans toutes les directions de l'espace, en très faible partie vers l'observateur.

Les raies d'émission, à l'opposé, sont produites par un milieu chaud, dont les atomes sont constamment excités, et produisent la lumière par désexcitation. Là aussi, le rayonnement se fait dans toutes les directions. Aussi, pour avoir, juste dans la direction de l'observateur, une émission intense, il faut que l'émission totale soit de très forte intensité. Donc que le milieu soit à un niveau d'énergie élevé.

**Définition**

D'après ce qu'on a vu ci-dessus, la définition d'une étoile symbiotique ne semble pas très aisée. Il s'agit d'objets complexes, aux comportements disparates. Les deux prototypes initiaux ont été observés avec des points de vue différents : R Aqr comme variable à longue période, et Z And sous l'angle de son spectre anormal. Ceci participe à la confusion sur la définition. D'autres systèmes ont été découverts plus tard, après l'observation d'un sursaut pouvant aller jusqu'à 7 magnitudes (T CrB et V1016 Cyg par exemple).

La première définition donnée par Merrill était basée sur les similitudes avec 5 prototypes : Z And, BF Cyg, CI Cyg, RW Hya et AX Per (Z And n'en fait pas partie, puisqu'elle était observée par un autre chercheur). Mais ceci s'est montré insatisfaisant, car bien d'autres étoiles présentent des ressemblances, sans pour autant être explicables par un même modèle théorique.

Pour mieux filtrer, on a ajouté des règles que les candidates devaient satisfaire : une variabilité optique irrégulière, des raies d'émission d'ions avec potentiel d'ionisation supérieur à 55 eV, et surtout que l'étoile soit inclassable ailleurs !!! Cette dernière contrainte met en lumière l'aveu d'impuissance des deux qui la précèdent.

Comme on pouvait s'y attendre, les études ont amené progressivement une clarification des idées, même si on n'est pas encore au bout du chemin. Nous admettrons donc, en suivant S. Kenyon, qu'une étoile est symbiotique si :

- son spectre est de type G, K, ou M et présente les raies d'absorption d'une géante rouge, en particulier Ca I, Ca II, Na I, Fe I, $H_2O$, CN, CO, TiO, VO. Avec la certitude que l'étoile n'est pas une naine ni une supergéante ;
- son spectre présente les raies d'émission brillantes de H I et He I ;
- de plus on doit avoir
  - soit des raies d'émission brillantes d'ions avec potentiel d'ionisation d'au moins 20 eV (par exemple [O III]), avec une largeur d'au moins 1 angström ;

- soit un spectre A ou F avec raies d'absorption de H I et He I, et de métaux ionisés une fois.

Le troisième point présente une alternative. Il ne faut pas voir là deux sortes différentes de variables symbiotiques (bien qu'elles soient très diverses), mais deux phases successives dans l'évolution d'une même étoile. La première alternative correspond à la phase calme, dans laquelle l'étoile passe le plus de temps. Mais l'autre alternative décrit la phase éruptive, qui peut être longue. C'est pourquoi les chances de l'observer sont importantes, et par suite sa description nécessaire.

**Résumé**

Comme nous l'avons vu, le spectre d'une étoile symbiotique comprend :

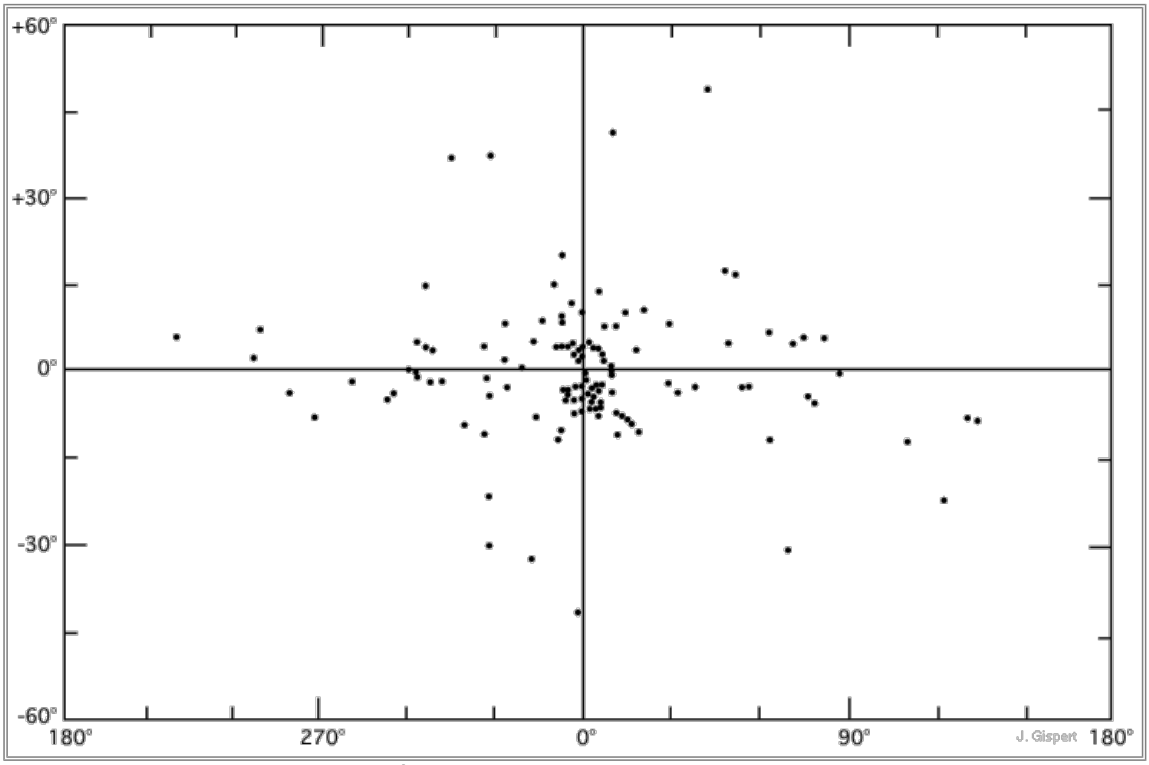
- un fond continu brillant dans le rouge ;
- de fortes bandes d'absorption de l'oxyde de titane TiO ;
- des raies d'émission correspondant à des éléments fortement ionisés ;
- un continuum bleu faible.

L'association d'une géante rouge de type M, G ou K, et d'une étoile chaude de type O ou B, permet d'expliquer ces diverses caractéristiques. L'étoile chaude donne le continuum bleu, la géante le continuum rouge. Les nébulosités qui entourent l'ensemble expliquent les raies d'émission : excitées par l'étoile chaude, elles se désexcitent en émettant cette lumière. Les fluctuations de faible amplitude sont produites par le mouvement orbital, et celles de grande amplitude proviennent des instabilités de l'étoile chaude.

Ainsi, les idées de base sont mises en place. Il reste à considérer les détails, et à trouver un modèle pour expliquer toutes les observations.

**Localisation**

Un échantillon de 125 étoiles symbiotiques confirmées permet maintenant d'établir des statistiques, qui apporteront un éclairage sur leur constitution physique. La première concerne tout simplement leur position dans le ciel.




Position des étoiles symbiotiques dans la Galaxie d'après S. Kenyon

Ce schéma montre la position des étoiles symbiotiques par rapport aux coordonnées galactiques : longitude en abscisse, et latitude en ordonnée. On voit une très forte condensation de ces étoiles en direction du centre galactique. Or, quelle est la population d'étoiles qu'on trouve dans cette partie de la Galaxie ? Ce sont des étoiles vieilles, de population II. Ceci est un indice fort pour déterminer les propriétés physiques des étoiles symbiotiques.

Sur le plan observationnel, on peut même penser que la concentration centrale est encore plus forte qu'il ne parait, car le rougissement et l'extinction vers le centre de la Voie Lactée ne peuvent que diminuer le nombre réel d'étoiles observables dans cette direction.

Enfin, on a découvert quelques étoiles symbiotiques dans les Nuages de Magellan, et une dans la petite galaxie ellipsoïdale du Dragon. Quatre de des objets contiennent des étoiles carbonnées, preuve que le phénomène symbiotique peut se produire plus ou moins indépendamment de la composition chimique des étoiles.

**Les modèles**

Nous avons déjà envisagé un couple stellaire. Mais bien évidemment, tous les chercheurs n'ont pas été d'accord sur ce principe. Et des modèles ne faisant intervenir qu'une seule étoile, satisfaisant ainsi au rasoir d'Ockham, ont été proposés.

L'un de ces modèles envisageait une variable à longue période très évoluée, dont le cœur était pratiquement dépouillé de son enveloppe, donc

très chaud et responsable des raies d'émission. L'enveloppe constituait la nébuleuse froide, qui expliquait les raies d'absorption.

Un autre type de modèle évoquait une étoile géante normale, dont la chromosphère et la couronne étaient particulièrement actives.

Lorsque les observations ont pu accéder, grâce aux moyens spatiaux, aux longueurs d'onde absorbées par l'atmosphère terrestre, ont constata que ces modèles étaient en désacord plus ou moins flagrant avec les nouvelles données. Les rayons X en particulier leur ont été fatals.

**La phase calme**

D'après ce que nous avons déjà vu, à partir de l'étude des spectres, les étoiles symbiotiques sont constituées d'une géante rouge, d'une étoile chaude, et d'une nébuleuse. Nous entrerons dans les détails plus loin, mais l'existence de ces trois composantes donne à penser que l'objet est très complexe. Nous sommes loin de l'étude d'une petite étoile bien tranquille ! Ici, nous avons un couple qui se dispute en s'envoyant des nébuleuses... Nous ne serons pas étonnés si les phénomènes sont complexes, et si leur interprétation est difficile. Plus encore, on peut envisager qu'il n'y ait pas un modèle unique, mais plusieurs solutions plus ou moins différentes à ce problème.

**Définition récente**

Belczinsky a donné en 2002 une définition directement dérivée de celle de Kenyon :

- Présence de bandes d'absorption (TiO, $H_2O$, CO, CN, VO) typiques d'une géante M, G ou K, et de raies d'absorption de Ca I, Ca II, Fe I, Na I parmi d'autres.
- Raies d'émission de H I et He I fortes, auxquelles s'ajoutent :
  - **soit** des raies d'ions à potentiel d'ionisation > 35 eV, en particulier [O III] ;
  - **soit** un continuum caratéristique d'étoiles chaudes de type A ou F, avec des raies d'absorption de H I et He I ;
- la raie $\lambda$ = 6825 nm, même si les bandes de l'étoile froide n'apparaissent pas.

Ces contraintes sont proches de celles de Kenyon, et celui-ci affirmait que toute étoile symbiotique les a violées au moins une fois ! Comme dans la définition de Kenyon, l'aternative entre les raies d'ions et le continuum sépare les phases calme et active, et non des types d'étoiles différents.

**1$^{ere}$ composante : la géante rouge**

C'est bien celle qui pose le moins de problèmes. Il s'agit en effet d'une étoile ayant quitté la séquence principale après épuisement de son hydrogène central. Elle peut se trouver sur la branche des géantes, juste avant le flash de l'hélium, ou bien sur la branche horizontale, en train de fusionner son hélium central, ou encore plus tard, sur la branche asymptotique avec un cœur inerte de carbone-oxygène, surmonté d'une coquille de fusion de l'hélium, et encore d'une coquille de fusion de l'hydrogène.

Entre ces deux zones de fusion, les échanges d'énergie sont complexes, et l'équilibre difficile à atteindre. Il s'ensuit des pulsations dites *pulsations thermiques*, qui sont représentées dans le diagramme HR par la bande d'instabilité. Les variables à longue période de type Mira s'y trouvent.

Cette étoile est évoluée (géante rouge), et donc son enveloppe est dilatée. Dans quelle mesure ? En fait, cette question n'a pas de sens toute seule. Envisageons aussi la distance orbitale des deux étoiles. Les étoiles sont entourées par leur surface de Roche, où la gravité des deux composantes s'équilibre. Si les étoiles sont proches, la géante peut remplir son lobe de Roche, et alors déverse beaucoup de matière sur sa compagne. Par contre, si la distance est plus grande, le lobe de Roche ne sera pas plein, et ce mécanisme ne jouera pas. Dans les deux cas, la géante rouge souffle un important vent stellaire. Ce dernier est la seule alimentation de la compagne si elles sont distantes, et il s'ajoute au déversement par le point de Lagrange si elles sont proches.

**Seconde composante : l'étoile chaude**

Le problème est plus difficile. La diversité des observations ne s'accorde pas avec un type donné d'étoile. Il faut en invoquer plusieurs pour cela. Dans de nombreux cas, l'étoile est très chaude, et compatible avec une naine blanche. Mais dans d'autres cas, une étoile moins chaude est suffisante pour expliquer l'ensemble. Et même une étoile de la séquence principale convient.

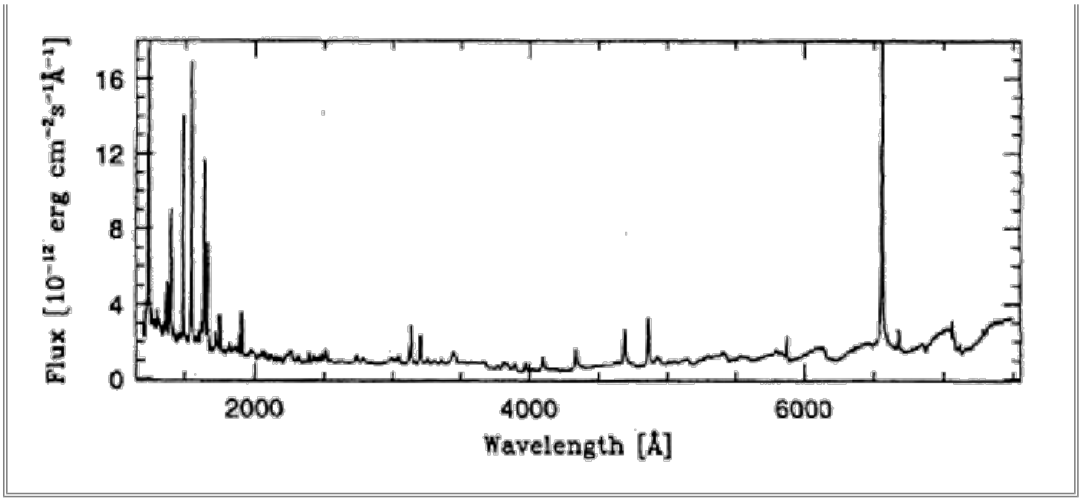
**Dernière composante : la nébuleuse**

Les observations sont difficiles, et la confusion possible. Certaines étoiles ont été classées comme nébuleuse planétaire, puis comme étoile symbiotique, et peut-être aussi l'inverse. La différence est subtile, parce que ces deux objets sont de nature très voisine. Une étoile évoluée perd beaucoup de masse par vent stellaire après sa phase AGB ; si elle est isolée, elle produit une nébuleuse palnétaire. Dans une étoile symbiotique, si le lobe de Roche n'est pas rempli, le phénomène est le même ! La seule différence est qu'une étoile chaude proche excite cette nébuleuse, et que la matière y tombe. Des phénomènes de type nova vont, dans ce cas, s'ajouter.

**Formation**

Dès l'instant où, dans un couple d'étoiles, l'une est de faible masse, et l'autre de masse moyenne, la seconde évolue plus vite, et devient une géante rouge alors que la première est encore sur la séquence principale. Il y aura forcément apport de matière, par vent stellaire seul ou avec déversement par le point de Lagrange, et donc interaction symbiotique. Ce phénomène est donc très répandu. Si on ne l'observe pas davantage, c'est parce que sa durée est faible.

Plus tard, la seconde étoile devient à son tour géante rouge, et le phénomène se reproduit à l'envers. La première étoile a pu, entre temps, devenir une naine blanche. Par conséquent, le phénomène symbiotique s'explique avec une géante rouge et une autre étoile plus ou moins évoluée.




Spectre UV et visible de AG Peg figure d'après Mikolajewska, 1997

Cette figure montre le spectre de l'étoile symbiotique AG Peg. On y voit à gauche le continuum UV (en bas) et les raies d'émission (au-dessus) provenant de la composante chaude, en bas à droite le continuum visible de la composante froide, échancré par ses bandes d'absorption ; de la droite au centre les raies d'émission de la série de Balmer de l'hydrogène.

Vous pourrez remarquer que le minimum du spectre se trouve centré sur 4.000 Å, c'est-à-dire dans le visible. Ni la composante chaude, ni la composante froide ne brillent beaucoup dans cette région du spectre.

**Classification**

Selon l'aspect considéré, on distingue trois classifications des étoiles symbiotiques :

- Classification selon la couleur
  - **étoiles symbiotiques jaunes**, dont la géante est de type spectral G ou K ;
  - **étoiles symbiotiques rouges**, dont la géante est de type spectral M.
- Classification infrarouge
  - **type D** ; D pour *dusty*. Ce sont les symbiotiques, en général rouges, dont les abondantes poussières (au sein de la nébuleuse) produisent un excès d'infrarouge ;
  - **type D'** ; semblables aux précédentes, mais avec une étoile géante jaune ;
  - **type S** ; S pour *stellar*. Pas d'excès infrarouge, donc probablement peu de poussières.
- Classification géométrique (comme pour les novæ)
  - **semi-détachées** : la géante rempli son lobe de Roche, et alimente l'autre composante, qui est une étoile de la séquence principale ou une naine blanche ;
  - **détachées à courte période** : la géante ne remplit pas son lobe de Roche, et ne déverse sa matière sur l'autre que par vent stellaire. La compagne est généralement une naine blanche. AG Peg est de ce type.
  - **détachées à longue période**. La géante est une Mira, et l'autre est une naine blanche très chaude.

**Etoiles S**

Les étoiles classées S sont des géantes de type spectral M, donc rouges, avec un excès d'oxygène et des bandes de l'oxyde de zirconium ZrO. Les éléments lourds, dont l'oxyde de zirconium, qui se trouvent dans leur enveloppe s'expliquent par des réactions nucléaires d'addition de neutrons, par le processus s. Le seul mécanisme capable de produire ces éléments dans des conditions d'énergie relativement basse est un mécanisme d'addition de neutrons. S'il est difficile d'ajouter un proton à un noyau, à cause de la répulsion électrostatique, il n'y a aucune difficulté à ajouter un neutron, puisqu'il ne subit aucune répulsion. Même un neutron de faible énergie peut se coller à un noyau. D'autre part, sa neutralité ne change pas les propriétés chimiques de l'élément, mais il donne un isotope plus lourd. On distingue deux cas, selon le taux de production de neutrons :

- si l'intervalle de temps entre l'arrivée de deux neutrons successifs est inférieur à la période de désintégration du noyau produit (c'est le processus-r ; r pour *rapid*), celui-ci n'a pas le temps de se désintégrer, avant de se voir ajouter un nouveau neutron. On obtient ainsi des isotopes de plus en plus lourds. Il arrive qu'une désintégration béta change un de ces neutrons en proton, et alors on passe à l'élément de numéro atomique supérieur. C'est ainsi qu'on explique la formation de noyaux lourds dans certains milieux.
- si l'intervalle de temps entre l'arrivée de deux neutrons successifs est supérieur à la période du noyau produit (processus-s ; s pour *slow*), celui-ce se désintégrera, et ce sera son noyau-fils qui recevra le neutron. On aura alors une autre chaîne de production d'éléments.

Le taux élevé de production de neutrons nécessaire pour le processus-r se rencontre dans les phases explosives : supernovæ. Par contre, le processus-s se contente très bien du faible taux rencontré dans les enveloppes des étoiles symbiotiques.

Le technétium est produit de cette manière, et sa présence prouve donc l'action du prcessus-s.

Certaines de ces étoiles (les mira) montrent du technétium dans l'enveloppe. Or le technétium n'a aucun isotope stable : le plus résistant a une période de 2,6 millions d'années. Aussi, si on l'observe dans l'enveloppe d'une étoile, c'est qu'il y a été produit récemment.

## *Recette pour confectionner une symbiotique*

**Ingrédients**

Un couple orbital d'étoiles de la séquence principale. On nommera *primaire* l'étoile la plus massive des deux, et *secondaire* l'autre.

Si les étoiles sont moins massives que le Soleil, leur durée de vie sur la séquence principale est supérieure à 10 milliards d'années, si longue qu'elle n'ont pas eu le temps de devenir géante rouge. De telles étoiles ne peuvent donner une symbiotique. *A contrario*, si elles sont plus massives que 3 M , leur luminosité est bien supérieure à ce qu'on observe. Nous prendrons donc des étoiles de masses comprises entre 1 et 3 M .

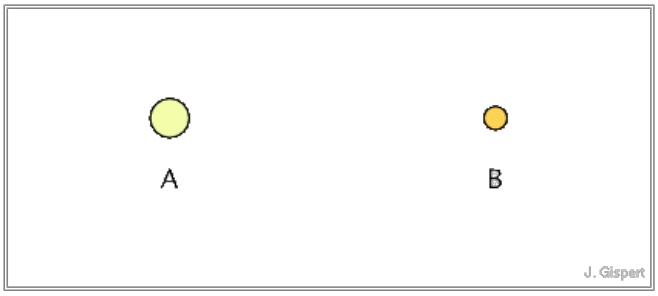
Ceci étant, la période orbitale est un paramètre décisif pour la réussite de la recette :

- si la période est très courte (quelques jours au plus), les effets de marée entre les deux étoiles sont si forts, qu'elles vont s'influencer l'une l'autre tout au long de leur vie, et leur destin sera tout autre. Ce ne sont pas de bons ingrédients pour la recette...
- si la période est plus longue, mais en restant inférieure à 100 jours, les deux étoiles sont suffisamment indépendantes pour évoluer comme si elles étaient seules. Le système est cependant serré, et les effets de marée importants : les lobes de Roche sont petits. La géante rouge que l'étoile devrait devenir serait plus grande que son lobe de Roche. Elle va donc en déborder. Or la matière qui est en dehors du lobe de Roche n'est plus liée à l'étoile, elle peut tomber sur l'autre composante. Donc, lorsque la primaire devient géante rouge, elle remplit son lobe de Roche très rapidement (lorsqu'elle n'est encore qu'à la base de la branche des géantes, juste après avoir quitté la séquence principale), et déverse de la matière vers la secondaire. Son évolution se poursuivra normalement en interne, mais son enveloppe ne pourra pas s'expanser au-delà du lobe de Roche. Par conséquent, sa superficie sera limitée à celle de son lobe de Roche, qui est plus petite que ce qu'elle devrait être si l'étoile était seule. Sa température, par contre, sera seulement un peu plus élevée que pour une géante normale. Et comme la luminosité est le produit de la brillance superficielle (définie par la température) par la superficie qui émet, la luminosité restera bien plus faible que pour une géante normale. Une telle étoile, si elle est vue dans le plan orbital, est une variable à éclipse, de type Algol. Notre recette est encore ratée !
- si la période est comprise entre 100 et 5.000 à 10.000 jours (moins de 30 ans), la primaire remplira toujours son lobe de Roche, mais celui-ci sera assez grand pour qu'elle soit une géante pratiquement normale, avec une luminosité standard. Une telle étoile déverse un flux de matière de l'ordre de $10^{-6}$ M $a^{-1}$ (un millionième de masse solaire par an), ce qui est suffisant pour assurer la symbiose. Cependant, ces étoiles sont encore assez proches pour se cacher dans une enveloppe commune.
- Si la période est supérieure à 10.000 jours, les effets de marée sont moins forts, et l'étoile ne remplira jamais son lobe de Roche. Aussi, la seule matière qu'elle pourra fournir à sa compagne proviendra de son vent stellaire. Ce vent est estimé souffler à un taux de $10^{-5}$ à $10^{-7}$ M $a^{-1}$, et la compagne ne peut en capter que de l'ordre de 1 %. 1 % de $10^{-5}$ à $10^{-7}$ M $a^{-1}$ donne encore de $10^{-7}$ à $10^{-9}$ M $a^{-1}$. C'est trop faible pour justifier d'une étoile symbiotique dont la composante chaude serait sur la séquence principale. Mais c'est suffisant si cette composante est une naine blanche beaucoup plus chaude. Si la période est inférieure à 10.000 jours, on peut donc attendre une composante chaude sur la séquence principale, mais si la période est plus grande, elle ne pourra être qu'une naine blanche.

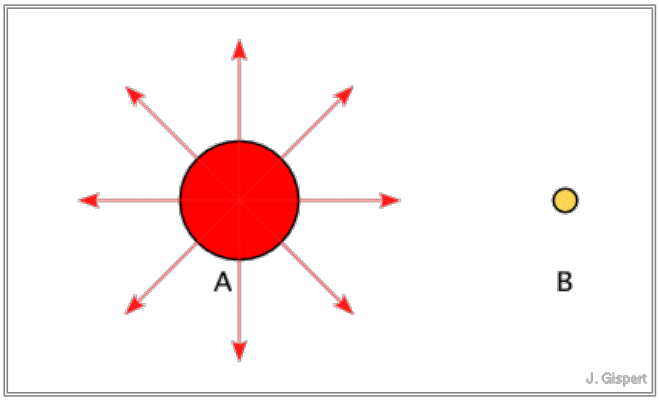
Les ingrédients que nous prendrons seront donc deux étoiles de masse moyenne (1 à 3 M ), formant un couple de période supérieure à 100 jours.

**La recette**

Nommez A la primaire, et B la secondaire, A étant plus massive que B.



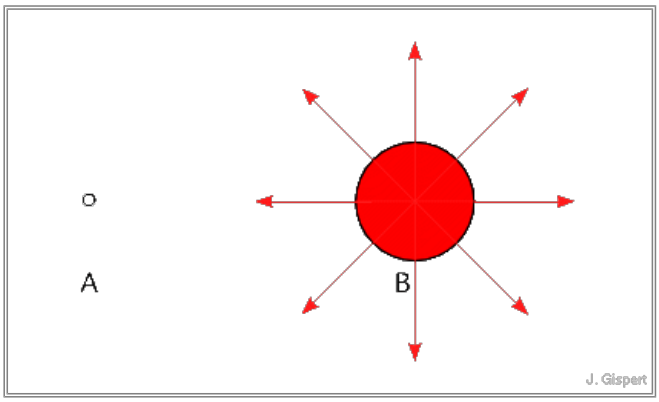

A, la plus massive, évolue plus vite, et devient géante rouge. Elle émet un vent stellaire fort, qui se répand dans l'espace pour former une légère nébuleuse, et dont une partie est capturée par l'étoile de la séquence principale B. Ce couple est maintenant une étoile symbiotique dont la composante chaude est sur la séquence principale. L'étoile chaude chauffe la nébuleuse, et lui permet de rayonner les raies d'émissions observées.



L'évolution se poursuivant, la géante rouge passe par la phase nébuleuse planétaire, où elle rejette son enveloppe, puis son cœur mis à nu devient une naine blanche. Nous avons maintenant un simple couple formé d'une étoile de la séquence principale et d'une naine blanche. Rapidement (une dizaine de milliers d'années), la nébuleuse planétaire se dissoud dans l'espace et devient invisible.




Le temps passe, et l'étoile B, la moins massive, quitte à son tour la séquence principale et monte la branche des géantes rouges. C'est elle qui émet maintenant un fort vent stellaire, et recrée une légère nébuleuse. Comme précédemment, une partie de ce vent stellaire est captée par l'autre étoile, la naine blanche. Le phénomène symbiotique se reproduit donc dans l'autre sens, mais cette fois la composante chaude est une naine blanche.




La suite voit l'étoile B passer par la phase nébuleuse planétaire, éjecter son enveloppe, puis devenir à son tour naine blanche. La fête est finie !

Dans ce scénario, on note trois paramètres au moins. Ce sont les masses des deux étoiles, et leur distance orbitale. La variation des masses ne change pas fondamentalement les phénomènes, mais la distance orbitale joue un rôle plus important. Si les étoiles sont éloignées, le couple est lâche, et les relations entre les étoiles limitées. En regardant de plus près l'évolution de la géante rouge, on doit considérer son passage sur la branche asymptotique. A ce stade, elle possède un cœur de carbone-oxygène, inerte, entouré d'une coquille où se produit la fusion de l'hélium, elle-même entourée d'une coquille où se déroule la fusion de l'hydrogène. Ceci s'explique évidemment par l'effet de la température décroissante en s'éloignant du cœur. Mais cette double source d'énergie est complexe, et l'équilibre bien plus difficile à atteindre que dans le cas simple d'une fusion centrale. Aussi, l'étoile entre dans une phase de pulsations dite thermiques (dans le diagramme HR, elle traverse la bande d'instabilité). La géante peut devenir une Mira, et on décrit ainsi certaines des étoiles symbiotiques observées.

Si les deux étoiles sont plus proches, sans trop, les phénomènes sont ceux décrits plus haut.

Enfin, si les étoiles sont très proches, la géante rouge peut remplir son lobe de Roche, et déverser une partie importante de sa matière sur sa compagne. Cette matière s'ajoute à celle perdue par vent stellaire. On obtient les étoiles symbiotiques semi-détachées. Remarquez que ceci se produit aussi bien avec B sur la séquence principale, qu'avec A naine blanche. Le modèle explique donc bien ce qui est observé.

**Activité**

Le scénario envisagé retrace les grandes lignes de l'évolution d'un couple d'étoiles de masse moyenne, et montre qu'il passe éventuellement deux fois par la phase symbiotique, une pour chacune des étoiles. Mettant en lumière l'échange de matière, il ne décrit pas les conséquences que ce dernier peut avoir. En étudiant les étoiles variables, nous avons passé en revue un certain nombre de cas dans lesquels un couple est impliqué. Les variables cataclysmiques, les novæ en font partie. Ces phénomènes se produisent en effet parfois dans les étoiles symbiotiques, avec plus ou moins de force. Des phases éruptives, dans lesquelles la matière déversée entraîne un emballement des réactions thermonucléaires à la surface de la naine blanche, c'est-à-dire un phénomène de nova, sont effectivement observés.

**Supernovæ Ia**

La primaire de certaines étoiles symbiotiques est une naine blanche, donc en équilibre par la pression de Fermi des électrons. Elle est en-dessous de la masse limite de Chandrasekhar. Mais si elle accrète de la matière de la géante rouge, sa masse peut augmenter.

Une alternative se produit :

- soit la matière accrétée donne lieu à des explosions fréquentes de type nova, qui l'expulsent et ramènent la masse à une valeur plus faible ;
- soit ces explosions ne se produisent pas, et la masse augmente constamment. Il est alors possible qu'elle dépasse la limite de Chandrasekhar, produisant l'effondrement du cœur. Celui-ci étant dégénéré, l'augmentation de température ne produit pas d'augmentation de pression, et les réactions de fusion se déclenchent et s'emballent, produisant l'explosion totale de l'étoile. C'est une supernova Ia.

Il faudra encore du temps et des études pour comprendre comment se fait la distinction entre ces deux alternatives. Le fait est que l'on observe bien des étoiles symbiotiques qui présentent un phénomène nova récurent, et aussi des supernovæ Ia. Il est peut-être possible que le phénomène nova n'entraîne pas une perte de masse importante, et permette ainsi l'augmentation nécessaire pour arriver à la limite.

**Résumé**

Les étoiles symbiotiques sont caractérisées par :

- Ce sont des binaires de périodes comprises entre 200 jours et plus de 10 ans. Ce sont des étoiles vieilles du disque de la Galaxie, et elles ont des masses comprises entre 1 et 3 M .
- L'une des composantes est une géante rouge. Dans les couples de type D (période > 5 ans), la géante est une Mira qui perd de la masse par un vent stellaire intense. Les autres, de type S (période < 5 ans), perdent leur masse à un taux bien plus faible et ne sont généralement pas des Miras. Quelques unes, de courte période, contiennent une géante qui rempli son lobe de Roche, et qui déverse sa masse sur le compagnon de faible masse, dans un disque d'accrétion.
- Dans une majorité de systèmes, la composante chaude est une naine ou une sous-naine (R = 0,01 à 0,1 M0 ; T = 30.000 à 150.000 K) qui accrète le vent stellaire de la géante rouge. L'énergie provenant de l'accrétion est négligeable devant l'énergie émise par la composante chaude. L'étoile ressemble à l'étoile centrale d'une nébuleuse planétaire. Les photons ultraviolets émis par l'étoile chaude ionise une partie de la nébuleuse, ce qui produit d'intenses raies d'émission (HI, HeI, HeII), et une émission radio. Un faible pourcentage (moins de 10 %), des étoiles symbiotiques contient une étoile naine (SP) entourée par un disque d'accrétion. Les nébuleuses qui les entourent sont petites ; elles n'ont pas été détectées en radio.
- Les symbiotiques montrent une variété déconcertante de comportements éruptifs. Un grand nombre d'explosions sont des emballements thermonucléaires dans l'enveloppe riche en hydrogène d'une naine blanche ou d'une sous-naine. Ces éruptions durent facilement plusieurs décades, et ressemblent à des éruption de novæ classiques. Dans certains cas, les vents stellaires issus des deux composantes, de vitesses différentes, produisent une onde de choc. L'énergie produite par ce choc est dégagée par rayonnement X et par une ionisation intense de la nébuleuse. D'autres éruptions sont produites par des phénomènes d'accrétion dans le disque qui entoure une étole de la Séquence Principale. Ces éruptions sont en général assez courtes, de 1 à 3 ans. Elles peuvent tout de même être spectaculaires.
- Les étoiles symbiotiques peuvent s'interpréter par l'évolution d'un couple d'étoiles de petite masse. Dans la plupart des cas, la géante rouge est est la composante secondaire du couple initial. Dans les seuls couples où l'étoile qui accrète est une naine (SP), la géante rouge peut être le compagnon initialement le plus massif.

Le phénomène symbiotique est donc une phase normale dans l'évolution d'un couple stellaire. L'étoile la plus massive évolue plus rapidement, passe par le stade de géante rouge, où elle émet un fort vent stellaire. Celui-ci peut former une enveloppe en expansion, éventuellement captée par le compagnon moins massif. Mais ce dernier, de masse plus faible, évolue à son tour vers le stade géante rouge, alors que l'ancienne primaire a perdu une grande partie de sa masse. Son cœur dépouillé est chaud, et peut capter le vent stellaire de la géante rouge.

**Avenir**

Les étoiles symbiotiques sont des objets complexes, avec de nombreux paramètres entrant en jeu pour modifier leur comportement. Le scénario proposé ci-dessus s’adapte bien aux différentes observations, et semble donc correct dans ses grandes lignes. Mais bien évidemment, il n’y a pas deux étoiles symbiotiques semblables, et dans le détail, les choses sont très complexes. Pour mieux les maîtriser, il faudra accumuler davantage de données dans différentes longueurs d’onde, et prendre en compte davantage de paramètres. C’est le travail des chercheurs. Mais les ingrédients que nous avons considérés sont suffisants pour une compréhension correcte du problème.

**Bibliographie**

Outre de nombreux textes épars, un livre a fait le point sur ce sujet : *The Symbiotic stars*, S.J.Kenyon, Cambridge Astrophysics Series, Cambridge University Press Première édition 1986

---=OO=---




**L'espace**

Peut-on voir l'espace ? Non ! On voit un objet, situé à une certaine distance. Entre notre œil et l'objet, on ne voit rien. Dans le langage courant, on dit qu'il y a là du vide. Par exemple lorsqu'on se trouve au sommet d'une montagne, et qu'on regarde vers la vallée, ce vide peut donner le vertige. Mais il est facile de constater que ce vide ne l'est pas : il contient de l'air qui devient palpable s'il se met en mouvement.

Le mot *espace*, dans le langage courant, désigne ce qu'il y a entre un objet et nous par exemple. Il devient nécessaire parce que nous pouvons aller vers l'objet. Ce déplacement prend un certain temps, qui est une façon de percevoir la *quantité d'espace* qui était située entre l'objet et nous. On peut aussi se déplacer selon une direction perpendiculaire, et l'espace prend alors une seconde dimension. On peut regarder l'oiseau s'envoler, et il en prend une troisième. Tout ceci reste bien flou, et pour fonder la physique, il a fallu aller bien plus loin.

La physique étudie les mouvements, les objets dans leurs relations les uns avec les autres. Pour définir un mouvement, il faut bien dire d'où l'on part et où l'on arrive. Donc, préciser des positions. Par rapport à quoi ? Par rapport à l'espace, qu'on doit mesurer. Notre concept flou doit donc être précisé, en un modèle mathématique qui permettra des mesures et des comparaisons (deux objet qui sont au même point sont en contact). L'histoire prend là toute son importance.

La notion d'espace a tout d'abord été précisée par les Egyptiens, lorsque chaque année ils devaient reconstruire leur cadastre après la crue du Nil. Il leur a fallu développer une méthode pratique pour retrouver les bornes de leurs champs. C'est l'invention de la géométrie (littéralement : mesure de la Terre), avec les mesures de longueur et probablement aussi d'angles. Les Grecs ont ensuite idéalisé ces notions, et ont produit le premier modèle abstrait de la géométrie.

Ce modèle est celui de la géométrie euclidienne. En effet, pratiquement, il est plus facile d'aller tout droit que de suivre une courbe délicate à reproduire. Donc, la géométrie s'est fondée sur l'étude des lignes droites, et des angles qu'elles forment entre elles. Euclide a formalisé cela dans sa Géométrie Euclidienne, définie à l'aide de postulats.

On peut se faire une idée assez juste de la géométrie euclidienne en regardant un sol pavé de carreaux (carrés par définition). Les deux systèmes de lignes perpendiculaires que les carreaux dessinent représentent les repères entiers de positions particulières. Entre deux de ces repères, on interpole. On peut imaginer une troisième dimension en hauteur. Oubliant les carreaux, ne conservons que les lignes, et imaginons-les matérialisées par des fils de fer. Ajoutons aussi la troisième dimension. Ce grillage représente la structure de l'espace euclidien. On peut remarquer que deux lignes côte à côte sont parallèles, et ne se rejoignent jamais si on prolonge le carrelage indéfiniment par la pensée.

Les postulats d'Euclide sont au nombre de 5. Il est remarquable que les 4 premiers n'aient pas posé de problème d'acceptation, mais que le cinquième soit apparu, pour la plupart des géomètres, comme superflu. A tel point qu'ils ont, pendant des siècles, cherché à le démontrer à partir des 4 premiers… sans succès ! Jusqu'à ce que l'on démontre enfin que ce n'était pas possible (1829, Lobatchevski). Ce cinquième postulat est indispensable pour définir la géométrie euclidienne.

Mais alors, que se passerait-il si on n'acceptait pas ce postulat ? Des géomètres se sont posé le problème à la fin du XIX$^{e}$ siècle. Il leur est apparu que, pour construire une géométrie cohérente et complète, il fallait mettre un cinquième postulat. Donc, ils ont modifié le cinquième postulat d'Euclide. Et ils ont obtenu deux familles de géométries distinctes entre elles et distinctes de la géométrie euclidienne : ce sont les géométries elliptique (courbure positive, Riemann 1867) et hyperbolique (courbure négative, Lobatchevski 1829, Bolyai 1832). La géométrie euclidienne est de courbure nulle.

De ce point de vue, l'espace est donc une construction. Il n'a pas encore de réalité physique. Si l'Univers est fini, l'espace existe-t-il au-delà ? Dans la conception euclidienne, la réponse pourrait être affirmative. Mais Einstein a donné une réponse physique à cette question.

Les deux nouvelles géométries ont été considérées comme de belles constructions mathématiques, jusqu'à ce qu'Einstein s'en empare pour fonder la Relativité Générale.

**Géométrie et topologie**

La géométrie est la mesure de l'espace : étant donnés deux points, on veut déterminer par exemple leur distance. La topologie est d'une autre nature. Se référant elle aussi à l'espace, elle ne considère plus les distances, mais seulement les *possibilités offertes* par la forme de l'espace.

Première idée : imaginez que l'espace soit constitué de deux sphères qui ne se touchent pas. Il sera impossible d'aller de l'une à l'autre. On dit que cet espace n'est pas connexe. Un espace connexe est donc un espace dans lequel on peut joindre tout couple de points (on peut aller de n'importe quel point à n'importe quel autre).

Deuxième idée : puisque les distances, les longueurs, ne sont pas importantes, une boucle est équivalente à une boucle plus petite. Que la boucle soit irrégulière, ou bien soit un cercle parfait, n'a pas davantage d'importante. Et on peut donc rétrécir une boucle indéfiniment, jusqu'à la réduire à un seul point. Mais pas toujours ! Prenez une sphère, et dessinez-y une boucle quelconque. Vous pourrez toujours la réduire à un point par

contraction. Mais si l'espace présente un trou, comme par exemple un tore, certaines boucles ne pourront pas se réduire à un point. Ce sont celles qui enserrent le trou du tore. Mais elles pourront toutes se réduire à une même boucle minimale.

La Relativité Générale traite d'un espace *a priori* connexe, et défini la gravitation comme une déformation géométrique de l'espace-temps. Elle ne prend pas en compte les diverses topologies possibles. Pourtant, ces dernières pourraient avoir un rôle capital dans la perception que nous avons de l'Univers. Dans certaines topologies, une même galaxie pourrait nour donner plusieurs images, d'aspect différent, nous donnant l'illusion d'un nombre apparent de galaxies bien supérieur au nombre réel. L'Univers pourrait aussi nous apparaître plus vaste qu'il n'est en réalité.

Créer des théories mathématiques de l'Univers est bien beau. Mais si ces théories ne peuvent être confrontées avec les observations, elles restent de peu d'intérêt. Or la topologie de l'espace définit des propriétés qui pourront être vérifiées ou infirmées, peut-être pas très rapidement, mais dans un avenir envisageable. Par conséquent, ces théories pourront être soit invalidées, soit justifiées par l'observation.

**Uniformité**

L'espace nous apparaît-il toujours identique ? On peut le considérer dans différentes directions autour de nous, à différentes distances, à différentes époques, à différentes échelles. Ces points de vue nous montrent-ils toujours le même aspect ?

Nous avons vu plus haut que l'on n'observe pas directement l'espace, mais qu'on déduit ses propriétés de l'observation de son contenu. Or les méthodes de cette observation sont diverses. Elles comprennent l'étude du ciel profond, qui permet d'accéder aux galaxies proches et à l'Univers lointain. Elle inclus aussi la physique de l'infiniment petit, puisque là ce sont les mouvements et les interactions des particules élémentaires qui font l'objet d'études. Les particules sont plongées dans un espace, on mesure leur position et leur vitesse un peu à la manière des mesures en Mécanique Céleste.

On constate tout d'abord, que ce soit en Astronomie ou en Physique Nucléaire, que l'espace est continu, tel qu'on l'imagine. Il est connexe : de tout point on peut aller vers tout autre. Par conséquent, une même représentation théorique doit convenir. Mais il faut retenir une leçon de la Relativité Générale : la gravitation s'exprime comme une déformation de l'espace-temps, et le contenu en matière-énergie est indissociable de l'espace-temps lui-même. Alors, à l'autre bout de l'échelle, dans l'infiniment petit, il n'est pas raisonnable d'ignorer la gravitation pour construire une théorie vraiment pertinente. Toutefois, dans les conditions actuelles (celles de nos laboratoires), la gravité étant $10^{39}$ fois plus faible que l'intéraction électromagnétique, il est bien correct de la négliger. Ce n'est plus le cas lorsqu'en cosmologie, on s'intéresse à ce qui s'est passé peu de temps après le Big-Bang. La densité de l'Univers était telle que la gravité était énorme, et il n'est plus question de la négliger. Seulement, à cette échelle, la Mécanique Quantique règne, et la nécessité de réunir ces deux théories en une seule cohérente se fait sentir. Cette théorie n'existe toujours pas à l'heure actuelle.

Lorsqu'on aura réussi à la construire, comment l'espace y sera-t-il décrit ? La Mécanique Quantique nous a appris que l'énergie est quantifiée (non continue). Et puisque l'espace-temps est intimement mêlé à l'énergie, il est fort probable qu'il apparaîtra également quantifié.

Ce que l'on envisage actuellement, c'est un espace-temps microscopique (à des échelles proches de la longueur de Planck), soumis aux relations d'incertitude d'Heisenberg. Sa forme même devrait fluctuer. Et l'image la plus pertinente qu'on puisse donner est celle d'une écume.

L'image de l'espace est un peu analogue à celle de la mer vue d'avion. A très haute altitude, elle apparaît lisse, uniforme, légèrement courbée par la rotondité de la Terre. Plus bas, on distingue des vagues, et bien que sa forme générale soit inchangée, on y voit des fluctuations locales. Enfin, à très courte distance, on voit l'écume, avec des gouttes qui se détachent, puis retombent et s'y réincorporent. Ceci donne une idée de ce que pourrait être l'espace-temps, selon l'échelle à laquelle on l'observe.

**La RG et l'optique**

**Topologie**

Les théories actuelles ne peuvent mêler vraiment Mécanique Quantique, pour la raison que la description de l'espace n'est pas la même&nbspb;: quantifié pour l'une, continu pour l'autre. Dans ce qui suit, nous verrons la structure de l'espace-temps à grande échelle. Pour traiter de topologie, le mieux est de prendre des exemples.

Premier exemple : un plan infini dans toutes les directions possède une topologie simple. Il est connexe, et infini. Si vous tracez une courbe fermée à sa surface, vous pourrez toujours la réduire à un point : la topologie n'a pas de trou.

Deuxième exemple : une feuille de papier. C'est une partie de plan, c'est donc un espace semblable au précédent mais fini. Là encore, toute courbe fermée peut se réduire à un point. Mais la finitude entraîne une différence fondamentale : cet espace topologique possède un bord. Arrivé à ce bord, il n'est pas possible de continuer tout droit, il n'y a plus d'espace au-delà. Il est tentant d'assimiler la finitude de l'espace à la présence d'un bord. Mais ceci est faux, nous en verrons plusieurs exemples.

Troisième exemple : enroulons la feuille de papier pour en faire un cylindre, et collons les deux bords joints. Nous obtenons une topologie d'espace fini, mais différente de celle de la feuille déroulée. En effet, si vous y tracez une courbe fermée qui fasse le tour du cylindre, il vous sera impossible de la réduire à un point. Cette topologie présente un trou.

Quatrième exemple : le cylindre est un bout de tuyau. Prenons un bout de tuyau en caoutchouc pour des raisons de commodité, et enroulons-le de telle manière à rejoindre les deux extrémités. On forme ainsi un tore. Une boucle autour du tuyau ne peut toujours pas être réduite. Mais une boucle le long du tuyau, qui se rejoint à la liaison entre les deux extrémités, ne peut non plus se réduire. Pour bien comprendre cette notion, entourez donc le tore avec une ficelle, et essayez de tirer pour faire un nœud. Pour cette analogie, on donne le nom de *lacet* à ce genre de boucle.

**Monoconnexité, multiconnexité**

Une surface est *monoconnexe* si tout lacet qui y est dessiné peut être réduit à un point. Dans le cas contraire, la surface est *multiconnexe*.

**Conséquences de la topologie**

Prenons le tore à deux dimensions vu plus haut. Il se construit à partir d'un rectangle. Plaçons dans ce rectangle deux galaxies, l'une, notée O, étant celle de l'observateur, l'autre étant nommée G. Les galaxies rayonnent de la lumière dans tous les sens. Mais un seul rayon part de la galaxie G en direction de la galaxie O. De O, on voit donc une image de G et une seule.

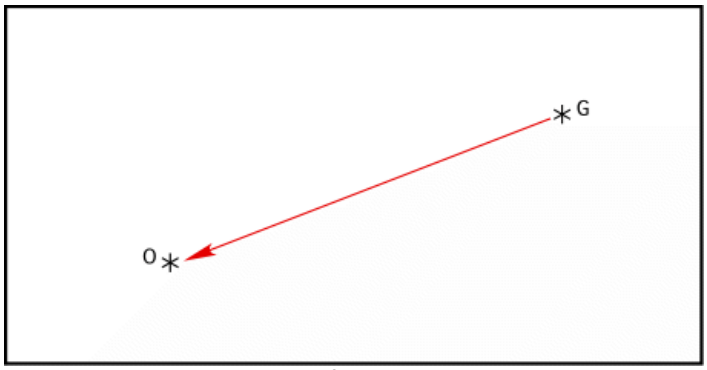



fig. 1

Lorsqu'on enroule la feuille pour produire un cylindre, on identifie ses deux bord opposés. Par collage, chacun des points du bord haut se retrouve identique au point correspondant du bord inférieur (A et B sont réunis en un seul point ; C et D également ; et aussi tout point sur les bords haut et bas, en particulier E et F). Là où on avait un bord, on trouve une continuïté. Par conséquent, un rayon lumineux issu de G qui arrive au bord haut du rectangle, peut continuer sa route à partir du bord bas, bien entendu en ligne droite (puisqu'il y a continuïté au niveau du collage, il n'y a pas de cassure du rayon).

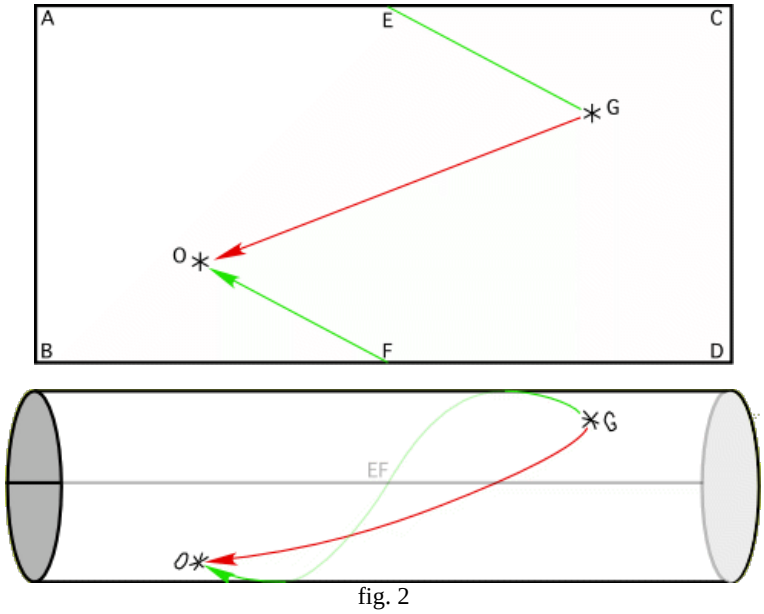



fig. 2

Les deux rayons, rouge et vert, issus de G, arrivent en O (le rouge passe par devant, le vert par derrière). L'observateur voit donc deux images de la galaxie G. Mais ces deux images proviennent de deux directions différentes ! Il aura donc l'impression de voir deux galaxies là où il n'y en a qu'une…

Comment voit-on ces images ?

- Les deux images proviennent de deux directions différentes
- Les deux rayons lumineux, qui les portent, ne sont pas de même longueur. Le rayon rouge a manifestement pris un chemin plus direct pour aller de G à O. L'éclat de la seconde image sera plus faible.
- La lumière se déplace vite, mais pas infiniment. Elle met donc plus de temps le long du chemin vert. Par conséquent, l'image verte est plus vieille que l'image rouge ! Si l'évolution de la galaxie G a été importante dans l'intervalle de temps, les deux images risquent de ne pas se ressembler vraiment.

On voit deux images de la galaxie G, mais sous un angle différent, d'éclats différents, d'âges différents… Il sera bien difficile de prouver qu'il s'agit bien de la même galaxie. Pire encore, nous verrons notre propre galaxie O, telle qu'elle était il y a un certain temps, celui mis par sa lumière pour faire un tour de l'Univers ! Même si c'est un rêve pour un astronome de voir notre Galaxie, il serait bien difficile de la reconnaître…

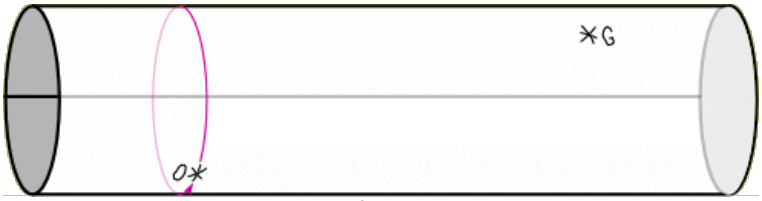



fig. 3

Ces considérations simples indiquent que l'Univers pourrait être plus complexe que ce qu'on imagine en général ; qu'il serait possible de le prouver, mais que ce sera difficile par identification simple des images.

Quelle est la taille de cet Univers ? On peut dire que la galaxie G est éloignée de O d'une distance correspondant au temps mis par sa lumière pour aller de G à O. Mais puisqu'il y a plusieurs chemins possibles pour cette lumière, il y a aussi plusieurs distances ! Evidemment, on peut considérer la plus courte comme étant représentative. Mais si on regarde G par le rayon vert, on verra une galaxie plus lointaine ! On pourrait en déduire que l'Univers est plus grand qu'il n'est en réalité. Voici pourquoi la topologie de l'Univers, si elle présentait ce genre de propriété, pourrait nous faire croire à un univers plus grand qu'il n'est en réalité, et bien plus peuplé.

Cet univers montrerait-il seulement deux images d'une galaxies ? Non, car la lumière pourrait faire plusieurs fois le tour de l'univers avant de nous parvenir :

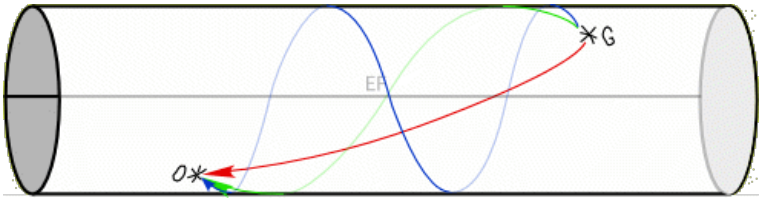



fig. 4

Le rayon bleu fait un tour complet de l'univers avant de parvenir en O. Un autre rayon peut faire deux fois le tour…

**Le tore enfin**

Le cylindre, comme la feuille, est un univers fini, mais il possède encore un bord. Pour obtenir le tore, il faut le courber, et abouter ses deux extrémités, ce qui aura pour effet de supprimer le dernier bord. Tous les rayons que nous avons vus sur le cylindre existent aussi sur le tore ; mais il en existe d'autre encore. Il est facile de concevoir que ce sont des rayons qui passeront par une extrémité du cylindre et par l'extrémité qui lui est collée. Ceci multiplie encore les images d'une même galaxie.

**Tessellation**

La *tessellation* est une représentation plus commode d'un univers (d'une topologie). Nous l'illustrerons d'abord sur le cylindre. S'il est facile de tracer le rayon direct de G à O, il n'est pas si simple de représenter celui qui franchit un bord de le feuille génératrice du cylindre. En fait, il suffit de dessiner deux copies de l'univers pour trouver ce rayon. Plaçons deux copies identiques l'une au-dessus de l'autre :

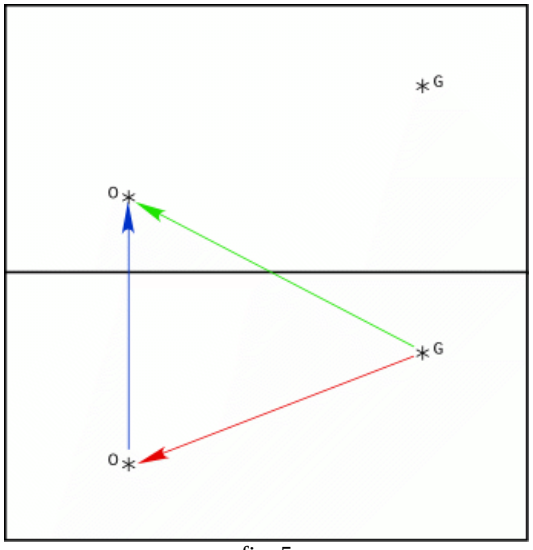



fig. 5

Glissons la copie supérieure sur l'inférieure. La partie du rayon vert qui s'y trouve (dans sa partie inférieure) passera dans la partie inférieure du résultat. De même la partie inférieure du rayon bleu (en haut) se retrouvera en bas, pointant vers la galaxie O (fig. 2 en haut). Enroulant le dessin formé de cette superposition, nous obtenons le cylindre, avec les rayons voulus(fig. 2 en bas).

