LES BATTERIES
Stocker l'énergie

Cette fiche propose une explication de la production d'électricité à partir de composés chimiques (les piles) et son stockage (les accumulateurs et les batteries).

On y trouvera plusieurs applications pratiques permettant de réaliser des piles ou des accumulateurs simples, avec mise en évidence de la production et du stockage de l'énergie électrique. Une application très simple, mais utilisant un produit corrosif, est proposée à la fin de cette fiche, c'est pourquoi elle est donnée comme un prolongement possible.

A noter que la fiche « LES CELLULES SOLAIRES » présente le moyen de produire de l'électricité à partir de l'énergie lumineuse. Ces deux fiches, avec la fiche « LES MOTEURS », donnent une bonne notion du cycle d'énergie utilisé par Solar Impulse : production, utilisation, stockage.

Projet : EPFL | dgeo | Solar Impulse
Rédaction : Michel Carrara
Graphisme : Anne-Sylvie Borter, Repro – Centre d'impression EPFL
Suivi de projet : Yolande Berga

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE
canton de vaud

Notions abordées

Sciences :

- Electricité
- Piles
- Batteries

Objectifs d'apprentissage du PER

MSN 36 - 35. Analyser des phénomènes naturels et des technologies à l'aide de démarches caractéristiques des sciences expérimentales :

- en acquérant les connaissances nécessaires en physique et en chimie.
- en utilisant un modèle pour expliquer et/ou prévoir le fonctionnement d'un objet technique.
- en choisissant et en utilisant des instruments d'observation et de mesure.
- en organisant des prises de mesures et en formalisant les résultats d'une expérience.

Disciplines et options concernées

Sciences : 11e (selon l'activité choisie)
OCOM - Sciences* : technologie 11e (selon l'activité choisie)

Durée de l'activité

Partie théorique : 2 périodes

Expérience : 4 fois 2 périodes

Un choix de 4 activités de 2 périodes chacune est proposé. Certaines de ces activités demandent une préparation assez longue de la part de l'enseignant.

* Disciplines spécifiques à la scolarité vaudoise
OCOM : options de compétences orientées métiers
OS MEP : option spécifique mathématiques et physique

Cette fiche est l'occasion de présenter aux élèves les piles et les accumulateurs.
Cette fiche permet aussi d'introduire quelques notions d'histoire des sciences.

PARENTHÈSE HISTORIQUE

L'histoire des accumulateurs débute avec celle des piles.

À la fin du XVIIIème siècle, le médecin et physicien italien Luigi Galvani constate que les muscles d'une cuisse de grenouille se contractent lorsqu'elle est mise en contact avec des métaux. Il découvre également que la réaction est plus forte si l'instrument utilisé se compose de deux métaux différents. Galvani a ainsi mis en évidence un phénomène nouveau : l'électricité qu'il nomme « électricité animale ».

À partir des travaux de Galvani, Alessandro Volta crée, près de dix années plus tard, la première pile à colonne. En effet, le physicien italien découvre que l'on peut générer de l'électricité avec deux plaques de métal mises en contact par un liquide conducteur. Volta superpose alors des disques de zinc et de cuivre et des rondelles de carton imbibées d'eau salée pour conduire le courant, formant ainsi une pile, d'où le nom donné à son invention : la pile de Volta.

Cinq ans plus tard, en 1802, le physicien et physiologiste allemand Johann W. Ritter découvre le principe de la pile rechargeable. Il construit une colonne faite de plaquettes de cuivre séparées par des disques de carton imprégnés d'une solution salée. Il observe que sa colonne, qui ne produit pas de courant toute seule, se charge dès qu'il la raccorde à une colonne de Volta. De plus, ce processus peut être répété à plusieurs reprises. Il appelle sa colonne une pile secondaire : c'est la naissance de l'accumulateur.