Pour construire le chemin qui fait un tour complet du cylindre, il faut ajouter une troisième copie :

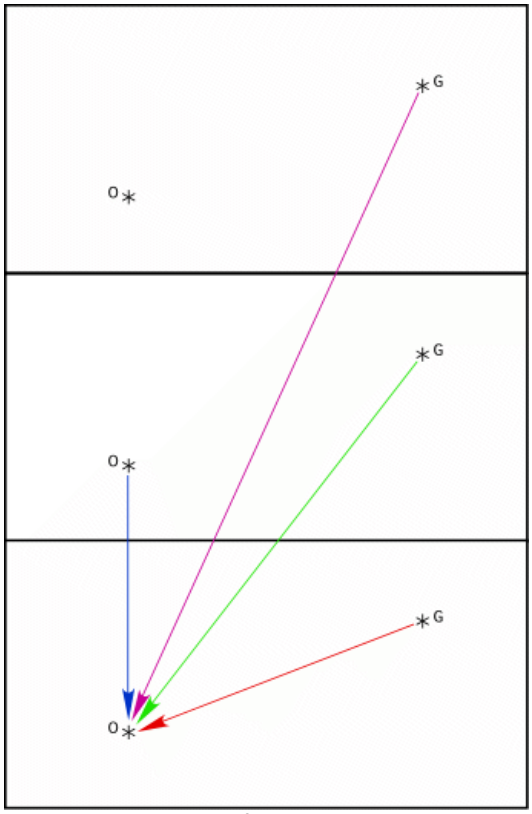



fig. 6

Les bords droit et gauche de ce schéma correspondent aux extrémités du cylindre (l'enroulement se fait selon un axe horizontal). Pour passer du cylindre au tore, il faut identifier ces deux bords. Ce qui revient, en extrapolant la méthode ci-dessus, à reproduire le schéma horizontalement :

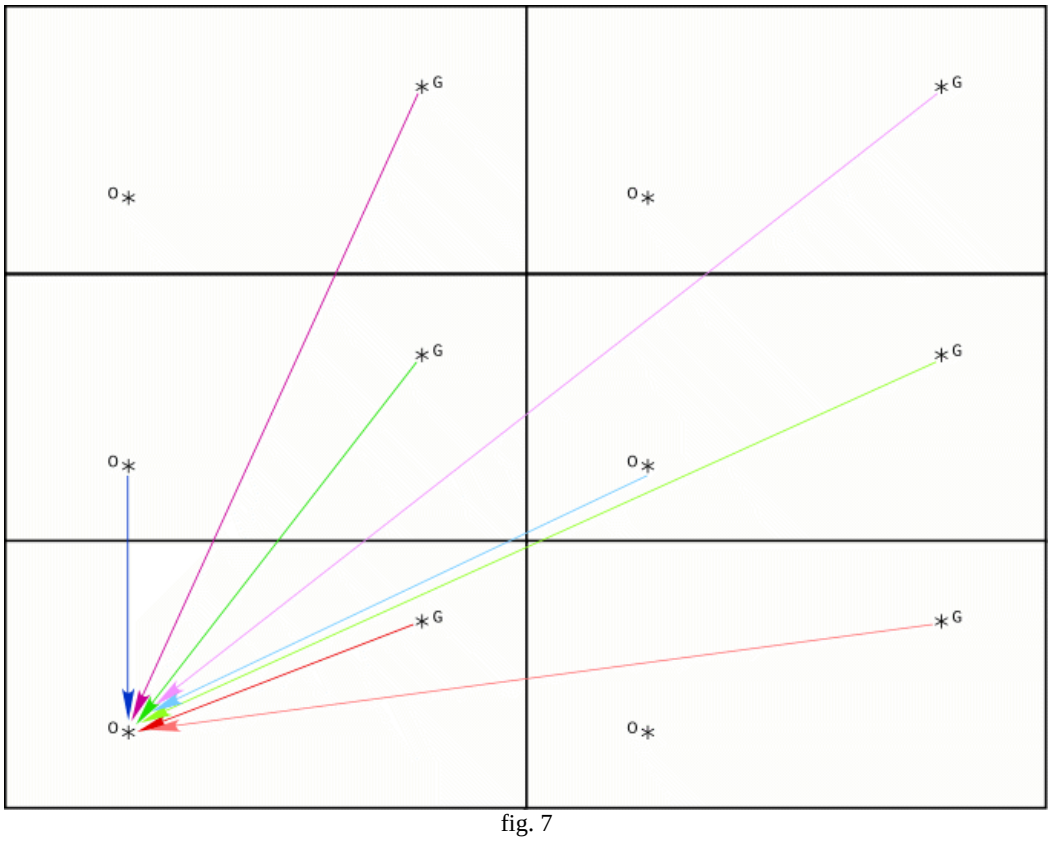



fig. 7

La tessellation correspondant au tore est donc un damier infini, répétition dans les 4 directions d'un motif de base. Le mot tessellation vient de *tesselle*, qui signifie carreau. Un tel pavage est nommé *revêtement universel*.

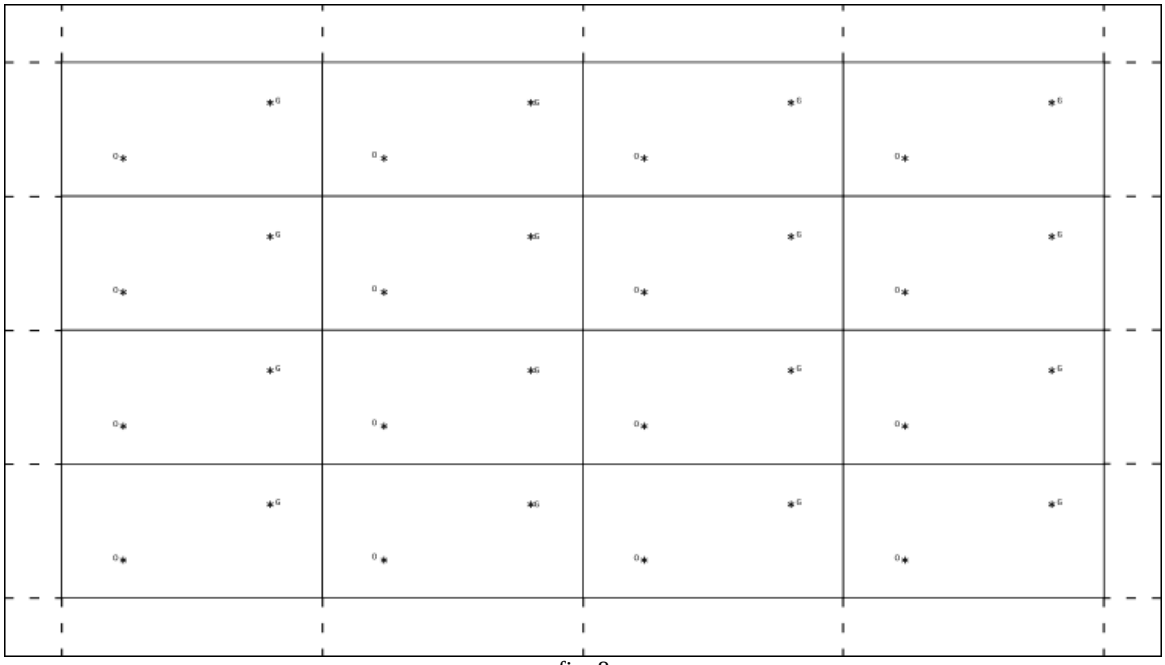


fig. 8

Jusqu'ici, nous avons raisonné sur un univers bi-dimensionnel. Le motif de base est donc un rectangle. Si on passe à trois dimensions, c'est-à-dire à un univers qui ressemble davantage à l'Univers réel, on doit partir d'un parallélépipède. A la place des bords linéaires, on a les 6 faces du parallélépipède. Il faut, de la même manière, associer deux à deux les faces opposées. Le résultat est de même nature que le tore, mais c'est une surface à trois dimensions. On la nomme *hypertore*. Pour visualiser simplement l'hypertore, il faudrait nous trouver dans un espace à 4 dimensions, ce qui n'est pas le cas. Aussi, la représentation mentale est bien difficile à faire, et la tessellation est-elle d'une grande utilité. Dans chacune des directions, il faut imaginer un pavage infini de motifs identiques. Et les images qui se forment dans un tel univers se conçoivent alors facilement.

Il est surprenant de constater que Karl Schwarschild a décrit, en 1900, un univers hypertorique, dans lequel notre propre galaxie donnerait une infinité d'images. Discutant la découverte de ces images, il montre qu'il serait absurde de penser qu'elles sont de véritables galaxies, toutes identiques, et qu'il serait préférable de penser qu'il s'agit de la même, visible dans un hypertore.

Mathématiquement, la tessellation est le pavage d'un plan par un motif. Elle peut être régulière, si tous les éléments sont identiques, ou semi-régulière s'il y a un nombre fini de motifs différents. Les tesselles doivent recouvrir totalement le plan, et sans recouvrement de l'un sur l'autre. On peut facilement produire une tessellation semi-régulière du plan en dépliant une cocotte en papier : elle constitue un carré, lui-même formé de triangles et de carrés plus petits. Ce motif peut se répéter à l'infini pour paver le plan.

**Bande de Möbius**

La bande de Möbius est une bande de papier qu'on colle par ses extrémités, après lui avoir fait subir une torsion. Ceci a pour effet d'identifier les coins de la bande en diagonale. Et cette identification change totalement la topologie de la bande puisque, à l'origine, elle possède deux faces et quatre bords, et qu'après elle n'a plus qu'une seule face et un seul bord.

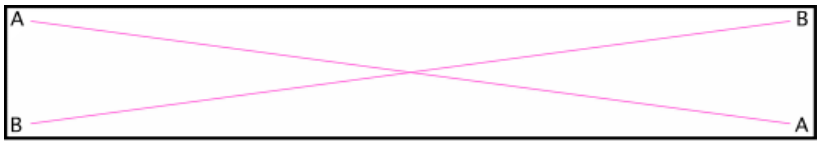



fig. 9

Suivez le bord supérieur de la bande, de A vers B. En arrivnt en B, vous êtes tout aussi bien au point B en bas à gauche, puisque la bande est ainis collée. Suivez maintenant la ligne inférieure, et vous retournez au point A. Vous avez parcouru tout le bord de la bande, de manière continue. La bande n'a bien qu'un seul bord…

Les trois surfaces précédentes sont des topologies multiconnexes (il existe des lacets qui ne se contractent pas en un point), dont la géométrie est euclidienne. Il n'en reste qu'une seule qui est la bouteille de Klein. La bouteille de Klein s'obtient par collage d'une bande, à la manière de Möbius d'un côté, du cylindre de l'autre :

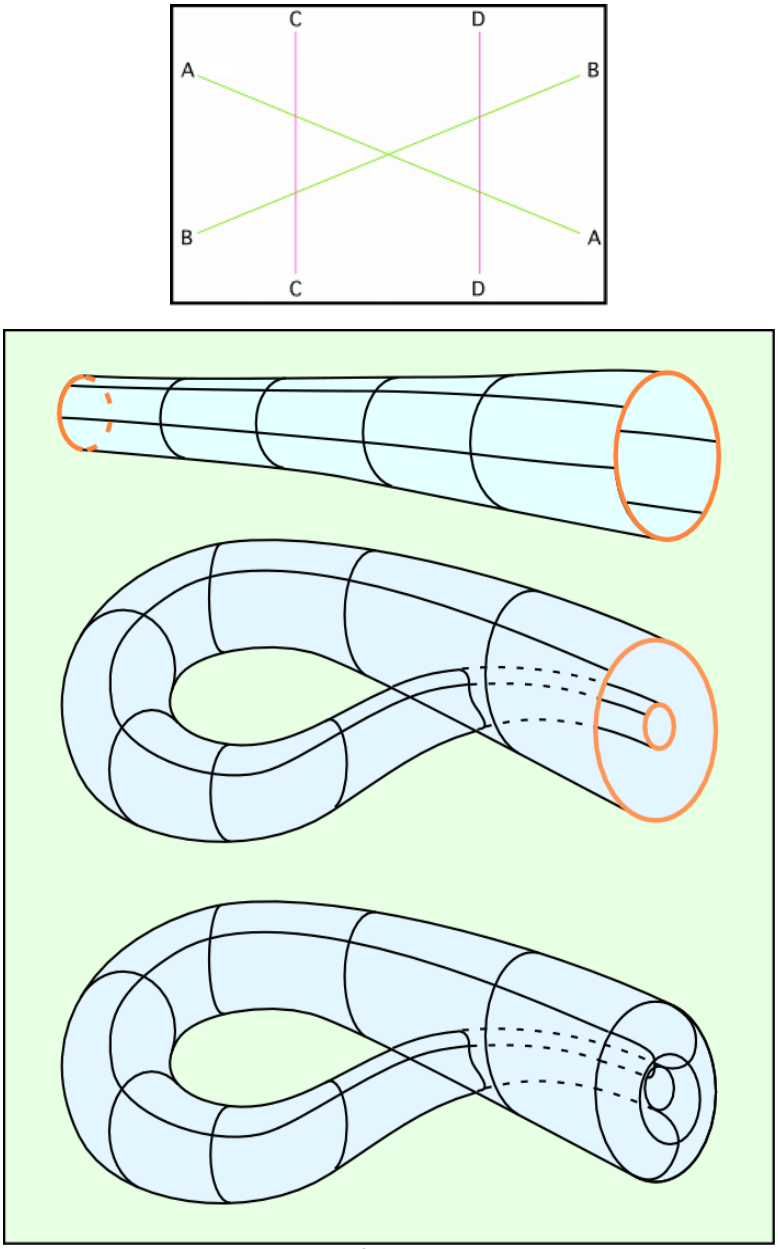



fig. 10

Regardez le premier dessin. Il représente le cylindre (collage des bords CD du carré). Si on enroule normalement ce cylindre, on obtient le tore : avant le collage les deux extrémités du cylindre se font face. Mais au lieu de cela, on replie le cylindre de façon que ses deux extrémités soient orientées dans le même sens. C'est ce qui est produit par le croisement des bords AB. Et puisque les deux extrémités ne se font plus face, il faut bien de replier une pour pouvoir la coller à l'autre.

**Relations géométrie-topologie**

Ce sont deux notions à ne pas confondre. La géométrie est définie par le Relativité Générale, et c'est une propriété locale. Les équations différentielles qui la définissent permettent de trouver un point infiniment voisin d'un point donné. Connaissant un point, et les courbures en ce point, on peut en effet calculer un point voisin. Mais il faudra connaître la courbure en ce nouveau point pour pouvoir aller un peu plus loin. Nous sommes loin d'une connaissance globale de l'Univers dans son ensemble.

Par contre, la topologie s'adresse à la forme globale de l'Univers, ignorant ses propriétés locales.

Nous avons envisagé le tore (topologie) construit à partir d'un cube. Ce tore possède une géométrie euclidienne, car sa courbure est partour nulle. Mais on peut déformer le cuve de base en le gonflant (ses faces deviennent courbes, bombées), et son utilisation pour un pavage donnent un espace elliptique (courbure positive). Alternativement, on peut dégonfler le cube, et provoquer un creusement de ses faces. Leur coubure devient négative, et l'utilisation d'un tel cube dégonflé dans un pavage donne une topologie hyperbolique (à courbure négative).

La connaissance de la géométrie de l'Univers n'implique donc nullement celle de sa topologie. Et les deux sont nécessaires pour définir complètement la structure de l'Univers.

**Autres pavages**

Le tore (ou hypertore) est obtenu à partir d'un carré, et la topologie est fixée par les identifications de points. L'identification consiste à faire correspondre, à un point du bord du motif, un autre point d'un bord opposé. Cette association se nomme *holonomie*.

Il existe d'autres façons de paver l'univers.

**Application à la cosmologie**

Il ne faut pas confondre espace et espace-temps. Le premier est l'espace tel qu'on le concevait du temps de Newton, totalement indépendant du temps. Le second est le mélange intime de l'espace et du temps tel qu'il ressort de la Relativité (Restreinte et Générale). Toute mesure de l'un dépend de l'autre, et ils sont donc inséparables. Mais les notions de courbure et de topologie s'appliquent à un espace, c'est-à-dire à l'une ou l'autre des deux interprétations précédentes. On peut donc parler de la courbure de l'espace, ou de la courbure de l'espace-temps. La première est une déformation de l'espace indépendante du temps (constante donc). La seconde peut varier au cours des âges.

Les notions de topologie peuvent aussi s'appliquer aux deux formes. Mais la cosmologie étant basée sur la Relativité Générale, c'est normalement à l'espace-temps qu'on les adapte.

**Observation**

Créer des théories mathématiques est une activité en soi, mais leur intérêt astrophysique n'apparaît que si ces théories sont vérifiables observationnellement. C'est donc ce problème qu'il faut maintenant aborder.

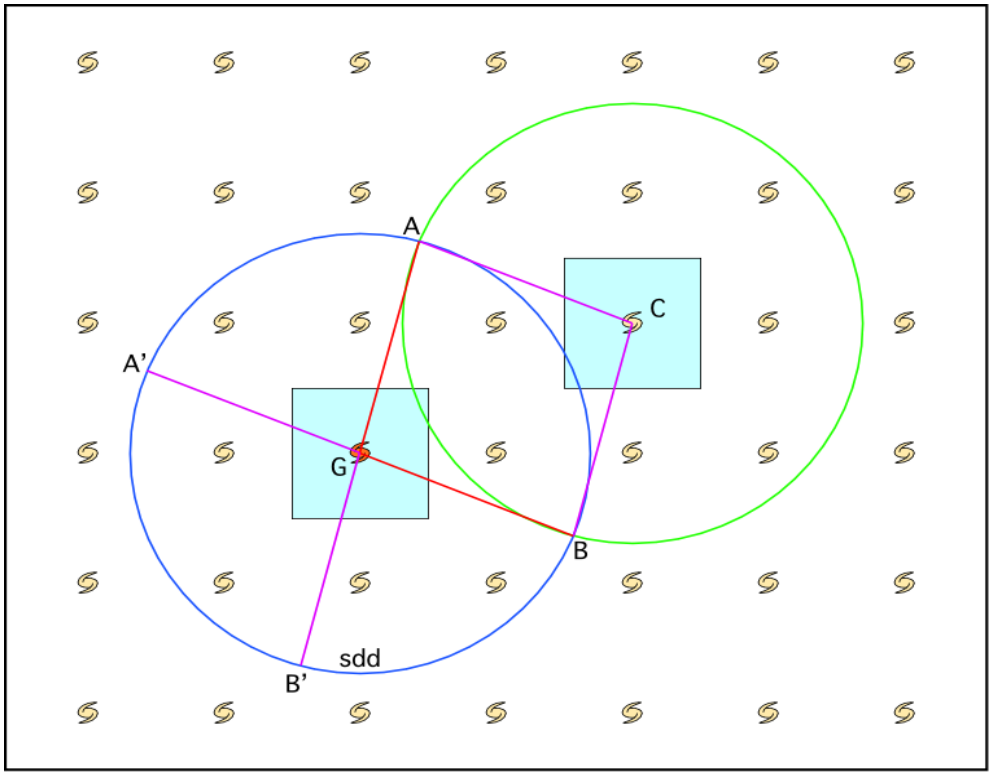
Quelles sont les conséquences de la topologie sur les observations ? La topologie est un phénomène global, qui concerne l'Univers dans son entier. Il faut donc se baser sur une observation intégrale, qui couvre la totalité du ciel. L'Univers aujourd'hui est visible dans les galaxies proches qui nous entourent, pour lesquelles on peut négliger le temps de parcours de la lumière. Cet échantillon n'est donc pas représentatif. Si on veut aller plus loin, il faut observer des objets très faibles, avec un temps de prise de vue bien plus long. Et le champ de prise de vue est très faible, donc la couverture totale du ciel n'est pas possible.

La situation semble donc compromise, mais il existe une observation qui soit globale, et qui, à l'inverse des galaxies, nous montre tout le ciel au même moment ! C'est le fond diffus cosmologique. Sa lumière a été émise au moment où l'Univers est devenu transparent, c'est-à-dire lorsque les électrons se sont accrochés aux noyaux atomiques. Ce phénomène dépend de la température, et celle-ci était décroissant avec l'expansion. De ce fait, cette température a été atteinte brusquement (au sens astronomique du terme) et partout. La lumière, qui était piégée dans la matière chargée, s'est d'un coup trouvée libre dans une matière devenue neutre. Cette époque de l'Univers est nommée *recombinaison*. On peut sélectionner cette lumière, l'isoler de celle qui est produite aujourd'hui, par sa couleur. Au moment où elle a été émise, la température de l'Univers était de 3.000 K. Et l'expansion a refroidi l'Univers depuis. Le taux d'expansion depuis cette époque étant de 1.000, la température a chûté du même facteur, et se trouve maintenant à 3 K. Il suffit donc d'observer à la longueur d'onde correspondante pour voir ce phénomène, isolé du reste de l'évolution de l'Univers.

Considérons la Terre comme point d'observation. Puisque la recombinaison a eu lieu partout au même instant, la lumière qui nous en parvient a mis le même temps pour arriver jusqu'à nous, et donc elle a parcouru la même distance. Par conséquent, nous observons une sphère. C'est ce qu'on appelle la *surface de dernière diffusion*. Il y a donc une grande homogénéïté dans cette observation.

Imaginons qu'on puisse faire la même observatin depuis une galaxie lointaine. Nous observerions aussi une surface de dernière diffusion, mais ce ne serait pas la même, puisque la perspective serait différente, et que les distance aussi seraient autres. La Terre et cette galaxie, seraient centre de deux sphères de dernière diffusion. Si ces sphères sont assez grandes, elles pourraient se recouper. Deux sphères se coupent selon un cercle. Les deux sphères auraient donc un cercle en commun, et les deux observateurs verraient, sur ce cercle, les mêmes objets au même moment, donc à la même température. En mesurant cette température sur le cercle, en admettant que les observateurs puissent communiquer, ils constateraient que la température est bien partout la même sur leurs cercles, et par conséquent qu'ils observent le même cercle. Ces cercles sont nommés *cercles dans le ciel*.

Le point un peu délicat est ici. Il est évident que deux observateurs éloignés (beaucoup) ne peuvent absolument pas communiquer à cause du temps de parcours du signal. Mais il faut ici se placer dans l'état d'esprit correct pour un univers multiconnexe. Prenons un tore pour fixer les idées. Nous avons appris qu'un tore peut se représenter par un pavage dans lequel un motif (l'univers réel) se trouve reproduit une infinité de fois. Toujours en raisonnant à deux dimensions, le motif est un carré, et l'univers est un tore. Notre galaxie est reproduite dans chacun des motifs. Faisons un dessin des surfaces de dernière diffusion vues depuis deux copies de la Terre :




Puisque les deux sphères sont centrée sur deux copies de la Terre, nous verrons l'une vers la droite (sur le schéma), l'autre vers la gauche. Et par conséquent, nous devrons trouver dans le ciel une paire de cercles qui représentent, dans des directions différentes d'observation, une même région de la surface de dernière diffusion (sur le schéma à deux dimensions, les cercles se réduisent aux points A et B, et A' et B'). Par conséquent, si on trouve deux tels cercles dans le ciel, on aura la preuve que la lumière qui en provient a effectivement parcouru deux trajets différents pour nous parvenir, et donc que l'Univers est multiconnexe. On dispose donc d'un test pour déterminer la topologie de l'Univers.

On peut réfléchir plus profondément sur la taille de la surface de dernière diffusion, par rapport à celle du motif. Et selon le rapport entre les deux, les aspects du fond diffus seront différents. Il contient donc l'information nécessaire pour reconstruire la topologie de l'Univers.

Les premières observations du fond diffus sont celles de COBE. Leur résolution était bien trop faible pour qu'on puisse y trouver des paires de cercles conjugués. En effet, on peut trouver quelle est la taille d'une fluctuation typique de température (germe d'un amas de galaxies futur), et l'on trouve que c'est de l'ordre du degré. Il faut donc des observation qui dépassent cette finesse pour être probantes. Ce n'est pas le cas de COBE, dont la résolution est de l'ordre de 8°.

**Bibliographie**

Ce texte a nécessité de nombreuses sources qu'il est impossible de citer toutes.
Mais l'ouvrage le plus synthétique à consulter est celui de Jean-Pierre Luminet, *l'Univers chiffoné*.

---=OO=---




La Mécanique Quantique a été abordée dans d'autres chapitres, pour les nécessités de la compréhension de nombreux phénomènes. Le but du présent chapitre est de remettre certains de ces phénomènes dans un contexte historique qui apporte un éclairage très utile. Il est aussi d'apporter des précisions importantes et des détails sur des points délicats. Les différents aspects de la Mécanique Quantique seront donc revus ici.

**Les quantas**

On parle de quanta parce qu'une lumière **monochromatique** ne peut pas avoir toutes les intensités. S'il nous semble qu'on peut faire varier la quantité de lumière à volonté, c'est parce que la lumière que nous voyons est toujours de grande intensité : notre œil ne nous permet pas de voir de très très faibles éclairements. Mais l'effet photoélectrique, découvert par Hertz, montre qu'il y a un seuil de longueur d'onde, en-dessous duquel il ne se produit pas. Ceci prouve que certaines longueurs d'onde ont suffisamment d'énergie pour le provoquer, d'autres non. La lumière (l'énergie qu'elle transporte) n'arrive que par paquets.

Cette notion de paquet appelle celle de corpuscule : comme la masse est associée à une particule, un paquet d'énergie doit l'être également. C'est de là que vient la notion de photon (particule de lumière).

S'il n'y a qu'une seule couleur, c'est que tous les photons ont exactement la même énergie $E = h \nu$, et par conséquent si on ajoute UN photon, on ajoute l'énergie $h \nu$, et rien de moins. Un groupe de n photons de cette couleur possède l'énergie $E_n = n h \nu$. Un groupe de n + 1 photons de même couleur possède l'énergie $E_{n+1} = (n+1) h \nu = n h \nu + h \nu = E_n + h \nu$.

Il n'est pas possible d'ajouter une quantité d'énergie inférieure à $h \nu$. C'est pourquoi on dit que l'énergie arrive par paquets.

**Spectre de l'hydrogène**

Dans le contexte historique précité, le spectre de l'hydrogène a été étudié expérimentalement, en particulier par Hagenbach à Bâle. Il s'agit d'un spectre de raies, c'est-à-dire qu'il ne présente que quelques couleurs bien précises, et rien entre elles. Hagenbach a précisément mesuré les longueurs d'onde des diverses raies visibles. Aucune logique n'émergeait à l'époque entre ces longueurs d'onde, pour l'hydrogène et pour tous les autres éléments. Mais l'hydrogène étant le plus simple de tous, c'est lui qui a été choisi comme premier objet d'étude.

Hagenbach a donné la liste des longueurs d'onde à un professeur de la ville, Jean-Jacques Balmer, qui a trouvé une formule empirique les représentant. Cette formule n'expliquait rien, bien sûr, mais mettait en lumière un rapport entre les différentes radiations émises par l'hydrogène. Cette formule allait être capitale dans la compréhension du mécanisme d'émission, mais il fallait lui ajouter un principe, qui a été énoncé par Max Planck.

La formule de Balmer fait intervenir un entier n, numéro de la raie (celles-ci étant numérotées à partir de la raie rouge $H_\alpha$) : $1 / \lambda = R_H (1 / 2^2 - 1 / n^2)$. Cet entier représente une notion fondamentale : le spectre de l'hydrogène n'est pas continu mais discret (le terme discret en mathématiques et physique signifie que deux valeurs sont séparées forcément par un intervalle vide). Alors qu'un spectre thermique montre une transition continue entre les différentes couleurs, le spectre d'émission de l'hydrogène ne montre que quelques couleurs précises.

**Rayon des orbites**

D'après la formule de Balmer, Niels Bohr a supposé que l'électron tourne autour du proton (noyau), sur des orbites bien précises, auxquelles sont attachées des énergies bien définies. Il émet un photon lorsqu'il passe d'une orbite à une autre. Et l'énergie emportée par le photon est simplement la différence d'énergie entre les deux orbites d'origine et de destination de son saut.

Niels Bohr a posé une condition qui représente la quantification. Elle porte sur le moment cinétique de l'électron sur son orbite. Le moment cinétique est une notion classique importante, car dans le mouvement elle se conserve : sa valeur ne change pas dans toutes les variations de vitesse, d'accélération… que subit le mouvement, à la seule condition qu'il n'y ait pas de force extérieure appliquée au système.

Notons v la vitesse de l'électron sur son orbite, $m_e$ sa masse. Le moment cinétique de rotation est défini comme la quantité de mouvement de l'électron $P = m_e v$, multipliée par le rayon de l'orbite : $C = m_e v r$.

La condition impose que ce moment cinétique soit un multiple entier d'une valeur, la constante de Planck. Par conséquent, la condition s'exprime par $C = n$ .

Posant cette condition *a priori*, Niels Bohr en a étudié les conséquences, et vu qu'elles étaient en accord avec les observations. Cet accord justifie cette condition *a posteriori*. Nous allons voir maintenant comment on retrouve en particulier la formule de Balmer à partir de cette condition, puis plus loin, nous l'utiliserons comme base de la théorie quantique.

Il est très facile de calculer le rayon des orbites de l'électron dans le modèle de Bohr (vous pouvez sauter ce calcul, et considérer le résultat noté

au-dessous ; mais remarquez bien l'utilisation de la condition). On considère les orbites circulaires, de rayon r. L'électron se trouve donc à la distance r du proton. $\varepsilon_0$ est une constante de l'électrostatique (la permitivité du vide, et e la charge de l'électron.  = h / 2 π est la constante de Planck réduite.

L'électron subit une attraction électrostatique : $F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{e^2}{r^2}$

En tournant, il subit également une force centrifuge (force fictive due à l'inertie) : $F = \frac{m_e v^2}{r}$

Son orbite résulte de l'équilibre entre ces deux forces, qui sont donc égales : $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{e^2}{r^2} = \frac{m_e v^2}{r}$

Après simplification on obtient **l'équation 1** : $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{e^2}{r} = m_e v^2$

Le moment cinétique de l'électron sur son orbite est : $C = m_e v r$

**Et la condition de quantification de Bohr** : $C = n\hbar$

En égalant ces deux expressions, on obtient l'expression de la vitesse de l'électron sur son orbite : $v = \frac{n\hbar}{m_e r}$

Elevant la vitesse au carré, et la portant dans l'équation 1 il vient : $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{e^2}{r} = m_e v^2 = m_e \frac{n^2\hbar^2}{m_e^2 r^2}$

Qui se simlifie en : $\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} = \frac{n^2\hbar^2}{m_e r}$

On en tire enfin l'expression du rayon : $r = \frac{4\pi\epsilon_0 n^2\hbar^2}{m_e e^2}$

On voit que le rayon est proportionnel à $n^2$.

**Energie des électrons**

Le calcul de l'énergie permet de déterminer les longueurs d'onde associées aux différents sauts de l'électron d'une orbite à l'autre. L'énergie totale de l'électron est la somme de son énergie potentielle et de son énergie cinétique.

énergie potentielle $E_p = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$

énergie cinétique $E_c = \frac{1}{2}m_e v^2$

Dans l'expression de l'énergie potentielle, reportons la vitesse obtenue dans l'équation 1 : $v^2 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e r}$

On en tire l'énergie potentielle : $E_c = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r}$

On peut maintenant calculer l'énergie totale : $\frac{-e^2}{4\pi\epsilon_0 r} + \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r} = \frac{-e^2}{8\pi\epsilon_0 r}$

C'est la valeur absolue de l'énergie qui nous intéresse (le signe - nous rappelle qu'il faut fournir de l'énergie à l'électron pour l'arracher à l'atome).

Reportons l'expression de r dans l'énergie correspondant à n : $E_n = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r} = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0}\frac{m_e e^2}{4\pi\epsilon_0 n^2\hbar^2} = \frac{e^4 m_e}{32\pi^2\epsilon_0^2 n^2\hbar^2}$

En remplaçant  par h / 2 π : $E_n = \frac{e^4 m_e}{8\epsilon_0^2 n^2 h^2}$

On peut maintenant calculer les raies spectrales : $h\nu = E_m - E_n = \frac{e^4 m_e}{8\epsilon_0^2 m^2 h^2} - \frac{e^4 m_e}{8\epsilon_0^2 n^2 h^2} = \frac{e^4 m_e}{8\epsilon_0^2 h^2}\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right)$

Et obtenir la fréquence de l'onde : $\nu = \frac{e^4 m_e}{8\epsilon_0^2 h^3}\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right)$

On passe de la fréquence à la longueur d'onde par : $\lambda\nu = c \Rightarrow \nu = \frac{c}{\lambda}$

d'où : $\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{e^4 m_e}{8\epsilon_0^2 h^3}\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right)$

et $\frac{1}{\lambda} = \frac{e^4 m_e}{8\epsilon_0^2 h^3 c}\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right)$

On pose : $R_H = \frac{e^4 m_e}{8\epsilon_0^2 h^3 c}$

Et on obtient l'expression recherchée : $\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$

Remarquez que l'entier n dans cette formule provient de formule donnant r, laquelle dérive de la condition de Bohr. C'est donc cette dernière qui définit les longueurs d'onde

A partir des lois de la Mécanique Classique, et en ajoutant seulement la condition de Bohr, on retrouve donc la formule de Balmer donnant les longueurs d'onde des raies spectrales de l'hydrogène.

Jusqu'ici donc, il n'y a pas eu de bouleversement dans la Physique… Ceci parce qu'on s'intéresse toujours à la lumière seule !

**Mécanique Quantique**

L'étude approfondie de la lumière a donc montré qu'elle était à la fois ondulatoire (interférences, diffraction…), et corpusculaire (effet photoélectrique, rayonnement du corps noir…). Louis de Broglie a eu une intuition géniale, en ce sens particulièrement qu'elle était contre-intuitive. Il a imaginé qu'il pourrait en être de même de toutes les particules, et donc que les particules de matière pourraient avoir aussi une onde associée.

Il est surprenant de voir que la Mécanique Quantique, si différente de la Mécanique Classique, a été bâtie au départ en utilisant les lois classiques !

**Quantification des orbites**

La formule de Balmer est empirique, et le modèle de Bohr est construit sur les lois classiques, modifiées par l'adjonction d'une contrainte pour introduire le caractère discret des orbites. Cet ajout est arbitraire, sans justification théorique. Le modèle marche, mais n'explique rien.

Louis de Broglie est parti d'une approche plus profonde. Les orbites de l'électron sont supposées circulaires, et il leur applique les lois de la mécanique classique. Mais il introduit la contrainte sous une forme bien plus physique. **Il suppose que le moment cinétique C des orbites est quantifié : C = n** .

On fait un calcul très simple, en utilisant les propriétés des orbites circulaires, et celles de ondes.

**ATTENTION !** Dans le calcul qui suit, λ désigne la longueur d'onde de **l'onde associée à l'électron**, qu'il soit en orbite autour du noyau ou pas. C'est une propriétés de l'électron lui-même et non pas, comme la lumière qu'il émet, une propriété de ses changements d'état.

| | | |
|---|---|---|
| 1 | C = n | quantification du moment cinétique |
| 2 | C = P r | définition du moment cinétique d'une orbite circulaire |
| 3 | P = C / r | tiré de la ligne précédente |
| 4 | P = n / r | (1) reportée dans (3) |
| 5 | P = k | impulsion d'une onde, k est le vecteur d'onde |
| 6 | n / r = k | (4) = (5) |
| 7 | n / r = k | simplification |
| 8 | k = 2 π / λ | expression de k en fonction de la longueur d'onde |
| 9 | 2 π / λ = n / r | on égale les deux expression (7) et (8) |
| 10 | 2 π r = n λ | on réordonne |
| 11 | L = 2 π r | on reconnait la longueur de la circonférence |
| 10 | L = n λ | on obtient l'expression de L |

Le résultat indique que, le moment cinétique de l'orbite étant quantifié, la circonférence de cette orbite est égale à un nombre entier de longueurs d'onde. Ceci signifie que l'onde de l'électron, emportée avec lui, se retrouve exactement en phase après un tour. Elle interfère donc avec elle-même de manière constructive !

Si on considère une orbite qui ne vérifie pas cette propriété, elle interfère destructivement, et c'est ce qui explique que l'électron ne peut être stable sur une telle orbite.

Par conséquent, si l'électron emporte avec lui une onde, comme Louis de Broglie l'a supposé, il ne peut utiliser que ces orbites particulères. Le calcul montre que l'on retrouve ainsi exactement la formule de Balmer, et qu'on explique donc les raies de l'hydrogène. On explique aussi les raies des autres atomes, bien que le calcul se complique très vite.

**Spectre du deutérium**

Mais il y a mieux. Le deutérium est l'hydrogène lourd, dont le noyau comporte un neutron. Comment se présentent ses raies spectrales ?

Le modèle planétaire de l'atome de Bhor a été développé dans un contexte classique, en utilisant les lois classiques de la mécanique, et en leur ajoutant, pour répondre aux observations, une loi supplémentaire quantifiant les orbites.

Or le calcul que nous avons ébauché, qui est le calcul initial de Louis de Broglie, suppose que le proton (noyau de l'atome d'hydrogène) est parfaitement fixe. C'est une approximation tout à fait valable, puisque le proton est 1 840 fois plus lourd que l'électron, et donc, comme pour les planètes autour du Soleil, le petit corps perturbe peu le gros. Mais Louis de Broglie a cependant refait un calcul plus précis en tenant compte de l'entraînement du proton.

Notons $m_P$ la masse du proton. Soit $\varepsilon = m_e / m_P$ le rapport de la masse de l'électron à celle du proton. $\varepsilon$ vaut à peu près 1 / 1 840. Alors, l'expression de la constante de Rydberg est légèrement modifiée : $R = R_H / (1 + \varepsilon)$.

Ceci n'a pas eu d'influence importante sur l'atome d'hydrogène, mais a permi la découverte du deutérium. Urey, en 1932, a observé que la raie $H_\alpha$ de l'hydrogène était flanquée, du côté violet, d'une raie faible à environ 2 . Cette raie s'explique simplement en considérant un noyau deux fois plus lourd que celui de l'hydrogène (le neutron et le proton ont pratiquement la même masse). Le rapport de masse de ce noyau $\varepsilon' = m_e / 2 m_P = \varepsilon / 2 = 1 / 3\,680$. Les raies de ce noyau se trouvent donc décalées par rapport à celles de l'hydrogène de $\varepsilon / 2$.

Le spectre du deutérium a donc été découvert avant le deutérium lui-même. Et cette explication indique en même temps où se trouvent les raies de cet isotope de l'hydrogène.

**Les relations d'incertitude**

Les relations d'incertitude d'Heisenberg ont été formulées en 1927 à partir d'une analyse de la notion de mesure. Mais elles proviennent plus profondément de la nature ondulatoire de la matière. Nous allons exposer successivement, de manière succinte, ces deux approches.

**Relations d'incertitude par la mesure**

Lorsque Heisenberg s'est penché sur le problème de la mesure des grandeurs à l'échelle microscopique, il possédait la mécanique classique, dont les succès dans le système solaire étaient impressionants. L'idée la plus naturelle était évidemment d'appliquer ces principes à une échelle plus petite. Mais dans le cas des planètes, dont la masse est énorme, on peut très facilement mesurer simultanément la position et la vitesse. Alors, ces deux valeurs étant connues, l'applicaton des lois de la mécanique permet de prévoir les position et vitesse à tout instant ultérieur. C'est le déterminisme de la Mécanique Classique.

Heisenberg a réfléchi à l'abîme immense qu'il y a entre la masse d'une planète et celle d'un électron. Comment mesure-t-on la position et la vitesse d'un électron ? Pour une planète, la lumière nous apporte ces informations. Qu'en est-il pour une particule ?

Pour éclairer une planète, il faut un grand nombre de photons. Chacun possède une énergie qu'il cède à la planète lorsqu'il vient la frapper. Mais cette énergie est négligeable par rapport à l'énergie cinétique d'une telle masse. Par contre, si le même photon vient frapper un électron, les choses se présentent d'une manière bien plus violente. L'énergie du photon perturbe gravement le mouvement de l'électron. On comprend bien alors qu'après avoir mesuré ainsi la position de l'électron, sa vitesse a été changée, et la mesure qu'on va en faire n'est plus exacte. Elle sera forcément entachée d'une erreur.

| Dans le domaine macroscopique, on peut s'arranger pour que la perturbation produite par la mesure soit négligeable ; dans le domaine microscopique, c'est impossible. |
|---|

Heisenberg a supposé que la quantité de mouvement p de l'électron a été mesurée avec grande précision. Pour mesurer sa position, imaginons de l'observer avec un microscope. On sait qu'un instrument d'optique ne donne qu'une précision limitée par la longueur d'onde de la lumière utilisée. Cette précision est limitée à la moitié de la longueur d'onde : $\Delta x = \lambda / 2$. Pour faire la mesure de position, il faut qu'au moins un photon ait été dévié par l'électron, et viennent impressioner notre œil. Le choc subi par l'électron lui confère une énergie, celle du photon $E = h \nu$. $P = h / \lambda$. Si le photon est renvoyé en sens inverse, sa quantité de mouvement change de signe. Pour cela, il faut l'arrêter, c'est-à-dire communiquer une impulsion $p = h / \lambda$, puis le renvoyer en sens inverse avec la même implusion, donc encore $p = h / \lambda$. Au total donc, l'électron aura acquis une impulsion de $\Delta P_x = 2 h / \lambda$ (au maximum ; on ignore totalement dans quel sens le photon frappe l'électron, ce qui fait que l'impulsion acquise est comprise entre 0 et $2 h / \lambda$).

Faisons le produit $\Delta x \, \Delta P_x = \lambda / 2 \times 2 h / \lambda = h$. Puisque l'erreur ne peut pas être inférieure, on en déduit immédiatement que :

$$\Delta x \quad \Delta P_x \geq h.$$

On nomme souvent les relations de ce genre *relations d'incertitude*. Cette appellation n'est pas bien correcte, parce qu'elle semble dire que nous ne sommes pas capables de faire les mesures, et que davantage de précautions pourraient donner un meilleur résultat. Le raisonnement précédent montre déjà le contraire, mais la seconde façon d'obtenir ces relations lève tout doute à ce sujet.

**Relations d'incertitude par la méthode de Fourier**

Cette aproche est plus difficile à appréhender, car elle est plus mathématique. Elle s'appuie sur une analyse de l'onde que Louis de Broglie a associée aux particules de matière. Une onde sinusoïdale simple telle que $\sin \omega t$ se traduit par un graphe infini dans les deux sens, donc par une onde d'extension infinie. Il n'est pas question de ça dans l'idée de Louis de Broglie. Au contraire, il s'agit d'une onde a portée très limitée. Ce n'est donc pas une sinusoïde simple.

L'onde associée à une particule matérielle doit être limitée à un petit domaine autour de celui-ci. Il faut donc trouver un moyen de construire une telle onde, mathématiquement, limitée.

On sait très bien que les ondes se mélangent par interférences, constructives ou destructives. Si on additionne deux ondes de fréquences différentes, on obtient une onde modulée. Et Fourier a montré qu'on peut très bien former une onde limitée à un petit domaine, nulle partout ailleurs, en ajoutant des ondes (en nombre infini). Plus précisément, si l'onde est non nulle entre $t_1$ et $t_2$, c'est-à-dire sur un intervalle de longueur $\Delta t = t_2 - t_1$, elle se représente par une somme d'ondes de pulsations $\omega$ telles que $\Delta\omega \times \Delta t \geq 2 \pi$.

La somme de toutes ces ondes s'appelle un *paquet d'onde*, et caractérise l'état d'une particule. Remarquez bien en effet qu'il ne s'agit par d'une onde simple, dont l'extension serait infinie, mais bien de la somme de toutes ces ondes élémentaires, chacune d'extension infinie, mais dont la somme n'est non nulle que dans l'intervalle considéré.

La relation E = ω permet d'écrire : ΔE / × Δt ≥ 2 π. D'où : ΔE / × Δt ≥ 2 π × = h

$$\Delta E \times \Delta t \geq = h$$

Nous avons retrouvé la même relation, par une méthode qui semble différente, mais qui est tout autant basée sur les propriétés mathématiques des ondes. Ces relations découlent donc de la nature ondulatoire de la matière, et sont incontournables. Nulle technique de mesure, si élaborée soit-elle, ne pourra les contourner.

**Quelques explications**

> *L'existence du quantum d'action implique une sorte d'incompatibilité entre le point de vue de la localisation dans l'espace et dans le temps et le point de vue de l'évolution dynamique ; chacun de ces points de vue est susceptible d'être utilisé pour la description du monde réel, mais il n'est pas possible de les adopter simultanément dans toute leur rigueur. La localisation exacte dans l'espace et dans le temps est une sorte d'idéalisation statique qui exclut toute évolution et tout dynamisme ; l'idée d'état de mouvement prise dans toute sa pureté est par contre une idéalisation dynamique qui est en principe contradictoire avec les concepts de position et d'instant.*
>
> *Louis de Broglie*
> *La physique nouvelle et les quanta*

La Mécanique Classique partait de l'hypothèse que la position ET la vitesse d'un objet quelconque peuvent être mesurés avec la précision que l'on souhaite. C'est vrai dans le domaine macroscopique, mais pas pour l'étude des particules. Louis de Broglie explique la différence entre deux façons d'aborder les choses : soit on les considère statiques, et on mesure leur position ; soit on les considère dynamiques, et on mesure leur vitesse (exactement leur impulsion, produit de la masse par la vitesse). Ces deux points de vue, compatibles en Mécanique Classique, ne le sont plus en Physique des Particules.

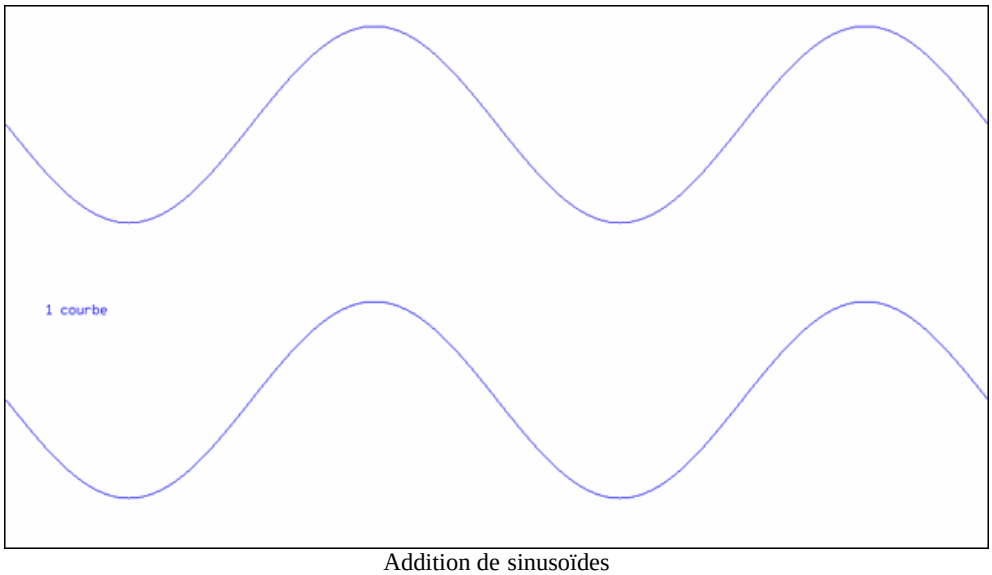
La Mécanique Quantique est forcée d'utiliser un peu de ces deux approches pour décrire les phénomènes. La proportion de chacune est précisée par les relations d'Heisenberg. Vous remarquerez que la plus connue de celles-ci, $\Delta x \, \Delta P_x \geq$ , relie deux variables x et $P_x$, la première étant une variable de position, traduisant le point de vue statique, la seconde $P_x$ étant une variable de mouvement, conformément au second point de vue. Et l'inégalité montre que si on augmente la prise en compte du point de vue statique (en diminuant l'incertitude sur x), on diminue forcément l'importance du point de vue dynamique, en augmentant l'incertitude sur $P_x$.

Les inégalités d'Heisenberg montrent donc la balance entre ces deux points de vue.

**Explications sur les inégalités d'Heisenberg**

Partant du principe que chaque particule possède une onde associée, et que cette onde ne s'étend pas à l'infini, il s'agit de construire mathématiquement cette onde. En évitant au maximum les formules, nous allons tout de même essayer de montrer visuellement comment les choses se passent.

On connait la forme d'une sinusoïde, courbe représentant la fonction sinus. On peut définir la somme de deux fonctions en additionnant simplement leurs valeurs en chaque point. Ainsi, on peut additionner deux sinusoïdes. Ou plus… Le résultat se voit sur l'animation ci-dessous :



Addition de sinusoïdes

L'animation montre comment on peut synthétiser une courbe en créneau à l'aide d'un nombre suffisant de sinusoïdes. La partie supérieure montre la superposition des sinusoïdes ; la courbe inférieure est leur somme.

| nb courbes | somme |
|---|---|
| 1 | $f_1(t) = \sin(\omega t)$ |
| 2 | $f_2(t) = \sin(\omega t) + 1/3 \sin(3 \omega t)$ |
| 3 | $f_3(t) = \sin(\omega t) + 1/3 \sin(3 \omega t) + 1/5 \sin(5 \omega t)$ |
| … | … |

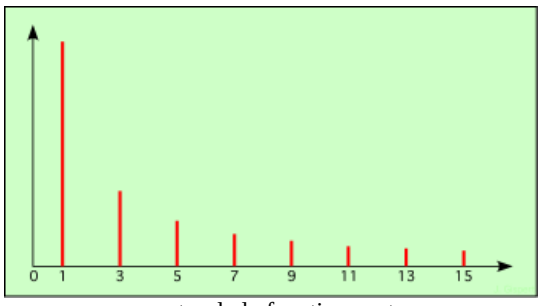
Sur l'animation, on voit immédiatement que, plus on ajoute de termes, plus la courbe prend la forme d'un créneau.

Ces fonctions représentent *le spectre* de la fonction considérée. Pour la fonction $f_2(t) = \sin(\omega t) + 1/3 \sin(3 \omega t)$ par exemple, le spectre comprend deux raies : ω et 3 ω, avec les amplitudes respectives 1 et 1/3. On peut compléter le tableau précédent :

| **nb courbes** | **somme** | **raies** | **amplitudes** |
|---|---|---|---|
| 1 | $f_1(t) = \sin(\omega t)$ | ω | 1 |
| 2 | $f_2(t) = \sin(\omega t) + 1/3 \sin(3 \omega t)$ | ω, 3 ω | 1, 1/3 |
| 3 | $f_3(t) = \sin(\omega t) + 1/3 \sin(3 \omega t) + 1/5 \sin(5 \omega t)$ | ω, 3 ω, 5 ω | 1, 1/3, 1/5 |
| … | … | … | … |

La dernière courbe représentée dans l'animation est la somme de 100 sinus ; elle a donc un spectre contenant les 100 raies ω, 3 ω, 5 ω,…, 100 ω. Vous remarquez qu'elle est toujours périodique, et que sa période est la même que celle de la première sinusoïde (ω). Si cette fonction était injectée dans un amplificateur, on entendrait un son correspondant à cette fréquence. Quand à la nature du son, il serait d'autant plus riche qu'il y a plus de termes : la première fréquence, la plus basse, est le *fondamental*, les autres sont les *harmoniques* (multiples du fondamental).

On peut représenter sur un graphique le spectre correspondant :



spectre de la fonction porte

Les traits verticaux rouges représentent chacun une raie spectrale. Leur position (1, 3 …) indique la pulsation (équivalente à la longueur d'onde) de la raie ; leur hauteur indique l'amplitude de la raie (son intensité).

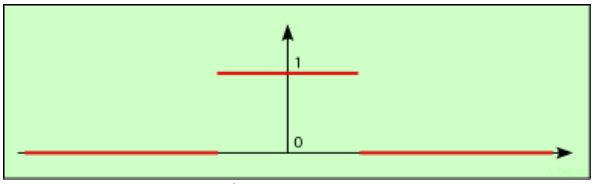
> **Remarque** : si on vous donnait seulement les nombres ω, 3 ω …, et les amplitudes correspondantes, vous pourriez reconstruire la courbe. Si on enregistre sur un disque de tels nombres, et si on les utilise pour fabriquer cette fonction, on pourra l'injecter dans une chaîne HiFi, et on aura réinventé le disque compact…

On a donc réussi à fabriquer, par addition de sinusoïdes, une courbe qui reproduit à l'infini un paquet d'ondes ! Il faut maintenant le limiter à une seule copie.

Tant qu'on sommera des sinusoïdes écartées (laissant un trou entre 3 ω et 5 ω par exemple), on obtiendra toujours une fonction périodique. Même en additionnant une infinité de sinusoïdes. Il faut donc accepter de supprimer les trous entre deux raies, et par conséquent de passer d'un spectre de raies, à un spectre continu !

La question est donc de savoir si on doit considérer toutes les valeurs possibles de ω, ou si on peut se limiter à un intervalle par exemple.

La méthode mathématique utilisée pour trouver les raies spectrales plus haut est basée sur les séries de Fourier, qui font une addition discrète (avec des trous entre les fonctions additionnées). Il faut généraliser en supprimant les trous, ce qui se fait en passant d'une somme à une intégrale. Mais le but ici n'est pas de faire des calculs, et nous allons préciser le résultat que l'on veut atteindre :



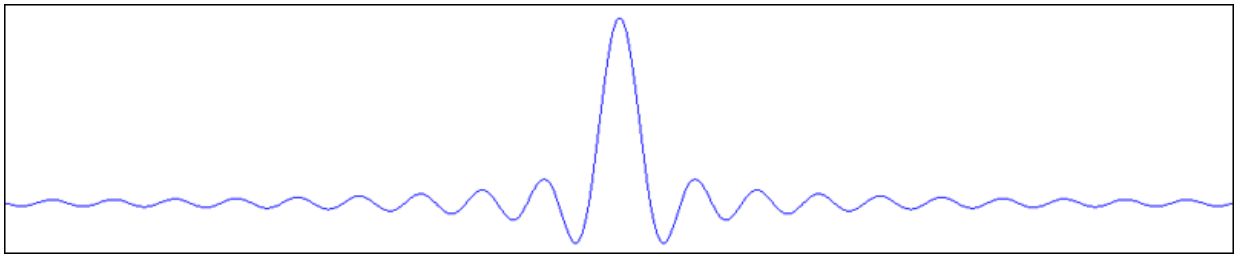
fonction porte

La fonction représentée ci-dessus représente un seul créneau. Elle vaut 1 autour de l'axe vertical, et 0 partout ailleurs. C'est elle que nous voulons représenter.

Un petit calcul que nous ne ferons pas ici montre que le spectre de cette fonction n'est plus un ensemble de raies munies de leurs amplitudes, mais une nouvelle fonction, qui nous donne l'amplitude correspondant à chaque valeur de ω :

$$F(\omega) = \frac{2}{\sqrt{2\,\pi}} \frac{\sin \frac{\omega\,\tau}{2}}{\omega}$$

On voit apparaître un rapport de sin ω et ω. Cette fonction joue donc un grand rôle, et on la nomme *sinus cardinal*.



La courbe représente la fonction sinus cardinal, définie par sinC(x) = sin(x) / x. A priori, elle n'est pas définie au point 0, mais elle est continue à gauche et à droite de 0, et les limites sont égales à 1. On peut donc la prolonger par continuité par sinC(0) = 1. Sa courbe est parfois nommée *courbe sombrero*, pour une raison évidente !

On peut voir que cette courbe présente une valeur élevée au voisinage de 0, mais que ses valeurs diminuent rapidement en s'en éloignant, du côté négatif comme du côté positif. Puisqu'elle représente le spectre de la fonction porte, on comprend bien que seules les fréquences autour de 0 sont utiles.

> Ceci nous montre qu'une onde d'étendue limitée est le résultat d'un paquet d'ondes dont les fréquences sont comprises dans un intervalle.

C'est par un tel procédé qu'on définit le paquet d'onde en Mécanique Quantique.

Mais là ne s'arrête pas la question. Quelle est la largeur de l'intervalle de fréquences à considérer ? Y a-t-il une relation entre cette largeur et la largeur de la fonction prote elle-même ?

La réponse est capitale, et elle est affirmative !

On démontre en effet que :

$$\Delta\omega \times \Delta t \geq 2\pi$$

$\Delta\omega$ est la largeur de l'intervalle de fréquences ; $\Delta t$ est celle de l'intervalle de temps considéré.

Reprenons la relation fondamentale que Louis de Broglie a utilisée en associant une onde à chaque particule :

$E = h\nu = h\omega / 2\pi$ (puisque $\omega = 2\pi\nu$) = $\omega$

Soit $\omega = E /$ et donc $\Delta\omega = \Delta E /$

Remplaçons $\omega$ par cette valeur dans l'inégalité :

$\Delta E / \times \Delta t \geq 2\pi$

$\Delta E \times \Delta t \geq 2\pi$ = h

$$\Delta E \times \Delta t \geq h$$

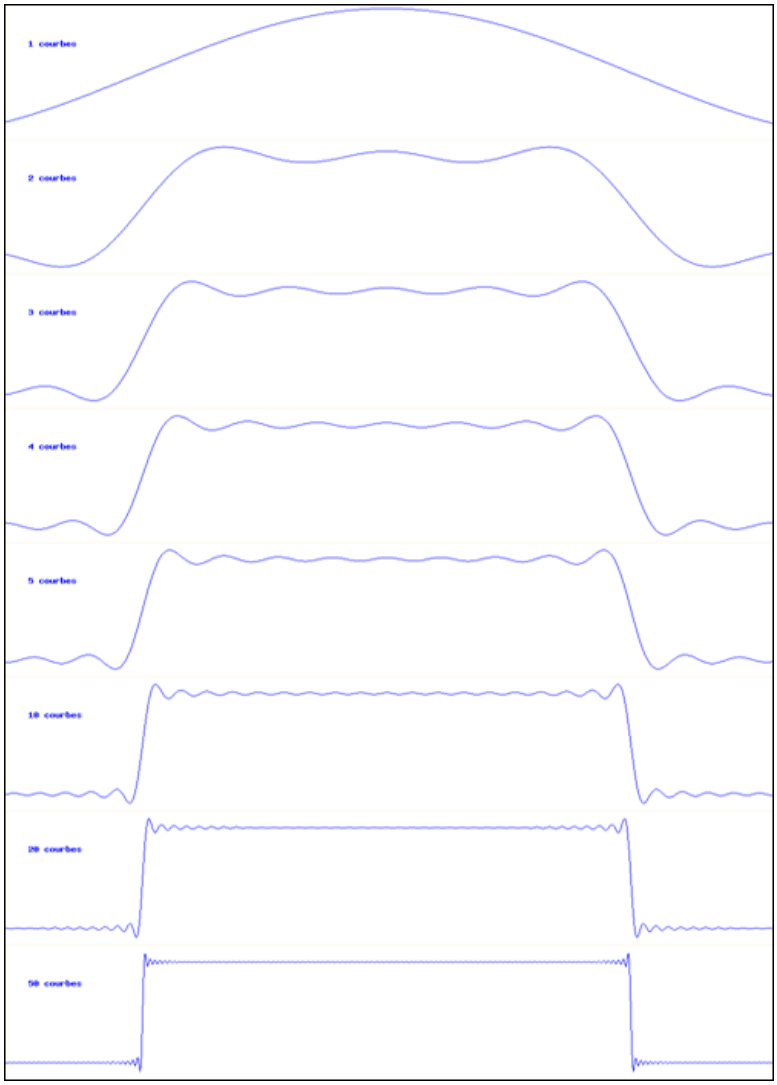
On vient de démontrer la première des relations d'incertitude d'Heisenberg…

> La démonstration en soi n'a pas grand intérêt. Mais ce qui est important, c'est qu'elle montre la filiation entre ces relations d'incertitude et l'association d'un paquet d'onde à une particule. Si on admet cette dernière, on est obligé d'admettre également l'incertitude…

Bien qu'Heisenberg ait obtenu ces relations par une analyse des perturbations que l'on produit sur une particule en l'observant, elles proviennent de la nature ondulatoire profonde de la matière. Et elles sont donc incontournables : nul progrès ne pourra nous en affranchir !

**Onde progressive**

Le paquet d'onde associé à une particule, doit être lié à elle, et donc se déplacer avec elle. Considérons le système de coordonnées lié à la particule. Dans ce système, il est évident que l'onde est au repos, donc stationnaire (sin $\omega$ t). Mais si on considère un repère par rapport auquel la particule (avec son onde), se déplace à la vitesse v, l'application de la transformation de Lorentz à l'onde montre qu'elle devient progressive, c'est à dire qu'elle se déplace dans ce système (utiliser la transformation du temps, et la reporter dans le sinus). Et on obtient simultanément la vitesse d'entraînement, qui est évidemment celle de la particule.




La fonction tracée est la somme :

$$f(x) = \sin \omega t + \tfrac{1}{3} \sin 3\omega t + \tfrac{1}{5} \sin 5\omega t + \ldots$$

Vous remarquerez qu'elle est périodique. Le créneau se répète à l'infini.

Considérons un essaim d'abeilles. Il est impossible de déterminer la trajectoire de chaque abeille. Pourtant la trajectoire de l'essaim entier est facile à décrire. Il en est de même avec les particules. Chacune nous échappe dans le détail de son mouvement, mais l'ensemble, qui constitue un objet macroscopique, se laisse bien décrire par les lois de la Mécanique Clasique.

## *Conclusion*

Si la Mécanique quantique recèle un mystère, ce n'est pas dans la quantification elle-même, ni dans le Principe d'Incertitude qu'il faut le rechercher. Les deux sont la conséquence de l'association d'une onde à chaque particule.

Le mystère, s'il y en a un, se trouve donc dans cette onde qui accompagne la particule. Mais ce n'est un mystère que parce que nous sommes très gros ! Nous sommes constitués de milliards de milliards de particules, et à notre échelle, les mécanismes quantiques probabilistes sont moyennés et deviennent naturellement les lois certaines de la Physique Classique, celles auxquelles nous sommes habitués, et que nous trouvons naturelles….

---=OO=---




## *But des recherches*

L'exploration de Mars nécessite des moyens importants, et par conséquent le soutient des politiques, qui détiennent les cordons de la bourse. Aussi, les projets doivent-ils avoir un fort pouvoir motivant. Comment convaincre les décideurs en leur proposant d'aller analyser quelques cailloux ? La recherche de la Vie extraterrestre est un thème bien plus porteur.

Le guide essentiel dans cette recherche est l'analogie, avec ses limites, entre la Terre et Mars. On peut extrapoler les connaissances que nous avons sur notre planète, à la condition de le fait prudemment et de vérifier si les conclusions qu'on en tire sont valables dans l'environnement martien. Dans les mêmes conditions, la Lune peut servir de guide pour la géologie, et les datations.

Les scientifiques ont une autre motivation pour explorer Mars : l'analogie inverse. Si l'observation de la Terre nous guide pour comprendre Mars, réciproquement ce qu'on apprend sur Mars, ayant suivi une évolution très différente, nous permettra de bien mieux comprendre notre propre planète. Et peut-être d'éviter de faire des catastrophes… on peut rêver !

L'évolution de Mars à été déterminée par sa masse  plus importante que celle de la Lune, elle lui a donné une importante activité interne et volcanique  moins importante que celle de la Terre, elle a interdit la tectonique qui efface toutes traces en quelques centaines de millions d'années.

### Caractérisation des recherches

La Vie est bien mal définie. À vrai dire, nous ne savons pas comment la caractériser, n'ayant qu'un seul exemple à notre disposition : la Terre. Et sur cette dernière, la Vie est liée à l'eau. Y a-t-il des planètes où la Vie existerait sans eau ? Nous n'en savons rien, et par conséquent nous ne savons pas que chercher. Aussi, la position la plus raisonnable est-elle de chercher ce qu'on connait en priorité.

il n'y a pas d'éléphants sur Mars… le seul espoir qu'il nous reste est d'y découvrir une vie microbienne.

C'est sur ces remarques que sont basés tous les programmes actuels. Il ne faut donc pas s'étonner si l'exploration de Mars consiste tout d'abord à y rechercher à la fois de l'eau et des molécules organiques. Nous verrons que la recherche directe d'eau liquide a été infructueuse, et qu'on doit se résoudre à chercher des indices indirects. En particulier des roches hydratées, ou bien dont la formation nécessite de l'eau.

Cette quête a permi, indirectement mais en gardant le but initial, de pratiquer de la géologie martienne. Grâce à quoi on commence à bien connaître non seulement la géologie, mais aussi l'histoire de Mars.

La pression atmosphérique a été mesurée pour la première fois par la sonde soviétique Mars 6. Elle valait 5,5 mb le jour de l'atterrissage. La pression varie beaucoup avec l'altitude, comme sur Terre, mais sur Mars les valeurs sont importantes. Pour que l'eau soit stable sous forme liquide, il faudrait une pression d'eau moins ?? mb. Mais elle est toujours plus faible, et l'eau ne peut se trouver que sous forme de glace ou de vapeur à la surface de Mars.

### L'eau

La Terre abrite des océans aujourd'hui, et depuis longtemps. Quand se sont-ils formés ? À Jack Hills, en Australie, on a trouvé des zircons ($ZrSiO_4$) vieux de 4,1 milliards d'années (ils contiennent des inclusions d'uranium radioactif, permettant de dater leur formation). Ils sont enrichis en $^{18}O$, ce qui s'explique par leur formation dans une atmosphère en contact avec un océan (l'évaporation se fait au-dessus des océans, et les premières pluies précipitent de l'eau plus lourde contenant $^{18}O$ au-dessus des océans). C'est le meilleur indice de la présence d'un océan sur Terre dans ces temps reculés. On utilise des moyens de même nature pour savoir si Mars a eu des océans dans le passé.

Mars Express a découvert le premier réservoir d'eau à la surface de Mars. Ce dont les deux calottes polaires, qui sont constituées essentiellement de glace d'eau. Elle a montré de plus qu'à leur surface se dépose en hiver une couche de quelques mettes tout au plus de glace carbonique.

### Rappel sur la formation des planètes

La phase d'accrétion des planètes à duré quelques dizaines de millions d'années. Dans cette période, des milliards de planétésimaux peuplaient le ciel, et la gravité de la Terre en formation les attirait. Ils tombaient à un rythme très important c'est le *Bombardement Primordial*. Il a duré quelques dizaines de millions d'années et créé la Lune au cours d'un impact géant.

Après cette phase tumultueuse, il y a eu une période de calme, les planétésimaux proches étant tous tombés. Mais dans le système solaire externe, il se passait beaucoup de choses. Les planètes géantes accrétaient le gaz restant de la nébuleuse, et se déplaçaient donc dans un milieu relativement dense, qui perturbait leur mouvement. Ceci a entraîné la migration de ces planètes, et des perturbations gravitationnelles

importantes comme conséquence. Sous l'effet de ces perturbations, les petits corps qui se situaient dans l'espace entre Mars et Jupiter ont été projetés, pour une partie, vers le système solaire interne, et ils sont venus tomber sur les planètes telluriques. C'est le *Bombardement Tardif*. Il s'est produit quelques centaines de millions d'années après le Bombardement Primordial, et a duré jusqu'à la disparition des gaz et des poussières.

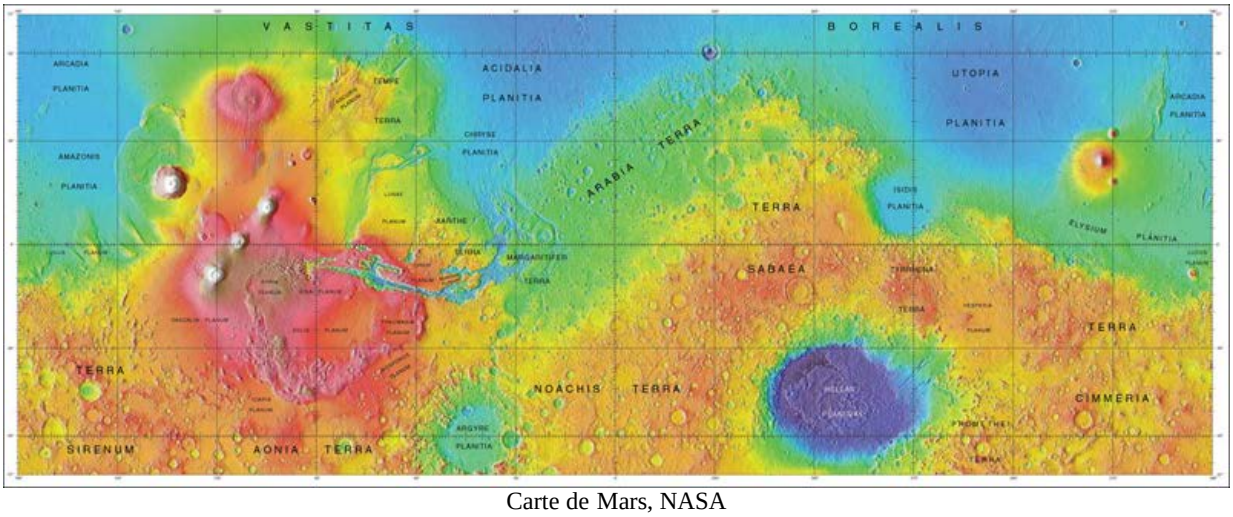
**Recherche de l'eau**

Les premières sondes ont montré une planète désertique, balayée par des vents violents, et couverte de cratères, mais pas partout. En tous cas, nulle trace d'eau à la surface. Le problème est donc changé : s'il y a de l'eau aujourd´hui sur Mars, elle n'est pas sous forme liquide. Il est possible qu'il n'y en ait plus, c'est ce que les sondes vont rechercher. Il y a très probablement eu de l'eau dans le passé, puisque Mars s'est formée au même moment et dans la même région du système solaire que la Terre. Mais elle a pu disparaître.

Pour rechercher des traces d'eau ancienne, il faut examiner les roches actuelles. Toujours par analogie avec la Terre, on sait que certaines roches ne se forment que dans l'eau ; c'est le cas des argiles. Comprendre les bases de la géologie martienne a donc été indispensable pour orienter les recherches.

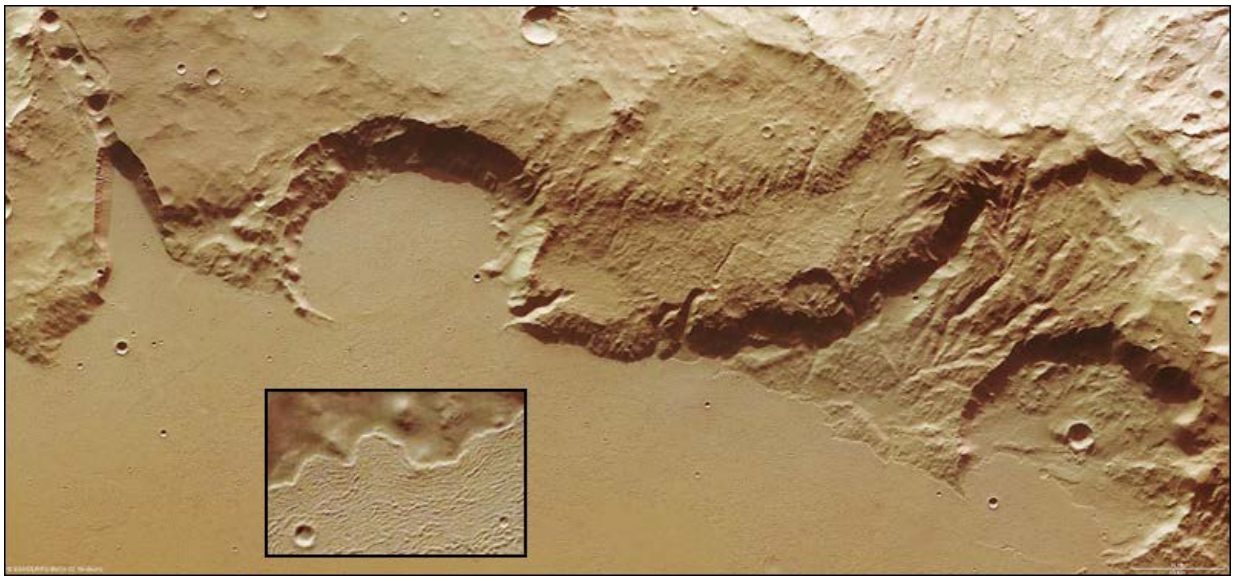
**Morphologie martienne**

La première caractéristique qui saute aux yeux est la *dichotomie nord-sud :*



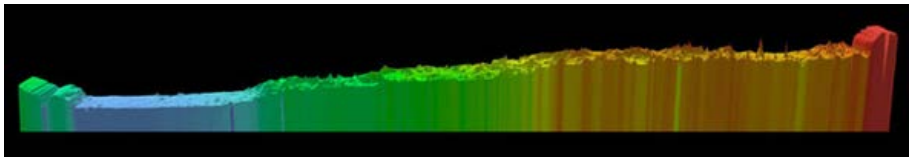

Carte de Mars, NASA

L'hémisphère sud est constitué de hauts plateaux, complètement cratérisés et donc vieux, alors que l'hémisphère nord est une plaine de basse altitude, nommée *Vastitas Borealis*, très peu cratérisée, donc jeune. Si un océan a existé sur Mars, il serait logique de le chercher là. Plus localement, les bassins Argyre et Hellas seraient aussi de bons candidats pour des mers intérieures.



Mangala Fossae photo ESA/DLR/FU Berlin (G. Neukum)

Les côtes que l'on voit se dessiner sur cette photo ne sont pas des côtes maritimes, mais le remplissage de la plaine par de la lave à la place de l'eau. S'il y a eu de l'eau, il est probable que ce soit avant le remplissage volcanique, et donc sa trace en a été effacée en cet endroit.



Altitudes martiennes : le pôle sud est ~6 km plus haut que le nord crédits NASA Goddard Space Center MOLA

Vastitas Borealis est analogue aux mers lunaires, c'est un bassin d'impact creusé, juste après la fin du bombardement primordial, par un objet de 2.000 km de diamètre. Il a été rempli par de la lave sur une surface de plus de 10.000 $km^2$.

L'impact sur la Terre, qui a formé la Lune, a projeté des débris dans l'espace, que la gravité de la Terre a pu retenir. L'impact qui a creusé Vastitas Borealis sur Mars est semblable, mais il a dû projeter les débris à une vitesse trop grande pour qu'ils restent liés à la planète. Au lieu de former l'équivalent de notre Lune, ils ont dû se perdre dans l'espace. Peut-être Phobos et Deïmos en sont-ils les miettes…

Les échantillons lunaires (Apollo, Lunokhod) ont montré que la Lune ne pouvait s'être formée directement à partir d'un même nuage que la Terre. La densité de la Lune est approximativement égale à celle du manteau terrestre. Elle n'a donc pas de noyau de fer. L'énergie de l'impact à chauffé la Terre, et renforcé la différenciation. Les minéraux lunaires sont les mêmes que les terrestres, mais ils sont anhydres.

Les plateaux lunaires sont composés de silicates légers (Al, feldspath anorthose). Les mers contiennent des silicates plus lourds (Fe, Ti) provenant du manteau.

**Le volcanisme**

Les volcans de Mars sont peu nombreux (sur Terre on en compte des milliers) ; ils sont plus grands que les nôtres. Ces deux différences doivent trouver une explication. Ce sont des volcans bouclier. Sur Terre, ceux-ci se forment par étalement lointain d'une lave fluide. Il est probable qu'il en soit de même sur Mars. Les volcans bouclier terrestres sont des volcans de point chaud :la dérive des plaques tectoniques les empêche de grandir, la faible épaisseur des plaques aussi. Pas de tectonique sur Mars, pas de déplacement des plaques, donc un volcan s'accumule au-dessus du point chaud. L'épaisseur de la croûte le permet, car elle est capable de supporter le poids de l'édifice volcanique.

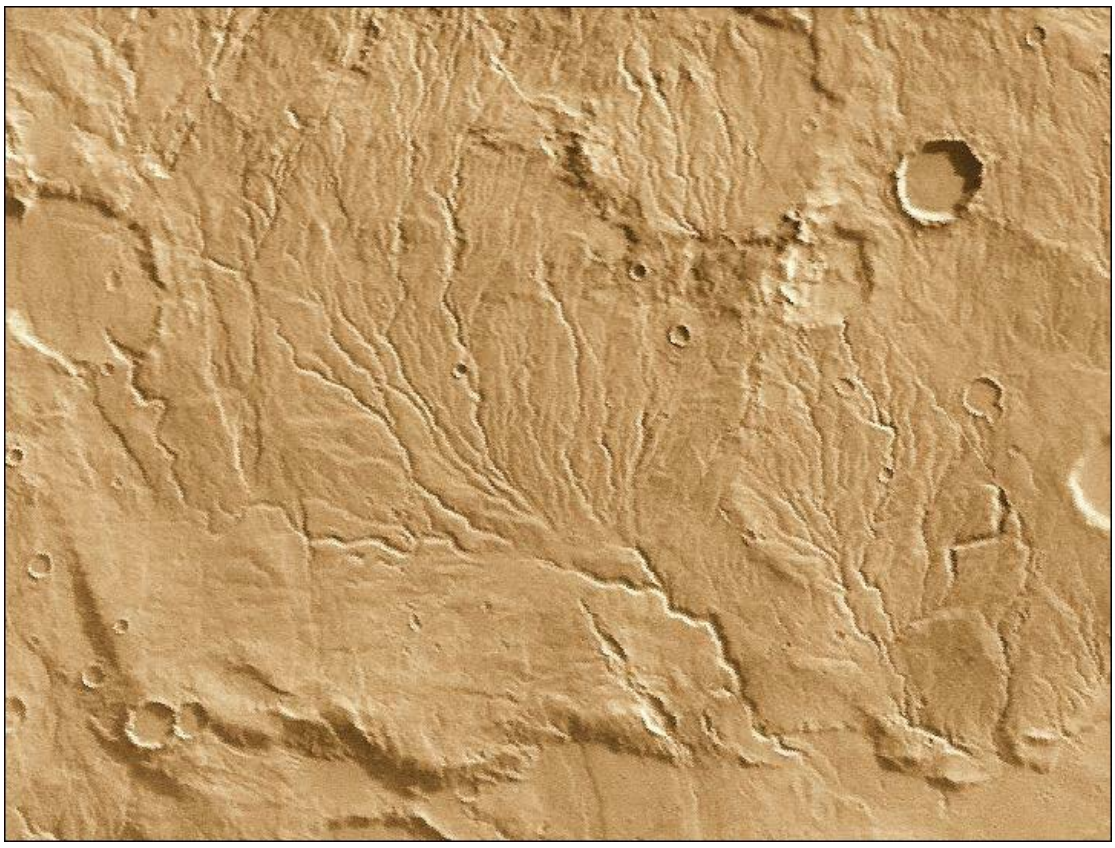
Sur Mars, on ne trouve pas de montagnes comme sur Terre. En effet, les montagnes sont produites par plissement de la croûte sous l'effet de la tectonique. Pas de tectonique sur Mars, donc pas de montagnes !

Le dôme de Tharsis mesure 5.000 km de diamètre et 5.000 m de hauteur. C'est un phénomène tectonique. C'est le principal phénomène volcanique de Mars, avec l'édification des volcans qui lui est postérieure. Les comptages de cratères lui assignent un âge de 4 milliards d'années. Les volcans sont éteins depuis quelques dizaines à quelques centaines de millions d'années.

Valles Marineris s'étend sur plusieurs milliers de km de longueur. Sa profondeur va jusqu'à 10.000 m, sa largeur à plusieurs dizaines de km. C'est une faille tectonique (graben), produite par la surrection de Tharsis. Dans la nomenclature martienne : latin *chasma* (gouffre), du grec *χασμα* abîme.

**Fleuves**

De nombreux lits de rivières existent :



Rivières fossiles photo Viking NASA

Ces rivières ressemblent aux rivières terrestres, mais présentent des différences :

- Les angles que font les affluents avec le cours principal sont plus fermés ;
- on ne voit pas de delta, pas d'embouchure. Le cours s'arrête assez brutalement ;

- on ne voit pas non plus de sources. Certains affluents semblent naitre brusquement avec un cours large, alors que sur Terre les petits ruisseaux font les grandes rivières.

Ces différences proviennent sans doute de plusieurs causes. Les angles doivent caractériser l'état du sol, plus ou moins solide. L'absence d'embouchure fait penser aux cours d'eau qui coulent dans le désert, et qui disparaissent dans le sable. Ils évoquent donc un terain très fragmenté dans leqeul l'eau peut facilement s'infiltrer. Enfin, l'absence de sources est plus critique. Pour qu'un flot important puisse apparaître brusquement, on peut invoquer la fonte d'une masse de glace. C'est l'interprétation qui prévaut aujourd'hui, et elle est supportée par une analogie avec des exemples connus en Sibérie. Il faut donc avoir une masse de glace dans ke sol, et un chauffage pour la liquéfier. Le volcanisme actif, dans le passé, sur Mars, nous fournit un moyen de chauffage efficace. La glace emprisonnée dans le sol commence à être chauffée, et à faondre. L'eau reste prisonnière du sol. A mesure que la fonte avance, la pression augmente, et ce jusqu'à la rupture. A ce moment-là, une quantité importante d'eau est instantanément libérée, et peut produire des flots importants qui jaillissent d'un point bien localisé.

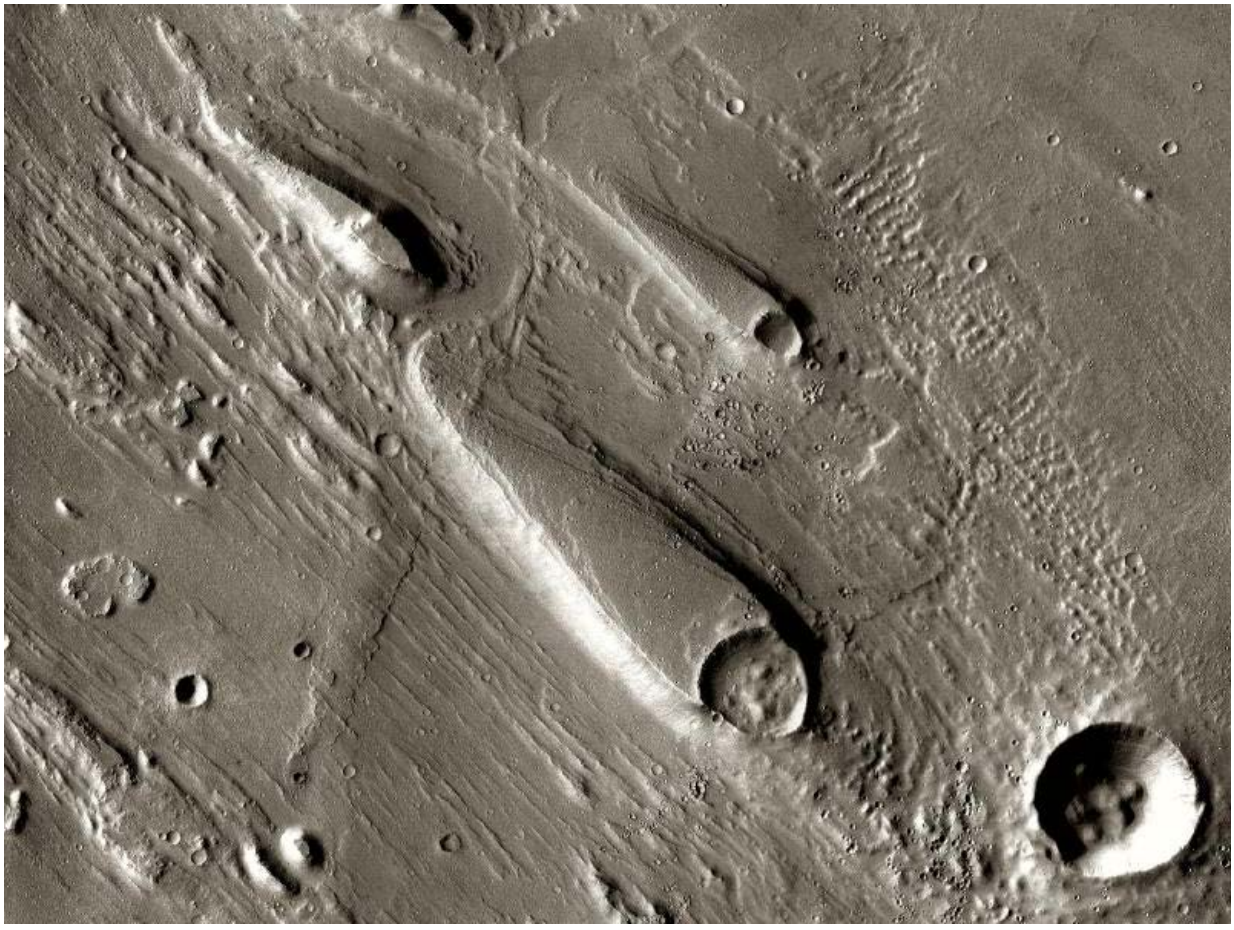
On a observé de petits flots actuels sur les pentes de certains canyons. Voir érosion sur Mars.

L'eau est le liquide responsable le plus probable, par son abondance et par les conditions thermodynamiques qui l'auraient maintenue à l'état liquide. Le liquide doit être entre le point triple et le point critique. En dessous du point triple, il n'y a pas de vapeur. Au- dessus du point critique, liquide et vapeur sont confondus. Pour le méthane c'est entre -182 et -83°, pour le $CO_2$, c'est entre -57 et +31°, mais à haute pression (5 bars pour -57°, 35 bars pour 0°). Mars n'a sans doute jamais eu de $CO_2$ liquide. Pour l'eau, les températures sont entre 0 et 370°, et les pressions entre 6millibars et 220 bars. Ces conditions sont tout à fait compatibles avec celles de Mars. Aujourd'hui, la pression est trop faible pour que l'eau soit stable sous forme liquide. Il ne peut y avoir que de la glace ou de la vapeur.

Les fleuves martiens sont particuliers, on ne voit ni source ni embouchure… les conditions dans lesquelles l'eau a coulé sur Mars sont donc bien différentes de ce que l'on connait sur Terre. On voit pourtant de véritables réseaux fluviatiles, situés sur les terrains anciens très cratérisés. Le débit était probablement assez faible, et sur une longue durée, nécessitant de l'eau liquide stable.

**Vallées de débâcle**

On trouve aussi des vallées de débâcle. Elles sont beaucoup plus jeunes que les réseaux fluviatiles, elles ont présenté un débit bien plus fort, et n'ont pas duré très longtemps. Elles sont situées assez près de Valles Marineris, dans une région donc limitée et de caractéristiques bien précises.



Ares Vallis photo Mars Odissey, NASA/JPL-Caltech/ASU

Sur Terre, 99,9 % du $CO_2$ à été transformé en carbonates, avec l'aide de la vie (la chimie minérale réalise cette réaction, mais sur des durées bien plus longues). Le $CO_2$ à donc disparu grâce à l'eau. Et sur Mars ? Si c'était pareil, il devrait y avoir beaucoup de calcaire. Or on n'en observe pratiquement pas. Mais il y a une autre indication : le rapport $N_2/CO_2$. Il est identique sur Vénus et sur Mars, où il vaut 96/3. Sur la Terre, le $CO_2$ à disparu à la suite de son pompage par les océans, et sa précipitation sous forme de carbonates, et l'azote, insensible à ce mécanisme car non soluble, est le gaz de loin dominant de l'atmosphère. On calcule d'ailleurs que tous les carbonates de la Terre, s'ils libéraient leur gaz carbonique, redonneraient une atmosphère de même nature que celle de Vénus. On doit admettre que sur Mars ce mécanisme n'a pas joué par manque d'eau, et qu'une évolution physique de l'atmosphère à éliminé les gaz légers, $CO_2$ et $N_2$ pareillement, diminuant la pression en maintenant le rapport. On ne peut invoquer deux mécanismes distincts qui arriveraient exactement au même résultat. Par conséquent, on doit

admettre que, s'il y a eu des océans sur Mars, ils n'ont pas duré très longtemps.

Sur Vénus, le rapport D/H est 100 fois plus élevé que sur Terre, indiquant que l'eau à été dissociée par les UV du Soleil, et que l'hydrogène s'est échappé. Le deutérium, 2 fois plus lourd, n'a pu s'échapper et s'est donc concentré. Sur Mars, $CO_2$ et $N_2$ ont diminué dans la même proportion.

**Le pergélisol**

L'eau que l'on ne trouve pas à l'état liquide pourrait être, en partie, conservée dans le sous-sol mélangée à la terre et gelée. C'est le *pergélisol*. Le radar Marsis de Mars Express a été conçu pour cette recherche, qu'il pouvait effectuer jusqu'à une profondeur de plusieurs milliers de mètres. Ce qu'il peut détecter exactement est l'interface entre la glace du pergélisol, et le rocher qui la porte, ou l'eau liquide qui pourrait être dessous à cause de la pression. Or Marsis n'a trouvé de pergélisol qu'autour des calottes polaires, et en quelques points particuliers ailleurs. Ce n'est pas une preuve d'absence d'eau, parce qu'elle pourrait être sous une autre forme, mais c'est tout de même assez inattendu. L'observation de nombreux cratères d'impact cernés d'éjectas lobés, qu'on a attribués à la fusion du pergélisol au moment du choc, est en effet contradictoire.

Les atomes radioactifs de période proche de l'âge du système solaire sont $^{238}U$, $^{235}U$, $^{232}Th$, $^{40}K$. Abondance : $10^{-8}$. Pour la Terre, $4\ 10^{13}$ W, soit 1.000 fois moins que l'énergie solaire. L'énergie interne de la Terre est encore à 50 % d'origine gravitationnelle.

Lunokhod a été le premier engin mobile robotisé. Il a parcouru des dizaines de km. Luna 16, 20 et 24 sont les seules sondes qui aient renvoyé des échantillons sur Terre automatiquement. Luna 24 à procédé à un carottage de trois mètres de profondeur dans le régolite. C'est le seul à ce jour. Renvoyée sur Terre, cette carotte à donné des indications extraordinaires sur l'histoire de la Lune et du vent solaire sur 4 milliards d'années.

- 1996 : Mars Pathfinder. Ares Vallis, uniquement des laves, pas le moindre sédiment. Donc pas d'eau sur de longues durées.
- 1996 : MGS.
- 2004 janvier : Mars Express. Découverte d'un grand glacier d'eau au pôle sud de Mars. Plusieurs km d'épaisseur, sur plusieurs centaines de km. C'est la première découverte de grandes quantités d'eau sur Mars. La sonde à aussi montré que la calotte sud était recouverte d'une fine (quelques mètres) pellicule de $CO_2$ en hiver. La glace est mélangée à de la poussière en surface, si bien qu'elle apparaît sombre sur les photos. C'est pourquoi elle n'avait pas été détectée avant.

Spirit : Gusev, ancien lac ? Opportunity : Terra Meridiani, hématite noire. Au début, Spirit n'a observé que des roches volcaniques non altérées.

**Les sulfates**

Mars Express, avec Omega, a observé le sol de la planète et y a découvert, par leur signature spectrale, de vastes étendues couvertes de sulfates. La nature et la répartition de ces sels sont très instructives. Certains sont des sulfates de magnésium : kiésérite, epsomite ; le reste est du sulfate de calcium, du gypse. Mais Omega a pu déterminer en plus que ces sulfates sont hydratés. Les terrains proches du site d'atterrissage d'Opportunity en sont recouverts.

Parallèlement, Opportunity a atterri par chance dans un petit cratère, où il a observé des roches claires stratifiées, antérieures à l'impact et mises au jour par lui. Ces roches sont parsemées de petites billes de couleur bleu foncé et de quelques millimètres de diamètre. Leur aspect leur a valu le nom de *myrtilles*, et elles sont constituées d'hématite, oxyde de fer $Fe_2O_3$, qui se forme en général dans l'eau. Mais surtout le rover a trouvé dans ces roches les signatures spectrales du soufre et du magnésium, d'où l'on infère la présence probable de sulfate de magnésium.

Ces sulfates se forment dans l'eau, à partir de roches riches en soufre et en métaux, ce qui est le cas des abondantes roches volcaniques qui parsèment la surface de Mars. C'est donc une preuve que de l'eau à séjourné là.

S'appuyant sur les données obtenues par son rover, la NASA a annoncé la découverte d'une ancienne mer d'eau salée sur Mars, annonce un peu hardie, car les sulfates peuvent très bien se former dans de l'eau transitoire. Mais contrairement à ce que prétend la NASA, ces sulfates ne garantissent pas qu'il y ait eu de l'eau stable sur une longue durée. Pire, la kiésérite observée par Mars Express est un sulfate monohydraté instable, détruit par un séjour prolongé dans l'eau. Sa présence montrerait plutôt qu'elle se formait, et que l'eau disparaissaient. Elle est très rare sur Terre où l'eau est abondante.

Les observations de Mars Express indiquent plutôt des épisodes où de grandes quantités d'eau circulent, lessivent les sols, et déposent les sulfates en s'évaporant, dans une atmosphère peut-être trop légère pour y être stable. On peut imaginer une pression atmosphérique faible, incapable d'assurer la stabilité de l'eau à long terme pour former des lacs et des mers, mais suffisante pour que l'évaporation soit longue, et laisse à l'eau le temps de circuler et de former les sulfates.

Enfin, sur Terre ces minéraux se forment dans un milieu très acide, et par analogie l'environnement martien de l'époque aurait dû l'être également.

Omega (Mars Express) a cartographié les sulfates. Ils n'apparaissent que dans une zone bien délimitée et peu étendue. On les trouve dans les chasmata de Valles Marineris, et dans les vallées adjacentes à Terra Meridiani oû s'est posé Opportunity, jusqu'à Aram Chaos au nord. Dans Valles Marineris, on les trouve sur les pentes des mésa centraux. On ignore s'ils constituent un vernis de surface, ou s'ils sont constitutifs du mésa lui-même. Enfin, les argiles se trouvent là où il n'y a pas de laves. Les laves les ont donc recouvertes ailleurs (où elles se trouvaient). Ceci montre que les argiles datent de l'époque du bombardement primordial.

Terra Meridiani est inclinée du nord (terrains cratérisés) au sud où les cratères sont de plus en plus rares (terrains de plus en plus jeunes). Elle est une conséquence des mouvements qui ont formé le plateau de Tharsis. C'est une érosion éolienne intense, qui a duré des milliards d'années, qui a érodé le sol, mettant à nu ces argiles. Omega et Opportunity ont donc mis en évidence une ère où les conditions ont été très particulières. Les sulfates étant liés au dôme de Tharsis, il est probables qu,ils lui soient associé. C'est la formation du dôme qui a provoqué les circonstances de leur formation. L'ère des sulfates serait donc entre 3,5 et 3,9 MA.

Mais Omega a détecté des sulfates au pôle nord. Lorsque la calotte de glace d'eau à été découverte par la glace carbonique l'été, l'instrument à observé du gypse (sulfate de calcium deux fois hydraté) entre les bras de glace. Ces sulfates-là n'ont pas la même origine, ils semblent récents.

**Le volcanisme**

Les photos des flancs des volcans permettent d'évaluer leur âge à une centaine de millions d'années. Les dernières coulées dateraient donc de cette époque, sauf quelques exceptions de 10 MA seulement. C'est très peu, si on considère que la planète est petite, et a dû se refroidir rapidement.

Avec le refroidissement, la lave ne s'épanche plus, et les gaz restent piégés aussi. Peuvent-ils cependant atteindre la surface ? Sur Terre, les sulfures de fer du basalte se dégradent, donnant du H2S. Si Tél était le cas, ces gaz soufrés pourraient produire le gypse au pôle nord. Pourquoi au pôle nord ? Parce que c'est l'endroit où la croûte est la plus fine, et où le gaz peut s'échapper le plus facilement. Probablement le dernier de la planète où c'est possible. Et ces gaz modifieraient l'atmosphère actuelle, par apport de $CO_2$, $N_2$, A, Hsub>2O, $CH_4$.

La combinaison d'un minéral et d'un environnement permet de reconstruire une partie de l'histoire de la planète

**Les hauts plateaux**

Les hauts plateaux sont constitués de laves très anciennes non altérées, riches en pyroxène. : riches en Ca (diopside et augite) ou pauvres (pigeonite, enstatite). Ces minéraux sont caractéristiques d'un très haut niveau de fusion. Ces terrains datent du bombardement primordial, et n'ont pas subi de modifications ultérieure, ni mécanique ni chimique. À la même époque, la vie apparaissait sur Terre.

La surface entière de Mars présenté la même origine magmatique. Cependant, les terrains du sud, vieux et cratérisés, n'ont pas été altérés, alors que ceux du nord, plus récents, l'ont été. Dans les plaines du nord, on ne distingue plus la composition d'origine. Mars n'a pas subi d'altération globale, mais régionale.

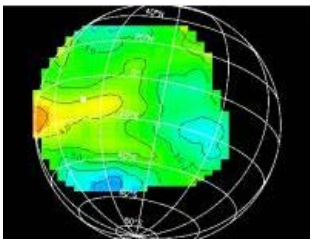
Les régions sans signature magmatique sont les plus brillantes, et les plus rouges. La comparaison des spectres montre que le fer y est sous forme ferrique et non ferreuse. Mars à rouillé ! Pourquoi ?

Dans le spectre IR observé par Omega, l'eau ne peut échapper, qu'elle soit liquide, glace ou vapeur, adsorbée ou piégée dans un réseau cristallin.

Les oxydes ferriques sont strictement anhydres. C'est de l'hématite $Fe_2O_3$ sous forme de grains nanométriques. En conséquence, ce n'est pas l'eau qui a rouillé la planète. Si l'eau avait joué un rôle, il y aurait des radicaux OH (non détectés) ; de plus l'eau percole, et aurait affecté le sol sur plusieurs cm. Or il n'est altéré que sur quelques micromètres.

Les rovers au sol ne voient que les roches magmatiques, non la pellicule qui les recouvre, tant elle est fine. En roulant, ils laissent derrière eux leurs traces sombres, montrant que le sol, juste sous la pellicule, n'est pas oxydé.

D'où vient l'oxydation ? On a observé, depuis la Terre par télescope, du péroxyde d'hydrogène ou eau oxygénée $H_2O_2$ dans l'atmosphère. Elle s'y trouve en très petites quantités, mais elle est très efficace. Aussi, au fil des milliards d'années, elle a pu oxyder la surface. La concentration diminue évidemment avec l'altitude et la pression décroissante. C'est pourquoi les vieux terrains du sud n'ont pas été oxydés. Les volcans de Tharsis sont recouverts par de la poussière oxydée à basse altitude, et charriée par le vent. Mais là encore les hauts plateaux sont à plus basse pressions et les vents y sont trop peu efficaces pour transporter la poussière.



Rapport de mélange de $H_2O_2$ dans l'atmosphère de Mars.

Crédits LESIA. Observatoire de Paris. CNRS

Le point blanc indique le point sub-solaire. Les valeurs mesurées sont en accord avec les prévisions des modèles. L'eau oxygénée est une oxydant très puissant, capable d'oxyder toute la surface de la planète au fil du temps (les taux produits sont faibles).

**Les carbonates**

Mars Express à recherché des carbonates, sels pour la détection desquels elle est parfaitement adaptée. En vain. Il ne doit pas y avoir plus de 1% de carbonates à la surface de Mars.

**Les argiles**

Omega a trouvé également des argiles (phyllosilicates hydratés en grains). Si on peut envisager la formation des sulfates sans eau, on ne sait pas s'en passer pour la formation des argiles. Ce sont des smectites (magnésium et fer). Sur Terre, les argiles se forment par décomposition de roches, en particulier volcaniques, par barbotage prolongé dans de l'eau tiède. Elle semble donc réclamer une présence longue d'eau liquide. On trouve un peu de montmorillonite (silicate d'aluminium). Au cours du lessivage de la roche, les silicates de magnésium et de fer sont attaqués en premier, ceux d'aluminium ensuite. Par conséquent, plus un silicate est aluminié, plus il a barboté longtemps. La kaolinite est entièrement Al. Les argiles les plus abondantes sur Mars se forment dans un milieu neutre ou acide sur Terre ; à l'inverse des sulfates. Par conséquent, les sulfates et les argiles se sont formés dans des milieux très différents. On peut raisonnablement penser que ce soit à des époques différentes.

Les argiles sont toujours détectées dans les vieilles régions cratérisées, les sulfates dans la zone de Valles Marineris plus récente. Ceci montre que les conditions pour la formation des argiles (eau permanente) n'ont duré que peu de temps. Lors de la formation du plateau de Tharsis, la planète était déjà asséchée. L'eau liquide n'était présente que pendant le bombardement primordial.

Mawrth Vallis s'est formée par des écoulements cataclysmiques, après la formation des argiles. En effet, son lit ne contient que des roches volcaniques anhydres, alors que ses flancs et plateaux alentours sont recouverts d'argiles.

Syrtis Major est une zone très cratérisée entourant une zone moins cratérisée. Ceci permet de déterminer l'âge par comptage : 3,9 milliards d'années. Après le bombardement. Les minéraux hydratés ne sont présents que dans les parties très cratérisés. Ce qui achéve de faire lien. Quand les premières manifestations volcaniques se sont produites, Mars était déjà aride.

## *Ères géologiques de Mars*

On a défini une échelle de temps relative basée sur les comptages de cratères. Elle comprend trois ères : par ordre d'âge décroissant le *Noachien* (Noachis Terra), l'*Hespérien* (Hesperia Planum) et l'*Amazonien* (Amazonis Planitia). Bien pratique pour donner une idée de l'âge d'un terrain, elle est toutefois basée sur un processus exogène, extérieur à la planète : la chute des météorites. L'avantage de cette classification est de permettre un rapprochement avec les autres corps célestes, la Lune par exemple, et de ne nécessiter aucunes connaissances autre que visuelle. L'inconvénient majeur est qu'elle ne donne aucun renseignement sur la géologie de la planète.

Le Noachien est la période la plus ancienne, la plus cratérisée. L'Amazonien est la plus récente ; elle court de la fin du Bombardement Primordial jusqu'à aujourd'hui. L'*Hespérien* se place entre les deux, avec moins de cratères que la première.

Omega a caractérisé des roches volcaniques, et trois types de roches altérées : des oxydes ferriques anhydres, des sulfates hydratés, et des argiles hydratées. Il a caractérisé les variations de chaque type, ainsi que leur contexte géologique. Il n'a pas détecté de carbonates.

La croûte s'est tout d'abord solidifiée, à partir d'un magma généralisé. Le calcium est l'élément le plus fusible. C'est lui qui donc se fond le premier, et enrichi le magma. Les pyroxènes présentent tous les degrés d'oxydation, ce qui signifie qu'ils ont cristallisé à partir d'un magma totalement fondu.

Un magma faiblement fondu, donc riche en Ca, donne en cristallisant de l'*augite* et du diopside (pyroxènes). Plus la roche fond, plus le magma s'appauvrit en Ca. Omega est capable de discriminer entre les roches issues de ces différents magmas. Omega a montré que la croûte s'est formée à partir d'un magma totalement fondu. Par contre, le volcanisme est issu d'un magma enrichi en Ca, des pyroxènes.

## *la nouvelle classification*

### Première période

Les argiles hydratées se sont formées sur les terrains très anciens. Les épanchements volcaniques se sont produits après, recouvrant partiellement les argiles. Pour que l'eau soit liquide à la surface de Mars, il a fallu une pression atmosphérique bien supérieure à ce qu'elle est aujourd'hui. Et ceci, par effet de serre, augmentant la température au-dessus de 0°. Il fallut une pression d'autant plus élevée que le jeune soleil brillait un peu moins qu'aujourd'hui, de 20 à 30 %. Cette ère de Mars est donc tout à fait particulière, et mérite d'être nommée. Puisque c'est la période de formation des argiles, qui sont des phyllosilicates, le nom proposé est *Phyllosien*.

Le Phyllosien a commencé après la formation de la croûte, et s'est poursuivi jusqu'à l'assèchement de la planète. Si la fin avait correspondu avec celle du Noachien, on devrait trouver des argiles partout répandues sur la croûte primitive. Mais elles ne sont que dans des zones limitées. Ce qui prouve que le sol à été remodelé par des impacts après la fin de la formation des argiles. Le Bombardement Primordial s'est donc achevé plus tard, et le Phyllosien n'est qu'une partie de Noachien.

Le Phyllosien correspond à l'ère terrestre où la vie est apparue. Mais les traces en ont été effacées chez nous par la tectonique. Mars nous permettrait d'obtenir des données sur ce qu'il a pu arriver sur Terre à la même époque.

À la fin du Phyllosien, l'eau souterraine à dû geler et former le pergélisol qu'on observe aujourd'hui.

Le Phyllosien commence au refroidissement de la croûte, et se termine vers 3,9 milliards d'années.

### Seconde période

Considérons maintenant les sulfates. Ils se trouvent à l'est de Tharsis, dans Valles Marineris, et dans Terra Meridiani, jusqu'à Aram Chaos, des terrains très peu cratérisés. Ils sont donc plus récents que le Phyllosien. Toutes les sondes ont observé du soufre, partout sur Mars. Si ce soufre provenait des roches locales, son abondance reflèterait la composition variable des roches. Or l'abondance du soufre est la même partout. Il provient donc d'une autre source, le dégazage volcanique. L'édification du plateau de Tharsis, avant même celle des volcans qu'il porte, à pu fournir ce soufre, emporté tout autour de la planète par les vents.

La formation de Tharsis est due à la remontée d'un diapir, qui a apporté un important flux de chaleur. Celle-ci a fondu la glace souterraine, provoquant des débâcles catastrophiques. On en voit de nombreuses traces à la surface. L'eau et le soufre étaient donc présents simultanément, capables de synthétiser des sulfates. Procédant comme précédemment, on a proposé le nom *Théiikien*, d'après le nom grec des sulfates : *theiikos*.

Le Théiikien est donc l'ère qui a suivi le Phyllosien. il est caractérisé par des remontées d'eau sporadiques (dégelée par la chaleur géothermique), dans une atmosphère déjà trop ténue pour assurer la stabilité de l'eau. Cette ère à forcément été de courte durée, limitée par les quantités de pergélisol disponibles dans les zones volcaniques.

Le Théiikien s'étend de 3,9 à 3,5 milliards d'années.

**Troisième période**

À la fin du Théiikien, l'atmosphére était très légère, l'eau non stable, comme aujourd'hui. Il s'est formé et se forme encore, du fer à l'état ferrique (explications ci-dessous). On a donc proposé le nom de *Siderikien*, par référence au grec *siderikos*, qui désigne ces oxydes. Le Siderikien n'est guère marqué que par le volcanisme, qui commence au Théiikien, et se poursuit par des phases actives séparées de centaines de millions d'années. La période récente (les derniers milliards d'années) a été marquée par des changements parfois rapides de l'inclinaison de la planète. Ces modifications entraînent à chaque fois un refroidissement de certaines régions, et un réchauffement des autres. Il s'ensuit un transport des glaciers par fusion dans les zones chaudes, puis déposition dans les régions froides.

Mais la caractéristique essentielle du Sidérikien est la lente oxydation superficielle, qui rougit progressivement tout le sol de la planète.

Le Sidérikien s'étend de 3,5 milliards d'années à nos jours.

## *Le changement climatique*

Les argiles du Phyllosien demandent un milieu neutre à basique pour se former, alors que les sulfates du Théiikien qui lui succède requièrent un milieu franchement acide. Ceci suggère qu'entre les deux périodes de formation, un changement climatique global s'est produit. Le changement essentiel est la perte de l'atmosphère. Cette perte est due à la masse insuffisante de Mars, incapable de retenir les gaz légers. Peut-être les impacts ont-ils fourni assez d'énergie pour souffler l'atmosphère de Mars, alors que la gravité terrestre était suffisante pour retenir les gaz, même dans ces circonstances.

MGS a montré que Mars ne possède pas de champ magnétique global. Par contre, elle a observé un champ magnétique rémanent dans les terrains très cratérisés (datant du Phyllosien). Ce champ prouve que Mars à eu un champ magnétique à cette époque. Par contre, l'absence de champ dans les zones volcaniques (Tharsis), montre qu'à l'époque où le plateau s'est formé, le champ avait déjà disparu. De plus, les grands bassins d'impact (Argyre, Hellas) n'ayant pas de champ rémanent, se sont formés plus tard. Le champ à donc disparu avant les impacts géants, et avant la mise en place du volcanisme. Y a-t-il un lien entre la formation des argiles (la présence d'eau pérenne) et le champ magnétique ? Peut-être… le jeune soleil était 20 à 30 % moins brillant qu'aujourd'hui, mais plus actif en UV et X. Et ces rayonnements sont susceptibles de chasser une atmosphère… sauf si celle-ci est protégée par un champ magnétique.

Le champ magnétique est produit par effet dynamo, dans un noyau convectif et différencié. Cette convection est entretenue par de l'énergie, d'origine gravitationnelle au début, puis radioactive ensuite. Mars n'a sans doute pas assez de masse pour que la radioactivité entretienne la dynamo après affaiblissement de la source gravitationnelle.

Les écoulements visibles sur Mars ne sont pas liés à de l'eau permanente, lorsqu'elle était stable. Et les traces d'une éventuelle vie sur la planète ne doivent pas être cherchées à ces endroits-là. Il était naturel de rechercher les traces d'un océan dans les plaines du nord, point bas de Mars. Mais on a montré que ces traces y ont été effacées par des épanchements de lave à l'échelle de toute la région. C'est là où sont les argiles que l'on pourra lire l'histoire humide de Mars. Et cette possibilité résulte de la faible activité de la planète, qui a préservé certaines de ces zones. La recherche de la vie est faite selon des critères terrestres, en particulier la présence d'eau stable. Mars Express a montré que la recherche d'une vie éventuelle devait être menée dans les terrains Phyllosiens. Et les américains ont retenu 7 sites d'atterrissage pour *Curiosity*, parmi lesquels 6 ont été sélectionnés par Mars Express, qui y a découvert des argiles.

Si la vie est apparue sur Mars, c'est très probablement dans les terrains Phyllosiens. Si elle s'y est maintenue, c'est en suivant l'eau dans ses migrations lors de sa raréfaction. Le radar Marsis de Mars Express a cartographié les zones où se trouve de la glace aujourd'hui. Sous cette glace, la pression est forte, et la glace se transforme en eau liquide sans même une augmentation de température. Des traces de vie seraient donc à rechercher là où cette eau liquide est la plus proche de la surface. C'est le but de *Exomars*, projet européen, qui pourra faire un carottage jusqu'à deux mètres de profondeur. Actuellement, les radars disponibles ne permettent pas de détecter une transition en douceur entre deux domaines, l'un sec et l'autre humide, mais seulement une discontinuité, qui n'a pas été observée. Ils n'ont rien découvert hormis dans les régions polaires. Mais des instruments plus fin en trouveront peut-être bientôt.

## *La "découverte" de Curiosity*

L'expectative était insoutenable ! La NASA a annoncé qu'elle allait annoncer quelque chose…

C'est fait. Il s'agit de la découverte dans le sol martien d'un composé organique. Encore faut-il s'assurer qu'il n'a pas été apporté par le rover lui-même depuis la Terre. Et aussi qu'il ne s'agit pas d'un des composés que l'on trouve en abondance un peu partout dans l'Univers, dans les comètes en particulier.

John Gortzinger, le scientifique en chef de la mission Curiosity, qui avait évoqué une découverte «pour les livres d'histoire» le 22 novembre, a expliqué avoir été «mal compris»…

---=OO=---




**Rappels de cosmologie standard**

Le modèle standard de la cosmologie, parfois nommé *modèle de concordance*, est basé :

- du point de vue théorique sur la Relativité Générale, avec une simplification drastique donnée par le *Principe Cosmologique* ;
- et du point de vue observationnel par trois observations essentielles :
  - le fond diffus cosmologique,
  - le décalage vers le rouge de tous les objets lointains,
  - les abondances des éléments légers.