Toujours en 1802, le docteur William Cruickshank conçoit la première batterie électrique capable d'être produite en série. Il arrange des feuilles carrées de cuivre soudées à leurs extrémités et intercale entre elles des feuilles de zinc de même taille. Ces feuilles sont placées dans une longue boîte en bois rectangulaire, qui est ensuite refermée à l'aide de ciment pour en garantir l'étanchéité. Des encoches à l'intérieur de la boîte permettent de maintenir les plaques métalliques bien en place. La boîte est remplie d'une solution aqueuse salée (saumure) ou d'acide dilué. Jusqu'à une certaine époque, toutes les batteries comportaient des éléments primaires, ce qui voulait dire qu'elles n'étaient pas rechargeables.

En 1859, Gaston Planté réalise le premier accumulateur au plomb, que l'on trouve aujourd'hui dans les batteries automobiles. Son appareil se composait de deux lames de plomb roulées en spirales et maintenues écartées par des bandes isolantes. Une pile branchée sur son dispositif oxydait le métal au pôle positif et réduisait l'oxyde de plomb à l'électrode négative. En reliant les deux lames ainsi polarisées, Planté observa qu'il circulait un courant électrique tant qu'elles n'avaient pas retrouvé leur état chimique primitif. Pour augmenter la surface des électrodes, Planté enroula concentriquement deux bandes de plomb séparées par deux intercalaires de caoutchouc pour éviter tout contact entre elles.

En 1901, Thomas Edison invente la batterie Fer-Nickel. Ce type d'accumulateur est ensuite utilisé pour l'éclairage et la traction des chariots dans les mines.

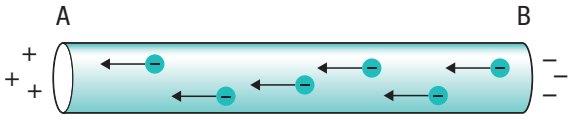
Mais il faudra attendre presque un siècle pour voir apparaître la batterie lithium-ion, commercialisée pour la première fois par Sony Energitech en 1991. Cette batterie occupe aujourd'hui une place prédominante sur le marché de l'électronique portable (dans les téléphones portables notamment).

LES PILES

Qui parle de pile ou d'accumulateur, parle d'électricité. Voici quelques notions nécessaires pour comprendre le sujet de cette fiche.

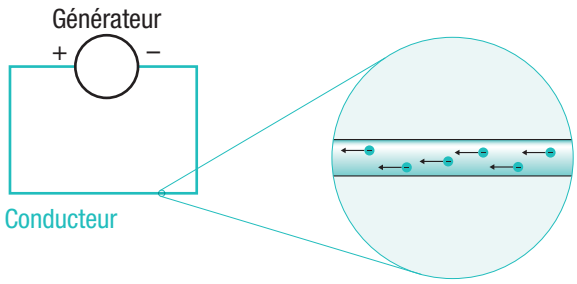
Cause du courant électrique

Plaçons aux deux extrémités d'un fil conducteur des charges électriques en même quantité mais de signes opposés (+ et –). Un courant électrique va apparaître : les électrons libres du métal sont attirés par les charges + placées à l'extrémité A et repoussés par les charges – placées à l'extrémité B.



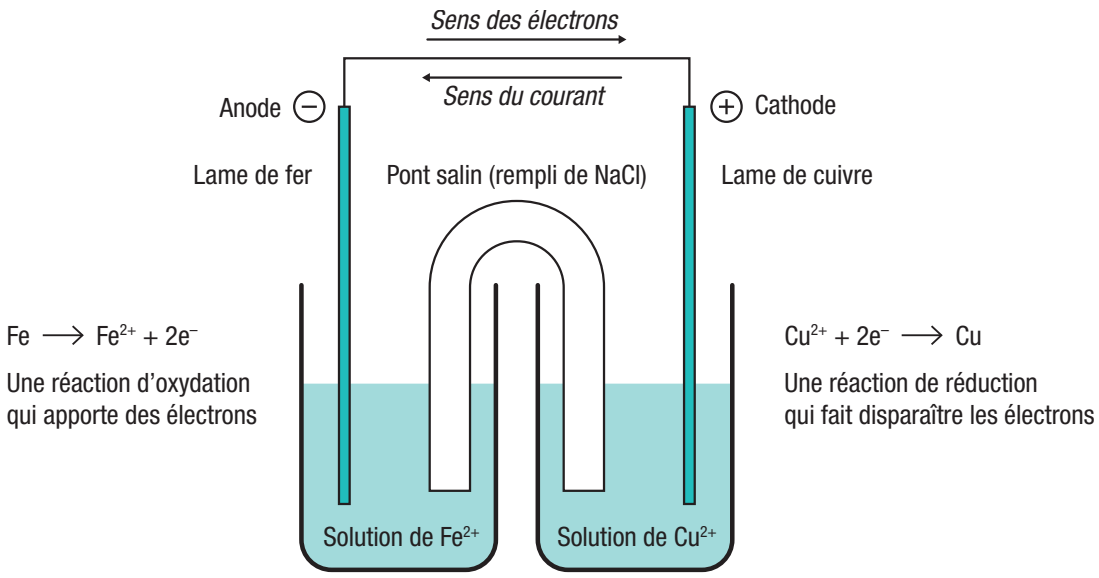
Electrons libres du métal
et leur sens de déplacement