Après quelques discussions, le décalage vers le rouge a été interprété comme une vitesse d'éloignement des galaxies lointaines. Cette vitesse proportionnelle à la distance a trouvé une explication toute naturelle, et par là convaincante, dans l'expansion de l'univers. Mais puisque l'Univers est en expansion, en regardant le film à l'envers, on le voit en contraction. Et rien ne vient, *a priori*, empêcher cette contraction de se poursuivre jusqu'à une singularité, où l'univers devait avoir un volume nul… Cette singularité n'a pas d'explication physique. Mais elle signifie que l'Univers a eu un commencement.

La Cosmologie utilise la Relativité Générale comme base. Or cette dernière modélise l'espace-temps comme une entité maléable, influencée par la matière, et influançant la matière… L'équation simplifiée à l'extrême peut s'écrire $G = \kappa T$, où G représente la géométrie de l'Univers, et T son contenu en matière-énergie. $\kappa$ est une constante de couplage. Cette égalité montre bien que toute variation de G entraîne une variation de T : si la géométrie de l'Univers varie, la matière se déplace. Et à l'inverse, une variation de T entraîne aussi une variation de G : si la matière se déplace, la géométrie change. L'essentiel de la difficulté vient de ce couplage.

Les équations de la Relativité Générale ne sont pas suffisantes pour résoudre le problème. Il faut leur ajouter une fonction donnant la distance entre deux points voisins, fonction nommée *métrique*.

Le problème est maintenant de déterminer une métrique, et là, les choses se gâtent. La difficulté est trop grande pour pouvoir aborder le problème dans toute sa généralité. Il faut donc simplifier les données pour le rendre gérable.

**Les modèles**

Un modèle est une solution des équations de la RG, définie par une métrique. Les solutions envisageables sont :

- Le modèle de l'Univers vide de de Sitter. Puisqu'il n'y a pas de matière-énergie, **T = 0**. L'équation se réduit à G = 0. Il est difficile de faire plus simple, mais le réalisme n'y trouve pas son compte.
- Les modèles pour lesquels **T = constante**. Ils constituent la famille étudiée par Alexandre Friedman et Georges Lemaître, dont les membres dépendent d'un paramètre.
- Les modèles les plus généraux pour lesquels **T est quelconque**.

La simplification envisagée par Friedman et Lemaître dès les années 1920 est basée sur le Principe Cosmologique. Celui-ci suppose que **l'Univers est homogène et isotrope**. L'homogénéité indique que les propriétés qui nous intéressent ont la même valeur partout (en particulier la densité). L'isotropie prétend que ces propriétés sont identiques dans toutes les directions de l'espace. Il n'y a donc pas de direction privilégiée.

L'observation du ciel montre immédiatement qu'il contient des étoiles séparées par de grands vides. Les étoiles se groupent en galaxies, séparées par de grands vides aussi. Les galaxies se regroupent en amas… les amas se groupent enfin en superamas. Au niveau des superamas, on découvre également des vides immenses. Cette image de l'Univers est donc tout, sauf homogène ! Mais on suppose, on pose comme principe, qu'à une échelle encore plus grande (plusieurs centaines de millions d'années lumière), l'Univers est enfin homogène.

Il est évident que cette affirmation est gratuite. En 1920 on n'avait encore aucune idée de ces structures à grande échelle. Et aujourd'hui les observations viendraient plutôt l'infirmer. Mais en posant cette homogénéïté, on obtient un problème intégrable, ce qui est une très bonne justification pour attaquer le problème.

Mais peut-être serait-il sage de reconsidérer ces limitations presque un siècle plus tard…

**Les modèles de Friedman-Lemaître**

La famille de ces modèles dépend d'un paramètre : la densité moyenne $\rho$ de l'Univers. Il s'agit de la moyenne, mais d'après le Principe Cosmologique qui sous-tend ces modèles, elle est la même en tout point de l'Univers. Elle fixe les caractéristiques des modèles car ceux-ci sont instables, ils sont en contraction ou en expansion mais ne peuvent être statiques. Pour s'accorder aux observations, c'est l'expansion qui doit être choisie.

L'univers étant en expansion, la gravité mutuelle de toutes les particules qui le remplissent tend à les rapprocher, donc à freiner l'expansion. En effet, le freinage des particules modifie leur position dans l'espace-temps, et donc la géométrie de celui-ci. On s'attend alors à ce que l'expansion soit décélérée. Et aussi que cette décélération soit d'autant plus forte que la densité de l'Univers est plus élevée.

Selon leur densité $\rho$, les modèles de Friedman-Lemaître se divisent en trois catégories :

- le modèle critique, pour lequel l'expansion ralentit éternellement, et tend à s'annuler au bout d'un temps infini. La densité de cet Univers est nommée *densité critique* $\rho_c$.
- les modèles fermés, pour lesquels la densité est plus grande ($\rho > \rho_c$), et stoppera l'expansion dans un temps fini. Ensuite, l'Univers sera en contraction vers un Big Crunch symétrique du Big Bang.
- Les modèles ouverts, pour lesquels $\rho < \rho_c$. L'expansion se poursuivra toujours, et sa vitesse ne tend pas vers 0. A l'infini, elle reste rapide.

Dans les trois cas, l'expansion est freinée.

**Les problèmes du modèle standard**

Les modèles de Friedman-Lemaître sont issus du Principe Cosmologique appliqué à la Relativité Générale. Après une phase de calcul initial indiquant leurs propriétés générales, on est passé à une analyse plus fine, qui a mis rapidement en lumière bien des difficultés.

**Première difficulté :** la synthèse des éléments légers. Les modèles de Friedman-Lemaître présentent une singularité, donc un commencement. Par conséquent, le contenu de l'univers a eu aussi un début. On sait que la matière primordiale (celle qui n'a pas été transformée par les étoiles) a une composition bien précise, comprenant approximativement 3/4 d'hydrogène, presque 1/4 d'hélium, et une pincée de lithium.

Mais en remontant le temps, la matière est de plus en plus chaude, et l'énergie détruit les atomes, les noyaux, et même les particules… Très peu de temps après le Big Bang, l'Univers était rempli seulement de particules indépendantes, neutrons, protons et électrons. l'Univers se refroidissant par l'expansion, une brève période a permi la synthèse de l'hélium à partir de l'hydrogène : il fallait que la température soit encore suffisante pour vaincre la barrière électrostatique des protons, mais plus trop haute sans quoi les noyaux complexes formés étaient immédiatement détruits. La masse de l'Univers, qui freine l'expansion, détermine la durée de cette période, et donc la quantité d'hélium primordial. La mesure de cette quantité d'hélium indique donc combien de temps cette phase a duré, et par conséquent l'efficacité du freinage. On en a déduit la densité de l'Univers, et trouvé qu'elle doit être de l'ordre de la densité critique : $\rho_{nucl} \quad \rho_c$. Cette détermination de la densité moyenne de l'Univers **ne dépend que de la composition chimique du gaz**.

Il y a bien sûr une méthode plus directe pour mesurer cette densité. Dans une galaxie, la masse et la luminosité globales sont reliées par la relation : M = 4 L (M en masses solaires et L en luminosités solaires). Il s'agit d'une moyenne qui intègre tous les types d'étoiles avec leur luminosité propre, en tenant compte des proportions de chaque type. En observant la luminosité d'une galaxie, on en déduit sa masse. Et de là on peut déterminer la densité de l'Univers : on trouve une valeur de l'ordre de $\rho_{vis} = \rho_c / 10$. Il y a là un léger problème : **cette estimation est dix fois plus faible que la précédente** !

Pour pallier à ce problème, le modèle standard de Big Bang incorpore la matière noire, qui est en masse neuf fois plus importante que la matière connue. Avec ces 10 % de matière normale + 90 % de matière noire, on arrive à concilier une gravité expliquant la dynamique de l'Univers, et une nucléosynthèse juste assez longue pour donner les produits attendus. Le seul inconvénient est qu'*on n'a jamais vu la couleur de la matière noire*… Gardons tout de même à l'esprit que cette absence est peut être provisoire, les recherches continuant en particulier au LHC.

Malgré cette difficulté, l'explication de cette nucléosynthèse primordiale est considérée comme l'un des piliers du modèle du Big Bang.

**Seconde difficulté :** La platitude de l'Univers. L'Univers nous semble aujourd'hui bien plat. Plat signifie que sa courbure est pratiquement nulle. La courbure est produite par la matière. On pourrait s'attendre à ce que l'univers présente une courbure, positive ou négative, la courbure nulle n'étant qu'une valeur particulière parmi une infinité de valeurs envisageables. Pourquoi l'univers est-il plat ? Ce ne peut être l'effet du hasard, et il faut absolument trouver un mécanisme qui le justifie.

**Troisième difficulté :** Le rayonnement micro-onde, ou fond diffus cosmologique. Après le Big Bang, l'expansion a fait baisser sans cesse la densité moyenne de l'Univers. Très chaud, celui-ci rayonnait énormément, mais l'énergie rayonnée était immédiatement absorbée par la matière très dense… Jusqu'au jour où cette densité est passé en-dessous d'une valeur critique, rendant l'Univers transparent. Dès lors, les rayonnements ont pu se propager librement, et traverser des étendues immenses pour parvenir jusqu'à nous aujourd'hui. Avec l'expansion, les longueurs d'onde se sont étendues comme l'espace, mille fois, et des rayonnements émis à 3.000 K nous parviennent maintenant à 3 K seulement (l'énergie d'un rayonnement est $E = h \nu = h c / \lambda$ si $\lambda$ a été multipliée par mille, E et la température qu'elle représente ont été divisées par mille). Il s'agit donc d'un rayonnement micro-onde.

Mais plus on améliore les instruments d'observation, plus ce rayonnement nous apparaît uniforme sur le ciel. Il montre un spectre de corps noir très pur, et une température incroyablement uniforme. Ses valeurs sont identiques sur tout le ciel, au cent millième près… Comment tout l'Univers observable a-t-il pu égaliser ses température à ce point ? Ceci en sachant que la vitesse d'expansion étant plus faible que la vitesse de la lumière, des points éloignés de l'Univers n'ont pas pu communiquer dans les premiers instants ? **Ce problème reste ouvert**.

> L'équilibre thermique de l'Univers ne peut être atteint que par échange d'énergie d'un point à un autre. Pour cela, il faut que l'énergie ait eu le temps de franchir la distance entre ces deux points. Or il est impossible que ce soit le cas dans les premiers instants de l'Univers, dans le cadre du Big Bang simple. Pour provoquer cette uniformisation, on a dû ajouter le paradigme de *l'inflation*, qui n'est là que pour ça. Et encore faut-il que cette inflation ait des propriétés bien précises, difficiles à admettre. L'alternative est de penser que l'Univers s'est formé dans le Big Bang à température uniforme, mais alors, on ne sait absolument pas pourquoi…

La dynamique des galaxies (étoiles périphériques), et des amas, ne s'explique pas si on considère la matière visible. Ces objets seraient instables. Qu'à cela ne tienne, on a inventé la matière noire pour y remédier : elle est là pour tout stabiliser. C'est la même que celle qui explique la nucléosynthèse, du moins on l'espère !

**Quatrième difficulté :** cerise sur le gâteau, on s'est aperçu en 1998, en observant des supernovæ de type Ia lointaines, que l'expansion de l'Univers n'est pas ralentie comme on le pensait, mais accélérée. Qu'importe, on ajoute la QSP (quantité suffisante pour) d'énergie noire, et le tour est joué. **Evidemment, nous n'avons pas la moindre preuve de son existence**.

Comme on le voit, le modèle standard dérive d'une idée simple, l'utilisation de la Relativité Générale, mais sa conception incorpore plusieurs éléments ajoutés pour la circonstance. Pour rendre le problème abordable, on impose des principes supposés raisonnables (Principe Cosmologique). Ensuite, à chaque problème, plutôt que de remettre en question le modèle, on lui ajoute un petit quelque chose pour le remettre sur pieds. Un ingrédient que les physiciens sont priés de bien vouloir découvrir dans leurs laboratoires. Sauf que jusqu'à maintenant, ils n'ont rien trouvé…

**Attention** toutefois ; Ces critiques ne doivent pas faire oublier que l'ensemble ainsi conçu représente vraiment bien les observations, au moins telles qu'elles sont aujourd'hui. Et il reste tout à fait possible que l'on découvre finalement matière et énergie noires. Les théories physique actuelles ne l'interdisent pas, et au contraire elles proposent des pistes pour les expliquer. La théorie peut le prévoir, mais les observations, les expériences, n'ont jamais rien vu jusqu'à aujourd'hui. Or sans observations pour vérifier, les théories n'ont pas de valeur…

On peut envisager des modèles alternatifs, ce que nous allons faire, mais actuellement aucun d'entre eux n'est à même de tout expliquer. Il faut dire qu'ils ont été infiniment moins travaillés que le modèle standard. Chacun est l'œuvre d'un petit nombre de chercheurs, et depuis un temps bien moindre. Alors, ça vaut la peine de passer en revue quelques-uns de ces modèles, au moins dans leurs grandes lignes. D'ici quelques années, certains auront été complètement écartés, parce qu'on aura trouvé des difficultés majeures (à moins qu'on n'y mette quelque rustine…). D'autres seront plus avancés qu'aujourd'hui, et resteront en course. L'avenir nous le dira.

#### Le modèle du rebond

L'inflation explique l'homogénéité et l'isotropie de l'Univers, parce qu'il aurait eu le temps de s'uniformiser avant elle. Elle explique aussi la platitude : plus une sphère est grande, plus elle paraît plate.

Mais un modèle autre, basé sur une évolution différente, les explique aussi. Il suppose que l'Univers existait avant son expansion, mais qu'il était en contraction. Il aurait poursuivi cette contraction assez longtemps pour s'uniformiser, puis aurait inversé cette évolution. L'arrêt de la contraction se serait produit lorsque les dimensions auraient atteint la dimension de Planck (au temps de Planck). C'est extraordinairement petit, mais *stricto sensu* la singularité du Big Bang est évitée. Dans sa contraction, l'Univers aurait bien eu le temps aussi de s'aplatir, et ce problème-là est également évité.

Notez bien que le rebond, atteignant le temps de Planck, se produit dans un état physique totalement hors de portée de nos théories actuelles. Cet aspect du modèle le ramène, à ce point de vue, au même point que le Big Bang : il n'explique rien de mieux.

Pour le rendre valide, il faudrait aussi expliquer que la contaction antérieure s'arrête, puis s'inverse en expansion. Mais nous n'avons pas de pistes pour cela.

## *Abandon du Principe Cosmologique*

Une idée semble-t-il plus prometteuse ne remet pas en cause les grandes lignes du modèle standard, mais opère une analyse plus fine des principes de base. Plus particulièrement du Principe Cosmologique qui, comme nous l'avons vu plus haut, est une approximation très grossière à petite échelle, et qui ne prend sens qu'à des échelles de l'ordre de plusieurs centaines de méga parsecs.

Dans ces conditions, comment les amas de galaxies auraient-il pu se former, **sans modifier la géométrie de l'Univers** ? Leur masse est tout de même loin d'être négligeable. Un modèle réaliste devrait bien sûr prendre en compte cette structuration de l'Univers. C'est justement ce que nie le Principe Cosmologique.

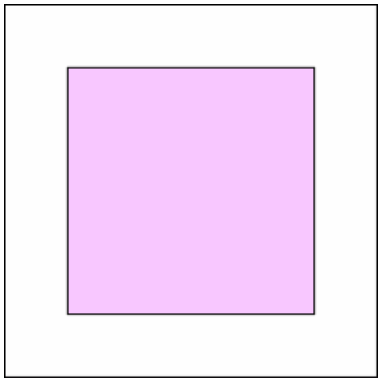
Que pourrait-on dire si on partait d'un principe plus réaliste, en remettant en cause l'hypothèse d'isotropie et/ou d'homogénéité de l'Univers ?

Plusieurs chercheurs se sont penchés sur ce problème, sachant que l'abandon de ces hypothèses complique passablement les équations, au risque de rendre les difficultés mathématiques insurmontables. Considérons d'abord l'isotropie.

#### Les solutions non isotropes

Si l'Univers est isotrope, la métrique contient un facteur d'échelle R(t), qui ne dépend pas des coordonnées d'espace. Le facteur d'échelle est le coefficient, variable au cours du temps, qui multiplie les distances entre deux points quelconques. Si à l'instant $t_0$ la distance entre deux points est *d*, à l'instant *t* elle sera $d \times R(t)$. Le modèle de Big Bang utilise un tel facteur d'échelle.

Si l'Univers est anisotrope, il n'a pas les mêmes propriétés dans toutes les directions. L'allongement des distances selon la direction x n'est pas le même que selon la direction y. Alors, le facteur qui multiplie ces allongements doit être différent, c'est-à-dire que $R(t)$ est remplaçé par trois facteurs : $R_x(t)$, $R_y(t)$, $R_z(t)$. On peut imaginer, en deux dimensions, un tissus élastique que l'on allongerait plus dans une direction que dans l'autre.



$R_x(t) = 1{,}01$, $R_y(t) = 0{,}99$

Il est évident que ceci complique les équations qui en dépendent, et rend bien plus difficile la recherche de solutions. Il n'est donc pas étonnant que les premiers chercheurs se soient abstenus d'envisager ce cas.

Formellement, c'est la métrique qui est modifiée. La métrique est la fonction qui donne la distance infinitésimale entre deux points voisins. Dans le cas anisotrope, il n'y a pas qu'une seule métrique possible, il y en a neuf. Elles ont été étudiées par Luigi Bianchi, qui leur a donné son nom, en 1897. Etudiées avant la Relativité Générale, ces métriques n'avaient alors qu'un caractère purement mathématique. Elles ont pris ensuite un caractère physique, mais toutes n'ont pas la même valeur de ce point de vue. De plus, les difficultés de résolution ne sont pas de même niveau, et là encore, ce sont les plus accessibles qui ont été les plus étudiées.

On fait déjà un tri en considérant que l'Univers **actuel** est tout de même assez isotrope. Aussi les métriques retenues sont celles qui tendent vers un espace-temps isotrope. La question importante, pour laquelle Alexandre Friedman s'est intéressé aux métriques de Bianchi, est "ces modèles présentent-ils des singularités ?" Il se trouve que oui. Mais ces singularités sont plus diverses que celle dérivée du Big Bang.

Selon la métrique choisie, on constate que l'espace-temps peut être en contraction selon une dimension, et en dilatation selon les deux autres… Et de plus, ces dimensions peuvent s'échanger. Bref, si on se rapproche de la singularité, on obtient des oscillations qui empêchent de déterminer vraiment ce qu'il se passe. Dans certains cas, on observe même un comportement chaotique.

Vers la singularité, il arrive qu'une dimension s'effondre et tende vers 0, alors que les autres conservent des valeurs finies. C'est une singularité en forme de crêpe. Une autre métrique donne une singularité unidimensionnelle. Ces métriques présentent donc beaucoup de possibilités, qui demanderaient à être confrontées à l'expérience. Mais les difficultés ont freiné jusqu'à maintenant des études précises, et elles restent donc à l'état d'ébauches.

**Les modèles non homogènes**

Voyons maintenant ce que donne l'abandon de l'homogénéité. La complexité des équations est bien grande, car les métriques non homogènes sont les plus générales possibles. Les facteurs d'échelle sont maintenant fonction du lieu.

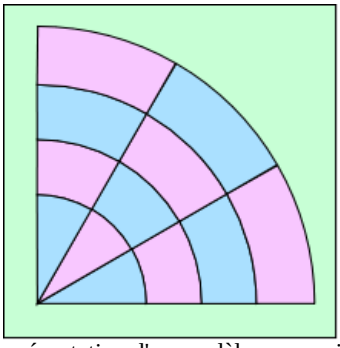
> Remarquez à quel point ceci est naturel, même si on le ressent pas *a priori*. Imaginez l'Univers, avec une galaxie dedans. Il n'y a pratiquement pas de matière partout, sauf où se trouve la galaxie. Il est bien évident que si cet Univers est en expansion, celle-ci sera freinée par la masse de la galaxie là où elle se trouve, et de moins en moins à mesure qu'on s'en éloigne ! Imaginer que l'expansion serait partout pareille est au contraire bien absurde ! Les facteurs d'échelle seront donc de moins en moins perturbés par la masse lorsqu'on s'en éloigne. Ils doivent donc varier selon la position considérée dans l'espace : $R_x(x, y, z, t)$, $R_y(x, y, z, t)$, $R_z(x, y, z, t)$.

**Métriques de Lemaître-Tolman-Bondi**

Ces métriques présentent une symétrie sphérique : elles possèdent un centre. Il semble donc évident qu'elles ne puissent s'appliquer à l'Univers, sans remttre en cause le Principe Copernicien : la Terre n'est pas au centre de l'Univers ! Pourtant, ces métriques jouent un rôle important en ce qu'elles permettent d'approcher un problème, même si les conditions ne sont pas réalistes.

Ces métriques changent en fonction de la distance à la Terre, ce qui est correct pour prendre en compte les variations locales de l'espace-temps, mais elles changent de la même manière dans toutes les directions : c'est cela qui leur donne la symétrie sphérique, et qui est en désaccord avec ce que nous pensons profondément de l'Univers. Mais si on s'intéresse justement aux phénomènes liés à l'éloignent, elles peuvent nous donner des indications.

La symétrie sphérique se conçoit en imaginant que l'Univers ainsi décrit serait formé de coquilles concentriques à la Terre, ayant chacune ses propres propriétés physiques : densité de matière, température… Considérons un axe issu de la Terre, et une petite zone conique autour de lui. Cette zone est caratérisée par sa densité (celle de la coquille à laquelle elle appartient), qui varie selon la distance à la Terre. On peut penser à une zone semblable contiguë à la première, mais décrite par un autre modèle de même nature, avec simplement une loi de densité différente. Ainsi, on peut concevoir que l'Univers soit découpé en zones coniques centrées sur la Terre, chacune étant décrite par un modèle semblable, mais avec une loi de densité différente.



Représentation d'un modèle composite
Les couleurs correspondent à deux densités différentes

Ceci ne constituera pas un vrai modèle parce qu'il n'y a pas de continuité d'une zone à l'autre. Il ne nous apprendra rien sur le passage d'une zone à l'autre. Mais radialement, il prend un certain sens.

En utilisant ces métriques, Marie-Noëlle Célérier a pu obtenir une relation entre la luminosité d'un objet et son décalage vers le rouge. Ceci nous rappelle un vieux souvenir : la loi de Hubble ! On obtient donc une nouvelle loi semblable, mais cependant différente.

Utilisant cette loi, Marie-Noëlle Célérier a montré que l'observation des SNIa peut s'expliquer tout naturellement **sans faire intervenir la moindre énergie noire** !

En fait, l'accélération de l'expansion serait un artéfact, une conclusion fautive basée sur un modèle trop simpliste. Il ne serait plus nécessaire non plus de réintroduire la Constante Cosmologique. Celle-ci est en effet la traduction mathématique d'une grande variété de phénomènes physiques envisageables : l'énergie noire en est un.

C'est là l'intérêt de ces modèles, qui ne sont pas réalistes certes, mais qui, abandonnant le simplificateur Principe Cosmologique, non validé par les observations, ouvrent des horizons nouveaux à l'étude de la Cosmologie. Un vrai modèle admissible est encore loin, il y a un très important travail mathématique à faire pour cela ; mais la voie semble tracée pour une nouvelle approche dont les fondements sont plus réalistes qu'avant.

**Modèle de Thomas Buchert**

Thomas Buchert a envisagé une autre façon de réintroduire des inhomogénéités dans un modèle. Partant de la constation que la méthode traditionnelle gommait toutes les irrégularités de l'Univers en prenant la densité moyenne de matière, identique partout, il a supposé que l'Univers était homogène et isotrope **en moyenne**. Ce qui est une façon de raccorder le Principe Cosmologique applicable aux grandes échelles (qu'il obtient donc par la moyenne), avec les inhomogénéités évidentes aux petites échelles.

Le Grand Mur est une immense structure qui regroupe des amas de galaxies. Certaines de ces structures s'étendent sur une distance de plus d'un milliard d'années-lumière. Les vides sont de même importance. L'Univers prend donc une forme en nid d'abeille, ou en mousse de savon. Mais en-dessous du milliard d'années lumière, il est loin d'être homogène. La prise en compte de ces immenses inhomogénéités semble bien incontournable !

Si vous mélangez de l'eau chaude et de l'eau froide, il est bien évident que la température moyenne que vous obtiendrez dépend des proportions d'eau chaude et d'eau froide. De la même manière, l'expansion moyenne de l'Univers dépend de la taille des différentes zones contributrices. Considérons deux zones, l'une de faible densité et l'autre de forte densité. L'expansion les emporte toutes deux de la même façon, mais elle est libre dans la zone de faible densité, et ralentie dans l'autre. On peut admettre que la zone dense verra son expansion s'annuler, puis s'inverser en contraction, pour former un amas de galaxies. Sa taille diminue alors beaucoup. Et de ce fait, sa contribution à l'expansion moyenne aussi ! L'expansion forte qui continue dans l'autre zone l'emporte largement dans la moyenne, qui de ce fait peut augmenter. On constate alors une accélération de l'expansion moyenne, alors que l'expansion est décélérée dans toutes les zones…

Cette remarque a été formulée par Syksy Räsänen à partir du modèle proposé par Thomas Buchert. Comme dans le modèle de Marie-Noëlle Célérier, on arrive à la conclusion que l'accélération de l'expansion, déduite de l'observation des supernovæ, pourrait n'être qu'un leurre, conséquence d'un modèle inadapté à la réalité.

> Précisons bien ici que l'observation des supernovæ ne donne pas une mesure de la vitesse d'expansion !
> Elle ne donne que la magnitude apparente des objets, et leur décalage spectral. On déduit une accélération en évaluant leur distance d'après le décalage spectral, en utilisant le loi de Hubble. L'accélération repose donc, non seulement sur l'observation, mais tout autant sur l'utilisation du modèle standard de Big Bang. Si par hasard celui-ci n'était pas parfaitement exact, l'accélération de l'expansion n'aurait plus de base…

Encore une fois, il est bien trop tôt pour en déduire que le modèle standard est faux. Mais ces travaux illustrent le fait que la Cosmologie en est encore à ses débuts. Elle est très loin d'être achevée, et nos connaissances sur l'Univers doivent être encore considérablement approfondies.

## *Résumé*

L'équation d'Einstein de la gravité est la base : $G = \kappa T$, où G représente la géométrie de l'espace-temps, et T son contenu en matière-énergie.

| | | |
|---|---|---|
| **Univers vide de de Sitter** | **T = 0** | **ρ = 0** |

| | | |
|---|---|---|
| **modèles de Friedman-Lemaître** | **T = constante** | **ρ = ρ(t)** |
| **modèle général** | **T quelconque** | **ρ = ρ(x, y, z, t)** |

Les modèles de Friedman-Lemaître se divisent en trois catégories :

- le modèle critique, pour lequel l'expansion ralentit éternellement, et tend vers 0 au bout d'un temps infini. La densité de l'Univers définit ce modèle. On la nomme *densité critique* $\rho_c$.
- les modèles fermés, pour lesquels la masse est plus grande, et stoppera l'expansion dans un temps fini. Ensuite, l'Univers sera en contraction vers un Big Crunch symétrique du Big Bang.
- Les modèles ouverts, pour lesquels la densité est plus faible que la densité critique. L'expansion se poursuivra toujours, et sa vitesse ne tend pas vers 0. A l'infini, elle reste rapide.

Dans une galaxie, il existe une relation entre la masse globale des étoiles et leur luminosité globale : M = 4 L, les deux valeurs exprimées en unités solaire (masse solaire et luminosité solaire). Cette relation permet de déterminer la masse d'une galaxie en observant sa luminosité. On en déduit que la densité moyenne de l'Univers doit être de l'ordre de $\rho_{vis} = \rho_c / 10$.

Très peu de temps après le Big Bang, l'Univers se refroidissant par l'expansion, une brève période a permi la synthèse de l'hélium à partir de l'hydrogène. La masse de l'Univers, qui freine l'expansion, détermine la durée de cette période, et donc la quantité d'hélium primordial. La mesure de cet hélium indique que la densité moyenne de l'Univers doit être de l'ordre de la densité critique : $\rho_{vis} = \rho_c$

Ces deux démarches différentes amènent à deux valeurs contradictoires de la densité de l'Univers. Plutôt que de remettre en question tout le modèle, les cosmologistes ont inventé la *matière noire*, qui représente la différence. L'Univers contiendrait donc dix fois plus de matière noire (jamais observée) que de matière ordinaire. Pour cela, il faut bien entendu que la matière noire ne participe pas aux réactions nucléaires, et ne soit pas visible. Elle est donc très différente de la matière ordinaire.

Une supernova de type Ia est l'explosion d'une naine blanche qui accrète de la matière, et dépasse ainsi la masse de Chandraskhar. Elle explose au moment où elle dépasse cette limite, et donc toutes les SNIa explosent dans les mêmes conditions. Aussi ont-elles toutes les même propriétés. Des supernovæ Ia lointaines ont été observées. De leur décalage spectral, on déduit leur distance par la loi de Hubble. Connaissant la distance, on déduit la magnitude absolue de la magnitude apparente. Or la magnitude absolue ainsi calculée ne correspond pas à la valeur attendue. On a remis en cause la distance déduite de la loi de Hubble, mais non la loi de Hubble elle-même ! En imaginant que la *constante* de Hubble soit en fait variable dans le temps, on déduit que l'expansion est accélérée.

Enfin, l'observation du fond cosmologique montre que 380.000 ans après le Big Bang, l'Univers était très homogène, au cent millième près. Or l'expansion est bien trop lente pour que l'Univers ait eu le temps de s'uniformiser ainsi depuis le Big Bang. Pour pallier à cette difficulté, on a imaginé l'inflation : pendant un temps très bref ($10^{-35}$ secondes) l'expansion a été exponentielle. Ceci permet de comprendre que l'Univers observable aujourd'hui ait été assez petit à l'origine pour s'uniformiser.

De ces considérations, nous déduisons le tableau suivant :

RG + principe cosmologique => modèles de Friedman-Lemaître (MFL)
MFL + nucléosynthèse primordiale => matière noire
MFL + SN Ia => accélération de l'expansion => énergie noire
MFL + fond cosmologique => inflation

---=OO=---




**Les satellites des planètes géantes**

Tout d'abord, voici une liste restreinte des principaux satellites des planètes géantes, par ordre d'éloignement croissant à la planète :

- Jupiter : Amalthée, Thébé, Io, Europe, Ganymède, Callisto,
- Saturne : Janus, Mimas, Encelade, Téthys, Dioné, Rhéa, Titan, Hypérion, Japet, Phœbé.
- Uranus : Puck, Miranda, Ariel, Umbriel, Titania, Obéron.
- Neptune : Despina, Galatée, Larissa, Protée, Triton, Néréide.

**Impressionante diversité**

L'exploration du système solaire externe (à partir de Jupiter) a été faite en particulier pour trouver des matériaux originels, afin de mieux comprendre la formation du système solaire. On croyait que cette région froide n'avait pas évolué depuis sa formation. La première surprise a été de constater à quel point elle est dynamique. Le trait le plus important est la diversité géologie et géochimique de ces mondes.

Les satellites des planètes géantes sont :

- de petits blocs de moins de 200 km de diamètre, soit proches, soit lointains de leur planète ;
- des corps intermédiaires de 200 à 1.000 km de diamètre ;
- de gros satellites dont la taille est de l'ordre de celle de Mercure. Ils vont de 2.700 à 5.260 km de diamètre. Ils sont plus gros que Pluton. Ce sont les satellites galiléens, Titan et Triton.

L'eau, sous forme de glace, est très abondante dans ces régions. La majorité des satellites des planètes géantes, ainsi que Pluton, sont couverts d'une carapace de glace, essentiellement d'eau. Io n'a pas de glace d'eau à sa surface, mais du $SO_2$ à l'état de glace. Les glaces sont moins denses que les roches, aussi ont-elles tendance à remonter à la surface où elles les remplacent. Le mécanisme responsable correspond à la fusion en profondeur et un jaillissement en surface, suivi d'un refroidissement. C'est du volcanisme !

La glace d'eau a été détectée dans les années 70 par spectroscopie dans le proche et le moyen infrarouge sur les satellites galiléens. Elle existe aussi sur les principaux satellites de Saturne et d'Uranus.

Les mesures de densité donnent 1 à 2 fois celle de la glace. Par conséquent, ces corps sont formés de glace d'eau dans la proportion de 30 à 70 % en masse. Ils possèdent donc une croûte de glace épaisse parfois de plusieurs centaines de kilomètres.

Plus on s'éloigne du Soleil, plus la température baisse. Et on s'attend à trouver d'autres sortes de glaces, dont le point de fusion est plus bas : $CH_4$, $NH_3$ sont stables et peuvent former jusqu'à 10 % des satellites extérieurs. On trouve aussi CO, $N_2$, $CH_3OH$ (*méthanol*, ou alcool de bois), $CH_2O$ (*formaldéhyde*, ou aldéhyde formique ; en solution dans l'eau, donne le *formol* ; on en trouve aussi dans les comètes).

La complexité chimique des satellites est en relation avec leur localisation. Chaque protoplanète a créé de la chaleur, par l'énergie gravitationnelle de l'accrétion. Cette chaleur a altéré l'équilibre chimique autour d'elle. La composition des satellites peut donc différer de celle des comètes, contrairement à ce qu'on pensait jusqu'à l'exploration spatiale. Jupiter étant plus grosse que Saturne, son environnement a été plus chaud, ne permettant pas le maintien de méthane et d'amoniac.

C'est à partir de Neptune que l'on peut trouver les glaces les plus volatiles en abondance : $CH_4$, $CO_2$, CO, $N_2$, $H_2O$ sur Triton et Pluton.

**Energie**

La chimie ne peut se développer qu'avec l'aide d'une source d'énergie. La géologie aussi demande une source d'énergie pour pouvoir évoluer. L'état de surface d'un corps permet donc de se faire une idée immédiate de l'état thermique du corps. Le processus géologique le plus important est le volcanisme, qui apporte en surface des matériaux venant des profondeurs. Qui dit volcanisme dit chaleur. Et pourtant, la géologie de ces corps glacés est extrêmement active (ou l'a été). Le volcanisme est attesté sur plusieurs de ces objets : Io, Triton, Europe, Encelade. D'autres ont eu cette activité dans le passé : Ganymède, Dioné et Miranda ont été fracturés en surface dans un passé relativement proche, mais sont inactifs aujourd'hui.

Comment le volcanisme peut-il se produire sur des corps dont la température de surface ne dépasse jamais 150 K ? C'est la source d'énergie qu'il faut découvrir, capable de fondre une grande quantité de glace, et de produire les fractures de la croûte pour permettre le passage de ces curieuses laves. La radioactivité invoquée pour les planètes principales ne peut être invoquée ici. Il y a bien trop peu de matériaux radioactifs pour cela.

Des satellites voisins présentent des surfaces anciennes ou récentes, sans que leur localisation ou leur composition puisse l'expliquer. **Les**

**marées crustales apportent l'explication nécessaire**.

En résumé, ces satellites devraient être inertes depuis bien longtemps, la radioactivité étant éteinte. Ceux qui présentent une activité actuelle ou récente sont soumis à des marées, qui en sont le moteur. Les marées sont d'autant plus importantes que les résonances entre satellites sont plus fortes.

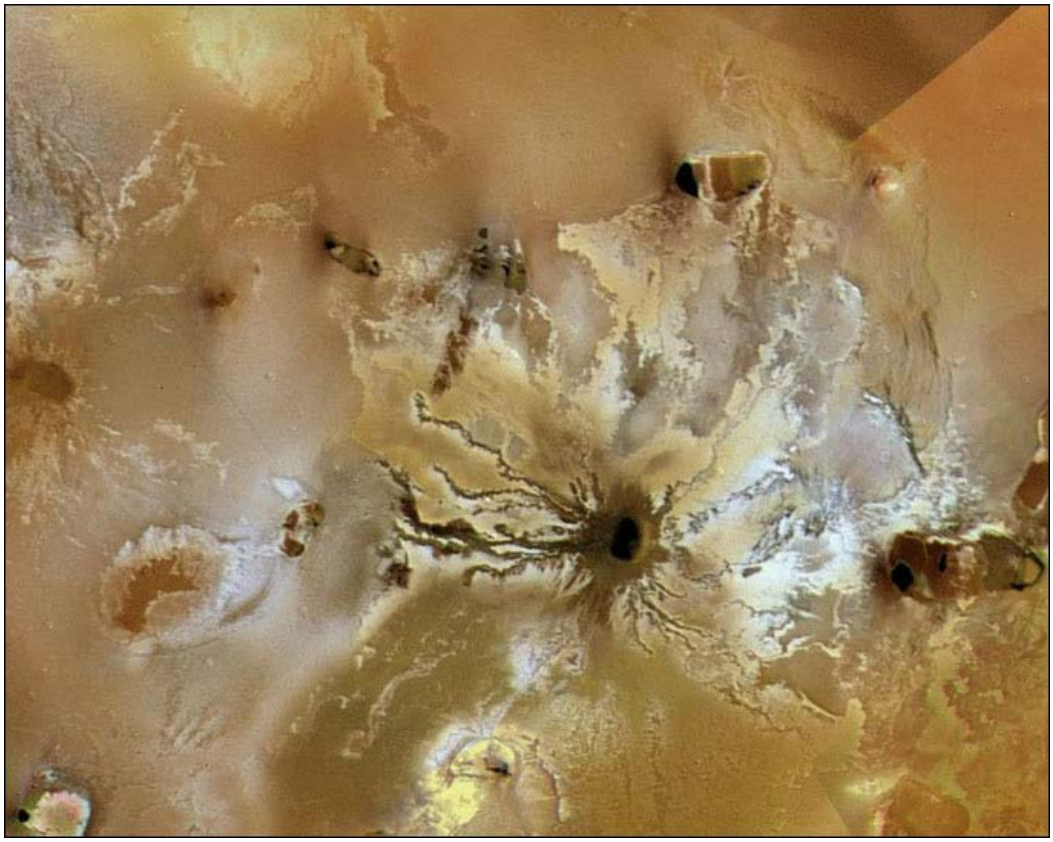
## *Jupiter*

### Io (Jupiter)

Sur Io, et sous l'influence des marées, la croûte se soulève de 100 mètres engendrant, par le frottement des micro-fractures, une chaleur suffisante pour fondre bien des matériaux. La surface de Io est la plus jeune du système solaire, la Terre peut-être mise à part. Elle est constituée de molécules soufrées. La température des laves atteint 1.700 , bien plus chaudes que toutes les laves terrestres !

L'importance des marées sur Io est due à la masse de Jupiter, qui est 1.300 fois supérieure à celle de la Terre, et aussi aux résonances avec les trois autres satellites galiléens (résonances de Lagrange).

La densité des satellites galiléens décroît avec l'éloignement à Jupiter, alors que la proportion d'eau qu'ils contiennent croît. En même temps, l'activité croît en s'approchant de Jupiter. Io est le plus proche et le plus actif, il ne contient pas d'eau car il est composé de roches et de soufre.



Ra Patera NASA/JPL-Caltech/Univ. of Arizona

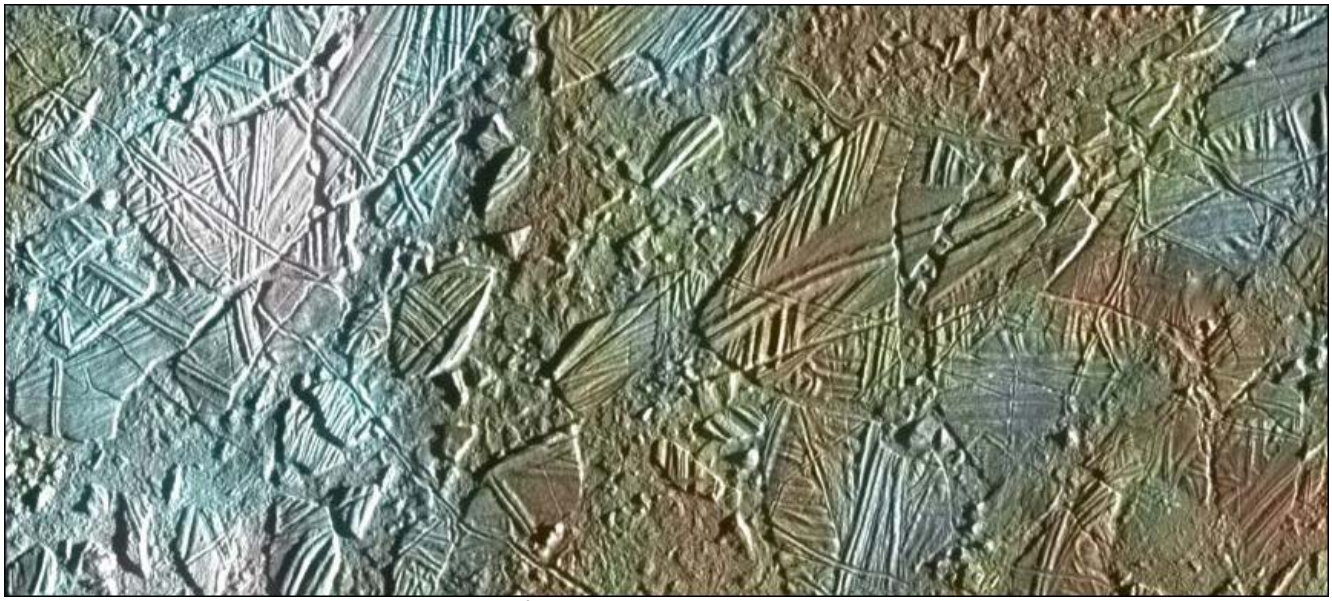
Ra Patera est un grand volcan bouclier sur Io. Il est vivement coloré par divers composés de soufre en particulier. La cheminée est la tache noire centrale. Le flot de lave s'étend à plus d'une centaine de kilomètres.

Io possède un champ magnétique intrinsèque d'un dixième de celui de la Terre. L'analyse de ce champ indique une couche d'eau à quelques centaines de km de profondeur. La surface est inactive, mais pas l'intérieur. 66 % de la surface est brillante et jeune. Le reste est vieux et très cratérisé. La plupart des terrains brillants sont fracturés, ce qui a effacé toute structure antérieure. Ce remodelage a été produit par un volcanisme qui a amené en surface de l'eau ou un mélange de glace et d'eau.

### Europe (Jupiter)

Les marées sur Europe ne dépassent pas 30 m, ce qui est déjà respectable, mais sous la glace se trouve un océan liquide, entretenu par ces marées. La surface est jeune, et pourrait être encore active.

Europe est recouvert d'un océan, avec une banquise de seulement une centaine de kilomètres. Cette épaisseur relativement faible (comparée à celles des autres satellites), est due à la grande force de marées, à cause de la proximité de Jupiter.



Surface d'Europe Galileo Project, JPL, NASA

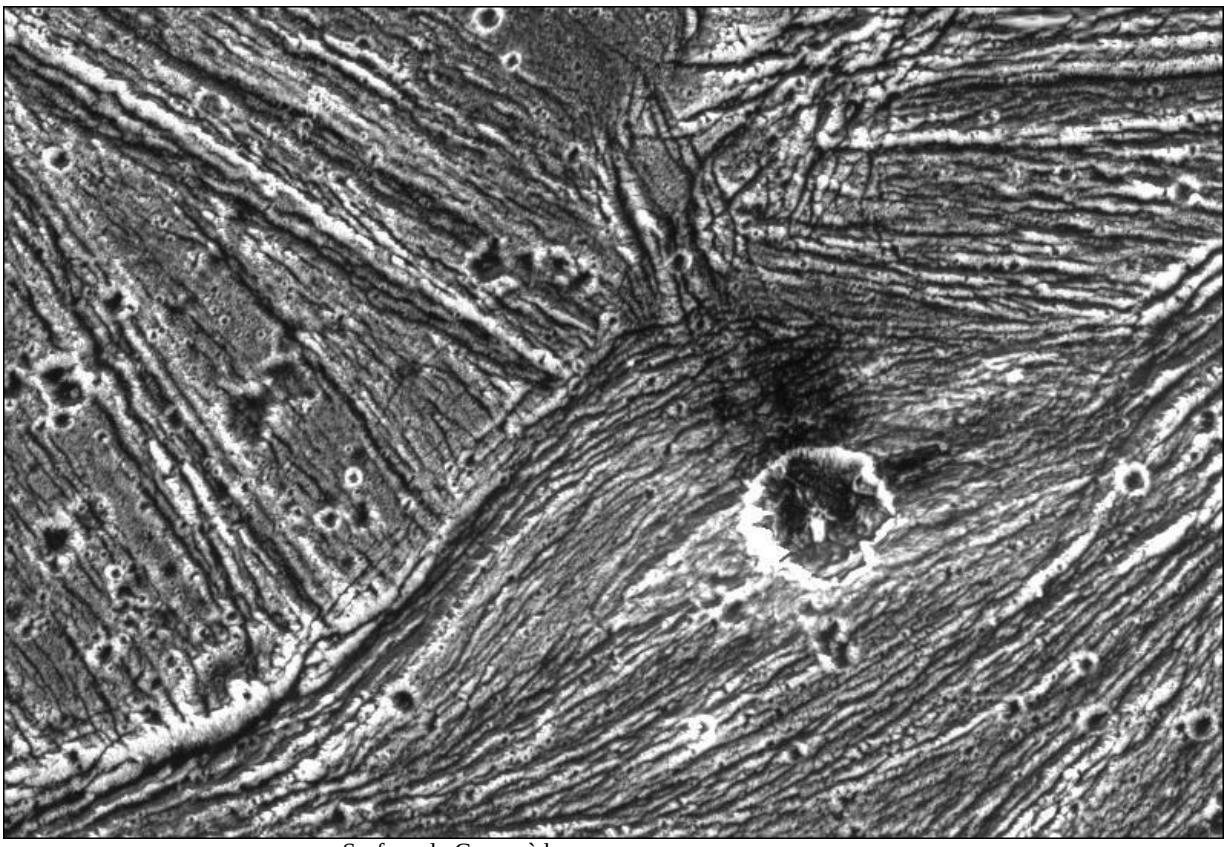
De grands pans de la croûte glacée d'Europe, de plusieurs centaines de km, ont glissé l'un par rapport à l'autre. Des cellules de convection ont également laissé leur trace dans la glace. La surface d'Europe a moins de 100 millions d'années. Pour expliquer ces différents aspects, la présence d'un océan liquide sous la glace serait idéale. Or les mesures magnétométriques indiquent la présence d'un champ qui s'explique par des mouvements de matière conductrice. Ce serait le cas d'un océan salé. Ainsi, sans en avoir la preuve observationnelle définitive, il est très probable qu'Europe ait un océan sous la glace. On a envisagé une vie possible dans cet océan, mais ceci n'est à l'heure actuelle que spéculation.

**Ganymède (Jupiter)**

La quantité d'eau présente sur Ganymède équivaut à la masse de la Lune ! Ganymède est fortement différencié, avec un noyau interne de Fe-Ni, un noyau externe de roches, et un manteau de glace et d'eau de 800 km.

La surface est formée essentiellement de glace d'eau, avec aussi $CO_2$ gelé, et des traces de $O_2$ gelé.

Ganymède est recouvert d'un océan sous plusieurs centaines de kilomètres de glace.



Surface de Ganymède Galileo Mission Team, Galileo Spacecraft, NASA

La surface de Ganymède est assez ancienne, et le satellite ne semble plus actif. Mais le dernier remodelage ne remonte pas à plus d'un à deux milliards d'années. Ganymède a probablement eu sa période chaude, associée à des marées intenses, lorsque des résonances maintenant détruites l'ont produite.

Ganymède et Callisto, les plus externes, sont constitués de plus de 50 % d'eau. Ils sont probablement inertes. Europe est intermédiaire : sa densité est 3 fois celle de l'eau, ce qui prouve qu'il contient des roches. Il possède probablement un noyau de fer-nickel, un manteau de silicates, et une couche d'eau et de glace de 100 km d'épaisseur. La surface d'Europe est très fracturée et peu cratérisée. Elle est donc jeune, et même encore active.

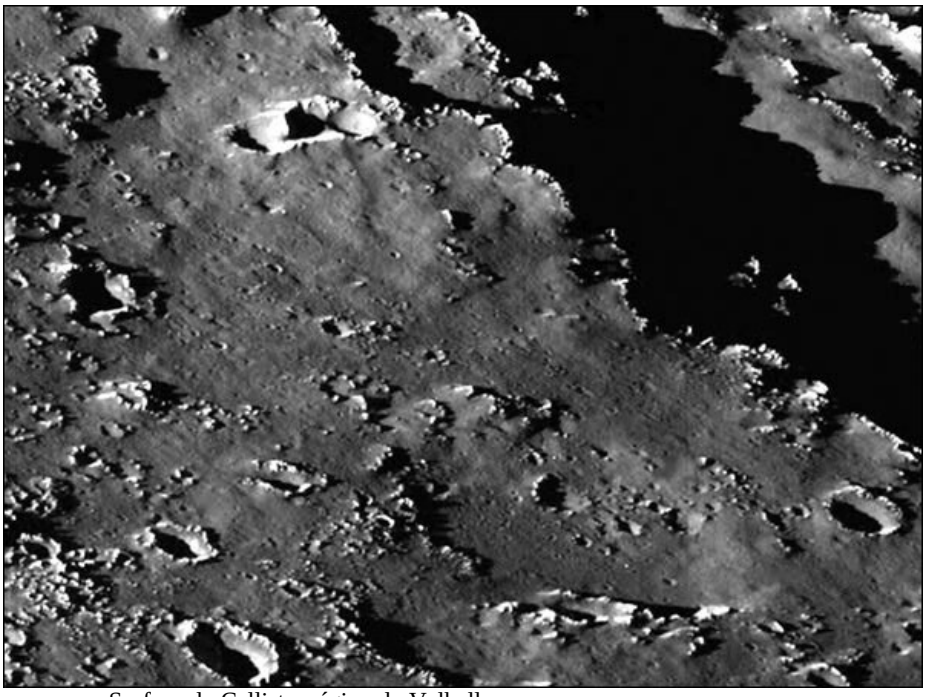
**Callisto (Jupiter)**

Callisto ne présente aucun signe d'activité.

Il y a de la glace de $CO_2$ sur Callisto (probablement formé par l'impact des ions de la magnétosphère jovienne sur la glace).

Callisto est recouvert d'un océan sous plusieurs centaines de kilomètres de glace.

Callisto est bien plus morne que les autres. Aucune trace d'activité en surface, à part les cratères d'impact. Bien que de taille comparable à celle de Ganymède, Callisto n'est pratiquement pas différencié. Pas de noyau ni de manteau (c'est par gravimétrie qu'on le détermine). Les traces des impacts montrent essentiellement de la glace, mais l'intérieur du satellite est un mélange de glace et de roches. Pas de champ magnétique. On pense cependant qu'une couche de 200 km de liquide pourrait se trouver sous la croûte. Des études plus précises *in situ* doivent être menée pour améliorer les connaissances de ces divers satellites.



Surface de Callisto, région de Valhalla Galileo Mission Team, Galileo Spacecraft, NASA

On remarque l'absence de petits cratères, et l'aspect déchiqueté des remparts de cratères visibles. Evidemment, un processus d'érosion a été à l'œuvre. L'explication probable est la sublimation de composés volatils, qui maintenait des poussières. Le bassin Valhalla a été creusé par un grand impact, tôt après la formation du satellite.

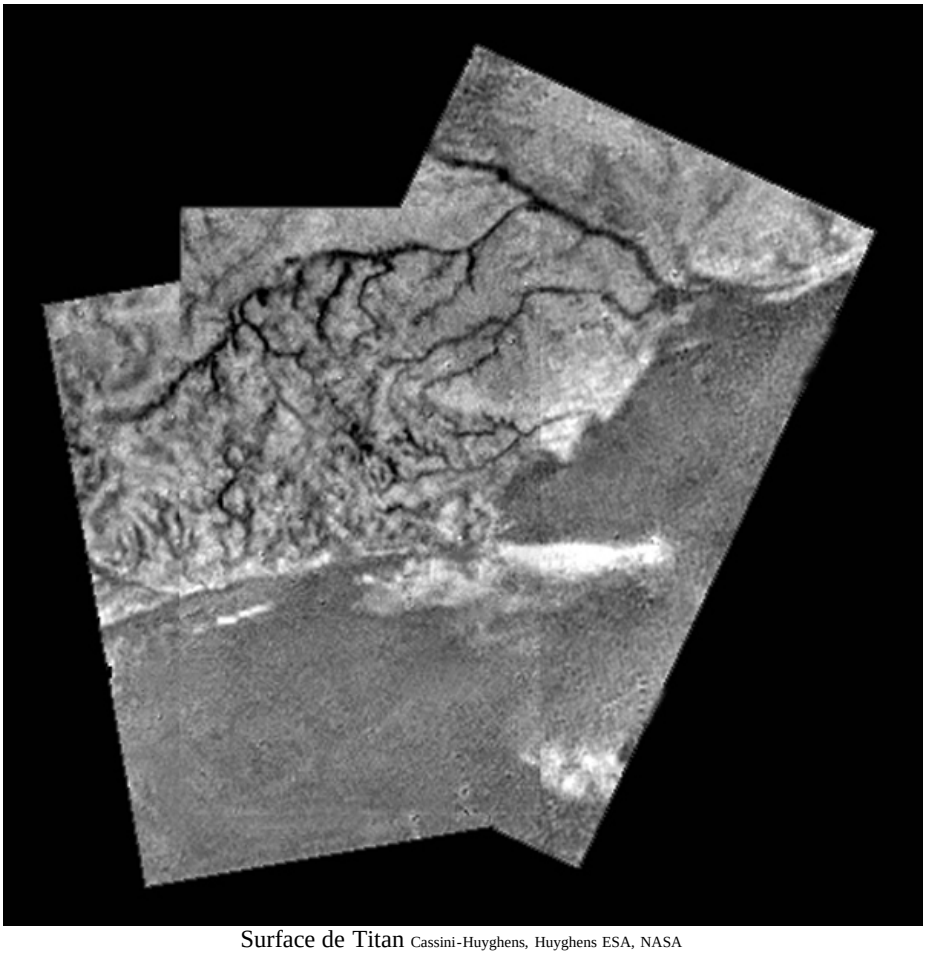
Pourquoi Callisto, si proche et si semblable à Ganymède, n'est-il pas diférencié ? Il semble en fait que Ganymède ait subi, à une période de son histoire, de violents effets de marées, rendus possibles par une orbite un peu différente de ce qu'elle est aujourd'hui. Callisto, plus lointain de Jupiter, n'aurait pas subi pareille évolution. Mais la masse de Callisto est de 35 % plus faible que celle de Ganymède, et cette différence, par la moindre quantité d'éléments readioactifs, pourrait aussi avoir limité la température interne et la différenciation de Callisto.

## *Saturne*

**Titan (Saturne)**

Titan est le second satellite par la taille. Il pourrait avoir les mêmes ingrédients qui ont donné la vie sur la Terre, dans un mélange différent.

Titan possède une atmosphère épaisse (1,5 atmosphères), constituée principalement d'azote moléculaire $N_2$, mais riche en méthane $CH_4$. Elle contient en moindre quantité d'autres hydrocarbures : acétylène $C_2H_2$, acide cyanhydrique HCN. Elle s'entoure d'une couche de brumes oranges de méthane à 200 km d'altitude. La composition interne des satellites de Saturne comprend sans doute d'autres composés que la glace d'eau et les roches.