Rapidement, les électrons arrivant en A vont neutraliser les charges + et le départ des électrons en B va faire disparaître les charges –. Plus rien ne se passe et le courant n'a été que momentané. Pour maintenir le courant (un mouvement d'ensemble des électrons dans le conducteur), il faut enlever les électrons en A et les apporter en B ; c'est ce que fait un générateur électrique. Un générateur est un appareil agissant comme une « pompe à électrons ».



Courant généré par un générateur
dans un conducteur

Dans le cas des piles, c'est une réaction d'oxydoréduction qui apporte constamment les électrons pour maintenir le mouvement de l'ensemble des électrons et les fait ensuite disparaître.



Circuit électrique

Une chaîne ininterrompue de conducteurs reliés à un générateur constitue un circuit électrique. Si cette chaîne est interrompue par l'ouverture d'un interrupteur, plus aucun courant ne circule dans le circuit. C'est pourquoi, il est essentiel de placer un pont salin entre les deux récipients de la pile liquide pour fermer le circuit et permettre ainsi aux charges électriques de circuler.

Sens du courant électrique

Les bornes d'un générateur sont désignées par les symboles + ou –. Par convention, le sens du courant a été défini ainsi : le courant sort du générateur par la borne + et y retourne par la borne –. Cette convention a été établie par le français André-Marie Ampère (1775 -1836) à une époque où l'on ne connaissait pas la nature du courant électrique. En réalité, les électrons parcourent un circuit dans le sens inverse de celui du courant électrique : les électrons sortent du générateur par la borne – et y retournent par la borne +.

Intensité du courant électrique

Tout mouvement d'ensemble comme celui des voitures sur une route ou l'eau d'une rivière, est caractérisé par son débit. L'intensité I du courant électrique dans un conducteur est le débit de charges électriques à travers le conducteur. L'intensité du courant est donc la quantité de charges passant en un point donné du conducteur par seconde. L'unité de l'intensité du courant électrique est l'ampère [A], en hommage à Ampère.

Tension entre deux points d'un circuit

Pour déplacer des charges (électrons) dans un conducteur, il faut fournir à ces derniers une quantité d'énergie suffisante, que l'on nomme tension U. La notion de tension est assimilable à ce qui se passe dans une chute d'eau. L'énergie acquise après 1 m de chute est la même. En effet, une goutte d'eau a la même variation d'énergie qu'elle chute de 15 à 14 m ou de 1 m au sol. Une charge possède une énergie car, repoussée par la borne négative de la pile et attirée par la borne positive, elle peut aller « naturellement » de la borne - à la borne +. Lorsque la charge se déplace dans ce sens, son énergie diminue. Par définition, la tension entre deux points d'un circuit est la quantité d'énergie électrique mise en jeu lors du déplacement d'une charge entre ces deux points. L'unité de la tension est le volt [V], en hommage à Alessandro Volta.

La résistance

Le courant qu'une batterie peut faire circuler dans un circuit électrique est analogue à l'eau que peut pousser une pompe dans un tuyau : plus la pression de la pompe est grande, plus le débit d'eau est important. Ainsi, plus la tension de la batterie est élevée, plus l'intensité du courant dans le circuit est grande. La résistance R d'un conducteur est définie comme le rapport de la tension appliquée U à ce conducteur à l'intensité I du courant qui en résulte.

Loi d'Ohm : $U = R \cdot I$

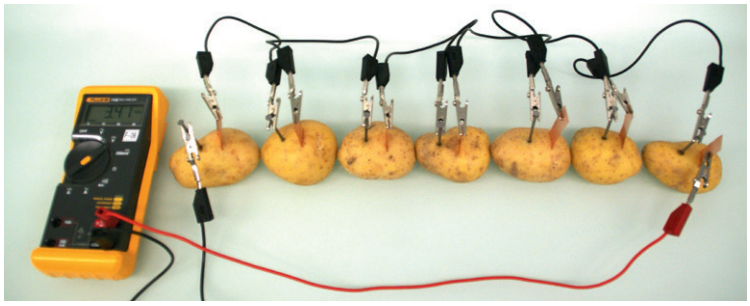
R la résistance électrique [Ω]
U la tension [V]
I l'intensité du courant électrique [A]

Bricotest : Fabrique une pile sèche simple à base de pommes de terre (« Agro-pile »)

Couper le bas de la pomme de terre pour qu'elle tienne à plat.

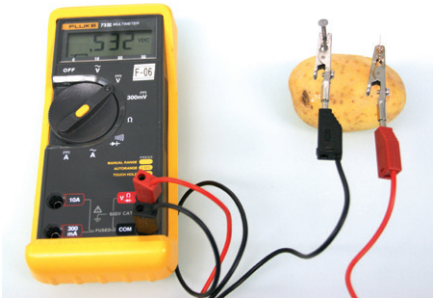
Faire une entaille avec un couteau et y insérer la lame de cuivre.

Planter le clou à la distance choisie.

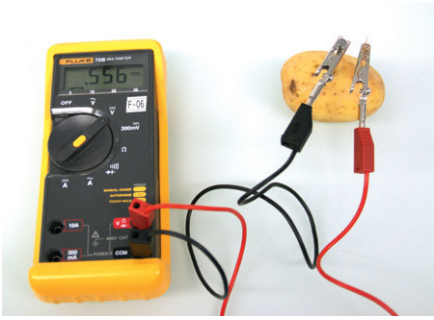


Prolongement : étude de la pile « pomme de terre » (peut servir de base à des TP pour des élèves motivés par la science ou la physique)