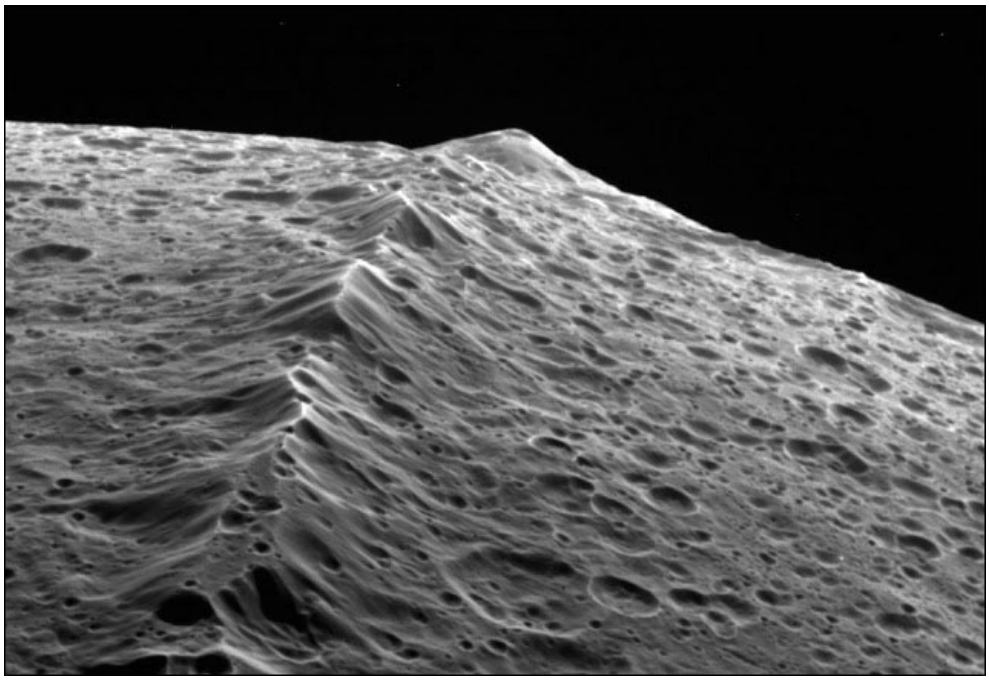


Surface de Titan Cassini-Huyghens, Huyghens ESA, NASA

La plupart des satellites moyens de Saturne sont assez cratérisés, et par conséquent assez vieux. Mais Encelade, petit satellite de 450 km, second à partir de Saturne, n'a pratiquement pas de cratères. Sa surface ressemble à celle de Ganymède. Mimas, à proximité, n'est qu'un gros glaçon sans histoire. Dissemblance curieuse entre ces deux voisins.

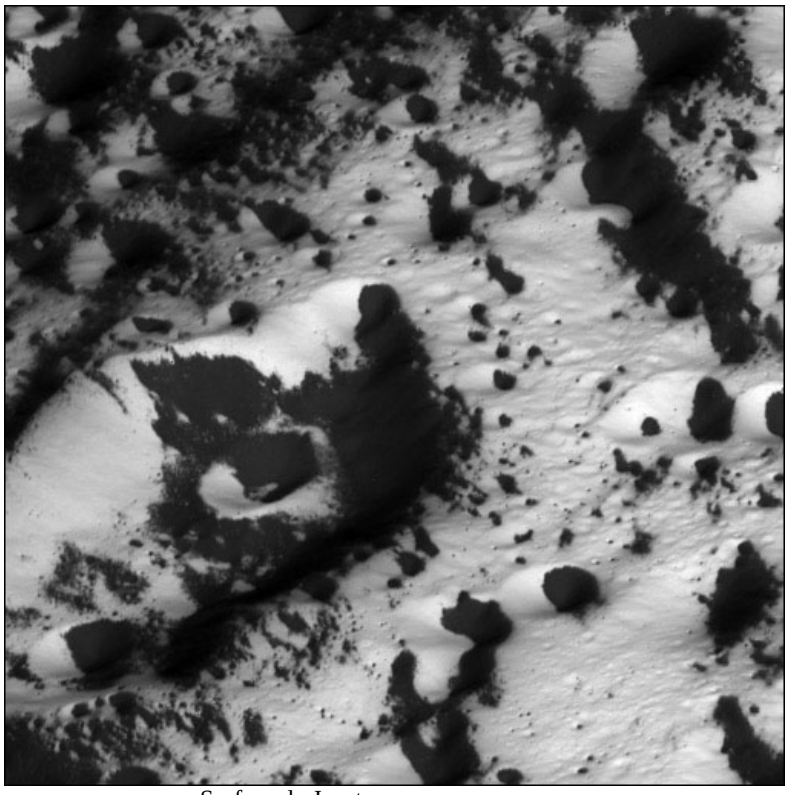
**Japet (Saturne)**

Japet est particulier : il a deux faces ! Jean-Dominique Cassini avait déjà remarqué qu'une face était plus brillante que l'autre. Le satellite est bloqué par les marées, et tourne toujours la même face vers Saturne. C'est celle-là qui est très sombre, avec un albédo de 4 %. Cet hémisphère est nommé *Cassini Regio*. L'hémisphère opposé à Saturne est au contraire très brillant, avec un albédo de 60 %. Il est nommé *Roncevaux Terra*. Les deux hémisphères sont cratérisés.



Bourrelet de Japet NASA/JPL/Space Science Institute

Le matériau sombre est un dépôt à la surface de Japet, d'au plus une dizaine de centimètres d'épaisseur. Cette estimation provient du radar de Cassini, et de mesures directes des trous produits par des impacts. Il n'y a pas de zones grises, pas de mélange entre le clair et le sombre.



Surface de Japet NASA/JPL/Space Science Institute

Cette image a été prise à la limite entre les deux hémisphères : le sombre, à l'avant du satellite, et le clair à l'arrière.

Ce dépôt provient certainement d'un autre satellite, Phœbée. Celui-ci baigne dans un anneau de Saturne nouvellement découvert, car il n'est visible qu'en infrarouge. Très ténu, il ne réfléchit pas la lumière du Soleil, et reste invisible. En infrarouge, sa faible température lui permet cependant d'émettre le rayonnement qui l'a trahi. Les impacts météoritiques sur Phœbée lui arrachent un peu de glace, mélangée à de la poussière. Chauffée par le Soleil, la glace se sublime, et il reste la poussière qui produit l'anneau. Par le jeu des perturbations, ces poussières parviennent finalement à tomber sur Japet, et y produisent le dépôt sombre.

C'est sur la face avant de Japet, tournée vers l'anneau, que le dépôt se fait donc, et ceci explique la dissymétrie de Japet. Si le satellite n'était pas synchrone avec Saturne, le dépôt se ferait uniformément, et il n'y aurait pas de dissymétrie. Une fois que le dépôt a commencé, et que la surface est devenue un peu plus sombre, elle absorbe mieux le rayonnement solaire et sa température monte à 130 K. La glace se sublime alors et libère des poussières, ce qui accroît encore l'assombrissement. Par contre, la vapeur d'eau produite se répand dans la faible atmosphère, et peut en partie aller se déposer sur l'autre hémisphère, plus froid puisque sa température n'est que de 100 K. Ainsi, le phénomène d'assombrissement s'entretient lui-même.

Mais Japet est encore plus pittoresque. Il présente un énorme bourrelet équatorial, qui le fait ressembler à une grosse noix. Ce bourrelet s'étend sur 1.300 km dans *Cassini Regio*, et s'élève jusqu'à 20 km dans certaines parties. Sa largeur atteint aussi 20 km. L'origine de cet énorme bourrelet est inconnue. Diverses explications ont été proposées, mais elles ne sont guère convaincantes. Elles vont d'un bourrelet formé par la force centrifuge lorsque le satellite tournait rapidement sur lui-même, à une remontée de glace, à l'écrasement d'un anneau qui aurait tourné autour de Japet, ou d'un satellite du satellite qui s'y serait écrasé…

Japet est criblé de cratères, et aussi de bassins d'impact. Le plus grand mesure 500 km de diamètre.

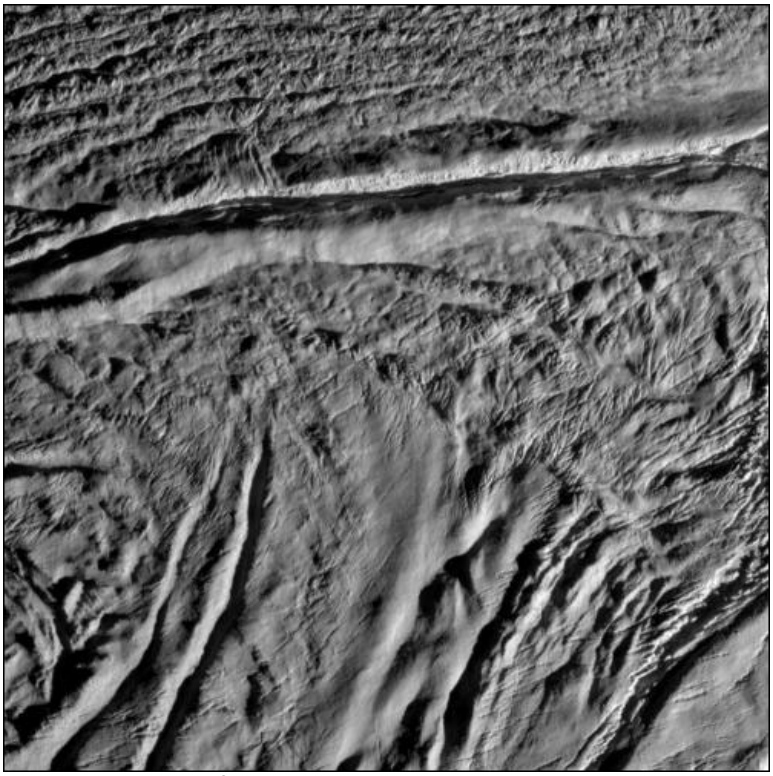
L'orbite de Japet est particulière aussi. Elle est bien plus grande que celles des autres gros satellites, avec un demi grand-axe de plus 3.560.000 km, une excentricité de 0,028, et surtout une inclinaison de 7° 30'. Cette dernière particularité permettrait, si on se trouvait à sa surface, d'admirer un paysage merveilleux, avec Saturne et ses anneaux parfaitement visibles un peu de dessus. Les autres satellites sont précisément dans le plan des anneaux, qui n'y sont vus que par la tranche.

**Encelade (Saturne), Miranda et Ariel (Uranus)**

Encelade et Miranda sont de petits satellites, dont la masse est de l'ordre de celle de la calotte Antarctique. Les forces de marées y sont assez faibles, et ne peuvent dégeler de la glace d'eau. Mais on peut envisager d'autres matériaux, à point de fusion bien plus bas. L'hydroxyde d'amonium, par exemple, fond à -97 . Il faut beaucoup moins d'énergie pour le fondre, et des marées bien plus faible peuvent y suffire. Est-ce crédible ?

L'hydroxyde d'amonium, comme son nom l'indique, est formé par du gaz ammoniac dissous dans l'eau. A très basse température, le taux de solution est très élevé. Il se forme un ion $NH_4^+$ associé à l'ion $OH^-$. C'est un composé dont les ingrédients, eau et ammoniac, sont abondants dans cette région du système solaire. Par conséquent sa formation est très probable. Si la température monte, le gaz s'évapore. Il peut créer une pression capable de percer la croûte de glace, et produire une sorte de volcanisme.

Le volcanisme terrestre, ou martien, ou vénusien, construit de grands édifices qui accumulent les matériaux éjectés. Rien de tout ça dans les satellites qui nous intéressent. Leur surface est lisse, et d'aspect semblable aux mers lunaires (Ganymède, Encelade, Dioné, Triton).



Surface d'Encelade Nasa/JPL/Space Science Institute

Toutefois, il y a sur Miranda et Ariel de larges crêtes symétriques, et sur Encelade de petits dômes arrondis d'origine volcanique probablement. Les crêtes font quelques centaines de kilomètres de long, pour plusieurs kilomètres de hauteur. Elles se sont formées par extrusion de matériaux le long des failles de la croûte, qui se sont déposés sur de vieux terrains.

La hauteur des édifices volcaniques dépend de la fuidité de la lave. Plus elle est fluide, plus elle s'étale. Sur Encelade, Ariel et Miranda, ils s'élèvent entre 500 et 2.500 mètres. C'est trop haut pour être de l'eau pure. Si on y dissous de l'amoniac, surtout s'il y a des cristaux, on peut obtenir la viscosité nécessaire. De l'alcool (méthanol $CH_3OH$) peut y contribuer. Mais l'amoniac n'a pas été détecté.

Les plus petits satellites. Encelade, Ariel, Miranda ont pu être soumis à des forces de marées qui les ont chauffés. Même Dionée, Théthys, Titania, montrent des altérations de la surface, qui trahissent une faible activité.

## *Uranus*

### Satellites d'Uranus

L'albéo des satellites d'Uranus est seulement de 20 à 40 %, malgré la croûte de glace. Callisto, avec 18 % est presque aussi sombre que la Lune. Mais la glace est si transparente que peu de poussières suffisent à la rendre sombre. La surface de ces corps est donc au moins contaminée par des matières sombres. Callisto n'a que 15 à 45 % de glace en surface. Mais les cratères d'impact récents montrent des éjectas clairs, ce qui prouve que la contamination n'est que superficielle.

Le matériau contaminant est sombre. Sa signature spectrale est compatible avec celle des tholins, hydrocarbures qui se forment lorsqu'une matière organique est soumise à des décharges électriques par exemple. Mais l'origine est peut-être aussi dans des impacts cométaires, ou dans la pluie de micrométéorites. Mes ions de la ceinture magnétique de Jupiter jouent sans doute un rôle.

La Surface d'Europe est jeune, et n'a pu accumuler des débris extérieurs ; elle est pourtant recouverte d'une substancee rougeâtre sombre. L'origine est différente de celle de Ganymède et de Callisto. Il est probable que ce soit des sels, provenant de l'océan sous-jacent, ou alors des sulfates éjectés par les volcans de Io.

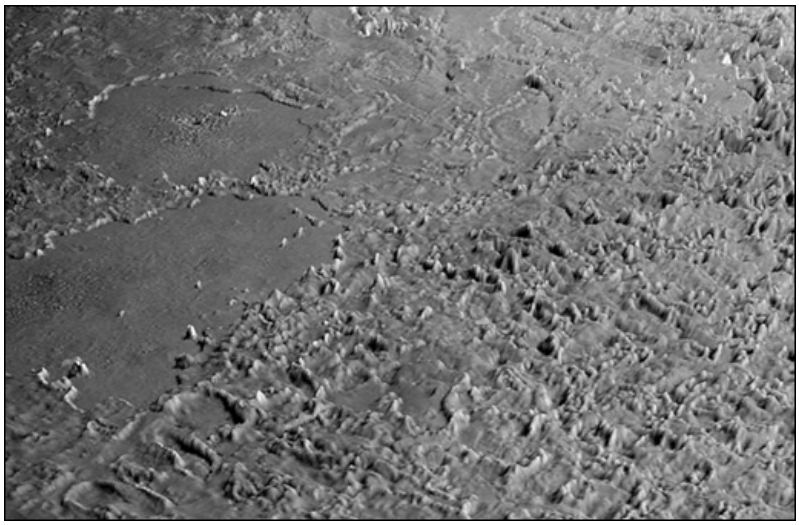
La surface des autres satellites de Saturne et d'Uranus est aussi sombre malgré la glace qui en est le principal constituant.

### Triton

Triton orbite à l'envers (sur une orbite rétrograde) autour de Neptune. L'orbite est pratiquement circulaire. Mais le mouvement rétrograde est incompatible avec une formation simultanée de Neptune et Triton. Triton, au contraire, est très probablement une petite planète capturée par Neptune, comme l'atteste un travail théorique de Bill McKinnon. Dans ces conditions, Triton a probablement la même origine que Pluton et les autres objets de la ceinture de Kuiper interne.

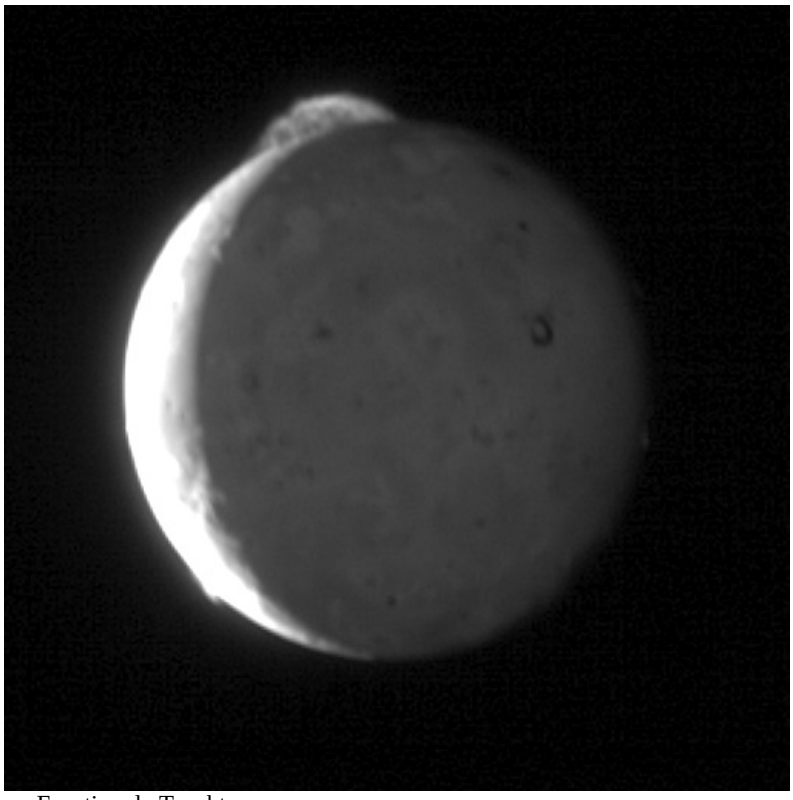
Comment un objet de Kuiper peut-il se retrouver en orbite autour de Neptune ? Un corps qui approche une planète gagne de l'énergie, puis passe au plus près, et restitue l'énergie acquise pour s'éloigner d'autant. Ceci est tout à fait semblable à une planète sur une orbite fortement elliptique : de l'aphélie au périhélie, elle transforme de l'énergie portentielle en énergie cinétique, puis du périhélie à l'aphélie, elle fait la transformation inverse. La capture n'est donc pas évidente. Même en l'admettant, il est encore difficile d'obtenir une orbite circulaire, comme c'est le cas pour Triton. Mais un choc avec un satellite existant autour de la planète peut apporter l'énergie de freinage suffisante pour la mise en

orbite. Les calculs indiquent que 90 % de Triton ont dû être fondus lors de la collision. La surface originale a été de ce fait totalement détruite. La surface est très peu cratrisée, et son âge est évalué à moins de 50 millions d'années. C'est l'un des corps du système solaire dont la surface est la plus active.



Terrain cantaloupe sur Triton NASA/JPL/Universities Space Research Association/Lunar & Planetary Institute

La géologie de Triton est très variée. La surface est couverte de flots de lave considérables, mais aussi de types de terrains inhabituels. C'est le cas de terrains nommés *cantaloup* (Cantaloup est une variété de melon, dont le melon de Cavaillon. Son origine est en Italie, près de Rome, dans le village de Cantaluppa). Le nom du terrain vient donc de l'aspect, qui rappelle l'écorce du melon. Ces régions sont formées par la convection interne du satellite, les cellules ayant une quarantaine de kilomètres de diamètre. Il s'ensuit une surface bosselée, qui fige ces cellules de convection, en formant des crêtes entourant des dépressions fermées. Ils se sont formés lorsque la croûte s'est retournée, formant un vaste champ de diapirs.



Eruption de Tvashtar NASA/JPL/Universities Space Research Association/Lunar & Planetary Institute

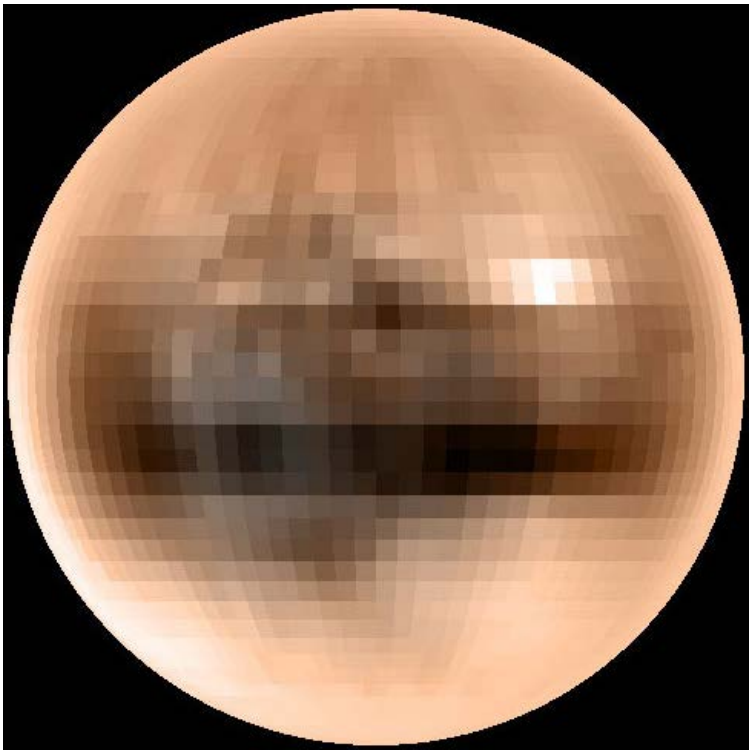
Voyager a découvert des geysers sur Triton : matériau sombre qui monte jusqu'à 8 kilomètres d'altitude. On a longtemps pensé que l'énergie du Soleil produisait ces éruptions, mais il se pourrait que l'énergie interne y suffise.

La densité de Triton montre qu'il contient 30 % d'eau. Là aussi, il pourrait y avoir un océan en profondeur. Mais en surface, on trouve d'autres glaces, $CO_2$ gelé, et même N2, CH4, et CO. La température de 35 K leur permet de ne pas s'évaporer. Cependant, $N_2$ et $CH_4$ sont à la limite, et ne sont donc pas gelés totalement. Ils forment la fine atmosphère du satellite. En profondeur, ces glaces doivent donner de nombreuses molécules en se combinant.

## *Transneptuniens*

### Pluton

Les objets transneptuniens sont formés aproximativement de 1/3 d'eau (en masse) et de 2/3 de roches (en volume, 1/2 de chaque). Lors de la formation du système solaire, Neptune est soupçonné d'avoir éjecté de nombreux petits corps glacés qui s'étaient formés non loin. Les interactions gravitationnelles qui éjectaient ces corps, soit vers le Soleil, soit vers les confins du système où ils allaient former le nuage de Oort, ont modifié peu à peu l'orbite de Neptune. Les calculs et simulations ont montré que quelques 10 masses terrestres ont ainsi été éjectées, et que dans le même temps de 10 millions d'années, Neptune s'est déplacée de 7 UA. Dans sa migration, Neptune s'est approchée de Pluton, qu'elle a capturé dans la résonance 3:2. A partir de là, son sort était lié à celui de la planète, qui l'entraînait avec elle pour maintenir la résonance. Ceci n'est pas vrai du seul Pluton, mais aussi d'un grand nombre d'objets transneptuniens pris successivement dans diverses résonances : un sur quatre est dans ce cas. Ceux qui partagent la résonance 3:2 sont nommés *Plutinos*. Il est statistiquement impossible que tant d'objets se soient formé spontanément dans de pareilles résonances. Seule la migration de Neptune l'explique. Celle-ci est donc attestée par l'existence des résonances.



Pluton Eliot Young (SwRI) et al., NASA

Ceci est la meilleure image actuelle de Pluton. Ele ne montre pas beaucoup de détails !

La sonde *New Horizons* a été lancée le 19 janvier 2006, elle a survolé Jupiter le 28 février 2007, profitant de son assistance gravitationnelle, et elle survolera Pluton et Charon le 14 juillet 2015. Elle passera à 9.600 km de Pluton, et seulement 27.000 km de Charon (il est possible que ces paramètres soient modifiés). Les cameras donneront des images allant jusqu'à une résolution de 25 m / pixel. Le côté éclairé par le Soleil sera entièrement cartographié en couleurs avec une résolution de 1,6 km / pixel. Une cartographie infrarouge sera également réalisée, permettant de comprendre les propriétés thermiques des deux objets. La sonde devrait aussi apporter des informations sur les petits satellites de Pluton, Nix, Hydra, et les deux derniers non encore nommés (P4 et P5). La sonde ne dispose pas de moteurs lui permettant de se mettre en orbite autour de Pluton. Elle le survolera, et continuera sa route vers le système solaire externe. Selon les objets de Kuiper qui seront connus au moment du survol, la sonde pourra être déviée de sa trajectoire inertielle pour s'approcher d'un ou plusieurs objets plus lointains encore de la ceinture de kuiper.

$NH_3$ gelé a été détecté sur Charon.

**Résumé**

L'environnement des planètes géantes est extrêmement complexe. Les satellites sont nombreux, et s'influencent les uns les autres. Ces interactions, jointes à la forte attraction de leur planète, produisent des marées qui chauffent l'intérieur par frottement. C'est ce qui justifie l'activité importante de ces petits corps, qui sans cela seraient figés depuis longtemps. On note de nombreux échanges de matière entre eux. Ce n'est pas très étonnant, puisque leur gravité est faible. Les matériaux de surface leur sont facilement arrachés, et ils peuvent aller contaminer la surface d'un voisin. Ils peuvent aussi alimenter les anneaux de la planète. Ces corps si lointains du Soleil, qu'on imaginait gelés et inertes, ont donc trouvé des sources d'énergie suffisante pour leur donner vie ! (au moins sur le plan géologique).

**Les atmosphères**

Les mondes glacés sont caractérisés par leur composition, et par leur atmosphère.

Les atmosphères des différents corps du système solaire sont très différentes, et leur compréhension est indispensable. Mercure n'a pas d'atmosphère, parce que sa masse est trop faible pour en retenir une. D'ailleurs, si près du Soleil, il faudrait une très grande masse pour empêcher les atomes, que la chaleur anime d'une grande vitesse, de s'échapper dans l'espace.

Vénus et Mars ont une atmosphère constituée essentiellement de gaz carbonique $CO_2$. Celle de la Terre est dominée par l'azote moléculaire $N_2$, avec de l'oxygène comme second constituant. Pourquoi ? Ces trois planètes sont de même nature, et se sont formées dans la même région du système solaire.

La nébuleuse qui a donné naissance au système solaire, et aux planètes en particulier, contenait essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium. Les autres éléments sont en bien moindre abondance. On pourrait imaginer que la Terre ait capturé une partie de cette nébuleuse pour se constituer une atmosphère à base d'hydrogène et d'hélium. Mais la gravité est trop faible pour qu'une telle atmosphère soit stable. Les gaz hydrogénés, $CH_4$ qui devaient exister dans cette région du système solaire en particulier, sont détruits par le rayonnement ultraviolet du Soleil, et l'hydrogène trop léger s'échappe. Les molécules ne peuvent donc pas se reformer, et ces gaz sont progressivement éliminés.

D'où viennent les constituants que l'on trouve aujourd'hui ?

**Le gaz carbonique**

Cette interrogation va nous mener vers les petits corps glacés lointains. Tout d'abord, le constituant principal des atmosphères de Vénus et Mars, le gaz carbonique, provient de l'oxydation du méthane de la nébuleuse $CH_4$. Son abondance dans ces deux planètes est en accord avec cette origine. Pour la Terre, c'est la présence de l'eau et la vie qui ont transformé le gaz carbonique en carbonate, qui se sont précipités et ont produit les massifs calcaires. Si on calcinait tout ce calcaire, on en tirerait assez de $CO_2$ pour donner à l'atmosphère de la Terre une pression de 70 atmosphères au moins. Pour Vénus il n'y a jamais eu d'eau liquide, et pour Mars elle n'est pas resté assez longtemps pour avoir un effet sensible. Le gaz carbonique est donc expliqué, passons à l'azote.

**L'azote**

Titan, Triton et Pluton ont une atmosphère dominée par l'azote, tout comme la Terre.

L'azote a été trouvé par spectroscopie, peu après le méthane. On a donc cru quelques temps que ce dernier était le constituant principal de l'atmosphère. Mais ces deux gaz ne comprtent pas du tout pareillement vis-à-vis de la spectroscopie. Le méthane est facile à détecter, ses raies sont fortes même s'il est peu abondant. Par contre, l'azote est beaucoup plus discret. Ses raies sont faibles, même s'il est abondant. Pour le détecter, il faut qu'il soit dans une phase condensée, liquide ou solide. Sa pression de vapeur est 10.000 fois plus grande que celle du méthane à une température donnée, ce qui signifie que si les raies sont aussi fortes pour les deux gaz, l'azote est 10.000 fois plus abondant que le méthane. C'est ainsi qu'on a pu montrer que l'atmosphère de Triton est dominée largement par l'azote.

Le sol est recouvert de glaces, dont l'albedo est élevé. Avant de savoir cela, les mesures photométriques, combinées avec un albedo estimé trop bas (0,2), indiquaient un diamètre du satellite presque double du diamètre réel (5.000 km au lieu de 2.600). Cette erreur importante a des implication sur l'estimation de la température (60 K au lieu de 36), et par suite sur l'état thermodynamique des gaz : solide, liquide, ou gazeux ? .

En considérant d'abord les roches terrestres elle-mêmes (ou martiennes, ou vénusiennes, mais qui sont semblables), on constate vite que l'azote est difficile à expliquer. L'oxygène terrestre vient du gaz carbonique, décomposé par la vie, il ne pose pas de problème. L'argon est le troisième constituant de l'atmosphère terrestre, et sa provenance n'est pas claire.

Le point de fusion du méthane étant de 90 K, il devait être à l'état solide sur Triton (avec du gaz, mais pas de liquide). Pour l'azote, le point de fusion est à 63 K, trop proche pour décider. Il pourrait y avoir du liquide. Lorsque Voyager 2 a enfin pu observer le disque de Triton, son diamètre a été divisé par deux, et sa température superficielle ramenée à 40 K. C'est en-dessous du point de fusion de l'azote, qui ne peut donc finalement se trouver à l'état liquide.

**Atmosphère de Pluton**

Une occultation d'une étoile brillante par Pluton a permi de déterminer la courbe de lumière. S'il n'y a pas d'atmosphère, l'étoile disparaît brutalement. Dans le cas contraire, elle s'éteint progressivement, et la vitesse d'extinction permet de tracer la densité de l'atmosphère en fonction de l'altitude. On a ainsi déterminé une température de l'atmosphère de Pluton de l'ordre de 55 à 60 K, en supposant qu'elle était contituée de méthane. Cette température est comparable à celle des parties les plus chaudes de la surface.

Pendant la baisse de luminosité, on a observé une brusque diminution de la lumière. Elle s'expliquerait par la présence d'une couche de brumes ou de nuages, mais aussi par une brusque variation de la température. Or peu de temps après, on a découvert que l'azote était le principal constituant de l'atmosphère. La masse volumique de l'azote étant bien plus élevée que celle du méthane, ceci remettait en question l'évaluation de la température par l'interprétation de la courbe de lumière. On obtenait maintenant 100 à 105 K. Par conséquent, il doit y avoir une inversion de température au niveau du sol, la température augmentant avec l'altitude.

---=OO=---




… dans cette grande cuisine qu'est la préparation d'un univers épicé en galaxies,
tout se joue sur la taille des grumeaux et le temps de cuisson.

*Matière noire et autres cachotteries de l'Univers*
*Alain Bouquet, Emmanuel Monnier*

## *Plan*


I Nécessité de la matière noire
I.1 Rapport de masse
I.2 Courbe de rotation
I.3 Forme de la courbe de rotation
I.4 L'observation initiale
I.5 L'émergence des idées
I.6 Bilan
II Observations récentes
II.1 La radioastronomie
II.2 Le disque maximum
II.3 La loi de Tully-Fisher
II.4 Premières tentatives
II.5 Le temps des expériences
II.6 Résultat des simulations
II.7 Diversité des galaxies
II.8 Sous-structures
II.9 Stabilité des amas
II.10 La loi de Tully-Fisher
II.11 Masse manquante dans les amas
II.12 Problème cosmologique
II.13 Lentille gravitationnelle faible
II.14 Cas particulier
II.15 Chaude ou froide ?
II.16 HDM
II.17 Les neutrinos
II.18 Le modèle CDM
II.19 De quoi est faite la matière noire ?
II.20 En cas de découverte…
II.21 Une curiosité embarrassante
II.22 Explication des courbes de rotation par la matière noire
III Modification de la dynamique
III.1 MOND
III.2 Conséquences
III.3 Loi de Tully-Fisher
III.4 Fondement de la théorie
III.5 Les courbes de rotation en détail
III.6 Les amas de galaxies
Bibliographie


## *I Nécessité de la matière noire*

### I.1 Rapport de masse

Lorsqu'on observe une galaxie, on voit la lumière émise par ses étoiles. On peut la mesurer, et si on connait la distance de la galaxie à la Terre (par son décalage spectral par exemple), on peut déterminer sa luminosité totale (quantité d'énergie émise). Notons-là L.

On peut éventuellement déterminer la masse de la galaxie. C'est plus difficile, puisque ce n'est pas une mesure directe. Mais diverses techniques le permettent. Donneront-elles des valeurs compatibles ?

La théorie des étoiles donne une indication précieuse : elle permet d'associer une masse à un type spectral. Pour une étoile de type spectral donné (déterminé par son spectre), la masse est donc connue.

Il y a beaucoup d'étoiles plus petites que le Soleil, qui contribuent très peu à la luminosité totale, un peu plus à la masse totale. Par contre, on observe très peu d'étoiles plus grosses que le Soleil, considérablement plus lumineuses, et un peu plus massives. Connaissant la proportion d'étoiles des différents types spectraux dans la population d'une galaxie, on peut évaluer la masse totale de la galaxie. Il s'agit donc de la masse que l'on dira *visible*, puisqu'elle est déterminée par l'observation de la lumière des étoiles. On la note $M_V$.

Lorsque ces deux paramètres sont connus, on peut évaluer leur rapport $M_V/L$ de la galaxie. Bien évidemment, $M_V$ et L sont en unités solaires. Il y a beaucoup d'étoiles plus petites que le Soleil, mais qui contribuent peu à la luminosité totale. Par contre, on observe très peu d'étoiles plus grosses que le Soleil, mais qui sont très lumineuses. Ceci fait que le rapport $M_V/L$ pour une galaxie typique est de l'ordre de 1.

Remarquez qu'il est calculé en utilisant le modèle astrophysique des étoiles, qui lie la masse et la luminosité de chacune.

### I.2 Courbe de rotation

Une courbe de rotation est un graphique montrant la vitesse orbitale d'une étoile de la galaxie, en fonction de sa distance au centre. On la mesure simplement en observant le décalage spectral de la lumière provenant des étoiles à diverses distances du centre. Ce décalage se traduit immédiatement en vitesse de rotation, et permet de tracer la courbe.

Une fois la courbe tracée, on connait les mouvements des étoiles dans la galaxie. Ces mouvements sont produits par la gravitation, un peu comme le mouvement des planètes autour du Soleil. Et comme le mouvement des planètes permet de déterminer la masse du Soleil, on peut déduire ici la masse de la galaxie. Précisément, pour une étoile orbitant à la distance r du centre, la masse attirante est celle M(r) contenue à l'intérieur de l'orbite. Pour les étoiles périphériques, cette masse est simplement celle de la galaxie, tout au moins jusqu'à la distance de ces étoiles.

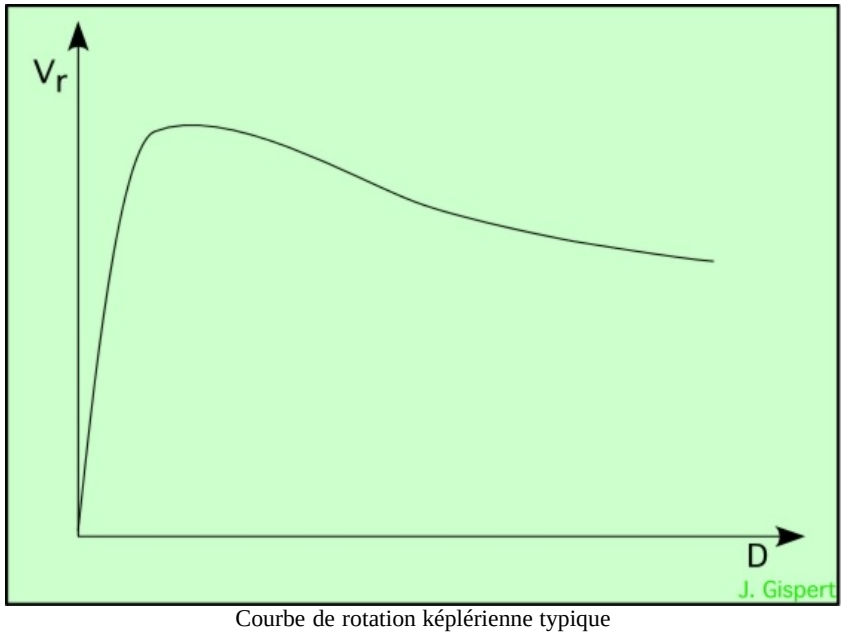
Ayant déterminé la masse $M_d$ de la galaxie de cette manière (l'indice d signifie *dynamique*), on peut l'utiliser pour déterminer le rapport M/L. Notons $M_d/L$ sa valeur.

Nous avons donc déterminé $M_v/L$ et $M_d/L$. La comparaison de ces deux rapports joue un grand rôle dans les études que nous allons décrire. Naturellement, puisqu'on parle de la même quantité M/L, on doit obtenir une valeur tout à fait comparable.

### I.3 Forme de la courbe de rotation

La vitesse d'une étoile dépend de la masse située au-dessous de l'orbite de l'étoile dans la galaxie. Donc, plus une étoile est lointaine, plus la masse qui l'attire augmente, ce qui accroît l'attraction gravitationnelle qu'elle subit. Mais comme elle est plus loin, cette même attraction diminue comme le carré de la distance. Le résultat est assez complexe, et dépend de la répartition de la matière dans la galaxie. Le bulbe, région centrale, a une densité d'étoiles forte  puis en s'éloignant, on trouve une densité d'étoiles décroissante. La masse contenue à l'intérieur de l'orbite d'une étoile est donc croissante avec la distance, mais de moins en moins. Puis on arrive aux confins de la galaxie (de la galaxie visible). Alors, la masse interne n'augmente plus, et la gravité ressentie pas les quelques étoiles lointaines ne varie plus qu'en raison inverse du carré de la distance. La vitesse orbitale de ces étoiles devrait donc diminuer comme diminue la vitesse des planètes autour du Soleil.

Par conséquent, la courbe de rotation doit montrer un accroissement de la vitesse avec la distance au centre, jusqu'à un maximum qui correspond à la région où la densité diminue, et où l'effet de la distance sur la gravité devient prépondérante. Au-delà, la vitesse de rotation doit diminuer de façon képlérienne, comme celle des planètes du Soleil.



Courbe de rotation képlérienne typique

Ce schéma montre une courbe de rotation képlérienne caractéristique, avec l'augmentation rapide de la vitesse dans les régions centrales, puis un maximum, et ensuite une décroissance képlérienne lorsque la masse en-dessous n'augmente plus de manière significative.

### I.4 L'observation initiale

La quête de la matière noire trouve son origine dans les observations de Zwicky (1933), qui a montré que les galaxies dans l'amas de Coma avaient une vitesse moyenne trop élevée pour rester liées. La **masse visible M** des galaxies (étoiles et gaz) déduite en supposant le rapport M/L = 1, est trop faible pour les retenir en orbite. Il faudrait, pour assurer la stabilité dynamique, que le rapport M/L soit de l'ordre de 500, ce que la physique des étoiles interdit formellement.

Les amas pourraient être instables par manque de masse, mais alors leur durée de vie serait brève, et on n'en observerait beaucoup moins. Ce n'est pas l'explication. Il faut donc envisager que la masse qu'on mesure par le rapport M/L n'est pas la masse totale.

Dans les galaxies, les premières observations de la vitesse des étoiles ont été difficiles, mais ont montré que le rapport M/L croît en allant du centre vers les parties externes.

### I.5 L'émergence des idées

En 1932, Jan Oort a observé le mouvement des étoiles de la Voie Lactée qui se trouvent en dehors du plan de la galaxie. Il a montré qu'elle étaient plus rapides que ce que la masse connue de la galaxie justifiait. Et il a parlé de *matière noire* pour justifier ces mouvements.

Zwicky a envisagé l'existence d'une *matière noire*, mais ne s'est pas prononcé sur sa nature. Il a simplement imaginé qu'elle puisse se trouver dans les galaxies, ou entre elles dans le milieu intergalactique. La matière noire dont parlent Zwicky et Oort est conventionnelle : il s'agit de particules connues, ou de poussières, de météorites, ou même d'étoiles trop faibles pour être visibles. La matière noire non baryonique n'émergera que plus tard.

En 1939, Babcock a analysé la rotation de la galaxie d'Andromède, et constaté que les vitesses ne décroissaient pas vers l'extérieur du disque lumineux. Il en a déduit que le rapport $M_d/L$ augmentait avec la distance au centre, et l'a expliqué de deux façons différentes :

- soit le taux de poussières augmente vers l'extérieur, provoquant une absorption de plus en plus forte ;
- soit la dynamique de Newton est à revoir.

Cette seconde explication, seulement envisagée, sera reprise bien plus tard…

#### I.6 Bilan

A la fin des années 30, la première phase est terminée, le décor est en place. Deux observations ont été faites dans le visible, dans les amas de galaxies, et dans les galaxies elles-mêmes. Ces deux observations concernent des vitesses, et sont en contradiction avec la gravitation universelle. Remarquez bien que ce n'est qu'à la lumière de ce modèle théorique de la gravitation qu'un problème se pose… Dans les galaxies, le rapport $M_d/L$ croît vers l'extérieur, soit parce que $M_d$ croît, soit parce que L décroît.

Les solutions envisagées par les astronomes de l'époque se conçoivent dans ce cadre :

1. Dans les amas de galaxies, Zwicky a envisagé l'existence d'une matière noire invisible ;
2. Dans les galaxies, $M_d/L$ croît parce que $M_d$ croît : c'est l'idée de matière noire de Jan Oort ;
3. Dans les galaxies, $M_d/L$ croît parce que L décroît : c'est l'autre explication de Babcock, la décroissance étant due à des poussières absorbantes ;
4. Partout, les observations précédentes ont été mal interprétées, par le filtre de la gravitation newtonnienne. Le problème de la masse manquante ne se pose pas. C'est la dynamique qui est mal comprise : modification de la dynamique de Babcock.

## *II Observations récentes*

#### II.1 La radioastronomie

En 1957, Henk van de Hulst publie un article dans lequel il construit la courbe de rotation de M31 (Andromède), obtenue par l'observation des nuages d'hydrogène neutre (raie à 21 cm de longueur d'onde). Ces nuages débordent largement (35 kPc) le disque visible (moins de 20 kPc), et permettent donc de tracer la courbe de rotation bien au-delà de la dernière étoile visible. Ces observations ont largement confirmé les idées précédentes, en montrant que la vitesse orbitale reste approximativement constante au-delà du disque visible.

> M. Roberts a montré en 1975 que l'hydrogène s'étend en moyenne à 1,5 fois la limite du disque visible.

On peut tracer la courbe de rotation à l'aide de ces nuages, parce qu'ils ne représentent qu'une fraction peu importante de la masse de la galaxie. Ils sont donc influencés par la masse totale, sans la modifier significativement. C'est ce qui permet de les utiliser comme traceurs des vitesses.

$$\gamma_n = \frac{V^2}{R}$$

Si on se place loin du centre, en observant un nuage externe, la masse totale lui est intérieure, et l'accélération newtonienne est :

$$\gamma_n = \frac{G\,M}{R^2}$$

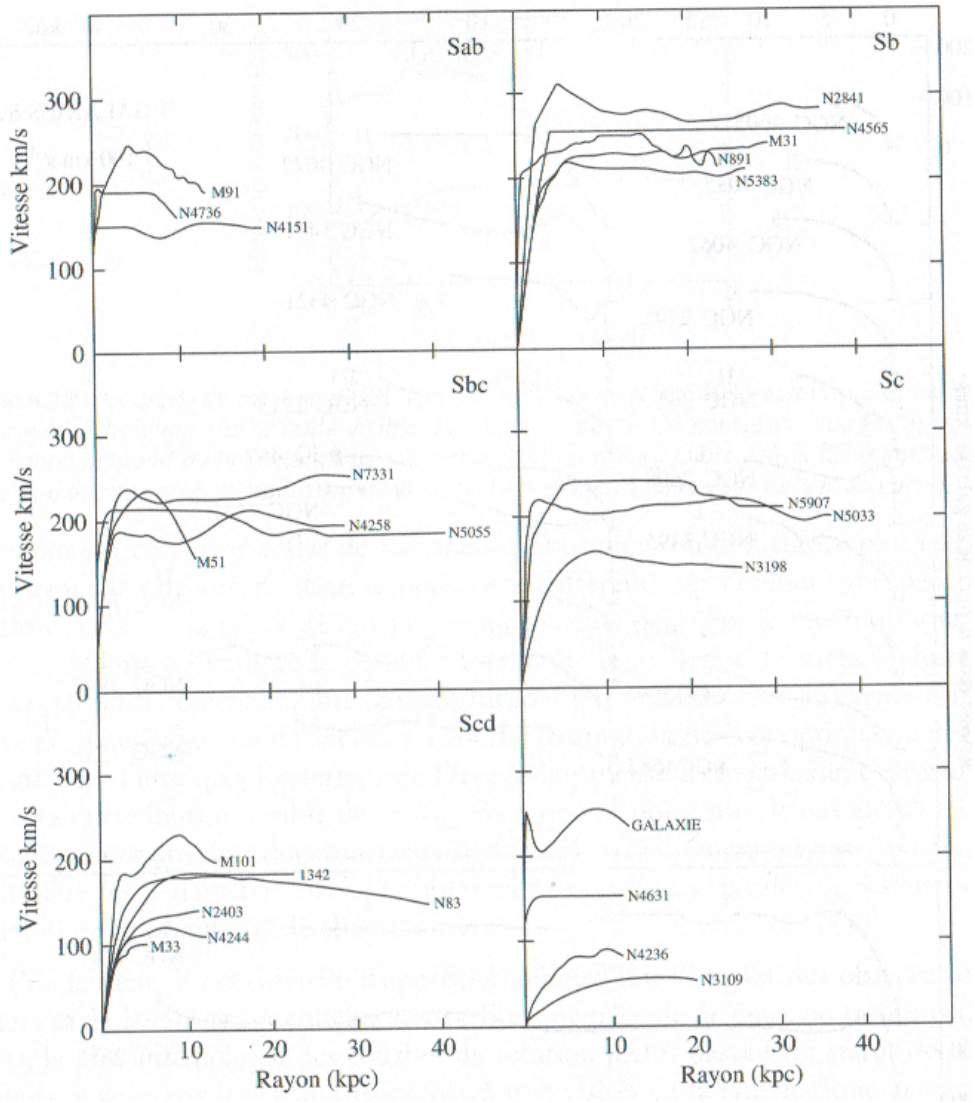
En tirant V :

$$V = \sqrt{\frac{G\,M}{R}}$$

Soit $V \quad R^{-1/2}$. C'est la décroissance newtonienne des vitesses de rotation, pour les régions galactiques où la masse extérieure est négligeable.

La première observation de van de Hulst a été largement confirmée par la suite, et on considère maintenant que les courbes de rotation sont globalement plates vers l'extérieur des galaxies spirales. La vitesse de rotation est pratiquement constante, au lieu de décroître comme $r^{-1/2}$.

En 1978, Albert Bosma a utilisé le radiointerféromètre de Westerbork pour déterminer les courbes de rotation externe de 25 galaxies.




nbnbnbnbnbn

La masse intérieure à une distance r du centre croît comme M(r) r.

Des observations dans le visible ont été faites aussi, par exemple par Rudolph Kurth en 1950, qui a évalué la masse de la Voie Lactée à 3 fois la masse visible, en analysant le mouvement des amas globulaires.

### II.2 Le disque maximum

Agris Kalnajs (Australie) a fait une étude poussée des courbes de rotation dans le visible, et utilisé *l'approximation du disque maximum*. En analysant la courbe de lumière de chaque galaxie (et non pas une courbe moyenne), et en considérant la masse maximum compatible avec la luminosité, il a trouvé que la courbe de rotation était compatible avec une rotation newtonienne… Mais le bulbe perturbait les mesures, et il a fallu le considérer à part (décomposition bulbe-disque). La conclusion de cette étude est que la partie visible de la galaxie n'est pas critique, et que la nécessité de matière noire n'est pas évidente en ne considérant que cela. C'est donc bien la rotation des nuages externes qui emporte la conviction.

### II.3 La loi de Tully-fisher

En 1977, Tully et Fisher ont découvert une relation empirique entre la vitesse de rotation d'une spirale et sa luminosité. Nommée *loi de Tully-Fisher*, cette relation s'exprime par :

$$L \quad V^4$$

C'est une simple loi de puissance. Elle permet de déterminer la luminosité réelle d'une galaxie spirale, en mesurant sa vitesse de rotation (par spectroscopie), indépendamment de sa distance. Cette loi est l'une des mieux vérifiées dans le domaine des galaxies ; elle est valide sur une échelle de 100 en luminosité. La seule dispersion des valeurs qu'on constate est due aux erreurs de mesure.

Dès qu'on peut mesurer la vitesse de rotation d'une spirale, on en déduit sa luminosité, et par comparaison avec sa luminosité observée, on en déduit sa distance. Cette loi est donc d'une très grande utilité en cosmologie.

Mais elle présente ici un tout autre intérêt. La luminosité est proportionnelle à la masse visible de la galaxie, alors que la vitesse de rotation est fonction de la masse totale. On a donc un moyen de comparer ces deux masses.

### II.4 Premières tentatives

Les observations étant à l'époque difficiles et laissant une incertitude assez importante, les astronomes ne s'en souciaient pas vraiment, et pensaient que des découvertes d'objets non lumineux résoudraient le problème. L'utilisation des satellites artificiels a permi d'observer dans l'infrarouge en particulier, et faire un bilan plus précis de la luminosité des galaxies. Les toutes petites étoiles étant de très loin les plus nombreuses, contribuent pour beaucoup à la luminosité, mais dans le rouge et l'infrarouge. Aussi étaient-elles plutôt oubliées avant l'ère spatiale.

Tous les objets visibles ne résolvant pas le problème, il fallait en chercher d'autres. On a recherché :

- des poussières (formées d'éléments lourds Si, O, C…), mais ceux-ci sont bien trop rares pour que les poussières aient une masse importante ;
- des naines brunes, ou des naines blanches. Difficiles à voir par leur luminosité si faible, on les a cherchées par effet de lentille gravitationnelle, qui augmente la lumière reçue. On en a trouvé, mais très peu. Ce n'est pas l'explication ;
- des nuages de gaz froid, neutre. Ils assombriraient le ciel derrière eux, et se verraient comme des trous dans le ciel, mais surtout ils n'ont pas été vus à 21 cm ;
- des nuages de gaz chaud. Ils avaient été imaginés par Arrigo Finzi en 1963, et ont été observés depuis entre les galaxies, mais leur masse est trop petite ;

Les objets compacts de ce genre (naines brunes, naines blanches, trous noirs…) ont été nommés collectivement *MACHOs* (*Massive Compact Halo Objets*). Leur recherche a été faite par des moyens systématiques puissants : projet européen *EROS* (*Expérience pour la Recherche d'Objets Sombres*), projet américain *MACHO*, qui ont suivi les effets de lentille gravitationnelle sur quelques millions d'étoiles, puis *AGAPE* (*Andromeda Galaxy Amplified Pixel Experiment*) qui en a suivi 10 milliards. Leurs résultats ont montré que très peu de tels objets peuplent le halo de la Voie Lactée et d'Andromède.

La prise en compte de tous ces objets a un peu amélioré la situation, mais pas assez pour résoudre le problème. Cette matière-là ne suffisant pas, qu'imaginer d'autre ?

Arrigo Finzi a explicitement envisagé une modification de la loi de la gravité, qu'il voyait plutôt en $1/r^{1,5}$ qu'en $1/r^2$. Mais en 1963, c'était difficile de toucher à la Gravitation Universelle, qui a été étendue par la relativité générale. Même aujourd'hui…

> Pour résumer, l'interprétation des observations dans les galaxies et les amas de galaxies par la dynamique newtonnienne montre un grave manque de matière.
> Il faut
>
> - soit trouver la masse manquante sous une forme exotique (la matière connue ne fournissant pas la réponse), c'est la quête de la matière noire,
> - soit abandonner la décroissance de l'attraction gravitationnelle en $1/r^2$.

### II.5 Le temps des expériences

La matière noire et d'un type totalement inconnu. Comment l'étudier ? Tout d'abord, en essayant de cerner ses propriétés. Où est-elle ? Comment se comporte-t-elle ?

Puisque tout ce que nous savons d'elle est son activité gravitationnelle, c'est bien par là qu'il faut commencer. Il faut essayer de savoir où elle est, comment elle est répartie, et en quoi elle résoud les problèmes dynamiques correspondants.

Les questions de dynamique galactique sont :

- comment une galaxie spirale tient-elle en équilibre ?
- comment une galaxie ellipsoïdale tient-elle en équilibre ?
- comment cet équilibre se maintient-il ?

La puissance de calcul des ordinateurs permet de décrire des points matériels dans l'espace, représentant les étoiles d'une galaxie, et de calculer comment ils s'attirent gravitationnellement. On peut alors déterminer où ils seront un instant après. Puis là, recalculer les forces, et ainsi de suite… Au bout d'un certain temps de calcul, on arrivera à faire tourner une galaxie sur elle-même.

Lorsque de telles simulations ont été réalisées pour la première fois, la puissance de calcul limitait beaucoup le nombre d'étoiles qu'on pouvait décrire. Cependant, on est arrivé à une conclusion concernant la dynamique des galaxies :

- les galaxies spirales se maintiennent en équilibre par la rotation (force centrifuge) ;
- les galaxies elliptiques se maintiennent en équilibre par la pression (produite par les forces gravitationnelles entre les étoiles).

Dans les spirales, les orbites des étoiles sont pratiquement circulaires et dans un même plan, ce qui donne à l'ensemble une dynamique de rotation. Dans les elliptiques, les orbites sont très elliptiques, et orientées au hasard. Par analogie avec les molécules d'un gaz, on peut considérer que les galaxies elliptiques sont chaudes (en ce sens que les vitesses des étoiles y sont élevées).

Analysons plus finement les premiers résultats. Une galaxie contient des étoiles et du gaz, et l'on doit modéliser les deux. Mais leur comportement est différent. Les étoiles sont des objets condensés, le gaz est diffus. Dans leurs relations, les étoiles s'ignorent presque totalement les unes les autres, parce que leurs distances sont considérables. Dans une galaxie spirale aux orbites régulières, il n'y a pratiquement pas d'influence des étoiles entre elles, sauf par leur masse globale, cumulée. Par contre, un atome de gaz apprtenant à un nuage a toutes chances de heurter prochainement un autre atome d'un autre nuage. Par rapport à leur section efficace (leur champ d'action), leurs distances sont faibles. Aussi, les atomes du gaz perdent-ils en permanence de l'énergie, ce qui a pour effet de les refroidir. Alors, les chercheurs ont aménagé leur simulation pour refroidir le gaz. Et là, la structure spirale s'est particulièrement bien manifestée.

La galaxie simulée est divisée en deux composantes :

- les étoiles, qui forment un système froid (régulier, newtonien), présentant une symétrie axiale presque parfaite ;
- le gaz, qui adopte la structure en spirale.

On doit se souvenir ici que les magnifiques bras spiraux des galaxies sont des ondes de densités, des régions où la matière est plus condensée et forme des étoiles. L'aspect brillant des bras vient de la forte luminosité des étoiles massives ainsi formées, dont la durée de vie est faible. Quand elles s'éteignent, l'onde de densité est allé un peu plus loin, et a allumé d'autres étoiles, qui tracent ainsi visuellement la rotation du bras.