Influence de la distance entre le clou et la lame de cuivre

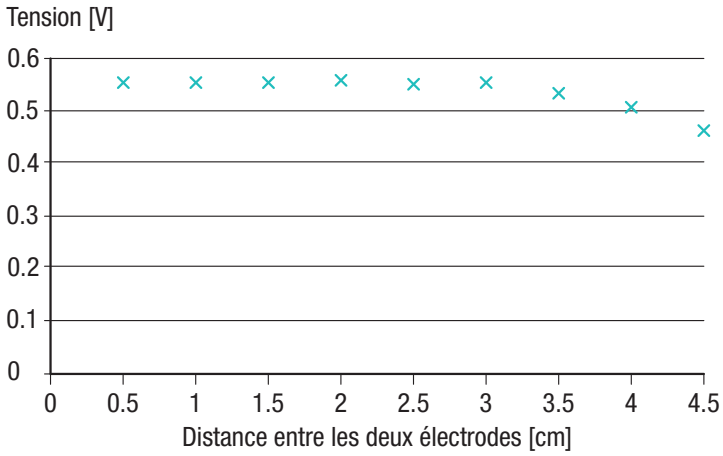


3.5 cm entre les électrodes



2 cm entre les électrodes

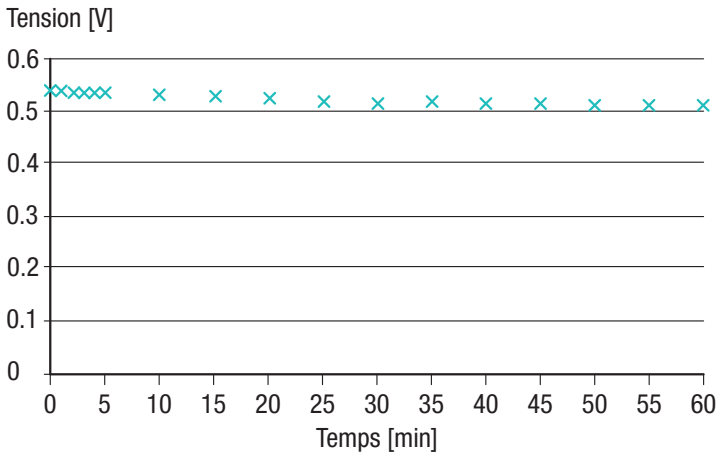
Distance [cm]	Tension [V]
0,5	0,553
1	0,553
1,5	0,553
2	0,556
2,5	0,550
3	0,551
3,5	0,532
4	0,508
4,5	0,460



Au-delà de 3 cm, la tension baisse, c'est pourquoi 2 cm ont été choisis comme distance.

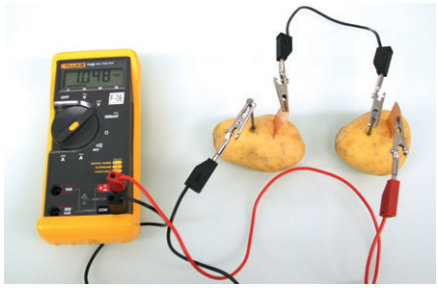
Variation de tension lors du fonctionnement (1 pomme de terre, 2 cm entre les électrodes)

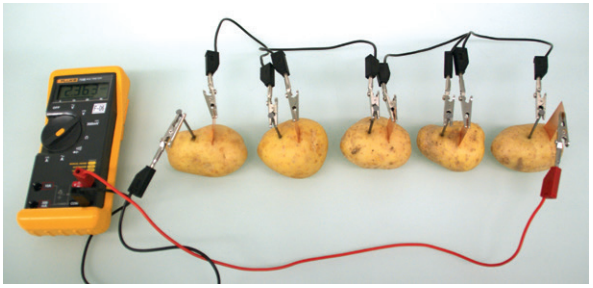
Temps [min]	Tension [V]
0	0,540
1	0,539
2	0,537
3	0,536
4	0,535
5	0,535
10	0,532
15	0,529
20	0,525
25	0,519
30	0,516
35	0,520
40	0,517
45	0,514
50	0,513
55	0,513
60	0,512



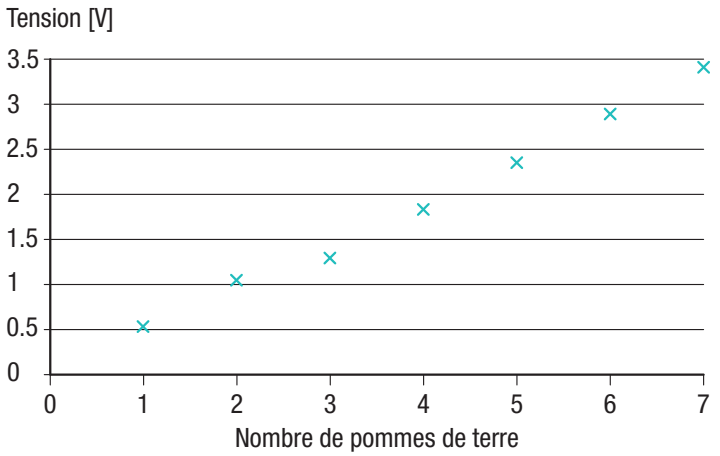
Pendant au moins une heure, la tension reste à peu près constante (en 60 minutes, la tension baisse de 5%). Cela permet de travailler en toute sérénité avec cette pile pendant une séance de travaux pratiques de deux périodes.

Influence du nombre de pommes de terre (2 cm de distance entre les électrodes)





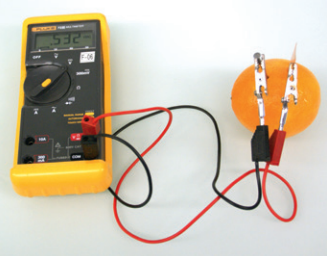
Nombre de patates	Tension [V]
1	0,534
2	1,048
3	1,300
4	1,838
5	2,363
6	2,907
7	3,410



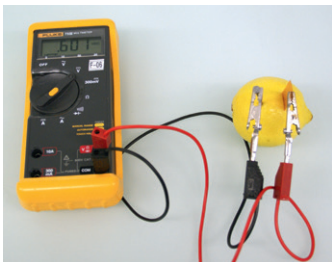
Placer des pommes de terre en série produit le résultat attendu : la tension de chaque pile s'additionne à celle des autres. Avec 5 à 7 pommes de terre, on peut allumer une diode.

Influence du choix du fruit ou du légume

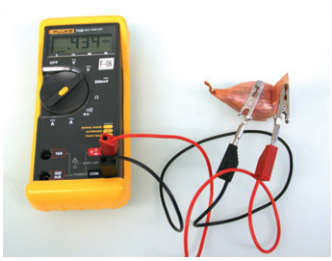
On peut utiliser d'autres fruits ou légumes et reproduire les mêmes opérations.



orange : 0.532 V



citron : 0.601 V



échalote : 0.434 V

TECHNOLOGIE : FABRIQUE UNE PILE OU UN ACCUMULATEUR

LA PILE À COMBUSTIBLE SIMPLE : PILE LIQUIDE ALUMINIUM – AIR

Ci-dessous, les réactions qui ont lieu dans cette pile à combustible.

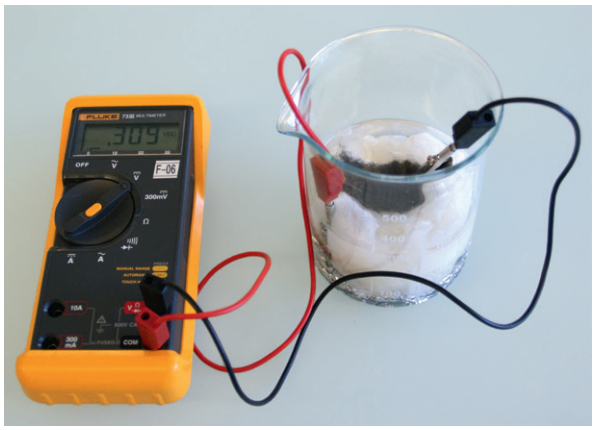
Pour l'aluminium (anode) : $Al + 3\,OH^- \longrightarrow Al(OH)_3 + 3e^-$

Pour l'air (cathode) : $O_2 + 2\,H_2O + 4e^- \longrightarrow 4\,OH^-$

La réaction globale est : $4\,Al + 3\,O_2 + 6\,H_2O \longrightarrow 4\,Al(OH)_3$

La laine d'acier n'intervient pas, elle sert seulement de cathode pour faire passer le courant.

Ici la tension est d'environ 300 mV



LA PILE À COMBUSTIBLE SIMPLE : PILE SOLIDE ALUMINIUM – AIR

Ci-dessous, les réactions qui ont lieu dans cette pile à combustible.

Pour l'aluminium (anode) : $Al + 3\,OH^- \longrightarrow Al(OH)_3 + 3e^-$

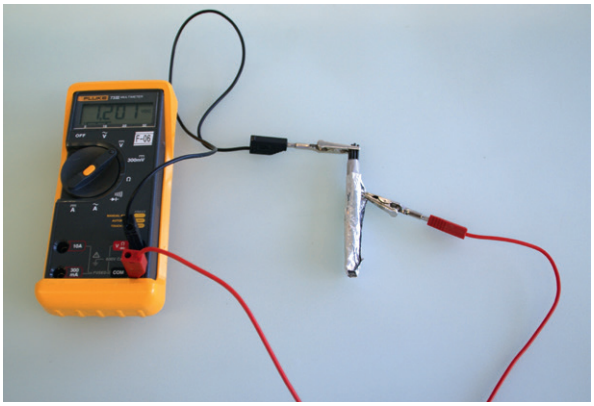
Pour l'air (cathode) : $O_2 + 2\,H_2O + 4e^- \longrightarrow 4\,OH^-$

La réaction globale est : $4\,Al + 3\,O_2 + 6\,H_2O \longrightarrow 4\,Al(OH)_3$

Le carbone des mines de crayon n'intervient pas, il sert de cathode pour faire passer le courant.