Mais les étoiles laissées derrière les bras peuplent la totalité du disque, leur densité est uniforme. Etoiles et gaz n'ont donc pas le même comportement, et l'artifice du refroidissement du gaz dans les simulations a bien mis en évidence ce phénomène.

Les simulations sont donc un outil très efficace, permettant de jouer avec des paramètres, afin de voir quels sont ceux qui permettent de modéliser au mieux ce que l'on observe.

Il ne reste donc plus qu'à y ajouter la matière noire, pour essayer d'obtenir des courbes de rotation réalistes. La répartition qui donnera ces courbes devrait être pertinente.

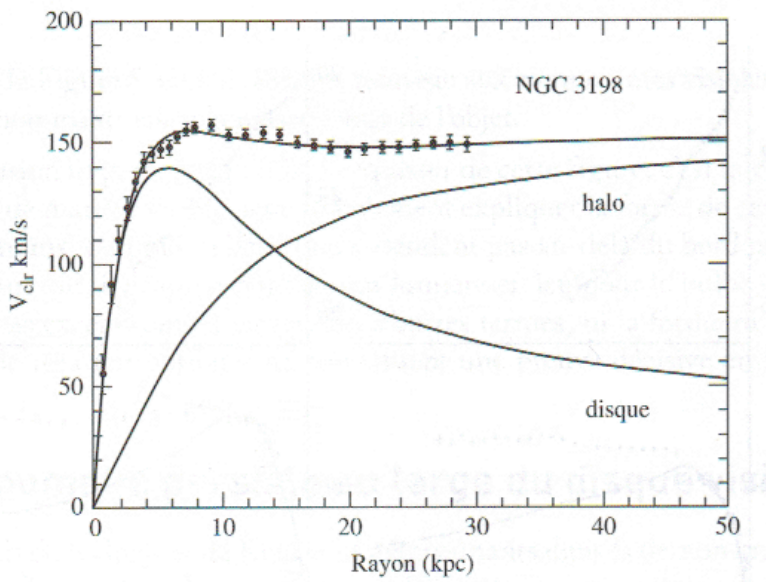
Avant d'incorporer cette matière noire dans les simulations, on doit se demander ce qu'il faut modéliser. La matière noire agit gravitationnellement, mais elle est invisible : elle ne brille pas, elle n'absorbe pas la lumière non plus. On n'observe pas plus de désintégrations, qui donneraient des photons, ou d'autres particules observables. La seule chose à mettre dans les simulations est donc la masse de cette matière, avec bien sûr une répartition appropriée.

Les galaxies sont construites régulières, isotropes. Rapidement, une structure spirale apparaît, avec une barre centrale. Mais elle disparaît tout aussi vite au profit d'une structure chaude : les orbites deviennent fortement elliptiques, et les interactions entre les étoiles fréquentes. Spontanément, la galaxie est passé d'un équilibre de rotation à un équilibre de pression.

**II.6 Résultat des simulations**

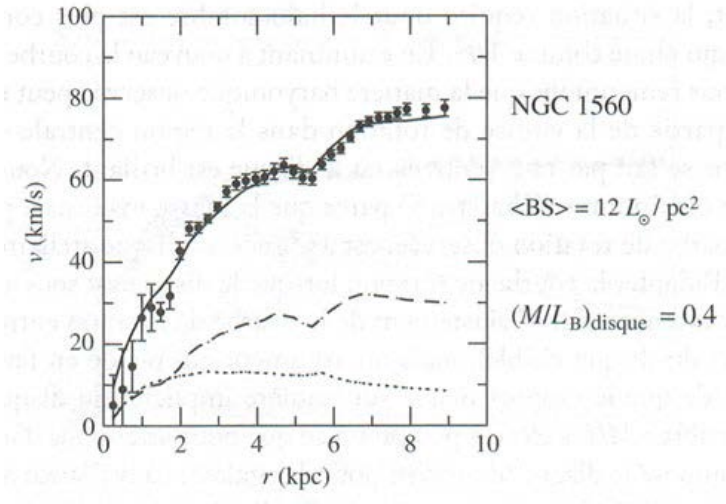
Pour éviter cette dissipation de la structure, qui n'est pas observée, Ostriker et Peebles ont modélisé un halo de matière noire entourant une galaxie spirale. Cette matière est chaude (la vitesse des particules est importante), et sa masse est au moins égale à celle de la masse visible. Avec ces ingrédients, ils ont obtenu des galaxies simulées qui ressemblent fort aux galaxies réelles. Le point le plus important est que ce halo stabilise la structure spirale.

Un tel halo n'est pas tout à fait nouveau. Les amas globulaires et quelques étoiles en constituent un, bien visible, autour des spirales. Il suffit donc d'imaginer qu'il contienne, en plus, de la matière exotique.

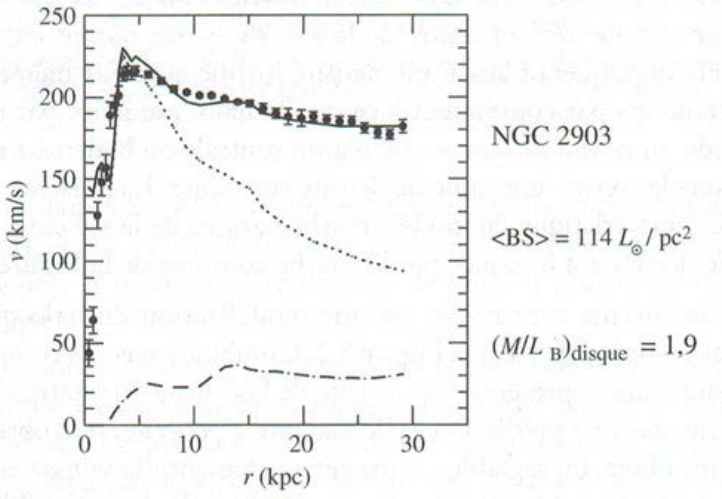



**II.7 Diversité des galaxies**

Il y a une différence, notée dans les années 90, entre les galaxies spirales à forte brillance superficielles (*HSB* pour *High Surface Brightness* ≈ 100 L /pc$^2$), et les autres (*LSB* pour *Low Surface Brightness* ≈ 10 L /pc$^2$). Les HSB montrent une courbe de rotation quasiment newtonienne, alors que les LSB s'en écartent beaucoup. Les courbes de rotation optiques ne sont pas vraiment probantes pour affirmer l'existence de la matière noire. Il faut invoquer les courbes étendues aux nuages de gaz externes.




**Faible** brillance de surface




**Forte** brillance de surface

Clairement, ce schéma nous montre que les galaxies à faible brillance de surface (à gauche) ont une courbe de rotation qui monte doucement, alors que les autres montent brusquement et passent par un maximum. Les galaxies à faible brillance superficielle sont faibles, et dificiles à voir. Aussi n'ont-elles été étudiées que récemment. Ces petites galaxies sont totalement dominées par la matière noire, la matière normale qui les constitue est négligeable. Leurs courbes de rotation sont difficiles à expliquer par le modèle du halo CDM. Pour sauver le modèle, on peut faire intervenir l'évolution de la galaxie, avec des mouvements de matière normale (explosions de supernovæ) qui, par leur action gravitationnelle, pourraient avoir modifié la répartition de la matière noire.

**II.8 Sous-structures**

Les simulations d'évoution pour ces halos de matière noire montrent une fragmentation. Le halo principal baigne une grande quantité de petites condensations, plusieurs centaines. C'est une conséquence de la formation hiérarchique des halos, par condensation de petits objets, qui se regroupent pour en former de plus gros. Le halo de la galaxie est donc le résultat de ces fusions. Mais on s'aperçoit que la fusion est imparfaite, les petites structures ne se laissant pas déchiqueter par les grosses. Elles subsistent donc.

Autour de la Voie Lactée, on observe effectivement des sous-structures : ce sont les galaxies naines sphéroïdales. Mais on n'en connait qu'une douzaine, ce qui est bien insuffisant. Il reste la possibilité que des sous-halos de matière noire existent, sans matière normale suffisante pour être visible…

En fait, la solution proposée pour résoudre un problème en pose d'autres !

**II.9 Stabilité des amas**

Ce qui explique la stabilité des galaxies peut aussi expliquer celle des amas. Des simulations à cette autre échelle ont été faites. Elles indiquent qu'il faudrait beaucoup de matière noire pour expliquer cela, en fait une bonne centaine de fois la masse visible. C'est en accord avec les observations initiales de Zwicky, et de nombreuses autres, plus récentes.

Si l'hypothèse de départ (il y a de la masse invisible, et la gravitation newtonienne est correcte), alors cette masse est largement dominante par rapport à la masse visible. Ce qui constitue une toute autre vision de l'Univers…

De plus, pour expliquer la vitesse de rapprochement de la galaxie d'Andromède, les masses d'Andromède et de la Voie Lactée sont bien insuffisantes. Là encore, de la matière noire est bienvenue pour améliorer la situation.

Enfin, dans les amas comme Coma, on a refait des mesures de vitesse et montré que la masse visible est bien insuffisante, confirmant les premières constatations de Zwicky.

Remarquez que les simulations ne présagent pas de la nature de la matière qu'il faut ajouter pour stabiliser. Elle peut être normale et non détectée, aussi bien qu'exotique. De la matière normale a bien été détectée etre les galaxies dans les amas, sous la forme de grands nuages d'hydrogène chaud (quelques millions de degrés) imaginés initialement par Finzi. Mais ils sont loin d'atteindre la masse nécessaire.

Tout ce faisceau de faits observationnels, et de simulations, a donné sa force au concept tout théorique de matière noire. Il ne reste plus qu'à l'observer…

**II.10 La loi de Tully-Fisher**

Le paradigme CDM doit aussi expliquer la loi de Tully-Fisher, qui est empirique. Les observations récentes en ont fixé l'exposant à 4.

Analysons cette loi. Elle dit que L  $V^4$. L est la luminosité globale de la galaxie dans le proche ifrarouge. Elle reflète directement la masse baryonique des étoiles. De l'autre côté, V est la vitesse marginale de la spirale, elle est définie par la masse totale de la galaxie, donc fortement liée à la matière noire. L'équation de Tully-Fisher met donc en regard la matière ordinaire à gauche, et la matière noire à droite. Comment peut-on expliquer un tel lien, ces deux formes de matière interférant si peu ? Puisqu'il n'y a pas d'interactions, ce lien ne peut être acquis, il devrait alors être produit par la formation des spirales.

Après le découplage de la matière noire, vers z = 100.000, les fluctuations de matière noire ont pu commencer à s'effondrer, et à cosntituer des

structures. Ces objets ont donc une origine très semblable, et sont autogravitants, comme les nébuleuses habituelles. De ce fait, leur masse M est proportionnelle au cube de leur rayon $R^3$ : M  $R^3$. Puisqu'ils sont en équilibre, ils doivent, comme la matière ordinaire, satisfaire au théorème du viriel (partage entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle), et donc $V^2$ = G M / R. De ces deux relations, il est immédiat de tirer : M  $V^3$. Les simulations montrent en effet une telle relation, mais avec une grande dispertion des valeurs (la proportionnalité n'est qu'approximative). Mais remarquez que cette relation ne fait intervenir que la matière noire, et non la matière ordianaire comme la loi de Tully-Fisher.

Alors, pour passer de l'une à l'autre, il faut faire intervenir la façon dont la matière ordianire, après son propre découplage vers z = 1.000, va à sont tour s'effondrer. A ce moment-là, les halos sombres sont déjà structurés, et par leur gravité vont guider la matière habituelle. La matière va donc se condenser vers le centre du halo sombre, mais cette condensation s'arrêterra lorsque la rotation produira assez de force centrifuge pour cela (moment cinétique suffisant). Si on admet que la vitesse de rotation di disque baryonique est est proprotionnelle à la dispersion des vitesses de la matière noire dans le halo, alors on arrive à une relation de la forme Tully-Fisher, mais avec un exposant 3 et non 4 : L  $V^3$.

Pour sauver la matière noire, on peut invoquer que le scénario de formation des galaxies est loin d'être maîtrisé à l'heure actuelle, et que dans ces incertitudes on trouvera le moyen d'augmenter l'exposant… C'est tout à fait possible, mais cette discordance entre la loi prévue et la véritables loi observée est tout de même un gros éceuil pour le paradigme CDM.

**II.11 Masse manquante dans les amas**

Faber et Gallagher en 1979 ont obtenu un rapport M/L ≈ 100. Les amas comme Coma ont une masse visible de l'ordre de $M_v$ ≈ $10^{13}$ L , alors que leur masse dynamique $M_d$ ≈ $10^{15}$ L . Ces données confirment celles obtenues bien plus tôt par Zwicky.

La plupart des galaxies des amas sont elliptiques, sans rotation d'ensemble et dépourvues de gaz. Si M/L ≈ 100 pour l'amas, en supposant que la matière noire soit associée aux glaxies et non diffuse, chaque galaxie doit avoir aussi un rapport M/L ≈ 100. Donc les grandes elliptiques auraient une grande masse, et elles devraient tomber vers le centre de l'amas. Ce qui n'est pas le cas. Donc, le gaz doit être diffus, au moins partiellement.

Depuis les années 70, on utilise des télescopes spatiaux à rayons X. Et ils ont découvert du gaz chaud dans les amas. La température est de l'ordre de $10^7$ K et correspond à une vitesse des atomes de 1.000 km/s. Finzi avait justement prévu l'existence d'un gaz dont les atomes auraient la même vitesse que les galaxies, ce qui est le cas. Finzi avait compris aussi que sa densité devait être faible, sans quoi il se serait déjà refroidi. C'est bien ce qui a été observé, même si la densité est assez élevée dans certains amas pour que le refroidissement ait déjà commencé. Mais même dans ce cas, la masse est trop faible pour satisfaire l'équilibre.

Le satellite à rayons X Eisntein en 1978 a cartographié la répartition de ce gaz dans les amas.

Dans les amas denses, la masse de ce gaz atteint $10^{13}$, $10^{14}$ M , soit 3 à 4 fois la masse des étoiles. Le gaz invisible (en optique) domine donc largement la matière visible condensée en étoiles. On a donc découvert une partie de la matière noire…

La masse dynamique de l'amas est de ≈ $10^{15}$ M . Le rapport ($M_* + M_{gaz}$) / $M_d$ reste de l'ordre de 5 ou 6. Il manque encore beaucoup de matière pour assurer la stabilité dynamique des amas…

**II.12 Problème cosmologique**

Pour produire les éléments chimiques après le Big Bang, il faut que la densité baryonique (la matière ordinaire) soit de $\Omega_b$ = 0,04 (4 % de tout ce qu'il y a dans l'Univers). S'il y a 6 fois plus de matière noire, cela fait $\Omega_{MN}$ = 0,24. Matière ordinaire et matière noire constituent donc $\Omega_{matière} = \Omega_b + \Omega_{MN}$ ≈ 0,3.

Les observations les plus récentes montrent que l'Univers est plat, à courbure nulle globalement, c'est-à-dire euclidien. Dans ces conditions, sa densité doit être égale à la densité critique, par définition de celle-ci (les Ω sont le rapport d'une densité à la densité critique), donc $\Omega_{tot}$ = 1. Par conséquent, il nous manque encore 70 % de l'Univers…

**II.13 Lentille gravitationnelle faible**

Le phénomène de lentille gravitationnelle a été imaginé à la suite de la publication de la Relativié Générale. Il a été plus tard observé sous la forme d'arc lumineux, qui sont des images de galaxies lointaines, ou de quasars, déviées et déformées par la masse d'un amas situé entre l'objet et nous. Ces observations sont une validation de la relativité générale.

Puisque cette théorie est confortée, on peut rechercher des effet de lentille gravitationnelle faible, produits par des objets de masse plus petite. On n'attend pas d'arcs somptueux, mais plus prosaïquement des déformations des galaxies proches. Celle-ci doivent perdre leur forme approximativement circulaire, et s'allonger dans les sens de la gravitation. On peut objecter (et on le fait) que les galaxies ne sont pas rondes, mais elliptiques. Cependant, l'orientation d'une galaxie donnée par rapport à la Terre est tout à fait aléatoire. Dans un champ, les galaxies visibles sont orientées au hasard. Alors, si on observe un allongement systématique de toutes ces galaxies vers un point particulier, on peut considérer que c'est une déformation gravitationnelle orchestrée par une masse occupant ce point. Ce phénomène permet, avec toutes les difficultés observationnelles qui l'accompagnent, de cartographier le ciel et de déterminer le masses perturbatrices.

Remarquez que cette méthode pour peser les galaxies ne s'appuie que sur la relativité générale, alors que la méthode par les rayons X nécessite d'assumer l'équilibre hydrostatique. Ce dernier a des chances d'être réel, mais peut-être pas dans tous les cas.

Les masses obtenues par cette méthode sont en très bon accord avec celles déterminées par les rayons X.

**II.14 Cas particulier**

Il existe un amas de galaxies, découvert en 2006, qui est tout à fait particulier. Il se nomme *amas du Boulet*, et se trouve à z = 0,296 ou encore 2.500 Mpc (avec $H_0$ = 74 km/s/Mpc). Cet amas est tout à fait étonnant. C'est en fait un amas double, avec une composante mineure éloignée de 720 kpc. Chandra, en rayons X, a trouvé deux grands nuages de gaz, associés aux deux amas, mais pas centré sur les étoiles ; ils sont entre les amas. L'un des deux nuages montre de manière évidente les traces d'un choc supersonique avec un autre nuage. En fait, l'explication est simple (en apparence) : les deux amas sont entrés an collision, les systèmes de galaxies se sont croisés sans interactions, mais les nuages de gaz ont subi un choc. La perte d'énergie du gaz lors du choc les a dissociés des galaxies, et ils sont maintenant en arrière d'elles.

Mais la surprise vient de l'analyse par lentille gravitationnelle. La distortion des images des galaxies du champ indique où se trouve la masse qui la produit. Et celle-ci correspond aux galaxies, et non au gaz. Alors ? Si on imagine que la matière noire se comporte un peu comme du gaz, elle aurait dû subir le choc, et traîner comme les nuages. Sa masse se manifesterait ainsi dans le nuages de gaz, et non dans les systèmes stellaires. Il fait admettre que cette matière noire n'a pas subi le choc… Elle est sans dissipation. Les particules de matière noire n'interagissent pas lorsqu'elles se croisent ! Curieux comportement. En particulier, il indique que cette matière n'est pas baryonique, ce dont on se doutait.

### II.15 Chaude ou froide ?

La matière est chaude lorsque les particules qui la composent se déplacent à grande vitesse. On peut donc imaginer que la matière noire soit froide ou chaude, selon la vitesse de ses particules. Aux premiers instants de l'Univers, tout était en équilibre thermique. Il est facile de l'imaginer : la densité était telle que toutes les particules, quelle que soit leur section efficace, se heurtaient. Et par là, équilibraient leur température. Mais lorsque la densité, en baissant, passait en-dessous d'un certain seuil, la section efficace d'un type de particule se trouvait trop petite pour que la particule interagisse encore. On parle de découplage. Ce type de particule continue donc son existence indépendante, sans plus interagir avec les autres.

La matière noire, selon ses propriétés, pourrait être aujourd'hui chaude ou froide. On a donc exploré les deux possibilités. La version chaude est nommée *HDM* (*Hot Dark Matter* en bon français), et la froide naturellement *CDM* (*Cold Dark Matter*).

### II.16 HDM

Considérons d'abord le cas HDM. Il concerne de la matière qui, au moment de son découplge du reste de l'Univers, se déplace à une vitesse fortement relativiste, donc très proche de la vitesse de la lumière. Auparavant, elle était donc en équilibre thermique avec l'Univers. La matière noire naturelle qu'on a considéré était les neutrinos. Ces particules ont beaucoup de caractéristiques adéquates, la seule donnée qu'il manquait au tableau pour conclure était leur masse.

### II.17 Les neutrinos

Leur masse était bornée supérieurement : on savait qu'elle était inférieure à une dizaine d'eV, alors que l'électron, bien léger, a une masse de 511 keV. Cette masse était donc si petite, que les physiciens ont pris l'habitude de la considérer nulle, possibilité tout à fait raisonnable. Mais la physique du Soleil en a décidé autrement. Lorsqu'on a enfin construit des détecteurs à neutrinos (qui interagissent si peu avec la matière que c'est bien difficile), on a constaté un déficit significatif dans les neutrinos solaires. Il fallait remmettre quelque chose en cause, soit la physique du Soleil, soit celle des neutrinos. Le modèle du Soleil étant par ailleurs très bien adapté, c'est la masse du neutrino qui a été mise en question.

Si cette masse est nulle, le neutrino ne peut pas se désintégrer. Or les expériences détectaient le neutrino électronique seulement, ignorant les neutrinos muonique et tauique. Imaginant que le neutrino électronique puisse se désintégrer dans l'un des deux autres types, il serait normal d'en observer sur Terre moins que ce que le Soleil en produit. Le modèle du Soleil serait sauf. C'est ce qui s'est passé.

Les physiciens ont fait des expériences bien contrôlées, entre le CERN à Genève producteur de neutrinos, et le Gran Sasso près de Rome, détecteur. Et le déficit observé a montré que le neutrino se désintègre bel et bien, donc qu'il a une masse.

Par conséquent, le neutrino pourrait être la particule de matière noire recherchée. Mais pour cela, il faudrait que sa masse atteigne quelques 20 ou 30 eV, il est donc disqualifié. Il joue certainement un rôle, mais secondaire.

### La formation des structures

La matière est regroupée en galaxies, amas et superamas. Comment ces structures se sont-elles formées ? Il y a deux scénarios possibles, soit elles se forment par regroupement, les petites en premier, qui fusionnent progressivement pour obtenir les grosses, soit par éclatement, les grosses d'abord, qui se fragmentent pour donner les petites.

Que s'est-il passé, dans un Univers baigné de matière noire chaude ? Les neutrinos se sont découplés lorsque leur énergie est tombé à 2 MeV environ. Etant donné leur masse dérisoire, ils étaient hautement relativistes. Dans ces conditions, ils constituent un bain si chaud, qu'ils effacent toutes les fluctuations de densité qui pourraient se former. Ceci pour des échelles de la taille de l'Univers… tel qu'il était. Mais à cette époque, il était bien plus condensé qu'aujourd'hui. Pour une masse de 17,5 eV, les neutrinos se découplent à z = $10^5$, soit 700 ans après le Big Bang, et l'horizon de l'Univers n'était que de 700 AL. Aujourd'hui, à z = 0, cette partie de l'Univers atteint la dimension de 700 $10^5$ AL = 70 millions d'AL ou 20 Mpc. Ce qui veut dire que notre fluctuation de 700 AL à l'époque était détruite, et donc les amas de galaxie n'existent pas (aujourd'hui) !

> Les particules relativistes (matière noire chaude par exemple), se déplacent aussi vite que la lumière. Donc, elles atteignent l'horizon. Et par conséquent, elles influencent, égalisent, tout l'univers à l'intérieur de l'horizon. Donc, elles lissent, par leurs interactions, les inégalités qui tenteraient de s'y former.

Les galaxies ne peuvent donc se former que beaucoup plus tard, lorsque l'horizon aura bien augmenté. Les simulations numériques montrent que ceci se réalise à z = 2. Or on observe des galaxies à des décalages bien supérieurs, bien plus anciennes.

Un autre argument est bien plus subtil. Il s'agit du théorème de Liouville, qui précise que les particules ultra-relativistes ne peuvent jamais dépasser l'énergie qu'elles avaient un moment du découplage. Ceci se traduit par le fait qu'elles ne peuvent pas peupler davantage l'espace des phases, et ressemble un peu au principe d'exclusion de Pauli. Cet argument disqualifie la matière noire chaude.

L'impossibilité de former les petites structures au bon moment, met à mal le modèle de matière noire chaude. On montre que cette difficulté est la même que pour les autres particules envisageables. On a donc abandonné le modèle HDM.

### II.18 Le modèle CDM

Examinons maintenant le modèle CDM. La matière noire froide est non-relativiste, c'est-à-dire qu'au moment de son découplage, la vitesse moyenne des particules est bien en-dessous de celle de la lumière. Une particule dont la masse serait de 100 GeV, et qui se découplerait à une température de 10 GeV, ne pourrait pas se déplacer à une vitesse relativiste. Ce serait de la matière noire froide.

La matière noire froide ne transmet pas les informations comme la chaude, sa vitesse étant bien faible. Aussi, les fluctuations de densité ne sont pas effacées par elle, et l'argument de formation des galaxies tombe naturellement. La CDM est un candidat, de ce point de vue, tout à fait présentable.

Dans ce modèle, nous avons deux composantes de l'Univers : la matière baryonique normale, et la matière noire. A cela s'ajoutent les photons et les neutrinos. Au début, tout cela est en équilibre. Puis la matière noire se découple du reste à z = 100.000, et enfin, à z = 1.000, les photons se découplent de la matière ordinaire. Entre z = 100.000 et z = 1.000, la matière noire n'est plus perturbée, et ses fluctuations peuvent parfaitement s'amplifier. Lorsque z tombe à 1.000, la matière ordinaire à son tour peut vivre sa vie. Mais elle est libérée à un moment où la matière noire a déjà formé des embryons de structure. Et sa gravitation attire la matière ordinaire, qui se précipite dans ces puits de potentiel.

Dans ce modèle, les petites galaxies se forment très tôt, et se regroupent progressivement pour constituer des galaxies plus grosses, des amas et des super-amas.

Ceci a une influence sur la taille des structures produites.

### II.19 De quoi est faite la matière noire ?

C'est là tout le problème. On n'en sait rigoureusement rien… Mais on imagine ce qu'elle doit être :

- elle est sensible à la gravitation ;
- elle est insensible à l'interaction électromagnétique ;
- elle doit être très peu sensible à l'interaction faible ;
- ses particules doivent être assez massives pour justifier les effets observés qu'on lui impute.

Pour ces raisons, on appelle ces particules hypothétiques *WIMPs* (*Weakly Interactive Massive Particles*). Wimp signifie *mauviette* en anglais. Ainsi, pour expliquer les anomalies gravitationnelles dans le cosmos, on invoque des machos et des mauviettes…

Le modèle standard de la physique des particules nous propose les leptons (électron, muon, tau, et neutrinos associés), et les baryons (proton, neutron, constitués de quarks) ; à cela s'ajoutent les particules d'interaction, ou fermions : photon, bosons faibles $W^+$, $W^-$ et $Z^0$, gluons, et graviton (ce dernier n'ayant jamais été observé). Les baryons constituent donc la matière baryonique, celle que nous connaissons. Les particules hypothétiques ne faisant pas partie de cette liste constituent la matière non baryonique, jamais détectée à ce jour.

Une première hypothèse, concernant la matière noire, a été de la rechercher dans la liste connue. Seuls les neutrinos, dont on a parlé plus haut, étaient candidats. Mais on sait maintenant qu'elle est très faible, de l'ordre de 1 eV, et donc bien insuffisante.

Force est donc de rechercher des particules exotiques. Mais pour cela, les physiciens s'appuient sur des théories connues, qui pourraient être vérifiées bien qu'elles ne le soient pas encore. La première est la *supersymétrie* (*SUSY*). Elle prévoit un échange entre bosons et fermions. Dans la physique standard, il y a une barrière entre les deux classes. On envisage de la lever…

La supersymétrie oblige à doubler le nombre des particules, car les particules connues ne sont pas supersymétriques les unes des autres. Et parmi les nouvelles, il doit y en avoir une plus légère que les autres. Elle ne peut donc pas se désintégrer. Cette particule aurait-elle les bonnes propriétés pour être la matière noire ? Il faudrait déjà qu'elle existe, ce qui n'est pas prouvé.

D'autres théories physiques spéculatives ont été envisagées, apportant des particules nouvelles. Mais rien à ce jour n'est venu étayer ces théories.

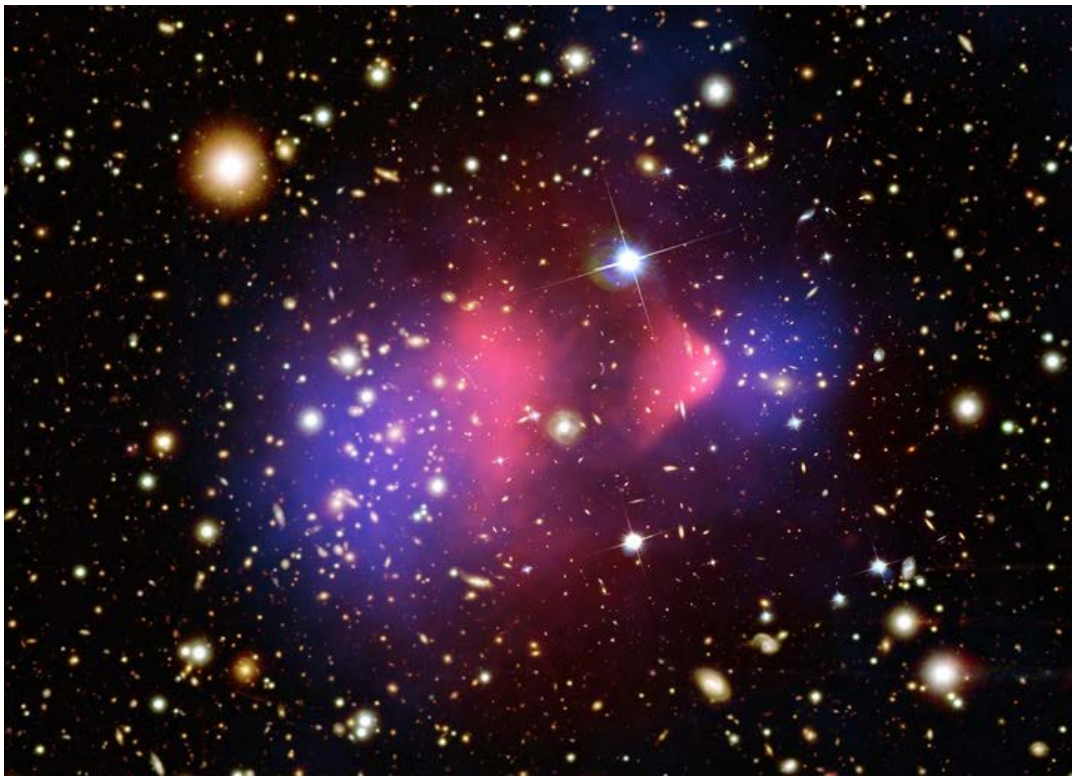
### II.20 En cas de découverte…

La découverte éventuelle d'une particule nouvelle se ferait dans le LHC, le plus grand accélérateur de particules d'aujourd'hui. Les collisions entre particules existantes se feront à une énergie de 14 TeV à son redémarrage prochain. Ce qui veut dire que des particules de grande masse pourront être produites à partir de cette énergie. Comment découvre-t-on une nouvelle particule ? De façon indirecte et statistique. En fait, on ne la "voit" pas. On trace des courbes, obtenues à partir d'une très grand nombre d'expériences (??). Et parfois, dans une de ces courbes, apparaît une bosse, qui montre que là, quelque chose se passe. "Là" signifie à cette énergie, donc à cette masse précise. La courbe est obtenue comme moyenne des résultats d'une grand nombre de collisions. Elle a donc une valeur statistique. Elle montre qu'il existe quelque chose, mais ne dit rien des propriétés de la chose. Le boson de Higgs a été découvert ainsi, et ses propriétés ne sont pas encore conuues.

Alors, imaginant qu'on découvre ainsi une nouvelle particule, supersymétrique ou non, il faudra faire encore de nombreuses expériences pour arriver à en déterminer les propriétés. Et rien ne dit que ces propriétés cadreront avec celles attendues de la matière noire. Autrement, dit, il est tout à fait envisageable de découvrir une particule qui ne soit **pas** de la matière noire ! *A contrario*, si le paradigme de la matière noire est exact, il faudra bien qu'un jour ou l'autre on la découvre. Mais il faut bien voir que si la matière noire n'existe pas, on ne pourra jamais l'affirmer ! On pourra toujours imaginer que quelque chose nous échappe encore… L'un des problèmes de fond de cette théorie est justement qu'elle n'est pas réfutable.

### II.21 Une curiosité embarrassante

On a observé la collision récente de deux amas de galaxies, dans plusieurs domaines de longeurs d'onde, et l'interprétation est difficile.



L'amas du boulet 1E0657-56, photo satellite Chandra NASA

Les deux amas s'éloignent l'un de l'autre. Cette photo est composite, et regroupe :

- l'image optique, sur laquelle on distingue nettement les galaxies des deux amas, à gauche et à droite ;
- en bleu, la répartition de la masse déduite des observations de lentille gravitationnelle ;
- et en rouge, en premier plan, le gaz intergalactique chaud photographié en rayons X.

On voit bien que la masse est centrée sur les galaxies. Mais les nuages chauds sont restés en arrière… Lors d'une collision de galaxies, ou d'amas de galaxies, les étoiles ou les galaxies se croisent sans se heurter, car leurs distances sont bien grandes devant leurs dimensions. Par contre, les nuages de gaz qui les accompagnent se heurtent violemment, et sont freinés par le choc. Le nuage de droite a d'ailleurs une forme caractéristique produite par une onde de choc supersonique. Il est donc tout à fait normal de voir les nuages de gaz désolidarisés des galaxies et à la traîne. On dit qu'il y a *dissipation d'énergie* pour le gaz, mais pas pour les galaxies.

Par contre, la masse se trouve bien centrée sur les galaxies visibles. Ce qui veut dire que la matière noire, qui confère cette masse aux amas, a traversé la collision sans dissipation, comme (noire essentiellement, puisque la matière normale est rare à l'extérieur) est le rapport de la masse au volume V. Donc $\rho$ M(r) / V. Mais celui-ci varie comme $r^3$. Donc $\rho$ M(r) / $r^3$. Et puisque M(r) est proportionnel à r : $\rho$ r / $r^3$ = les galaxies. S'il s'agit de particules, celles-ci ne subissent pas de dissipation, ce qui n'est pas le cas de la matière ordinaire ! Cette observation plaide donc vraiment en faveur de la matière noire exotique.

**II.22 Explication des courbes de rotation par la matière noire**

Nous avons vu plus haut que, à l'extérieur des spirales, là où la luminosité disparaît, la courbe de rotation est plate au lieu de décroître. Et la formule qui donne la vitesse de rotation à la distance r est telle que :

$$V^2 = \frac{G\,M(r)}{r}$$

Si la vitesse doit être constante, alors le membre droit de cette formule l'est aussi. G étant une constante, il faut de M(r) / r le soit également. Par conséquent, M(r) r. Mais la densité de matière1 / $r^2$.

Ainsi, pour justifier des courbes de rotation plates, la matière noire doit se répartir de façon très précise, et augmenter se densité graduellement tandis que celle de la matière normale diminue… Le lien entre les deux est si fort, que l'on parle de *conspiration disque-halo*. C'est assez troublant de voir une telle entente entre deux formes de matière qui, par ailleurs, semblent s'ignorer superbement !

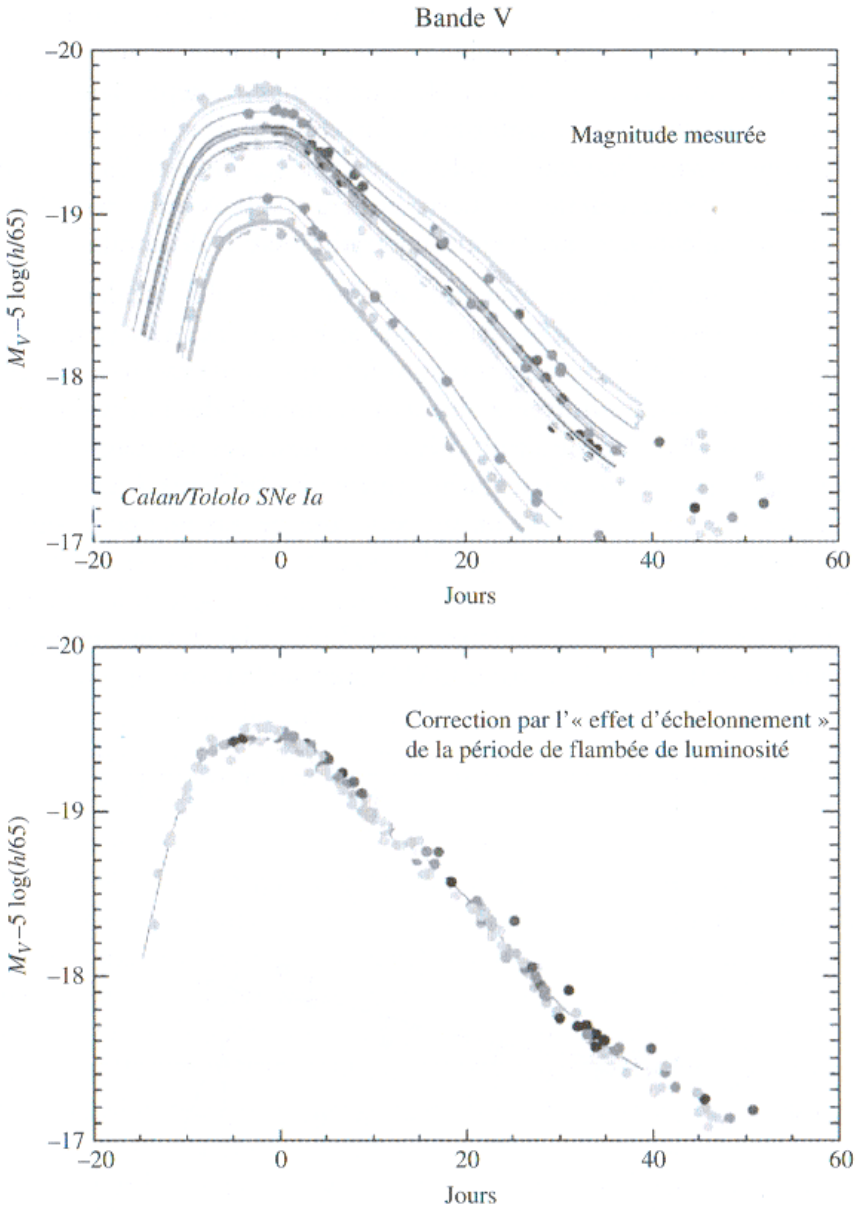
On doit remarquer aussi que la vitesse constante due au halo n'a *a priori* aucune raison d'être égale à la vitesse maximum donnée par la matière visible. Ceci aussi montre la conspiration.

Prenons le problème à l'envers. Imaginez-vous frabriquer une galaxie spirale. Mettez de la matière normale, visible, en la répartissant pour donner l'aspect visuel habituel d'une spirale. Maintenant, ajoutez de la matière noire. Quelle quantité ? Puisque les deux types de matière sont INDÉPENDANTES, vous pouvez mettre la quantité que vous voulez ! Croyez-vous que vous obtiendrez une courbe de rotation plate ? Il y a peu de chances… Pire, rien ne vous empêche de faire varier, d'une galaxie à l'autre, à la fois la quantité de matière noire et sa répartition. Et d'obtenir des courbes de rotation de formes diverses, différentes d'une galaxie à l'autre.

Cette petite expérience de pensée nous montre l'importance de la répartition précise de la matière noire par rapport à la matière normale, alors qu'elles sont indépendantes l'une de l'autre… Pour que la matière noire soit la solution au problème des courbes de rotation, il faut donc lui reconnaître des

propriétés bien étranges : indépendante de la matière normale, mais variant en parfaite harmonie avec elle.

---




## *III Modification de la dynamique*

Le problème provient de la discordance entre les mouvements observés et les mouvements prévus. Ceux-ci sont calculés à partir de la matière visible, en utilisant la loi de Newton (ou la Relativité Générale, ce qui revient au même, sauf en cosmologie). Par conséquent, une hypothèse (au moins) est fausse. Soit la masse observée est trop faible (d'où le paradigme de la matière noire), soit la gravité est mal comprise, soit ce sont les deux qui sont à remettre en cause ! C'est le deuxième point qu'on va maintenant aborder.

### III.1 MOND

*MOND* (*MOdified Newtonian Dynamics*) a été proposée par Mordehai Milgrom, astrophysicien israélien. Il a réfléchi sur la façon de modifier la loi de newton pour obtenir une théorie qui satisfasse les observations.

La dynamique est définie par deux lois : la force agissante, et la réaction des corps à cette force. La première est la loi de la Gravitation Universelle $F = G\,M\,m\,/\,r^2$. La seconde est la loi de l'inertie, découverte par Galilée, et que Newton a écrite $F = m\,\gamma$. Milgrom a vite abandonné la modification de la gravitation elle-même, pour jouer sur la loi de l'inertie.

Newton a obtenu ses deux lois à partir des lois de Képler, qui régissent le mouvement des planètes autour du Soleil. Pour préciser, ces lois ont été établies à partir du mouvement de la seule planète Mars, dont Képler avait des positions précises sur une longue durée. Ensuite, elles ont été extrapolées avec succès aux autres planètes. Puis les lois de Newton ont été largement validées dans le domaine du système solaire, domaine défini par un certain niveau de forces, et des distances qui s'expriment en millions ou milliards de kilomètres.

Lorsqu'on explore les confins des galaxies spirales, la valeur de la force de gravitation qu'on y rencontre est bien plus faible que dans le système solaire, et les distances sont bien plus grandes. On est donc bien dans un cas où les lois de Newton sont largement extrapolées pour leur faire dire

quelque chose pour quoi elles n'ont été faites. Est-ce raisonnable ?

Milgrom est parti de la loi de Newton, réécrite sous la forme :

$F = m \gamma = m \gamma^2 / \gamma$

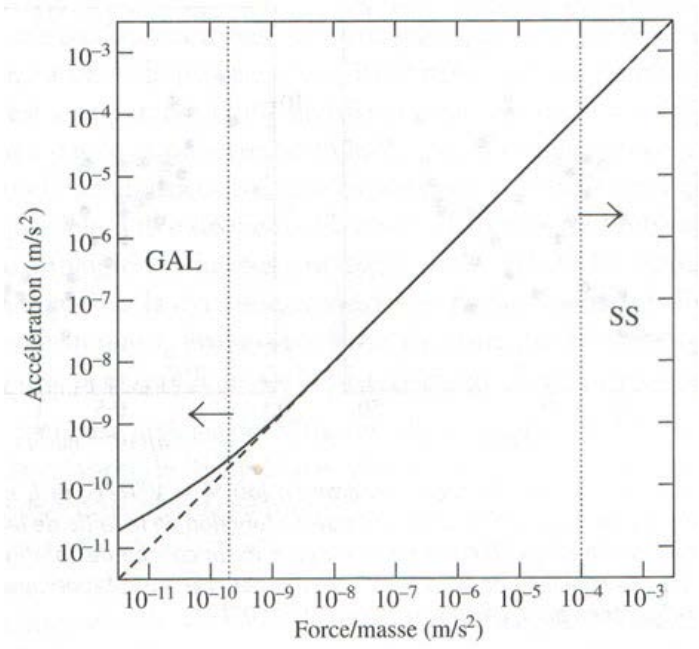
Maintenant, on remplace le $\gamma$ du dénominateur par une constante $\gamma_0$.

$F = m \gamma^2 / \gamma_0$.

Bien sûr, ceci modifie la loi, puisque la simplification ne peut plus se faire. Aussi réserve-t-on cette forme modifiée au domaine où les accélérations sont très faibles (par exemple au large des spirales). On a donc maintenant deux formes différentes de la loi fondamentale de la dynamique. Elles s'appliquent dans deux domaines différents :

| | | |
|---|---|---|
| lorsque $\gamma$ | $\gamma_0$ | $F = m \gamma$ |
| lorsque $\gamma$ | $\gamma_0$ | $F = m \gamma^2 / \gamma_0$ |
| entre les deux | | non défini |

Le fait que la fonction ne soit pas définie entre ces deux domaines n'est pas critique. C'est forcément une fonction qui permet de passer en douceur d'un domaine à l'autre. Et le but de cette théorie est de montrer une alternative dans le domaine des petites gravités. Elle sera à améliorer par la suite.




Ce schéma montre la différence entre les deux domaines : à gauche le domaine galactique des trèsnfaibles accélérations, à droite celui du système solaire des accélérations fortes. Entre les deux, c'est la fonction $x / (1 + x)$ qui a été choisie pour assurer la continuité.

**III.2 Conséquences**

Dans le mouvement circulaire, l'accélération centripète (en fait l'inertie qui entraînerait l'objet en ligne droite), est :

$\gamma_c = V^2 / r$, où V est la vitesse orbitale, et r la distance à l'attracteur. Puisque l'objet est en orbite stable, la force centripète est égale à la force gravitationnelle, donc :

$F = m \gamma^2 / \gamma_0 = G M m / r^2$

On remplace $\gamma$ par sa valeur centripète :

$F = m (V^2 / r)^2 / \gamma_0 = m V^4 / r^2 \gamma_0 = G M m / r^2$

On en tire immédiatement :

$V^4 / \gamma_0 = G M$

et donc :

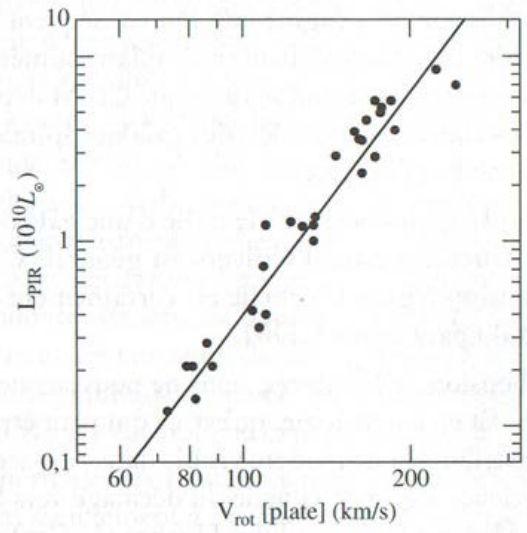
$V^4 = G M \gamma_0$

Par conséquent, on a bien obtenu ce que l'on cherchait : la vitesse dans ce domaine est une constante.

### III.3 Loi de Tully-Fisher

On peut remarquer en plus que la masse est proportionelle à la quatrième puissance de la vitesse à l'extérieur de la galaxie. Si, comme il est naturel de le penser, la luminosité de la galaxie est proportionnelle à sa masse, on a obtenu le relation de Tully-Fischer.

Ainsi, la relation de Tully-Fisher est naturelle dans cette nouvelle physique. Bien qu'elle ait été trouvée observationnellement avant, on pourrait dire que la théorie la prévoit, puisqu'elle en est une conséquence, alors que la théorie n'a pas été bâtie pour cela.

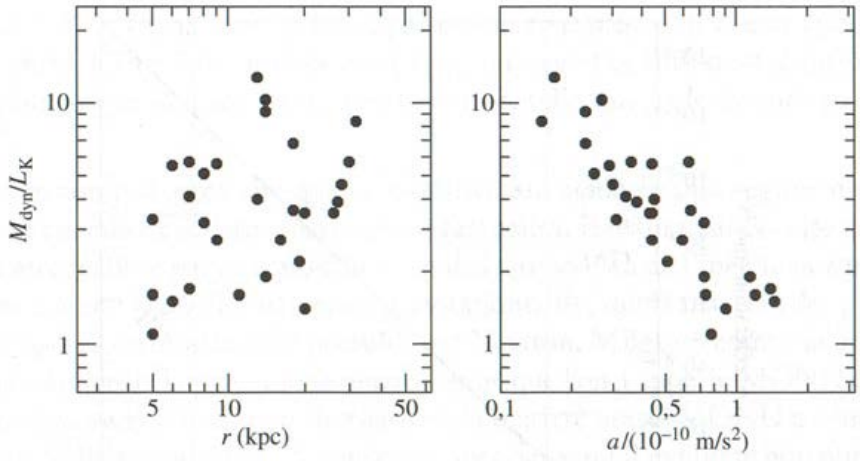



Loi de Tully-Fisher pour les spirales de l'amas de la Grande Ourse

La droite représentée est la prédiction de la théorie MOND. Elle s'adpate parfaitement aux données observationnelles.

### III.4 Fondement de la théorie

Milgrom a basé sa théorie sur l'idée que la modification devait porter sur l'accélération gravitationnelle. Il est maintenant conforté par une observation de 15 ans plus récente.




Sanders et McGaugh 2002

Ces deux schémas montrent le rapport M / L de l'amas de galaxies de la Grande Ourse (spirales seulement), mais classé de deux façons différentes. A gauche, les galaxies sont classées en fonction de leur rayon (taille de la galaxie), et à droite en fonction de l'accélération mesurée à l'extérieur. La masse est la masse newtonnienne.

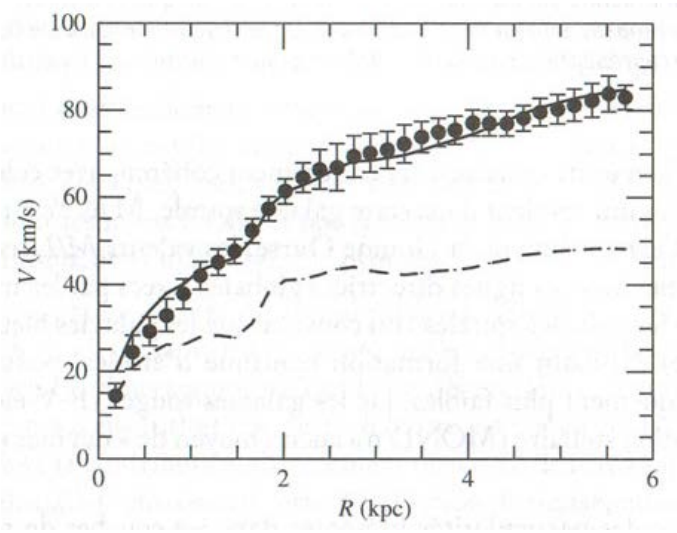
Il est absolument évident que le classement par taille éparpille les galaxies, alors que le classement par accélératin le regroupe selon une diagonale. On constate une dispersion assez importante, ce n'est pas une droite régulière, mais la tendance est claire.

On trouve de petites galaxies avec un rapport M / L faible, d'autres avec un rapport élevé ; de même on en trouve de grandes avec des rapports variés.

A droite, les galaxies dont l'accélération extérieure est relativement élevée ont un rapport M / L faible, celles dont l'accélération est faible ont un rapport élevé.

### III.5 Les courbes de rotation en détail

Le rapport M / L est calculé en considérant la masse des étoiles et la masse du gaz, matière noire exclue bien sûr.



Swaters 1999, Westerbork

Ce schéma montre la courbe de rotation calculée par MOND, confrontée à la courbe mesurée au radiotélescope de Westerbork, sur les nuages d'hydrogène neutre. On constate le très bon accord entre les deux.

En fait, la théorie s'adapte parfaitement aux galaxies, qu'elles soient à faible ou forte brillance de surface, ce que la théorie CDM ne peut faire. La discordance de CDM vient du fait qu'il faudrait un réglage extrêmement précis entre les densités de matière noire et brillante, pour arriver exactement à ces courbes. MOND n'a pas besoin de cet artifice.

**III.6 Les amas de galaxies**

Là est le problème… L'application de MOND aux amas permet, comme on s'y attend, de réduire la quantité de matière noire nécessaire pour justifier les mouvements des galaxies. De réduire, mais pas d'annuler. On passe de 6 fois la masse de matière brillante à 2 fois seulement, mais on n'explique pas tout.

Peut-être faut-il encore un peu de matière noire pour tout expliquer, les neutrinos pourraient éventuellement jouer ce rôle. Mais il reste un problème que MOND ne résoud pas.

Il existe une version relativiste de MOND, nommée TeVeS, mais elle comprend trois champs au lieu d'un… Une belle complexité, à côté de la quelle la Relativité Générale apparaît toute simple !

Ni la matière noire, ni la gravité modifiées ne peuvent, chacune séparément, vérifier toutes les observations. Lezs recherches doivent affiner les résultats, et les théories progresser.

## *Bibliographie*

*A la recherche de la matière noire* H. Sanders, de Boeck 2012

*Energie noire, matière noire* M. Cassé, Odile Jacob 2004

*Matière noire et autres cachotteries de l'Univers* A. Bouquet, Dunod 2003

---=OO=---




**Critique du Modèle Standard**

Le Modèle Standard des particules est couramment utilisé aujourd'hui, et donne des résultats extrêmement bons comparés à l'expérience. Il décrit les particules élémentaires et leurs interactions, à l'exception de la gravitation. Ce n'est donc pas une théorie physique complète.

Chaque particule y est décrite par quelques paramètres : la masse, la charge électrique, la charge leptonique, le spin… Au total, il comporte ainsi 19 paramètres. Ces paramètres font partie de la théorie, mais celle-ci n'en fixe pas les valeurs. Ce sont des paramètres libres, dont les valeurs sont déterminées expérimentalement.

Cette liberté laissée aux valeurs des masses, en particulier, indique que la théorie n'est pas unique ! On pourrait en fait créer une kyrielle de théories ayant toutes les mêmes principes, mais des valeurs différentes pour les masses. Il semble que par cet aspect le Modèle Standard ne soit pas une théorie bien achevée.

La gravitation n'en faisant pas partie, la théorie est en plus incomplète. Elle ne peut décrire tout l'univers, mais seulement certains de ses apsects, ceux dans lesquels la gravitation est négligeable devant les autres forces. Ce qui en fait malgré tout une théorie fort utile, car la gravitation est $10^{40}$ fois plus faible que l'interaction électromagnétique, dans les conditions qui règnent aujourd'hui à peu près partout dans l'Univers (sauf peut-être dans les trous noirs). Mais ce manque est crucial si l'on veut expliquer une phase chaude de l'Univers à ses débuts : le Big Bang. La densité est alors telle que la gravité, par addition, devient aussi forte que es autres interactions.

Le Modèle Standard donne donc des résultats utiles pour l'immense majorité des applications qu'on peut en attendre, mais il pêche dans des cas très particuliers. Ce qui peut laisser penser que certains phénomènes qui se produiraient dans ces circonstances-là ne seraient pas prédictibles.

Le Modèle Standard décrit les particules élémentaires comme étant ponctuelles. Les diagrammes de Feyman représentent les différentes interactions possibles. L'ennui est qu'il y en a plusieurs, beaucoup, pratiquement une infinité… Si on fait la somme de toutes ces possibilités, on tombe sur des valeurs infinies. Or parmi elles, il y en a de simples, dont la probabilité de réalisation est élevée, et d'autres bien plus complexes, mettant en jeu de nombreuses particules intermédiaires, et dont la probabilité est faible. Pour ne pas prendre en compte, négliger, ces possibilités qui ne se réalisent presque jamais, les physiciens ont défini la méthode de *renormalisation*. Cette méthode s'applique très bien pour l'électromagnétisme, les interactions forte et faible, mais pas pour la gravité. On dit que celle-ci est non renormalisable. Et de là vient l'impossibilité actuelle de l'inclure dans le Modèle Standard.

L'aspect ponctuel des particules dans le Modèle Standard semble donc à l'origine de bien des problèmes. La Théorie des cordes remplace les particules ponctuelles par des cordes ayant une longueur, et c'est là l'idée de base.

**Historique**

La première idée est venue à Gabriele Veneziano. Il travaillait sur l'interaction forte, et se heurtait, comme ses collègues, à des problèmes insurmontables. Un jour, il a constaté une similitude mathématique entre ces problèmes et une fonction bien connue, la fonction β imaginée par Euler deux siècles plus tôt. Les solutions de cette fonction représentaient bien les résultats qu'il cherchait à interpréter. Mais sa signification physique n'apparaissait pas.

Il a fallu attendre 10 ans avant qu'émerge une interprétation, et c'est l'origine des cordes : les particules élémnt ires ne seraient plus ponctuelles, mais seraient d'inifintésimale cordes. Cette interprétation est due à Yoichiro Nambu, Holger Nielsen, Leonard Susskind. Si ces cordes étaient très petites, elles pourraient, dans l'état de nos instruments actuels, nous apparaître ponctuelles. Ce qui justifierait qu'on ne les ait pas découvertes expérimentalement. Les interactions entre ces cordes seraient représentées par la fonction β d'Euler.

Une fois l'idée de base lancée, il a fallu la mettre en pratique, et développer une véritable théorie. Et là, les difficutés se sont accumulées. Il a fallu peu de temps pour que des résultats expérimentaux viennent mettre en échec ces développements. Pendant ce temps-là, la chromodynamique quantique remportait tous les succès ! Rappellons qu'elle traite justement de l'interaction forte, que voulait résoudre également la théorie des cordes. Cette dernière a été abandonnée… presque.

Sans trop anticiper sur la description de la théorie, on peut dire que les cordes sont les constituants élémentaires, et que les particules que nous connaissons sont des états de vibration de ces cordes. Une même corde, vibrant à des énergies différentes, peut apparaître sous la forme de particules différentes. Les gluons, qui caractérisent l'interaction forte, sont ainsi représentés. Mais les cordes ont d'autre modes, qui pouvaient s'interpréter comme des bosons, mais ne correspondaient pas à l'interaction forte. Ceci était un défaut rédhibitoire de la théorie, mais il a tourné à son avantage lorsqu'on s'apperçut qu'ils correspondaient en fait au graviton… Tout au moins au graviton théorique, puisqu'il n'a pas encore été observé. On sait que les ondes gravitationnelles, portées par le graviton, ont été observées indirectement par l'augmentation de la période du pulsar binaire. Mais le graviton n'est pas connu expérimentalement.

Ainsi, une théorie faite pour expliquer l'interaction forte dans un cadre quantique, se trouve contenir, presque par accident, les éléments de la gravitation. C'était vraiment un atout très fort. Restait à le conforter par un développement harmonieux.

Echaudé par les multiples tentatives antérieures qui avaient lamentablement échoué, les physiciens n'ont pas cru à cette nouvelle approche. Et dans les années 80, on a même trouvé des incompatibilités entre la Théorie des Cordes et la Mécanique Quantique. En 1984, les problèmes ont soudain été résolus, par Green et Schwarz. Et mieux encore, ils ont montré que la théorie pourrait expliquer non seulement la gravité et l'interaction forte, mais aussi, tant qu'à faire, l'interaction faible et l'électromagnétisme.

Cet aspect universel de la théorie a emporté l'adhésion de nombreux physiciens, qui ont travaillé activement. Mais les calculs sont difficiles. Pire même, car les physiciens ont l'habitude des calculs pénibles, tirés d'équations bien connues. En Théorie des Cordes, les équations ne sont connues qu'approximativement ! En 95, Edward Witten a annoncé une nouvelle approche pour améliorer les équations et les calculs correspondants. Mais près de 20 ans plus tard, la situation n'est pas vraiment débloquée.

**Définition**

Les cordes seront supposées élémentaires, en ce sens qu'elles n'ont pas de structure, elles ne peuvent pas être décoomposées en entités plus petites. Plus petites que la longueur de Planck serait d'ailleurs difficile à envisager…

Les cordes ont une longueur fixe, et vibrent selon des modes définis par la longueur, tout comme une corde de violon. Les différents modes de vibration, donc d'énergie, de ces cordes définissent les masses et les charges des particules.

Ainsi, toutes les particules que nous connaissons seraient en fait identiques dans leur structure, toutes formées d'un même type de corde, mais vibrant différemment. Comme pour une corde vibrante de violon, l'intensité du son correspond à l'intensité de l'excitation. C'est une énergie d'autant plus grande. Et puisque l'énergie correspond à la masse ($E = mc^2$), à chaque mode de vibration correspond donc une masse. Par conséquent, les masses auraient une explication !

**Masses**

Les masses posent cependant un problème. Si la longueur des cordes est la longueur de Planck, leur énergie quantique (due au principe d'incertitude), doit être de l'ordre de l'énergie de Planck. Convertie en masse, c'est la masse de Planck. Or celle-ci est absolument énorme : $10^{19}$ fois la masse du proton… C'est la masse d'un grain de poussière. Mais encore une fois, un phénomène sauve la situation. Les fluctuations quantiques des cordes leur confèrent une énergie négative ! Et la compensation pourrait se faire. Et elle se fait effectivement, comme l'ont démontré Scherk et Schwartz. Elles se compensent même exactement pour le graviton, qui de ce fait a une masse nulle. Ouf !

**Tension des cordes**

Pour vibrer, les cordes doivent être en tension, comme une corde de piano. Mais cette tension est énorme. et les modes de vibration possibles en nombre infini. Les particules que nous connaissons, dont la masse est minuscule par rapport à la masse de Planck, sont donc les modes les plus calmes. Et il devrait exister d'innombrables particules de grande masse, correspondant aux modes de grande énergie. Il est évident que nos accélérateurs de particules sont infiniment loin de pouvoir créer de telles particules. Existent-elles réellement ? L'énergie nécessaire pour les créer était disponible un instant après le Big Bang. Il devait donc y en avoir. Mais leur grande masse les rend instables, et elles ont dû se désintégrer en une myriade de particules plus légères, celles que nous observons.

**Compatibilité de la Relativité et de la Mécanique Quantique**

Le problème d'incompatibilité entre ces deux théories provient de leur description de l'espace. Pour la Relativité, l'espace-temps est continu, lisse. Pour la Mécanique Quantique, à très petite échelle, vers la longueur de Planck, l'espace-temps lui-même perd cette continuité et devient fluctuant. C'est la source des problèmes entre les deux descriptions du monde. La Théorie des Cordes ne présente pas ce problème, pour une raison d'échelle.

Pour sonder la matière et en découvrir la structure, nous utilisons des accélérateurs, qui projettent des électrons ou des protons à très grande énergie. Plus l'énergie est grande, plus la longueur d'onde de de Broglie associée à la particule est petite. C'est ce qui fait qu'elle nous permettent de voir des détails aussi petits que leur longueur d'onde elle-même, d'autant plus petite que leur énergie est plus grande. Les particules dans le Modèle Standard étant ponctuelle, il n'y a pas de limite inférieure réelle pour sonder la matière.

Avec les cordes, le problème est radicalement différent. Les cordes ont une longueur finie, et même en augmentant leur énergie on sera limité par leur longueur, qui ne permettra jamais de sonder à plus petite échelle. Mais si la Théorie des Cordes représente vraiment le Monde, alors rien ne permet de voir à plus petite échelle. Par conséquent, les fluctuations quantiques de l'espace-temps, qui sont à plus petite échelle, sont invisibles à toutes les particules, et le problème ne se pose tout simplement pas.

**Les symétries**

De nombreux phénomènes physiques admettent une symétrie. La plus évidente est la rotation : une sphère peut être tournée dans tous les sens, elle reste identique à elle-même. Plus subtile, la symétrie temporelle des lois de la Mécanique. La relation fondamentale de la Mécaniqe, $F = m\, d^2x / dt^2$, ne change pas si on change t en -t. Autrement dit, si on fait passer le film à l'envers, on voit les objets suivre la même trajectoire, mais dans l'autre sens. La physique regorge de symétries, et l'on peut même dire qu'aujourd'hui elles sont à la base des théories.

Le Modèle Standard des particules n'échappe pas à la règle. Il présente de nombreuses symétries, qui correspondent à des lois de conservation. Mais tout n'y est pas symétrique. Les particules se divisent bien en deux camps : les fermions et les bosons. Entre les deux, un mur.

Certains physiciens sont allé au-delà de ce qu'affirme ce modèle, et ont ajouté une nouvelle symétrie : celle qui permet d'échanger les bosons et les fermions. Si elle est vrai, cette symétrie permet à un boson de devenir fermion par une désintgration, et réciproquement. Un petit problème : aucun fermion connu ne correspond à un boson connu… *idem* dans l'autre sens d'ailleurs. Alors, pour admettre cette nouvelle symétrie, il faut accepter de doubler la ménagerie des particules !

**Le spin**

Les deux physiciens hollandais Uhlenbeck et Goudsmit ont, en 1925, réfléchi sur le magnétisme associé à l'électron. Dans la théorie de Maxwell, le magnétisme nait du mouvement de charges électriques. L'électron possède bien une charge, il lui manquait le mouvement. C'est le spin qui y pourvoit. Le spin est une sorte de rotation sur lui-même de l'électron, propriété quantique puisque l'électron est une particule ponctuelle. Défini pour l'électron, le spin a vite été étendu à toutes les particules matérielles, qui ont un spin de +1/2. Ensuite, ce sont les particules d'interaction qui ont été dotées d'un spin, mais il est entier, de valeur +1. Sauf le graviton, dont le spin vaut +2.

Dans la théorie des cordes, il est apparu un état de vibration qui correspond à une particule de masse nulle et de spin +2, ce qui permet de dire qu'elle contient la gravitation. Une désintégration permet de transformer une particule lourde en une particule plus légère. Ce qui est vrai de la masse le serait-il du spin ? Dans le Modèle Standard, ce n'est pas pris en compte. Mais certaines théories introduisent une nouvelle symétrie, qui permet de passer d'un spin à un autre, d'un demi-entier caractérisant les fermions à un entier caractérisant les bosons. Ceci est la *supersymétrie*. La Théorie des Cordes l'a incorporée, dans sa version Supercordes.

**Théorie des supercordes**

Elle inclus la supersymétrie, ce qui a pour effet d'associer à chaque particule une particule dont le spin diffère de ±1/2. Une particule qui diffère ainsi est nommée *superpartenaire*. En ajoutant 1/2 au spin d'une particule matérielle (électron, proton…), on obtient une particule de spin +1, c'est-à-dire un boson. Ainsi, la supersymétrie permet de transformer un fermion en boson, et un boson en fermion. Juste un petit problème : les particules connues ne peuvent ainsi s'apparier. Ce n'est pas pour rien qu'on n'a pas découvert la sypersymétrie à ce jour…

Les théories supersymétriques ont donc prévu de nouvelles particules. Et pour les nommer, on utilise une méthode systématique. Le nom des superpartenaires des fermions (électron, quarks, neutrinos de spin +1/2) se forme en ajoutant un 's' initial au nom du fermion. Le superpartenaire de l'électron est donc le *sélectron*, celui du quark est le *squark*, celui du neutrino le *sneutrino*. Ils sont de spin 0. Pour les bosons, on utilise le suffixe 'ino' ajouté au nom du boson. Le superpartenaire du photon est le *photino*, celui du gluon est le *gluino*. Les bosons intermédiaires Z et W donnent le *zino* et le *wino*. Aucune des superparticules n'a encore été découverte.

Quelle est la pertinence de cette supersymétrie ? On peut dire qu'elle est mathématiquement nécessaire, mais la Nature n'est peut-être pas forcée de suivre la mathématiques… Mais physiquement, le Modèle Standard est difficile à maîtriser à cause de fluctuations quantiques, qui produisent des effets parfois énormes, non observés. Or la supersymétrie, par des échanges entre bosons et fermions, calme le jeu. Le Modèle Standard Supersymétrique est donc plus stable que son ancêtre.

Enfin, l'unification des forces est prévue par la Mécanique Quantique, en considérant les fluctuations qui se produisent à proximité d'une particule (création-anihilation de paires). Mais elle ne se produit que deux par deux. Par contre, la supersymétrie, là encore, lisse le processus et produit une véritable unification.

**Masses**

Les calculs faits sur les superpartenaires indiquent que leurs masses doivent être très élevées, mille fois plus que le proton. Et nos accélérateurs n'atteignent pas cette zone, ce qui explique que les superparticules n'aient pas été observées jusqu'à maintenant.

**Supercordes**

Au départ, la théorie des cordes ne décrivait que des bosons, c'est-à-dire des particules de spin entier. Lorsqu'on a essayé d'inclure des modes fermioniques, ils sont apparus par couples avec des modes bosoniques. C'est-à-dire qu'on a créé à la fois des fermions et des bosons ; ils arrivent naturellement appariés, confortant l'approche supersymétrique. De plus, la supersymétrie évite la présence de tachyon (particules superluminiques), bien embarrasants dans la théorie première.

**La surprise**

En 1919, Theodor Kaluza, mathématicien polonais, a imaginé un univers dans lequel il n'y aurait pas 3, mais 4 dimensions d'espace… Mathématiquement, c'est parfaitement possible. Voyons pourquoi :

Considérons un espace à une seule dimension. C'est une ligne droite toute simple, sur laquelle on peut aller dans un sens ou dans l'autre. Il est assez naturel d'orienter la droite, pour savoirdans quel sens on se déplace. Alors, un déplacement dans le sens de la droite est positif, dans le sens inverse il est négatif. Sur cette droite, on peut définir des longueurs, d'un parcours par exemple. Si on se déplace dans le bon sens, le sens positif, la longueur du parcours est la différence entre les positions de l'extrémité et de l'origine. Mais dans le sens inverse, cette différence est négative. Prenons le carré pour avoir toujours un nombre positif.

Passons à deux dimensions. On a maintenant une surface, comme une feuille de papier. Il faut deux axes pour indiquer la position d'un point quelconque. Et pour définir la longueur d'un segment, on utilise le théorème de Pythagore : $l^2 = x^2 + y^2$. Il donne comm eprécédemmment le carré de la longueur.

En compliquant un peu plus, on passe à trois dimensions. On projette le segment à mesurer sur le plan (X, Y). Dans ce plan, la longueur de la projection est $l_{XY}^2 = x^2 + y^2$. Et la longueur du segment donné, par une seconde application du théorèe de Pythaogre, est $l^2 = x^2 + y^2 + z^2$.

Pour ces trois dimensions d'espace, le carré de la longueur d'un segment est donc toujours la somme des carrés des projections du segment sur les axes.

Pourrait-on imaginer un espace à 4 dimensions ? Pourrait-on y mesurer la longueur d'un segment ? Oui, en procédant tout simplement par analogie. On pose que la longueur d'un segment est $l^2 = x^2 + y^2 + z^2 + t^2$. Si on veut que les axes soient orthogonaux, il faut analyser ce que signifie cette propriété. Deux axes sont perpendiculaires si le produit scalaire de leurs vecteurs unités est nul. Il suffit de définir un produit scalaire en dimension 4 pour satisfaire cela.

Avec ces outils mathématiques, on est donc capables de construire, mathématiquement, des espaces de dimension quelconque (même infinie, mais oui…).

Kaluza a défini un espace un peu particulier, car il est évident pour tout le monde que notre espace physique n'a que trois dimensions d'espace, pas une de plus. Pourtant, imaginez qu'il existe une quatrième dimension, mais toute petite, enroulée sur elle-même. Tellement petite, que nos moyens physiques ne nous permettent pas de la distinguer. C'est un peu difficile à imaginer bien sûr, mais c'est envisageable. Un tel espace physique n'apporterait pas de contradiction.

L'image classique est celle de la fourmi qui marche sur un long tuyau d'arrosage. Vu de loin, le tuyau paraît un fil, unidimensionnel. Il faut le voir de près pour s'aperçevoir qu'il présente une seconde dimension enroulée, sur laquelle la fourmi, à la même échelle, est capable de tourner. C'est quelque chose comme ça que les particules élémentaires pourraient ressentir.

**Théorie de Kaluza-Klein**

Kaluza a suggéré que l'ajout d'une dimension permettrait d'unifier la Relativité Générale avec l'électromagnétisme. Une telle performance justifiait que l'on s'intéresse de près à la question. On nomme *Théorie de Kaluza-Klein* toute théorie qui explique la physique dans un espace à plus de 3 dimensions.

En ajoutant une diension à un espace, on ajoute des libertés. Comme la fourmi qui peut faire le tour du tuyau, les particules peuvent maintenant s'offrir de petites incursions dans un nouvel espace. Kaluza a réécrit les équations de la Relativité Générale, mais la quatrième dimension a produit, obligatoirement, de nouvelles équations. Il faut bien décrire ce qu'il se passe dans cette extension de l'espace. Et la surprise a été que es équations ajoutées étaient identiques aux équations de Maxwell de l'électromagnétisme.

Relativité Générale + quatrième dimension = Relativité Générale + électromagnétisme.

Ainsi, cette modification de l'espace permet de décrire simultanément deux théories majeures de la physique. La gravitation provient des dimensions habituelles, et l'électromagnétisme découle de la quatrième.

Les problèmes sont pourtant arrivés peu après. Les prédictions de cette théorie pour la masse et la charge de l'éelctron ne correspondaient pas avec les observations. Celles-ci devaient avoir raison ! Le physiciens se sont tournés vers d'autres problèmes. Jusqu'aux années 80.

Le interactions faible et forte étaient inconnues lors du travail de Kaluza. Alors, on a pensé que c'était la cause des problèmes de la théorie. Il était temps de la ressortir de la naphtaline. Et puisqu'une dimension de plus permettait de décrire une interaction, il suffisait d'en rajouter encore pour décrire les autres !

Mais attention ! Les nouvelles dimensions, comme celle de Kaluza, doivent être enroulées et microscopiques. Et présentes en chaque point de l'espace. En chaque point, il faut imaginer qu'il y ait plusieurs dimensions enroulées…

**Topologie**

Comment s'enroulent-elles ? Supposons qu'il y en ait deux. Elles peuvent former une sphère, ou un tore. Bref, il n'y a pas une solution unique.

L'ajout de dimensions a donné quelque chose de très encourageant, mais les calculs ont rapidement fait déchanter. On a ajouté 7 dimensions d'espace, pour satisfaire des problèmes de probabilité.

Comment ces dimensions supplémentaires peuvent-elles influencer la physique ? Puisque celle-ci est basée sur les modes de vibration des cordes, qui représentent les particules, il est évident que plus les modes sont riche, plus la physique l'est également. Et les dimensions supplémentaires donnent de l'espace aux cordes pour vibrer dans un espace plus vaste. On conçoit que ces dimensions ajoutent beaucoup de liberté aux cordes, et permettent par conséquent de représenter des particules plus variées.

A quoi ressemblent les dimensions enroulées ? Si nous en avions une seule, ce serait simple, elle s'enroulerait selon un cercle. Mais il y en a 7. Et le nombre de possibilités est quasiment infini. Or parmi tout cela, Eugenio Calabi et Shing-Tung Yau ont étudié peut-être les plus simples, qui forment déjà une vaste famille contenant plusieurs dizaines de milliers de membres. Mais on ne connait pas du tout les autres. Ces espaces de Calibi-Yau sont donc exemplaires, mais pourquoi la Nature aurait-elle choisi juste ceux qu'on sait étudier .?

Cependant, l'étude de ces espaces est intéressante à titre d'exemple. Si la théorie des supercordes est la bonne théorie pour décrire l'Univers, il faudra choisir la topologie (la combinaison des enroulements) qui produit les bonnes lois de la physique. Parmi une infinité de possibilités, ce n'est pas chose facile. Les espaces de Calabi-Yau constituent donc un exemple, qui doit permettre de bâtir une physique, au risque que ce ne soit pas la bonne.

**Vérification expérimentale**

Les cordes sont, pas définition, de la longueur de Planck. Pour sonder la patière à ces distances, il faut une énergie que nous sommes vraiment très loin d'atteindre. On imagine qu'il faudrait un accélérateur de particules de la taille de la Galaxie ! Il faudrait communiquer à une particule une énergie de 1.000 kW/h… Dans ces conditions, nous ne sommes pas près de vérifier directement la théorie.

L'espoir qu'il reste est de trouver des implications qui se manifesteraient dans des effets observables, c'est-à-dire à une échelle accessible.

Une première approche concerne le nombre de familles de particules. On sait qu'il y en a trois : l'électron, le muon et le $\tau$ sont les représentants de ces trois familles. Il est pratiquement établi qu'il n'y en a pas plus. Or le nombre de familles serait relié à la topologie de l'espace de Calabi-Yau sous-jacent. Plus précisément, l'enroulement des dimensions supplémentaires peut laisser des trous dans la topologie. Et le nombre de trous, en limitant les mouvements des cordes, fixerait le nombre de familles. Ainsi, pour expliquer trois familles de particules, il faudrait juste trois trous dans l'espace de Calabi-Yau. Mais actuellement, on ne sait pas faire le lien entre la forme de l'espace et les équations de la théorie. On peut espérer que les progrès mathématiques le permettront un jour.

La forme des enroulements modifie aussi les masses des particules, leurs charges, toutes leurs propriétés. En raisonnant à l'envers, on peut donc

espérer déterminer cette forme à partir des propriétés observées. C'est donc un critère macroscopique qui permettrait d'atteindre le niveau microscopique des cordes.

Mais tout cela ne sera possible que le jour où on sera capable de calculer ces paramètres (masse, charges…) à partir de la topologie de l'espace de Calabi-Yau. On en est encore loin, car les méthodes mathémtiques disponibles sont très approximatives.

Mais la théorie des cordes reste en lice, parce qu'on a montré qu'il existe des espaces de Calabi-Yau qui représenteraient correctment les particules. La porte reste donc ouverte.

Nous avons vu que les modes de vibrations produisent, par paires, des bosons et des fermions. La supersymétrie est donc dans la théorie. Or elle prévoit toute une ménagerie de particules que l'on n'a pas encore observé. Peut-être parce qu'elle sont trop lourdes pour les moyens actuels ? Peur-être le LHC les découvrira-t-il ? Peut-être sont-elles encore trop lourdes pour lui ? Peut-être n'existent-elles tout simplement pas parce que notre univers n'est pas supersymétrique…

La théorie des cordes pourrait aussi prévoir des particules à la charge fractionnaire différente de 1/3. Aucune telle particule n'a été observée. Finalement, la théorie des cordes est tellement riche, qu'elle peut prévoir un peu tout !

En particulier, on l'a invoquée pour représenter la matière noire. Mais on ne peut aller plus loin, faute de preuves.

**Pléthore**

L'incorporation de la supersymétrie s'est bien faite dans la théorie des cordes, mais trop bien ! En fait, elle s'est faite de cinq façons différentes, donnant finalement 5 théories des supercordes. 4 de trop…

*"Si l'une des cinq théories décrit notre univers, qui donc habite les quatre autres ?"*
Edward Witten

En fait, les calculs sont très difficiles, et ne peuvent se faire que de façon approchée. Et on a finalement montré que les 5 théories étaient 5 approximations différentes d'une même théorie baptisée *Théorie M*.

**Les branes**

Jusqu'ici, nous avons considéré les cordes comme des objets unidimensionnels, dans un espace à 10 dimensions. Mais ceci est bien restrictif. L'espace dont nous avons l'habitude, à trois dimensions, contient des sous-espaces. Un sous-espace est une partie de l'espace qui peut être décrite avec un plus petit nombre de paramètres. Pour donner la position d'un point dans l'espace, il faut trois variables (x, y, z). Mais si on se limite à la surface du sol par exemple, deux dimensions suffisent (x, y), puisqu'il n'y pas de hauteur, ou plus précisément la hauteur est la même partout, et peut donc être omise. Au lieu d'un plan, on peut considérer la surface d'un tissu, d'une membrane, avec des ondulations. Mais si la description est plus complexe, elle peut toujours se faire avec deux variables seulement. On peut aussi considérer une ligne droite, et un point quelconque est repéré par une seule variable (x).

Dans un espace à 10 dimensions, comme celui de la théorie des cordes, on peut aussi considérer des sous-espaces. Ils auront 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, ou 9 dimensions. Par analogie avec notre espace habituel, où une membrane est une surface à deux dimensions, on appelle *brane* un sous-espace quelconque. Et pour préciser sa dimension, on parle de *D-brane*, D étant la-dite dimension.

L'existence de ces branes enrichi considérablement la théorie, et la complique aussi beaucoup. Elle a des implications cosmologiques, mais ceci est une autre histoire…

---=OO=---




## *Plan*


Les fondements de la physique
Mathématiser la Nature
Les symétries
Sauver les phénomènes
heliocentrisme
Les épicycles
Résumé
La fin de la science grecque
Le blocage
Quelques prémices
Nicolas Copernic
La suite


**Tycho Brahé**, 14/12/1546-24/10/1601. Astronome danois, meilleur observateur à l'œil nu. Il a laissé les meilleures tables de positions de Mars, qui ont servi de base à Kepler pour établir les trois lois du mouvement des planètes. Son rôle dans ces études est donc capital.

**Johannes Kepler**, 27/12/1571-15/11/1630. Né le dans le Bade-Wurtemberg, il a montré que la planète Mars parcourait une orbite elliptique autour du Soleil, et trouvé la relation entre les périodes des planètes et leur distance au Soleil (lois de Képler).

**Isaac Newton**, 04/01/1643-31/03/1727. Savant anglais qui a défini la loi de la gravitation universelle. Sa loi, qui permet de démontrer celles de Kepler, est utilisée pour tous les calculs de mécanique céleste.

## *Les apports de l'Antiquité*

### Les fondements de la physique

L'Homme a toujours observé le ciel, et tenté de le comprendre. Pour cela, il a mis en jeu la magie, les dieux. Il a repoussé l'incompréhensible vers une puissance supérieure… ce qui au bout du compte n'expliquait pas grand chose ! Mais reporter les explications sur la volonté d'un dieu donne une liberté totale ! Tout est possible, s'il le veut… Et aussi, l'Homme peut l'influencer, et donc modifier, par ses comportements, par ses pratiques, le cours des choses. C'est la pensée magique, naturelle pour des personnes n'ayant aucune culture scientifique, aucune connaissance sur le fonctionnement de la Nature.

Les grecs utilisent les données accumulées avant eux, mais cherchent à les interpréter, pour essayer de comprendre et expliquer le monde. Ils refusent la pensée magique pour justifier ce qu'ils voient.

L'astronomie est le premier domaine dans lequel le raisonnement et l'observation ont cherché une explication du monde. Il ne s'agissait bien sûr que d'astronomie de position, mais ses implications sont considérables. C'est ainsi la première science.

Pour savoir où une planète se trouve dans le ciel, les premiers astronomes ont cherché des points de repère. Quoi de plus naturel que d'utiliser les étoiles pour cela ? Et la Lune, dont la taille sert si facilement de mesure… De là, la mesure des angles découle simplement. On peut donc comprendre que la mesure du cosmos commence ainsi de manière naturelle. N'oublions pas que les angles permirent aux égyptiens de refaire leur cadastre, chaque année, après la crue du Nil. Et qu'ils apparaissent tout naturellement dans la définition des heures, par le lever des étoiles brillantes.

Ainsi, l'astronomie a été le premier domaine où l'observation a pu se réaliser en termes de mesure. Les astres se déplacent avec le temps, et rythment sa mesure. Soleil et Lune sont les premirers signes, et ont donné les calendriers, avec bien sûr les durées particulières que sont le jour, la semaine, le mois et l'année.

La Nature n'est pas simple, et la comprendre demande un profond effort de raisonnement, de synthèse. Les premiers à avoir tenté cet effort sont les grecs de l'Antiquité. Ils ont construit un système du monde sur des bases bien précises, qui sont encore d'actualité aujourd'hui.

**Mathématiser la Nature**

L'Antiquité a produit deux grands principes pour apréhender le monde : les *qualités*, et les *analogies mathématiques*.

Les qualités sont attachées aux choses en ce sens qu'elles les caractérisent. Ainsi, la qualité du feu est la légèreté ; celle de la terre est la gravité (*grave* = pesant). Par conséquent, les flammes montent, et les pierres tombent. Ceci n'indique nullement si une pierre tombe plus vite qu'une autre, et ne dit pas pourquoi les flammes sont légères (possèdent cette qualité plutôt qu'une autre) et les pierres graves… "Votre fille est muette parce qu'elle est empêchée de parler" ! Ces qualités sont déduites de l'observation : la physique ainsi construite est donc uniquement observationnelle.

Les analogies mathématiques procèdent d'une toute autre vision du monde, vraiment abstraite. La première analogie utilisée associe les *éléments* aux polyèdres réguliers. Cette association est posée *a priori* : **c'est un postulat**. Une fois posée, on cherche tout ce qu'il est possible d'en déduire, et ensuite on confronte avec l'observation. C'est une méthode **prédictive** ! Si l'observation valide ces déductions, alors le principe qui les a permises est affermi. Cette démarche est toujours actuelle !

La première utilisation de cette méthode d'analogie a été faite par Empédocle (490-435 av. J.C.), avec les *quatre éléments* (terre, feu, eau, air) associés aux quatre polyèdres réguliers (cube, tétraèdre, octaèdre, icosaèdre, resp., nommés *solides platoniciens*). Les éléments se transforment les uns en les autres : l'eau gèle (la glace est de nature *terre*) ; la glace (terre) fond (en eau) ; l'eau s'évapore (air)… Ainsi, tout ce qu'on observe dans la Nature doit pouvoir s'expliquer en tant que combinaison de ces quatre éléments. Cette approche est donc **analytique**.

Cette association est totalement empirique, mais une fois faite, elle a des implications. La plus importante est due à la découverte d'un cinquième polyèdre

régulier, le *dodécaèdre*. Puisqu'il y a maintenant 5 polyèdres, il doit y avoir 5 éléments ! D'où la notion de *quintessence* (la cinquième essence), ou d'*éther*.

Cette tentative n'a bien sûr pas abouti, car ses bases sont infondées. Mais la méthode est excellente. En fait, l'analogie est une représentation abstraite de la nature. Pour qu'elle fonctionne, il faut évidemment qu'elle soit réalisée en accord avec des observations précises.

La mathématisation de la nature a été perpétuée, sous une forme à la fois géométrique et algébrique, car elle permet de faire des mesures précises, et de les comparer avec une théorie.

**Les symétries**

Aristote pose comme principe l'existence d'un centre du monde. Ce principe découle des observations, par une généralisation : il savait que les objets tombent toujours à la verticale, c'est-à-dire perpendiculairement au sol. Il savait aussi que, si on marche longtemps vers le sud (par exemple), on voit des étoiles disparaître au nord, et d'autres apparaître au sud. Il avait bien compris que c'est parce que la Terre est ronde, et en a déduit que les objet tombent vers le centre de la Terre.

Puisque les corps graves tombent vers le centre, la gravité doit être isotrope. Alors, les corps tombant de tous les côtés, et les plus graves poussant les moins graves, la Terre doit être sphérique. La notion de "plus graves qui poussent les moins graves" annonce l'équilibre hydrostatique. Et bien que le centre de la Terre ne soit pas le centre du monde, le raisonnement est très moderne : non seulement la Terre est ronde, mais elle l'est parce que la gravité est isotrope !

L'isotropie de la gravitation est une *symétrie*. Ce faisant, Aristote a, le premier, basé une théorie sur une symétrie. Actuellement, toutes les théories physique sont ainsi fondées.

**Sauver les phénomènes**

Qu'est-ce qu'une théorie (un système du monde) ?

On peut demander plusieurs choses à une théorie :

- de représenter correctement les phénomènes concernés, comme par exemple les positions des planètes. On dit qu'elle *sauve les phénomènes*, ou *sauve les apparences*. Elle est alors utilisable pour faire des prévisions.
- de calquer la réalité, comme par exemple de reproduire le mouvement d'un petit corps autour d'un plus massif. On parle de théorie *réaliste*. Une théorie réaliste peut donner des prévisions meilleures, ou pires, qu'une théorie qui sauve les phénomènes !

Cette notion de sauver les phénomènes, ce qui revient à dire "obtenir des valeurs numériques en adéquation avec les observations", est due à Platon, dans son ouvrage *le Timée*.

**L'héliocentrisme**

Héraclide du Pont (388-310 av. J.C.) a, le premier, imaginé un système héliocentrique. Cette idée est tout à fait extraordinaire, car elle est totalement contre les apparences, et ne vise qu'à simplifier les modèles ! Pour cela, Héraclide a été surnomé *paradoxologue* (du grec *para*, à côté, *doxa*, règle, loi, et *logos*,

discours).

Aristarque de Samos (310-230 av. J.C.) a conçu un système du monde héliocentrique. Le Soleil est immobile au centre. La Terre et toutes les planètes tournent autour. La Terre fait un tour en un an, et tourne sur elle-même en 24 h. Ce système est donc très proche du système actuel ; **la différence tient dans la dynamique**, inconnue à l'époque. Le seul mouvement envisagé était le mouvement circulaire uniforme. Et son application à ce système héliocentrique donnait des positions des planètes trop éloignées des positions observées. Ce défaut a provoqué son rejet par les contemporains d'Aristarque. Ces derniers lui ont préféré un système complexe constitué de sphères emboîtées. Pour expliquer correctment les mouvements, 56 sphères ont été nécessaires.

**Les épicycles**

En-dehors de la théorie des sphères, les mouvements des planètes ont été expliqués par des mouvements circulaires uniformes. Ceux-ci avaient l'avantage d'être simples, connus, et intéressants sur le plan esthétique. Ce dernier point est important, car il cache une très forte symétrie, puisque le cercle est invariant par toute rotation autour de son centre. De plus, le mouvement uniforme découle aussi d'un symétrie temporelle : les angles dont tourne la planète en des temps égaux, sont égaux. Et puisque l'orbite est un cercle (la distance de la planète au centre constante), les aires balayées en des temps égaux sont égales. Si on connait le mouvement képlérien, ceci semble naturel. Mais cette loi des aires avant la lettre était déjà dans les théories antiques.

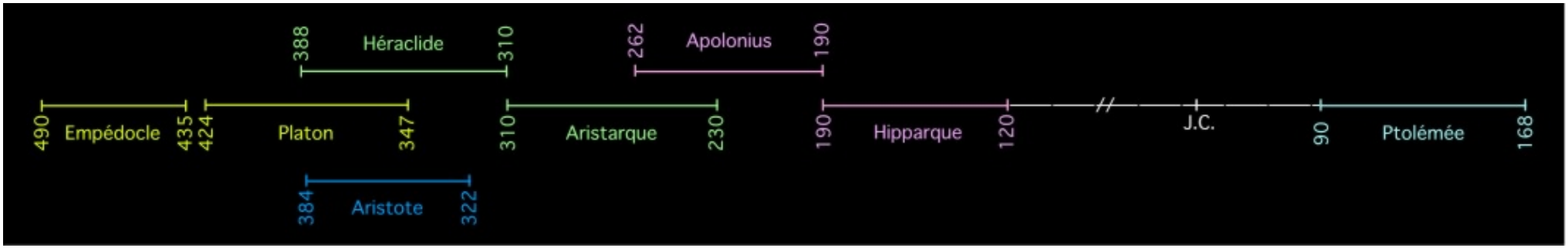
Le mouvement des planètes n'étant pas si simple, le désacord entre les positions calculées et les positions mesurées ne pouvait passer inaperçu. Apolonius (262-190 av. J.C., connu des très anciens élèves de Math élem ou Math sup), avait étudié les coniques, et déjà pensé que les orbites des planètes pourraient être des coniques. Ce qui, pour lui, pourrait expliquer la vitesse variable de la Lune sur son orbite.

Mais une autre possibilité a été utilisée par Hipparque (190-120 av. J.C.) : elle consiste à faire tourner la planète sur un cercle (*épicycle*) dont le centre tourne lui-même sur un autre cercle (*déférent*). Le centre de l'épicycle parcourt le déférent d'un mouvement uniforme, et la plantète parcours l'épicycle d'un autre mouvement uniforme. On peut ajuster les rayons des deux cercles, ainsi que les vitesses de rotation sur chacun. En faisant de bons choix de ces paramètres, on arrive à ajuster à peu près les prévisions aux observations, donc à sauver les phénomènes.

**Remarques**

- Tout d'abord, le système d'Aristarque est basé sur un principe, qui est défini *a priori* (le Soleil est au centre), puis appliqué pour voir s'il explique les observations. Cette méthode a été utilisée pour définir les grandes théories physiques actuelles : la Relativité, fondée sur la constance de la vitesse de la lumière ; la Mécanique Quantique, basée sur l'association d'une onde à toute particule… Pour Aristarque, il fallait adjoindre un principe dynamique modélisant les vitesses variables des planètes, mais celui-ci devra attendre encore quelques siècles !
- Les 56 sphères nécessitent de très nombreux paramètres à ajuster (inclinaison de l'axe de rotation et vitesse de chaque sphère), ce qui montre bien qu'il n'y a pas de principe sous-jacent qui unifie le système. Aujourd'hui encore, ce nombre de paramètres libres est un critère d'acceptabilité d'une théorie : moins il y en a, mieux ça vaut.
- Le système des sphères sauve les apparences : sans aucun principe sous-jacent, il représente les mouvements de façon satisfaisante par rapport aux observations de l'époque, faites à l'œil nu. Il est mathématiquement une solution acceptable, physiquement non (en tous cas, il n'est pas réaliste).

**Résumé**




L'approche de la science grecque tient en germe tous les principes sur lesquels la physique moderne reste basée. La mathématisation reste le point clé. C'est elle qui permet de prévoir les valeurs que prendront les phénomènes. Sans cela, la physique ne serait que philosophie.

L'analogie entre les objets physiques et des structures mathématiques (les polyèdres réguliers à l'époque), reste d'actualité. On recherche toujours des objets mathématiques, donc permettant le calcul, qui se comportent comme les phénomènes qu'ils sont censé représenter. Cette analogie a été utilisée, aux début de l'informatique, dans les *calculateurs analogiques*. Ces mmachines électroniques ne manipulaient pas des nombres, mais étaient construites à l'aide de circuits qui se comportaient *comme* les phénomènes qu'ils représentaient. Un pendule est un oscillateur amorti ; on lui faisait correspondre un circuit électronique oscillant, auquel on ajoutait un mécanisme absorbeur d'énergie, qui l'amortissait.

La sauvegarde des apparences, ou des phénomènes, consiste à produire un modèle (ensemble de formules de calcul), qui donne les mêmes valeurs. Ceci n'implique absolument pas que le modèle représente la réalité, il peut en être très loin… C'est la raison pour laquelle le système de Ptolémée a supplanté le magnifique système géocentrique d'Aristarque : Ptolémée sauvegardait les apparences, Aristarque était réaliste ! Mais les résultats d'Aristarque étaient moins bons.

**La fin de la science grecque**

Après Ptolémée, la science grecque a décliné, et personne en occident n'a repris le flambeau. Rome s'est constituée, et a dominé le monde méditerranéen. Les romains ont fait des merveilles en architecture, mais ils n'étaient pas forts en science ! Elle ne les intéressait pas. Un second coup a été porté par l'invasion arabe de l'Espagne et d'une partie de la France. La Terre est redevenue plate !

Pourtant, ce sont ces mêmes arabes qui ont récupéré l'Almageste traduit dans leur langue, et l'ont réintroduit en Europe, vers le X$^{e}$ siècle. Les savants occidentaux qui lisaient l'arabe l'ont étudié, et ont adopté le système de Ptolémée.

C'est ainsi que cet ouvrage a servi, pendant 15 siècles, de seul modèle cohérent de description du monde. Modèle géocentrique bien entendu. On a donné le nom de *Scolastiques* à ceux qui ont enseigné ce modèle pendant si longtemps.

Le Moyen-Âge a été un temps de pratiques magiques, la recherche de la *pierre philosophale* étant la plus connue. L'alchimie procédait des mêmes méthodes que la chimie qui lui a succédé, mais sans un support théorique servant de guide. Elle allait à tâtons, et découvrait ainsi des résultats intéressants, mais sans liens les uns avec les autres.

Le plomb était considéré, dans la lignée antique des qualités des éléments, comme impur. L'alchimie avait pour but de lui ôter ses impuretés, et de remettre ainsi au jour sa nature véritable : l'or. Nous savons bien maintenant que cette quête était aussi vaine que celle de don Quichotte ! Les méthodes de la chimie (le

feu), n'apportent que quelques électrons-volts, alors que la transmutation de plomb en or en nécessite quelques millions.

Nous allons voir maintenant comment on est sorti de cette période.

## *La révolution*

### Le blocage

Saint Thomas d'Aquin (1225-1274) a lu l'Almageste, et a fondé la doctrine de l'Eglise sur ses préceptes. Dès lors, les choses ont été figées, et toute personne osant contredire cet enseignement devenait hérétique. Ceci coûta la vie à Giordano Bruno, qui osa prétendre qu'il y avait une infinité de mondes et non la seule Terre. Et Galilée a dû abjurer après avoir prétendu que la Terre tournait autour du Soleil.

Pourtant, les idées évoluent quelque peu.

### Quelques prémices

Nicolas d'Oresme (1320-1382) évêque de Lisieux, mathématicien et astronome, a montré qu'aucune expérience ne peut dire si les cieux tournent autour de la Terre, ou si la Terre tourne sur elle-même ! Mais il a aussi compris que les arguments d'Aristote (chute d'une pierre jetée en l'air veticalement), qui voulaient prouver que la Terre ne tourne pas, sont sans fondement. Il a écrit le *traité du ciel et du monde*, qui est sans doute le premier livre concurent de l'Almageste. Ce livre a probalement influencé Giordano Bruno. Malheureusement, Oresme n'avait pas à sa disposition les observations qui lui auraient permi de prouver ce système, et il l'abandonna. Il n'a pas remis en cause le géocentrisme. En physique, il a découvert la réfraction de la lumière…

### Nicolas Copernic

Nicolas Copernic est né en 1473. Son destin était de devenir ecclésiastique, et il a été chanoine. Mais il était aussi astronome. A son époque, le seul système possible était celui de Ptolémée, et encore était-il soutenu par l'Eglise. Copernic, à qui ce système a été enseigné, et qui observe toujours à l'œil nu, va pourtant raisonner autrement. Son but est de simplifier les calculs nécessaires dans le système Ptolémée, et non de le détruire. Et e résultat qu'il obtint fut, dans son esprit, un artifice mathématique le permettant. Autrement dit, il ne considérait pas sa théorie comme réaliste. Cependant, il compris que la simplicité du modèle ne pouvait que refléter une plus grande adaptation au réel que le système géocentrique. Mais l'époque n'était pas favorable, et il attendit longtemps avant de plubier. Il attendit plus de 30 ans, et ne publia que peu avant sa mort, la même année 1543.

L'ouvrage s'intitule *De Revolutionibus Orbis Celestium*. Très ardu, son livre n'a pas eu d'échos, hors du cercle des astronomes. Il présente le système héliocentrique comme une hypothèse, et le Pape n'y a pas vu de contradiction avec le dogme.

Mais les idées ont fini par déborder ce cadre étroit, et la vision du monde en a été bouleversée. La Terre n'était plus au centre du monde, et l'Homme se trouvait donc relégué en bordure du système, alors qu'avant, tout semblait être fait pour le mettre au centre de tout, et donc pour lui. C'est un bouleversement intellectuel inimaginable pour nous qui sommes si habitués à tourner autour du Soleil.

Et l'Eglise a fini par réagir ! Si l'Homme n'est plus au centre de tout, la Création en est ébranlée… Le monde avait été fait pour nous, et voilà que nous en sommes au bord… Il ne faut pas oublier que Josué a arrêté le Soleil, et non la Terre ! C'est bien la preuve que c'est lui qui se déplace et non notre planète.

La littérature s'est emparée de cette idée, bien souvent pour la combattre, quelquefois en observateur dubitatif comme Montaigne.

**La suite**

On arrive à Tycho Brahé (1546-1601). Celui-ci est encore un observateur à l'œil nu, mais il construit des instruments plus grands, plus précis que ceux des prédécesseurs. Et il les utilise mieux que personne. De plus, il a la patience de poursuivre longtemps ses mesures. Le résultat est qu'il obtient des données suivies et d'excellente qualité sur les positions de Mars.

Les observations de Tycho Brahé ont permi à képler de trouver les trois lois qui régissent le mouvement des planètes. Et enfin, à l'aide de ces lois, et par des considérations géométriques assez simple, Newton a obtenu la loi de la gravitation. L'enchaînement de ces travaux, de Tycho Brahé à Newton, est un magnifique exemple de progression scientifique. Mais c'est un autre sujet…

---=OO=---




**Jusqu'à aujourd'hui**

La réalisation d'un miroir de télescope de plus en plus grand a toujours posé de sérieux problèmes. Couler un bloc de verre de grand diamètre, très homogène, sans bulles, a freiné la construction de télescopes de la classe des 4 m. Pour aller au-delà du télescope Bolchoï de 6 m, il a fallu abandonner la rigidité conférée par l'épaisseur, synonyme de poids insuportable. Les miroirs souples maintenus par ordinateur ont apporté une solution, qui a permis d'atteindre les 10 m. Mais au-delà, on se heurte à un autre problème, qui est celui du transport. Il n'est pas possible de réaliser le miroir sur place, et pour des diamètres supérieurs, il devient impossible de le transporter. La solution a été de réaliser les miroirs en plusieurs parties, ce sont les *miroirs composites*.

Dans un miroir composite, on minimise les interstices entre les fragments, afin de perdre le moins de lumière possible. Evidemment, c'est un ordinateur qui gère les miroirs, afin d'assurer à tout instant que leurs surfaces juxtaposées ne forme qu'une seule surface, celle qu'aurait le miroir monolithique équivalent. Mais il est difficile de construire des miroirs des très grande dimension, et d'ailleurs leur coût deviendrait vite prohibitif. Les télescopes dont la construction est envisagée actuellement, les *ELT* (*Extremely Large Telescope*), visent une taille allant jusqu'à 40 m. Mais pour un tel instrument (*EELT*, *European ELT*), il faut un millier de miroirs. Ceci amène une grande complexité dans le positonnement précis de chacun le long de la sphère théorique.

Une autre voie a été parcourue, d'ailleurs compatible avec la précédente : celle des interféromètres. Un interféromètre est un instument constitué de plusieurs télescopes distincts, travaillant de concert. Ils pointent le même objet simultanément, et les faisceaux lumineux qui en sortent sont mélangés de manière à produire des interférences. Le traitement des franges par des méthodes mathématiques (*déconvolution*) permet ensuite de reconstituer l'image de l'objet. L'avantage d'un interféromètre est d'obtenir, avec des télescopes de diamètre acceptable (8,20 m pour le VLTI par exemple), un pouvoir séparateur équivalent à celui d'un télescope dont le diamètre serait la distance entre les télescopes. L'inconvénient majeur de cette technique est la petitesse du champ.

**Un miroir en pointillés…**

Le concept d'hypertélescope est de réaliser un miroir à trous ! On peut facilement faire une expérience. Prenons le petit miroir qui se trouve sur la paillasse de la salle de bain. Il a une face concave, grossissante. Si on le tourne vers un paysage ensoleillé, on peut en projeter l'image à l'envers sur un écran. Couvrons le miroir avec une feuille de papier, dans laquelle on fait des trous. On voit toujours l'image, bien qu'elle soit moins lumineuse. D'où l'idée de découper le miroir en petits morceaux, et de placer les morceaux comme ils l'étaient avant le découpage. C'est-à-dire qu'ils doivent constituer **la même surface sphérique globale**. On peut être surpris que les trous ne se voient pas dans l'image obtenue, mais c'est ainsi.

Un miroir, constitué de la juxtaposition de fragments laissant entre eux un espace libre, est nommé *miroir dilué*. On comprend bien qu'il soit plus facile, et surtout bien moins coûteux, de réaliser un miroir dilué qu'un miroir plein. Bien sûr, la luminosité sera moins importante (elle est proportionnelle à la surface collectrice = la somme des surfaces des petits miroirs), mais le pouvoir séparateur sera celui correspondant à l'enveloppe extérieure du miroir. On peut alors imaginer de construire de très grands miroirs dilués, avec un ensemble de miroirs de petite taille, donc faciles à réaliser, et peu coûteux.

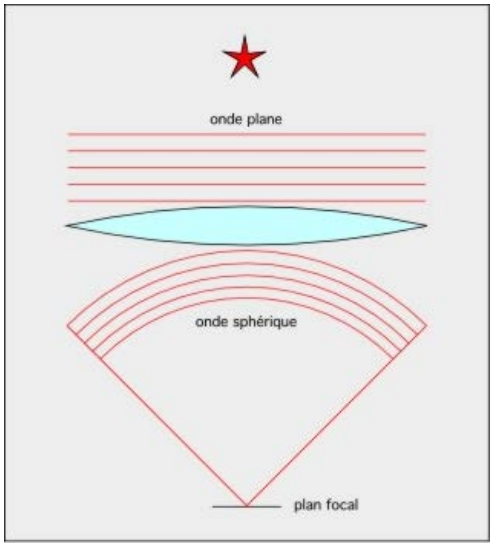
Cette solution avait été envisagée depuis longtemps. Mais elle paraissait irréalisable à cause de la diffraction. Regardez le paysage à travers un rideau en mousseline, et vous comprendrez vite : le paysage est noyé dans un halo lumineux produit par cette diffraction. Cette constatation a amené à une règle pour la construction d'un interféromètre, qui dit que la pupille de sortie doit être semblable à la pupille d'entrée. Or Antoine Labeyrie s'est aperçu qu'elle est trop limitative. Il a montré qu'elle doit être de même disposition, mais pas semblable. En fait, les pinceaux lumineux arrivant des différentes ouvertures doivent garder leur positionnement relatif, mais leurs dimensions peuvent être modifiées. Si on les agrandit, on augmente la luminosité de l'image, et on diminue celle du halo.

L'inconvénient de la méthode réside dans la diffraction encore. En augmentant la surface des pupilles secondaires, on diminue les interférences constructives qui produisent l'image, et donc on réduit le champ.

**Comment le réaliser ?**

On peux envisager de mettre un petit nombre de grands miroirs, ou un grand nombre de petits miroirs. Quelle est la meilleure solution ? Antoine Labeyrie a fait des tests, tout d'abord par des simulations informatiques. Et le résultat est bien net : il vaut beaucoup mieux utiliser un grand nombre de petits miroirs. En fait, la taille des miroirs n'est pas critique ; d'elle dépend la luminosité. Le paramètre important est leur nombre. Plus il y en a, meilleure sera la qualité de l'image. Nous allons maintenant voir comment se forme l'image.

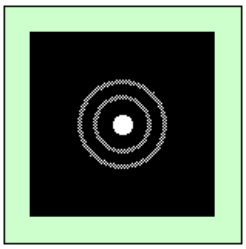
> La lumière provenant d'une étoile forme une onde plane, parce que l'étoile est si éloignée, que les ondes sphériques qui en proviennent peuvent, à une excellente approximation près, être considérées comme planes.




L'onde atteint le centre de la lentille en premier, et pénètre dans le verre.

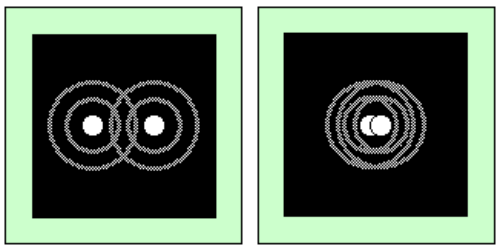
Là, sa vitesse est bien moindre que dans le vide, elle est limitée à 200.000 km/s. Ceci retarde l'onde.

Par contre, sur les bords de la lentille, l'épaisseur de verre à traverser est négligeable, et l'onde n'est donc pas retardée. C'est ce qui amène la courbure de l'onde après la traversée du verre.

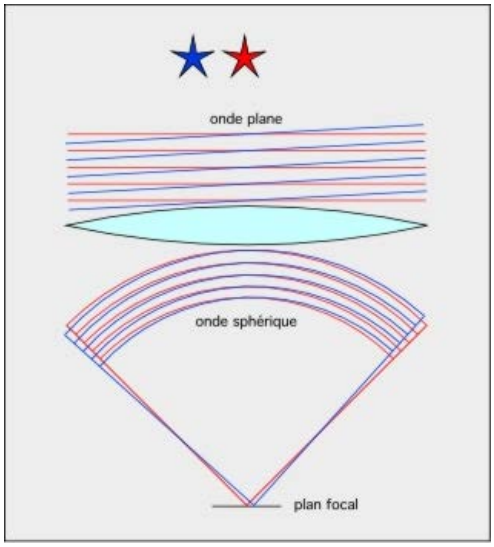


L'image est une tache de diffraction

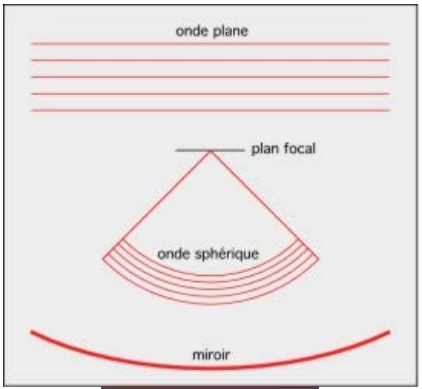
La lumière de deux étoiles arrive sur l'objectif sous la forme de deux systèmes d'ondes planes (figurés en deux couleurs).



Les deux taches de diffractions sont éloignées en fonction de l'angle de séparation des deux étoiles. Si la séparation est suffisante, on voit effectivement deux taches, sinon elles sont confondues.

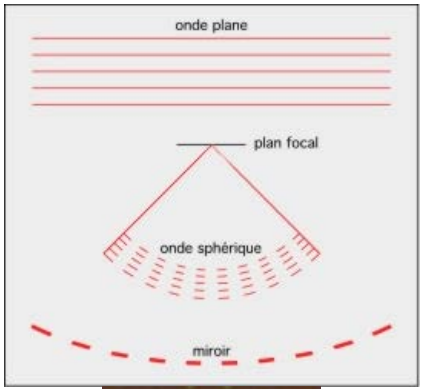


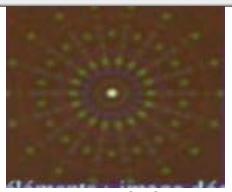

La focalisation de l'image est obtenue par ralentissement de certaines parties de l'onde, de façon à produire une onde concentrique. Un miroir, par sa forme, obtient le même résultat.



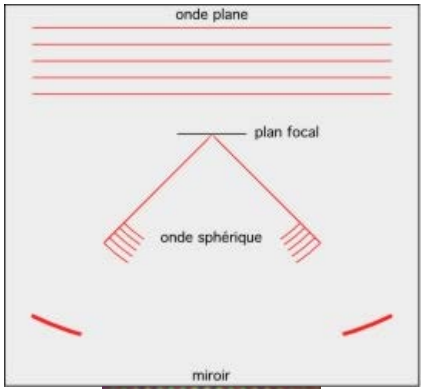


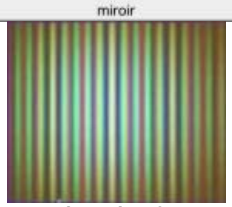

Miroir complet



Miroir dilué régulier

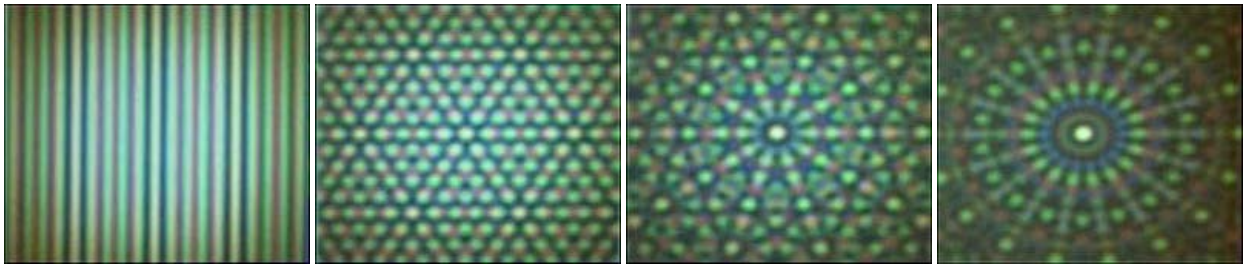


Miroir réduit à 2 fragments

A gauche, on voit ce que serait l'image (en bas) d'une étoile unique, vue dans un télescope géant. Imaginons de remplacer le miroir complet par un ensemble de miroirs plus petits, régulièrement espacés. L'image serait encore reconnaissable, mais bien complexe. On remarque surtout que la lumière est étalée, et forme des taches secondaires. Comment pourrait-on reconnaître un champ d'étoiles, si chacune donne une telle image ?

A droite, on voit l'image que donnerait le miroir, s'il n'en restait plus que deux éléments ! Ce sont les franges d'interférence de Young. Elles contiennent la même information mais bien dissimulée… C'est pourtant ainsi qu'on construit les interféromètres.



Interférence de Fizeau, avec 2, 3, 5 et 9 ouvertures respectivement images Antoine Labeyrie

Les images que l'on obtient, en fonction du nombre de miroirs utilisés, montrent que le nombre augmente la qualité. Il faut remarquer en effet que la tache centrale, inexistante avec deux ouvertures, est de plus en plus brillante lorsqu'on en ajoute. Ce qui signifie que la lumière est de plus en plus concentrée dans la tache de diffraction, au lieu de s'étaler dans des figures annexes, qui sont au contraire de plus en plus sombres.

La première expérience de ce genre a bien été faite à l'Observatoire de Marseille par Edouard Stéphan, sur le télescope de Foucault. Elle concernait seulement deux ouvertures. Elle ne lui a pas permis de mesurer le diamètre des étoiles, parce qu'il est trop petit, mais il a réussi à en fixer une borne maximale de 0,157".

**Principe de l'hypertélescope**

L'hypertélescope, tel qu'il a été défini par Antone Labeyrie, est un *interféromètre imageur multi-ouverture à pupille densifiée*. Cette définition précise bien tous les éléments qui le constituent.

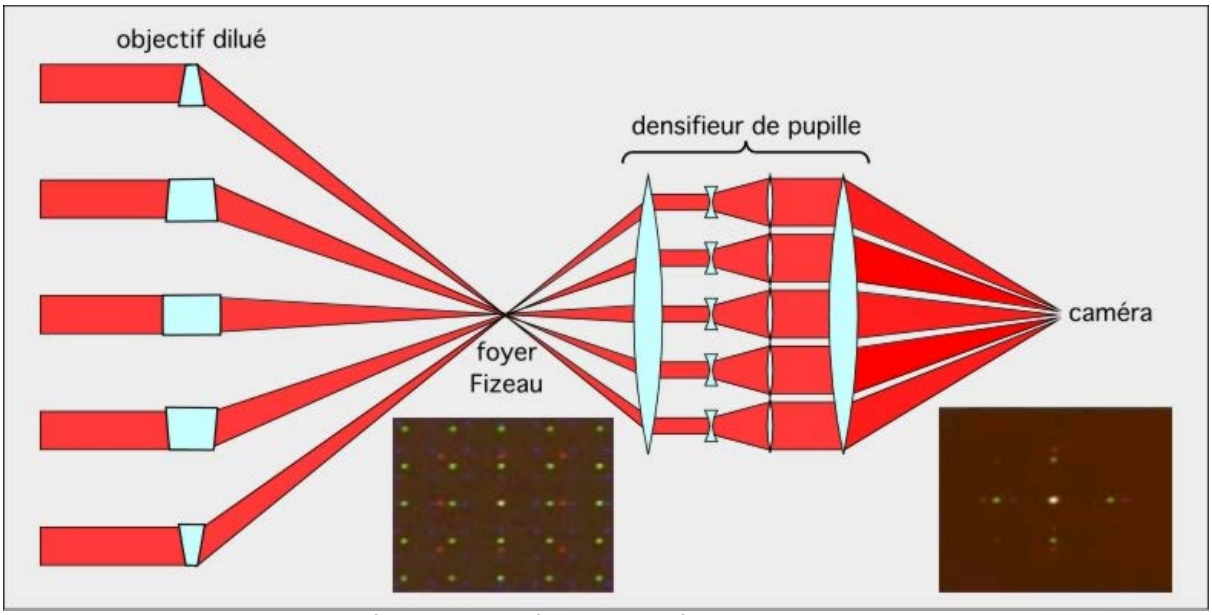



Schéma d'un hypertélescope, d'après Antoine Labeyrie

On considère un objectif dilué, dont les faisceaux convergent vers le foyer Fizeau. Si les fragments de l'objectif sont disposés régulièrement, l'image est celle visible au centre : une tache centrale, avec des pics secondaires. Après le foyer, on place une lentille qui rend le faisceau afocal (rayons parallèles). Ensuite, pour chaque petit faisceau correspondant à un fragment de l'objectif, on utilise une lunette de Galilée à l'envers : son oculaire (tourné vers l'arrivée de lumière donc) est divergeant, alors que l'objectif est convergeant. L'oculaire écarte le faisceau, que l'objectif rend à nouveau parallèle (la lunette est réglée en dispositif afocal). Remarquez que maintenant, il ne reste guère d'espace entre les faisceaux. C'est pour cela que ce dispositif est nommé *densifieur de pupille*. Enfin, une dernière lentille convergeante reforme l'image globale. Les pics secondaires ont été rassemblés, le pic central est fortement amplifié. Les pics secondaires ne sont plus très génants, et on peut observer par exemple une étoile double, dont on verra bien les deux composantes.

A noter que le densifieur de pupille est, encore, une invention d'Antoine Labeyrie…

Le procédé est moins bon lorsqu'on s'écarte de l'axe du miroir. Aussi, son champ est-il assez limité. C'est un inconvénient de l'hypertélescope.

Les interféromètres actuels (dont le VLTI), utilisent des télescopes indépendants, en mélangeant leur lumière. Mais ces télescopes ne sont pas à la même distance de l'astre observé. Il s'ensuit que leurs miroirs ne constituent pas une même surface sphérique. Alors, pour rétablir la situation d'une onde plane, il faut intercaler dans le trajet des faisceaux lumineux, avant qu'ils n'interfèrent, des lignes à retard, qui permettent à tous les faisceaux d'arriver en même temps. Ces lignes à retard sont complexes, coûteuses, et limitent le nombre d'ouvertures envisageables (4 pour le VLTI, 8 avec les AT).

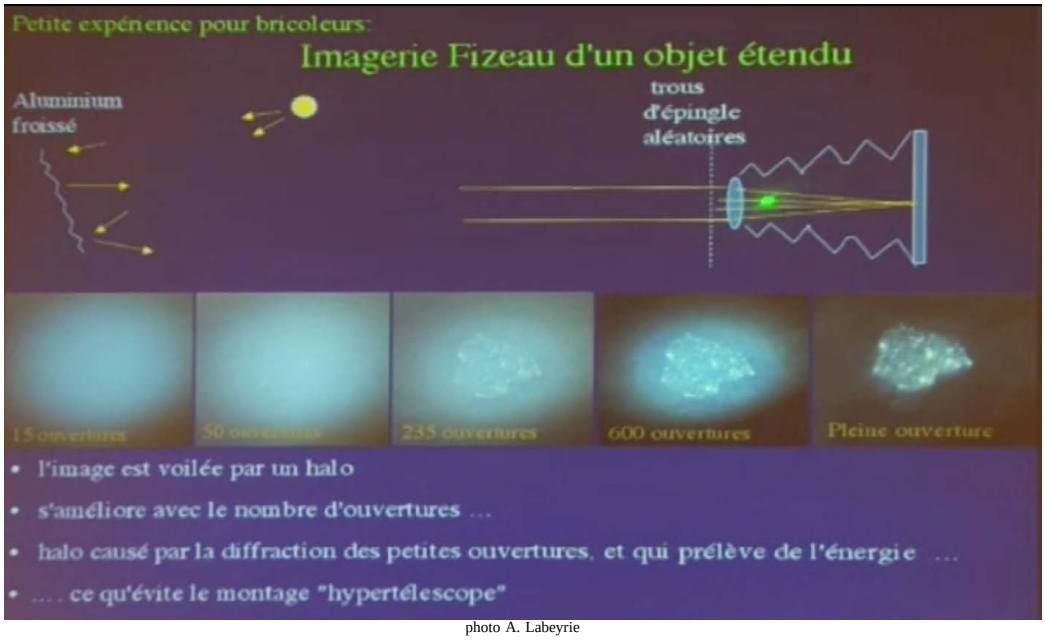


photo A. Labeyrie

Un morceau de papier d'aluminium froissé, puis défroissé permet, placé au soleil, de donner une image semblable à celle d'une constellation. Un autre morceau de papier d'aluminium, placé devant l'objectif d'un APN, laisse passer la lumière par un ensemble de petits trous (sténopés). On remarque que :

- avec 15 petits trous, on voit un halo de lumière, et ne distingue rien d'autre ;
- avec 50 trous, on commence à distinguer les points les plus brillants ;
- avec 235 trous, on commence à bien distinguer une image assez proche de la réalité ;
- avec 600 trous, on a une image très bonne, qui ressemble pas mal à l'image obtenue sans l'écran percé (en pleine ouverture).

Dans cette petite expérience simple, on n'a pas densifié la pupille, ce qui est la cause du halo entourant l'image avec les 600 trous. Mais on voit bien, expérimentalement, que l'image s'améliore si on augmente le nombre de fragments du miroir dilué.

Maintenant, une question se pose : quel doit être le diamètre des miroirs composants, pour obtenir la meilleure qualité possible ? Une autre expérience a amené le résultat : il est bien préférable d'augmenter le nombre de fragments, plutôt que leur diamètre. A surface collectrice égale, le plus grand nombre de miroirs est le mieux :

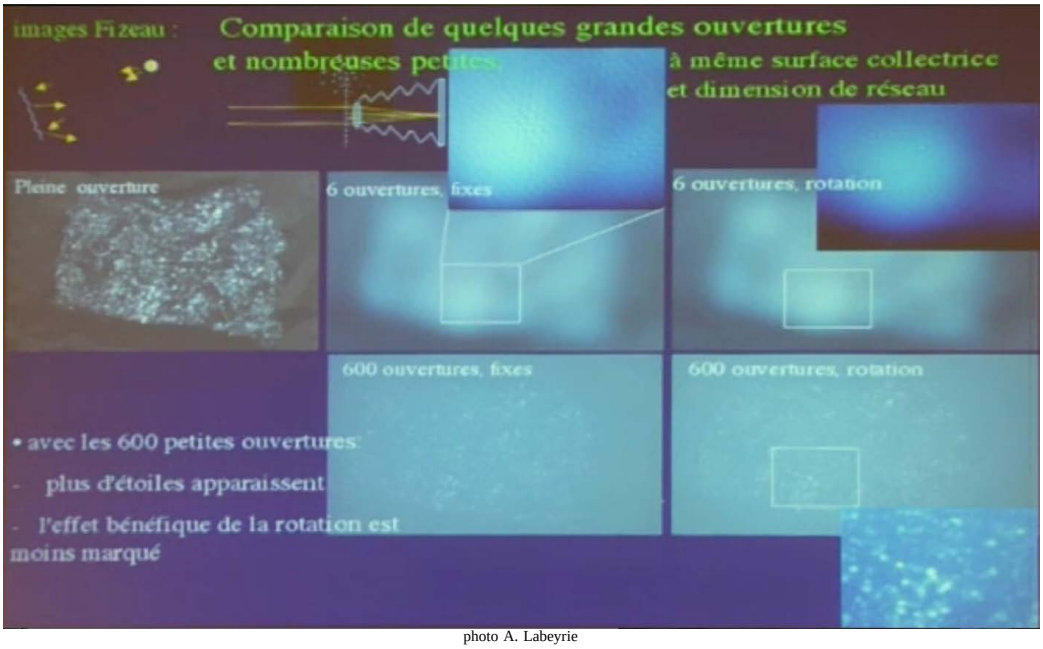


photo A. Labeyrie

La comparaison porte sur deux miroirs de même surface totale, le premier comportant 6 miroirs, et le second 600. Puisque la surface collectrice totale est la même S, le rayon des composants est $R^2 = S / 6 \pi$ et $r^2 = S / 600 \pi$. Donc R = 10 r. Par exemple, 6 miroirs de 1 m ou bien 600 miroirs de 10 cm ! Il ne doit pas être plus difficile de fabriquer 600 miroirs de 10 cm, bien que le nombre semble énorme, que 6 d'un mètre…

Au centre, on voit les images données par les deux miroirs dilués, et on constate aisément que celui qui comporte 600 petits miroirs donne une image intelligible, ce qui n'est pas le cas de l'autre. A droite, on voit une partie de l'image agrandie, qui montre bien la différence. La rotation apporte peu, mais nous allons voir son utilité.

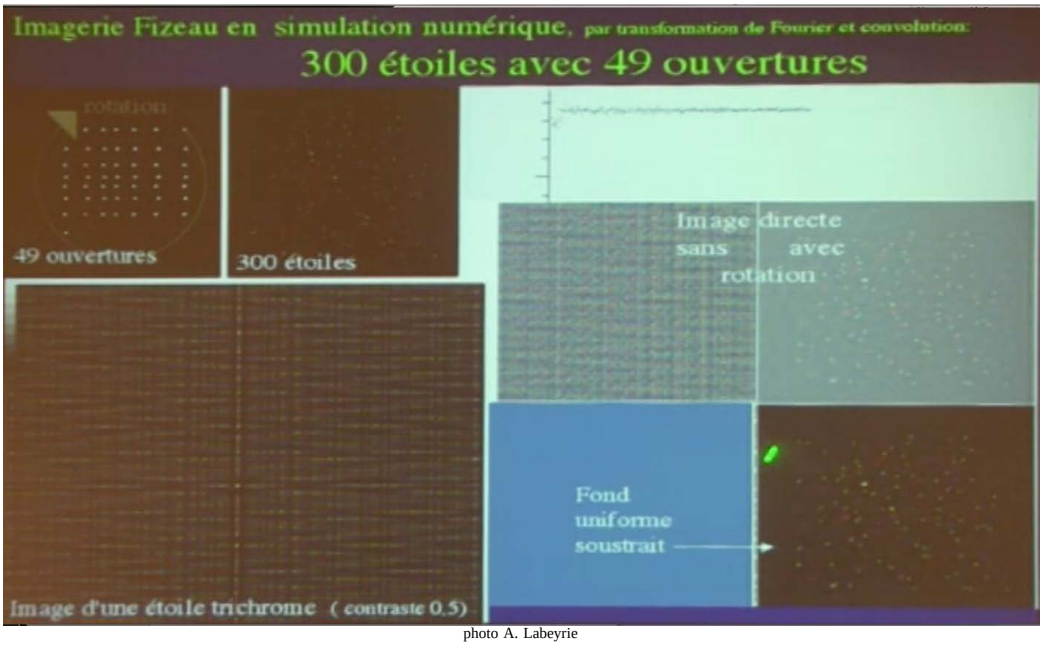


photo A. Labeyrie

A droite, on voit l'image, prise sans rotation, et on constate qu'elle est inutilisable. Avec rotation, la différence est impressionante, on voit une image assez claire. Enfin, si on soustrait le fond, on arrive à une photo tout à fait correcte.

La théorie indique que la résolution d'un ensemble de $n^2$ étoiles nécessite un miroir ayant au moins n miroirs composants. Pour séparer correctement 1.000 étoiles, il faut donc au moins 33 miroirs.

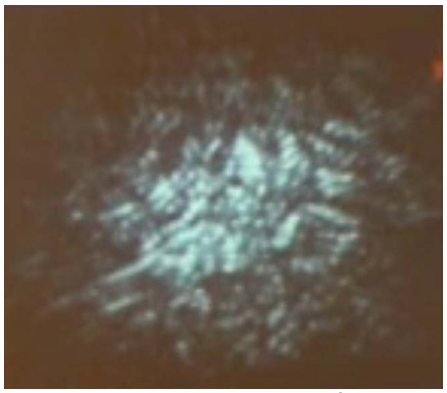
Bien sûr, la résolution (pouvoir séparateur) est d'autant meilleure que le diamètre du miroir dilué est plus grand. Et ce miroir doit être constitué d'un grand nombre de composantes.

On a vu aussi que les pics secondaires sont atténués au profit de la tache centrale par la densification de la pupille. Or les pics secondaires sont produits par la dilution. Donc, si on veut vraiment diluer le miroir pour baisser les coûts, il faut densifier la pupille. Le seul inconvénient de cette densification et la diminution du champ. En effet, si l'on grandit l'image donnée par chaque fragment d'un facteur $\gamma$, le champ est réduit de ce facteur $\gamma$, alors que le pic central est intensifié par le facteur $\gamma^2$.

**Turbulence**

Il reste une limitation, due à l'atmosphère. Celle-ci contient des bulles d'air qui déphasent la lumière provenant d'une étoile. Ainsi, on ne peut pas avoir une interférence constructive comme on l'attendrait.

On a deux solutions pour cela, qui sont maintenant classiques : l'interférométrie des tavelures, et l'optique adaptative. La seconde nécessite un matériel important et coûteux. On pourra dans un premier temps utiliser la première, qui ne nécessite qu'un appareil de photo très rapide, permettant de prendre des photos pendant les instants de stabilité de l'atmosphère. L'interférométrie des tavelures a été développée par Antoine Labeyrie.


tavelures produites par une étoile

Les tavelures sont des images instantanées des étoiles. En additionnant de nombreuses images instantanées, on peut construire une image de très bonne qualité. C'est le principe de la méthode nommée *imagerie des tavelures* (*speckle imaging*). L'astronome indien Surya vient de montrer que la méthode est applicable aux hypertélescopes.

**Comparaison avec un Schmidt**

Un télescope de Schmidt possède un miroir principal sphérique, plus grand que la lame de fermeture. Ainsi, les faisceaux lumineux arrivant d'étoiles éloignées (angulairement) et passant par la lame, arrivent sur des portions différentes du miroir principal. Pour une étoile donnée, seule une partie est utilisée. Mais les différentes parties permettent d'imager des étoiles différentes, et offrent un grand champ.

L'éloignement angulaire de deux étoiles dans un Schmidt peut être comparé aux deux positions successives d'une même étoile, à des instants différents.

N'oublions pas que le miroir de l'hypertélescope n'a pas de monture globale, et ne peut être déplacé. Aussi, le suivi d'une étoile est-il problématique. Mais si on accepte de mettre des miroirs sur une surface bien plus grande que celle qui sera utilisée, alors au cours de la nuit, l'image va se déplacer de miroirs en miroirs, pour être toujours visible. A chaque instant, une portion seulement des fragments sera utilisée.

Cette disposition pourrait être considérée comme un gaspillage. Ce qui est vrai, puisqu'une partie seulement est utilisée. Considérons maintenant une partie inutilisée à un instant donné. Pour la rentabiliser, il suffirait de récupérer la lumière qu'elle renvoie ! Par conséquent, de placer une seconde nacelle, portant une optique semblable à la première.

On peut donc construire des hypertélescopes à miroir sphérique, et plusieurs nacelles, et mener plusieurs observations simultanément… Ce qui était un gaspillage devient un gros avantage ! La multiplication des fragments permet de suivre un même objet pendant une longue durée, sans monture ; elle permet aussi de faire plusieurs observations en parallèle.

## *Les hypertélescopes au sol*

### Le premier

Le premier hypertélescope a été construit avec un objectif dilué de… 10 cm ! On ne s'attend pas à faire de grandes découvertes avec lui, ça va de soi.

Il est formé sur une lunette de 10 cm d'ouverture, devant laquelle est placé un masque percé de 64 trous de 0,8 mm régulièrement espacés. L'oculaire de la lunette est mis au point à l'infini, et donne de chaque trou une image de 0,1 mm de diamètre. Ces images sont espacées de 1 mm. Il possède un densifieur de pupille formé de microlentilles, ayant un rapport $\gamma$ de 10. Les images des trous font donc en sortie 1 mm de diamètre, et sont pratiquement jointives. Nous avons vu que l'amplification du pic central est en $\gamma^2$, donc ici il est de 100 fois.

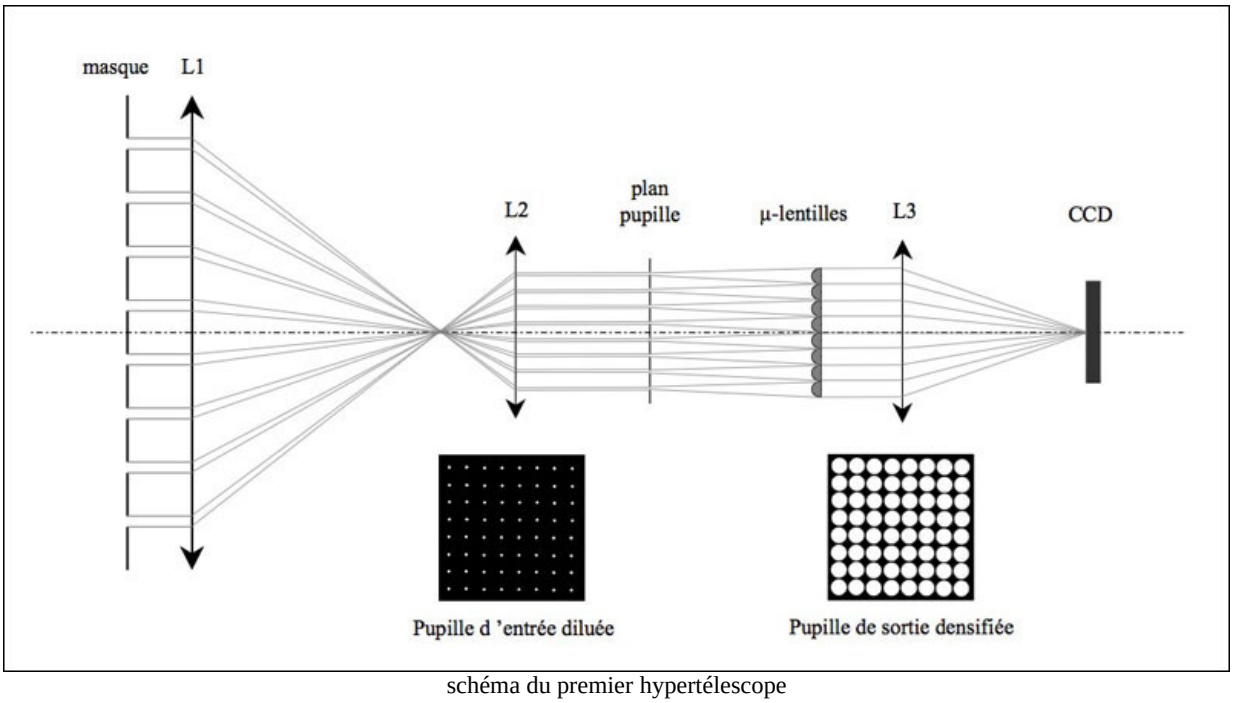


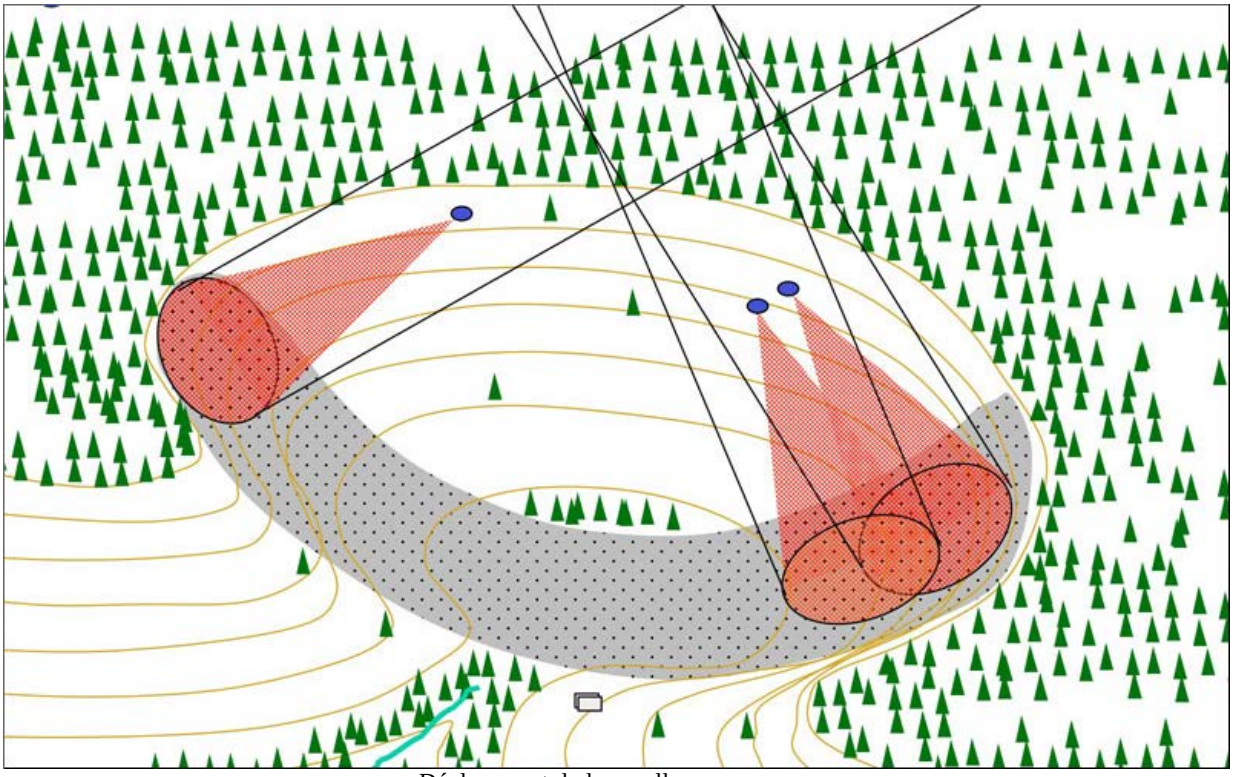

schéma du premier hypertélescope

Sur le schéma, remarquez d'abord les images données directement par la lunette masquée à gauche, puis après densification à droite. Ceci illustre bien l'effet de la densification.

Cet instrument miniature a permi de valider le concept de densifieur de pupille, et donc d'hypertélescope globalement.

### La monture

Nous avons signalé plus haut que l'hypertélescope n'avait pas de monture. Si c'était le cas précisément, il ne pourrait pointer un astre qu'au zénith, et pendant un instant très bref. Pour pouvoir faire des poses de longue durée, il faut que le dispositif placé au foyer puisse tourner, afin de suivre la lumière de l'astre. Mais ce faisant, l'instrument focal va sortir du champ de certains fragments, pour entrer dans celui d'autres. Ainsi, il faut que le miroir principal dilué soit physiquement plus grand que ce qui est utilisé à chaque instant.



Déplacement de la nacelle schéma A. Labeyrie

La limite serait de l'ordre de 1.000 à 1.200 m de diamètre, pour une raison toute bête : il n'y aurait pas de site naturel plus grand permettant d'installer le miroir à coût raisonnable !

## *Carlina*

Carlina est le nom de la première réalisation en dimension réelle. Un premier prototype a été réalisé à l'Observatoire de Haute Provence (OHP). Il comprenait au départ deux miroirs, et son but était de mettre au point la partie mécanique de l'ensemble, en fait la nacelle suspendue à un ballon dirigeable. Tout le système permettant à cette nacelle de se maintenir en l'air avec une excellente précision de positionnement était à concevoir. Il a été réalisé par un ensemble de cables, ancrés dans le sol, qui tiraient le ballon dans trois directions à 120°. La nacelle, de son côté, suspendue au ballon, doit pouvoir se déplacer légèrement pour assurer le suivi de l'observation. Le système est inspiré de ce qui a été fait à Arecibo en radiosatronomie.

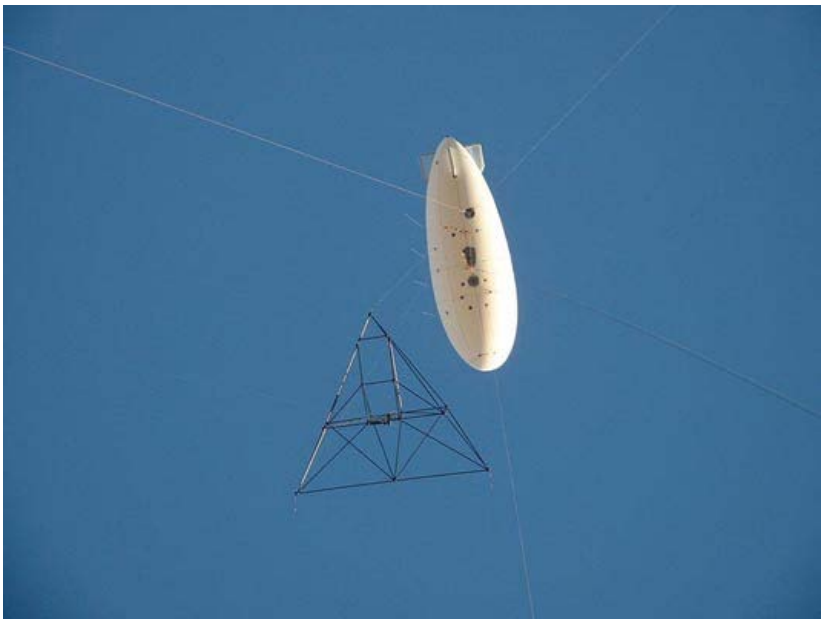


Carlina Acanthifolia photo A. Labeyrie

**Le prototype**



Prototype de l'OHP ; ballon et nacelle photo Antoine Labeyrie



L'ensemble vu de dessous photo Antoine Labeyrie



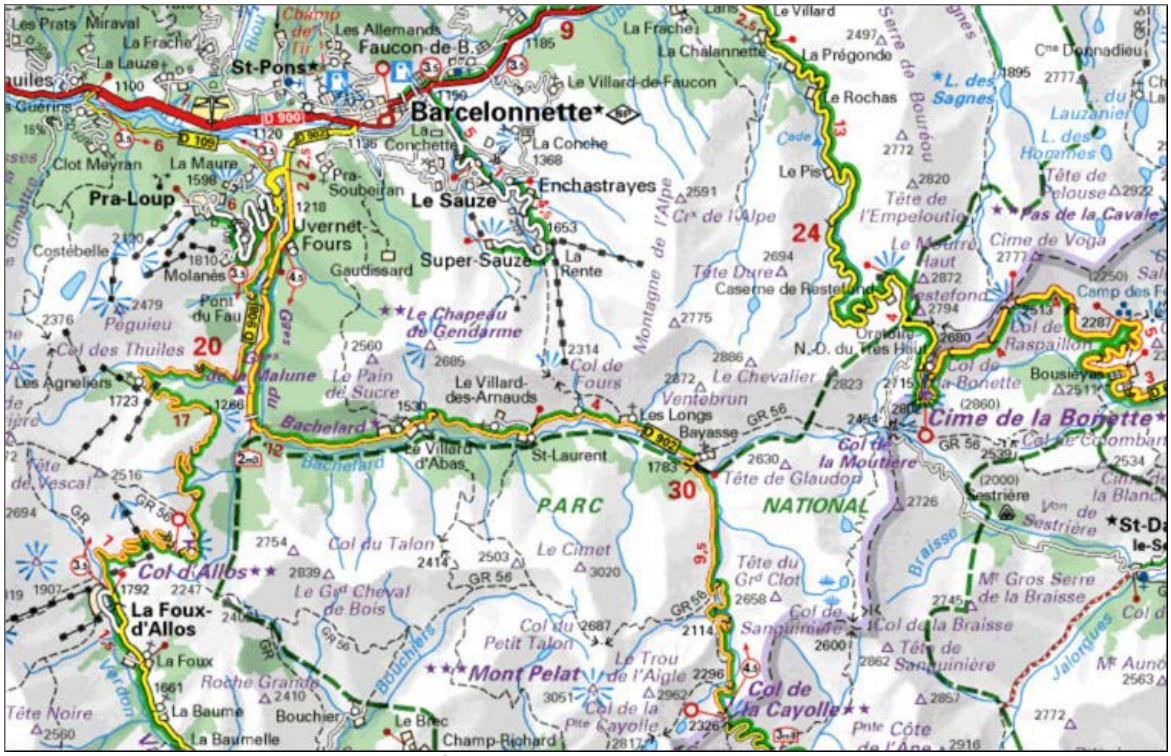
Reflet dans un des miroirs photo Antoine Labeyrie

Un troisième miroir a été ajouté ensuite, rendant le système plus réaliste.

**En vraie grandeur**

Depuis, un autre prototype, en vraie grandeur, est en cours d'installation au vallon de la Moutière, dans la vallée de l'Ubaye. Le projet commence avec une ouverture de 57 m. La nacelle est équipée d'un correcteur de Mertz à deux miroirs (destiné à corriger l'aberration sphérique donnée par un miroir non parabolisé).

**Le site -** Situé à 2.000 m d'altitude dans les Alpes du sud, le vallon de la Moutière, non loin de Barcelonette, répond à ces critères. Il bénéficie d'un ciel sans lumières parasites ayant une bonne transparence et une faible turbulence. Sa partie médiane, orientée est-ouest, proche d'une forme cylindrique, se trouve à l'abri des vents dominants et ne souffre quasiment pas des brises thermiques, conditions très favorables à l'installation de la structure suspendue portant l'optique focale.

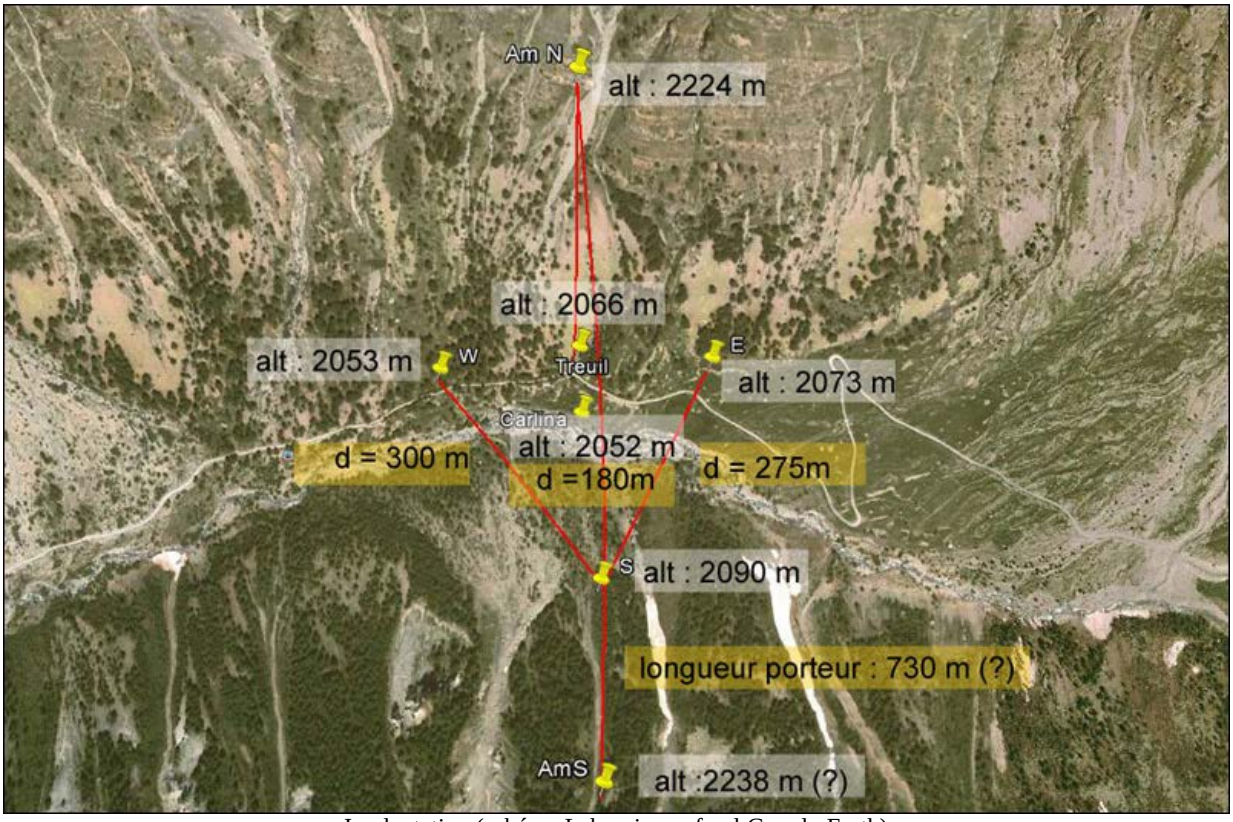


Carte routière du site (extrait de la carte Michelin)

Le site se trouve en partie dans le Parc du Mercantour, et de ce fait aucune installation pérenne n'est possible. Il s'agit bien d'un démonstrateur, et non d'un instrument destiné à une exploitation. Aucun bâtiment ne peut donc être construit, et rien ne doit gêner la faune. Cependant, cet instrument restera en place, et sera agrandi, jusqu'à ce que le projet définitif soit mis en place, ce qui prendra quelques années. Après démontage, il ne restera aucune trace.

**Le site -** Le miroir est constitué de petits miroirs de 20 cm de diamètre, posés sur des supports tripodes ancrés dans le sol. Le miroir dilué fait 200 m de diamètre (55 au début), et les petits miroirs se placent tous dans une même sphère. La nacelle optique ne pèse que quelques kilogrammes, et peut être supportée par un simple cable tendu d'un versant à l'autre. Le vallon étant orienté est-ouest, le cable est nord-sud.

**Le cable -** Pour tenir compte des contraintes du Parc, le cable n'est tendu que lors des observations, pendant la nuit. Dans la journée, il est posé au sol. Le cable est en Kevlar, ce qui lui donne une grande solidité et une bonne rigidité. Il mesure 800 m de long.



Implantation (schéma Labeyrie sur fond Google Earth)

**La nacelle -** La nacelle, suspendue à ce cable à une centaine de mètres du sol, est orientée par 6 petits cables, actionnés par des treuils. Les moteurs des treuils sont des moteurs pas-à-pas. Pour synchroniser les actions des treuils, un réseau wifi a été installé sur le site ! Il permet à un ordinateur de contrôle de commander les actions nécessaires (et éventuellement aux chamois de se connecter sur astronomia.fr…).

Naturellement, il faut une alimentation solaire pour donner la puissance à ce matériel.



Le moteur ouest photo Antoine Labeyrie

La nacelle renvoie la lumière vers le point sud du site, où se trouve un petit télescope en monture équatoriale pour la récupérer. L'axe polaire est orienté vers le nord céleste évidemment, mais il doit aussi passer par le centre de courbure du miroir. Pour cela, il suffit de placer le télescope sur la ligne polaire qui passe par ce centre, là où elle rencontre le sol.

**La performance -** Grâce à ses nombreux petits miroirs espacés, ce prototype aura le même pouvoir séparateur que le VLTI (petit nombre de grands miroirs). Pour un coût n'ayant rien à voir… De plus, Carlina donne une image directement visible, alors qu'un interféromètre classique nécessite une reconstruction de cette image par un algorithme après saisie des données. Pour obtenir toutes les fréquences spatiales, il faut utiliser le plus grand nombre possible de couples de télescopes. Ces observations ne peuvent se faire que successivement, et ne s'adressent donc qu'à des objets stationnaires, excluant ceux à évolution rapide.

La résolution de l'hypertélescope dans sa première version, de 57 m de diamètre, atteindra 2 millisecondes d'arc : à comparer avec les 40 millisecondes du HST, soit 20 fois meilleur ! Dans la version étendue, de 200 m de diamètre, on arrivera à 0,5 milliseconde. Soit 80 fois mieux que le HST, et 120.000 fois mieux que les observations de Tycho-Brahé…

Là où Tycho Brahé ne voyait qu'un seul pixel, nous en verrons 120.000 × 120.000 = 14 millions ! Soit un pavage de 11.039 écrans 17" juxtaposés, en une matrice de 83 en largeur par 133 en hauteur (définition de 1.440 × 900 pixels chacun).

**Et ceci n'est qu'un début…**

## *Le ELHyT*

*ELHyT* signifie *Extremely Large HyperTelescope*. Il s'agit du projet définitif, qui devrait atteindre 1.000 à 1.200 m de diamètre. Pour cela, il faudra l'installer dans une des rares vallées possibles sur Terre. Le site le plus prometteur est en Inde. Il devrait comprendre à terme un millier de miroirs.

Malgré ces dimensions impressionantes, le coût d'un tel instrument serait très raisonnable, puisque tous les miroirs sont à ciel ouvert. Aucune monture n'est à construire, et cela représente une économie majeure pour le projet. Le point critique qu'il reste à valider est celui de l'utilisation de l'optique adaptative, à l'aide d'une étoile guide laser. Cette amélioration permettra d'atteindre une résolution très supérieure à celle des interféromètres actuels. Elle doit donner aussi une amélioration de la sensibilité et de la magnitude limite de l'instrument, supérieures aux actuels.

Un aspect important est la possibilité d'ajouter des miroirs au fur et à mesure. Ainsi, des objectifs scientifiques moins gourmands pourront être acquis alors même que l'instrument ne sera pas terminé.

Pour en revenir à Tycho : définition de 0,1 milliseconde d'arc. Soit 600.000 fois plus que Tycho ! 278.000 écrans 17".

**Et ce n'est pas tout…**

## *Les hypertélescopes spatiaux*

Pour construire un hypertélescope spatial, il y a deux approches possibles :

- un ensemble rigide de miroirs, maintenus par une grande structure métallique ;
- un ensemble de petits satellites indépendants, nommés *free-flyers*.

La première a été envisagée par la NASA, qui a fait des études dans ce sens (*Terrestrial Planet Finder*, une poutre de 100 m de longueur comportant plusieurs miroirs). La seconde est européenne, et c'est celle qui est adoptée définitivement.

Le projet Darwin est un interféromètre spatial comprenant 6 miroirs de 2 m disposés sur une surface de 100 m à 1 km de rayon. Ce n'est pas un

hypertélescope, puisqu'il met en jeu un petit nombre de miroirs.

**La stabilisation**

Puisque la solution des *free-flyers* est adoptée, il faut résoudre le problème de stabilité de la configuration, qui était dans l'autre cas assurée par la rigidité de la poutre. La stabilisation dans l'espace peut s'envisager par trois méthodes :

- par des micro-fusées (durée de vie limitée par la quantité de carburant) ;
- par voile solaire (durée de vie potentiellement infinie, mais temps de réaction long) ;
- par laser (la pression de radiation d'un laser sur le miroir peut le réorienter).

Le pilotage par micro-fusées a été testé par l'expérience franco-suédoise Prisma. Elle en a montré la faisabilité avec la précision requise.

La solution de voile solaire n'est peut-être pas la meilleure car son temps de réaction pour reconfigurer le miropir est trop long. Mais elle a un avantage considérable : un miroir peut être perdu, c'est-à-dire que pour une raison quelconque, son orientation le met hors d'atteinte des communications terrestres, et il se trouve livré à lui-même. Pire, il peut gêner l'ensemble. Or les voiles solaires peuvent être réalisées (en forme de paraboloïdes), de telle manière que, si le miroir est désorienté, la pression de radiation du soleil le remettra dans la bonne direction (approximative) au bout d'un certain temps.

Le pilotage par laser s'apparente à celui de voile solaire, car il comprend également une voile passive. Mais à la place du rayonnement solaire, cette voile est destinée à reçevoir un faisceau laser produit par le laboratoire central (qui contient l'optique). Diverses études ont été réalisées, qui indiquent que la précision serait meilleure que celle des micro-fusées, pour une durée de vie non limitée.

**Epicurus**

Epicurus est un projet d'hypertélescope spatial, présenté par Antoine Labeyrie, et comprenant 6, puis 18, et enfin 36 petits miroirs de 30 cm de diamètre, étalés sur plusieurs centaines ou milliers de mètres (soit un pouvoir séparateur de l'ordre de la milliseconde d'arc).

**Luciola**

Luciola est le projet successeur d'Epicurus. Il s'agit encore d'un projet spatial d'Antoine Labeyrie, concernant un hypertélescope kilométrique. Il comprend un densifieur de pupille. Il a été soumis à l'ESA en juin 2007. Il est dans une phase de simplification pour le rendre opérationnel.



Le projet Luciola dessin Antoine Labeyrie

La luminosité ne sera pas un problème, malgré l'ouverture diluée (les grands trous). En effet, avec 100 miroirs de 25 cm, on atteint la magnitude limite du HST. Chaque miroir a une surface collectrice $s = \pi r^2$, donc les 100 miroirs totalisent $S = 100 \pi r^2$. Ce S est équivalent à un miroir unique de rayon R, donc de surface $S = \pi R^2$. En égalant les deux expressions de la surface S : $\pi R^2 = 100 \pi r^2$. On simplifie par $\pi$, et il reste : $R^2 = 100 r^2$, soit $R = 10 r$. Les 100 miroirs sont équivalents à un seul miroir de diamètre 10 fois plus grand, donc de 2,50 m. Or le HST fait 2,40 m. Luciola aura donc la même sensibilité, avec un pouvoir séparateur 400 fois plus important (rapport des diamètres 1.000 m / 2,40 m).

Hors de l'atmosphère, pas d'optique adaptative nécessaire, et pas de pertes en longueur d'onde. Il sera possible d'observer depuis l'ultraviolet 120 nm (raie Lyman $\alpha$) jusqu'à l'infrarouge 20 µm.

Les méthodes permettant d'augmenter la dynamique de l'image, la coronographie, la spectroscopie, sont utilisables. C'est donc un instrument absolument complet que l'on peut réaliser ainsi. Il rempli les conditions pour satisfaire le programme *Cosmo Vision* de l'ESA, qui planifie les missions de 2015 à 2025. Cette planification est rendue indispensable par la durée des développements (plus de 20 ans pour Huygens).

Ce concept, comme son correspondant au sol, est par nature extensible. Le nombre de miroirs peut augmenter avec des missions successives, et

les bancs optiques (équivalent de la nacelle de Carlina), peuvent être multiples, amenés successivement. Le nombre de miroirs pourrait atteindre 1.000, augmentant considérablement la sensibilité. Ce nombre, avec des miroirs de 25 cm, atteint la même surface qu'un des télescopes du VLT.

Pour imager des étoiles, les premiers éléments seront suffisants. Mais pour les exoplanètes, il en faudra un peu plus. A commencer par l'infrarouge, où le constraste est meilleur et où les observations seront possibles assez facilement. Mais pour le visible, il faudra attendre que l'instrument soit plus complet. A ce moment-là, la combinaison des spectres dans l'IR et le visible permettra de détecter de la vie sur une exoplanète.

Luciola est l'équivalent de l'hypertélescope de l'Ubaye : un prototype qui devrait déjà donner des informations extrêmement précieuses. Mais ce n'est qu'une étape, un démonstrateur. La suite est déjà envisageable :

- EEI : Exo-Earth Imager, d'une centaine de km de diamètre, avec un pouvoir séparateur de 1,2 µseconde, soit 60.000.000 de fois plus que Tycho ;
- NSI : Neutron Star Imager, atteignant 100.000 km, pouvoir séparateur de 1,2 nanoseconde, soit 60.000.000.000 de fois plus que Tycho…

Le chemin parcouru (enfin, à parcourir encore) est inimaginable.

Il y a un argument pour minimiser la taille des miroirs. En effet, si d est le diamètre des miroirs, la masse du microsatellite est en $d^3$, sa surface en $d^2$. Alors, la miniaturisation diminue d'un facteur 1/d l'accélération nécessaire pour mettre le microsatellite en mouvement (pour reconfigurer le télescope, la poussée sur le satellite est proportionelle à sa surface, alors que l'inertie est proportionelle à sa masse, donc à son volume). Au bout du compte, le temps nécessaire pour reconfigurer est proportionel à $d^{1/2}$.

## *Utilisation des hypertélescopes*

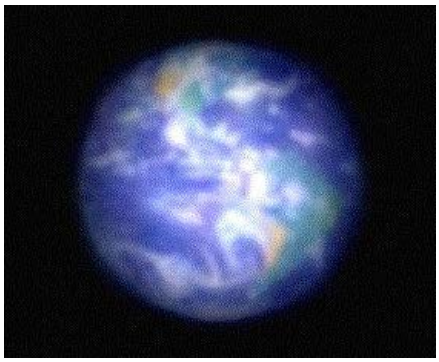
Avec un **hypertélescope au sol**, on peut mieux voir les étoiles, leurs planètes, rechercher une vie (éventuellement évoluée), les galaxies, l'Univers lointain.

Observer un passage d'une planète devant son étoile serait faisable, pour les étoiles proches. Par spectroscopie pendant le passage, on peut analyser l'atmosphère de la planète.

Avec un coronographe, on a déjà commencé à imager des exoplanètes (les plus grosses). Cette méthode serait utilisée avec des hypertélescopes. La planète, de type terrestre, est 1 à 10 milliards de fois moins lumineuse que son étoile.

Tout ce qu'on obeserve aujourd'hui constituerait évidemment des cibles : les trous noirs, les noyaux actifs de galaxies, les quasars et micro-quasars (voir si le modèle conçu à partir de ses propriétés est bien réaliste), les lentilles gravitationnelles, les sursauts gamma (contrepartie optique)…

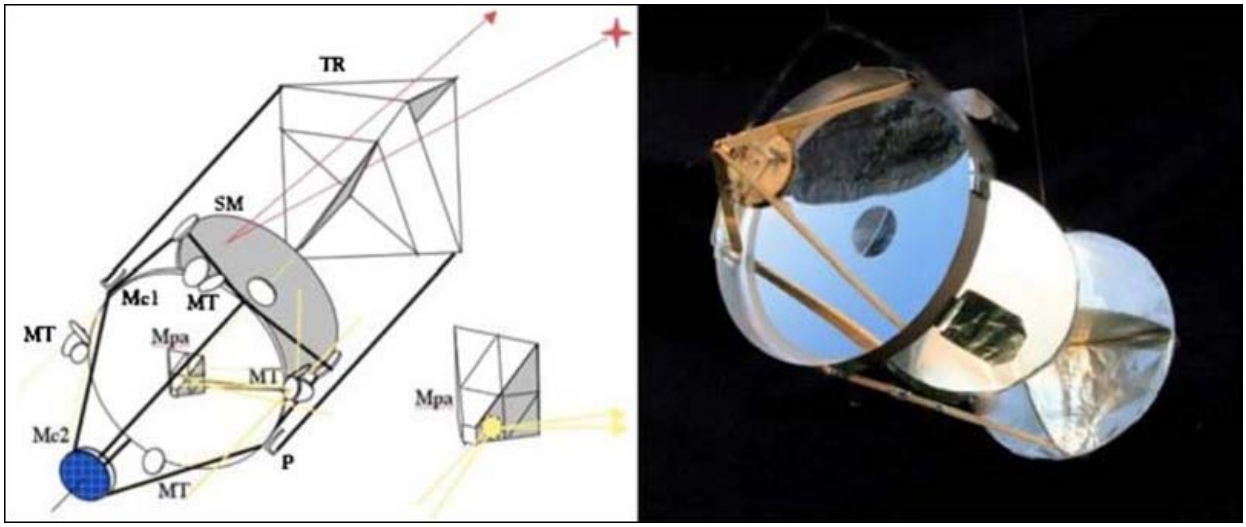
Avec un **hypertélescope spatial** de 100 km de diamètre, constitué de 100 miroirs de 3 m, on peut imager une planète comme la Terre en 30 mn de pose. L'image permet de distinguer les continents (s'il y en a), et donc de savoir beaucoup de choses à son sujet. En particulier, d'éventuels changement de couleur en fonction de la saison, donc une éventuelle vie.



Vue de la Terre

L'image ci-dessus montre comment on verrait une planète ressemblant à la Terre dans cet instrument de 100 km, si elle était placée à 10 AL de nous. On y distingue les mers, les continents, les couleurs. S'il y avait un changement de couleur avec la saison, il serait visible. Ceci ne serait pas une preuve de vie sur cette planète, mais ce n'en serait pas bien loin.

Il est évident que le point de Lagrange L2 est un lieu idéal pour installer un tel instrument. Il y règne une microgravité très uniforme, ce qui veut dire des forces de marées très faibles. Or ce sont elles qui sont susceptibles de séparer les microsatellites.



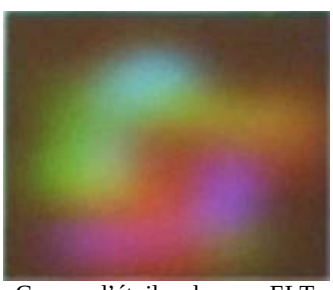

Un nanosatellite

Les supergéantes sont bien résolues à partir de 18 m.

**ELT vis Hypertélescope**

Un ELT a un champ bien supérieur à celui d'un hypertélescope. Mais bien sûr, son diamètre étant très inférieur, son pouvoir de résolution l'est également.

Un hypertélescope peut comprendre plusieurs nacelles, et donc constituer en fait plusieurs télescopes simultanés.



Groupe d'étoiles dans un ELT



Le même dans un hypertélescope

Antoine Labeyrie envisage jusqu'à un hypertélescope formé de miroirs espacé sur un diamètre de 100.000 km ! Un tel instrument, forcément spatial, permettrait d'imager la surface d'une étoile à neutrons (20 km de diamètre).

## *OVLA*

**Définition**

OVLA (Optical Very Large Array) est un projet d'interféromètre optique de type Michelson, proposé par Antoine Labeyrie. Sa version initiale comporte 27 télescopes de 1,50 m de diamètre placés le long d'une ellipse de plusieurs centaines de mètres de demi petit axe. En effet, le but est de construire un miroir géant parabolique, qui restera virtuel. En l'imaginant pointé vers le ciel, la lumière qu'il intercepterait projeterait au sol une ellipse. C'est donc sur cette ellipse qu'on place les miroirs réels. Le trou qui reste au centre est donc l'équivalent de l'obstruction centrale par le secondaire, dans un télescope classique. Il est évident qu'on peut envisager de combler partiellement ce trou avec d'autres miroirs, qui seraient placés sur des ellipses intérieures. Ceci constituera une extension du projet.

L'instrument étant un interféromètre, il faut recombiner la lumière provenant de chaque télescope dans un laboratoire, qui sera situé en l'un des foyers de l'ellipse. C'est par les foyers coudés des télescopes que la lumière y parviendra.

Les télescopes doivent évidemment constituer à chaque instant la bonne ellipse. Or celle-ci se déforme bien sûr avec le mouvement diurne. Il faut donc que les télescopes puissent se déplacer ! Chacun sera placé sur un support à 6 pattes, et marchera (vous avez bien lu) à une vitesse de quelques centimètres par seconde pour un diamètre instrumental de 500 m par exemple. Les télescopes devront être compacts et légers. La précision des déplacements est de l'ordre de la longueur d'onde de la lumière, mais l'interférométrie relache un peu cette contrainte.

Le nombre $27 = 3^3$ permet de grouper les télescopes par 3 pour assurer la cohérence ; puis chaque groupe par 3 encore ; et enfin ces grappes entre elles.

Le système utilisera une pupille densifiée, ce qui lui permettra d'atteindre un pouvoir de résolution de $10^{-3}$ à $10^{-4}$ secondes d'arc. De plus, on obtient directement une image utilisable, il est inutile de la reconstruire par calcul.

L'originalité de cette configuration réside dans sa souplesse : selon le type d'objet que l'on veut observer, on peut configurer très rapidement l'ellipse la plus adaptée. Ceci le distingue d'un système du genre VLTI, dans lequel, à cause des lignes à retard, les seuls emplacements possibles sont déterminés à la construction.

Les télescopes sont de type Gregory. Les miroirs seront de 1,52 m de diamètre, en verre ordinaire mince, supportés par 29 actuateurs. Ils seront ouverts à F/1,7. Ce sont des ménisques, afin de limiter le poids. Le secondaire fait 75 mm de diamètre, et un miroir tertiaire renvoie le faisceau vers le foyer coudé.

La monture est une boule, qui a de nombreuses qualités, dont celle de servir également d'abri aux miroirs. Ces télescopes n'ont pas de coupole ! Ce qui fait une économie énorme sur la construction. Le pointage précis est assuré par trois galets, qui supportent la boule et la tournent en même temps. C'est le télescope le plus léger du monde, car il pèse moins d'une tonne, pour un diamètre de 1,52 m.

Cet instrument aura un pouvoir séparateur de 100 à 1.000 fois meilleur que les télescopes actuels, HST ou VLT (avec optique adaptative). Les petits corps, comme des comètes deviennent imageables à distance. Mais la surface de certaines étoiles (Céphéides, RR Lyræ) est également visible. Plus loin, les noyaux actifs de galaxies. Mais le plus spectaculaire sans doute concerne les exoplanètes, qui seront visibles par coronographie, ou nulling interferometry.

**Bibliographie**

Cours du 8 février 2012 au Collège de France

Olivier Lardière : Thèse soutenue le 16 juin 2000 à l'OHP "Contrôle des télescopes automatiques et des grands interféromètres terrestres et spatiaux : cas du prototype OVLA à monture sphérique et optique active.

---=OO=---