Ici la tension est d'environ 1,2 V.

Avec cette pile, on peut faire fonctionner une carte musicale ou un petit moteur de faible puissance comme le moteur électrique de la fiche « moteur ».



L'ACCUMULATEUR SIMPLE : PILE SECONDAIRE DE RITTER

Marche à suivre

1) Il serait judicieux de découper les formes avant de faire l'expérience avec les élèves, car cette partie de la marche à suivre prend beaucoup de temps.

3) Pour avoir un bon contact entre les différents éléments, il faut mettre un poids sur l'empilement. Il sera peut-être nécessaire de presser dessus tout au long de l'expérience, si le poids n'est pas suffisant. La solution de NaCl s'écoule en entraînant des oxydes de cuivre avec elle, ce qui salit la place de travail.
Si l'on branche à ce moment-là un multimètre numérique aux bornes du montage, on constatera qu'aucune tension n'apparaît.
Pour avoir plus de détail sur cet accumulateur, voir l'étude ci-dessous.

5) On peut observer les réactions suivantes dans cet accumulateur.

Lors de la charge, il se crée de l'oxyde de cuivre Cu_2O (grâce à l'eau et l'oxygène de l'air).

A l'anode : $2\,H_2O + O_2 + 4e^- \longrightarrow 4\,OH^-$

A la cathode : $2\,Cu + H_2O \longrightarrow Cu_2O + 2H^+ + 2e^-$

La réaction globale est : $4\,Cu + 4\,H_2O + O_2 \longrightarrow 2\,Cu_2O + 4H^+ + 4\,OH^-$

Ou, en simplifiant : $4\,Cu + O_2 \longrightarrow 2\,Cu_2O$

Lors de la décharge.

A l'anode : $2\,Cu_2O + O_2 \longrightarrow 4\,CuO + 2e^-$

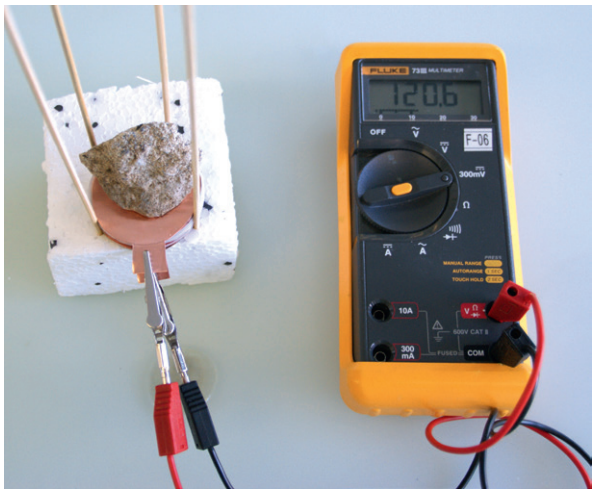
A la cathode : $2\,Cu_2O + 4e^- \longrightarrow 4\,Cu + O_2$

La réaction globale est : $6\,Cu_2O + O_2 \longrightarrow 4\,Cu + 8\,CuO$

Lors de la décharge, le Cu^+ (contenu dans Cu_2O) se transforme à l'anode en Cu^{2+} (contenu dans CuO) et à la cathode en Cu ; c'est une dismutation.

Ici, avec 20 disques de cuivre et 3 minutes après la charge, la tension est d'environ 120 mV.

A la fin de la manipulation, on peut observer que la charge a oxydé les plaques de cuivre.
Après 3 cycles de charge / décharge :



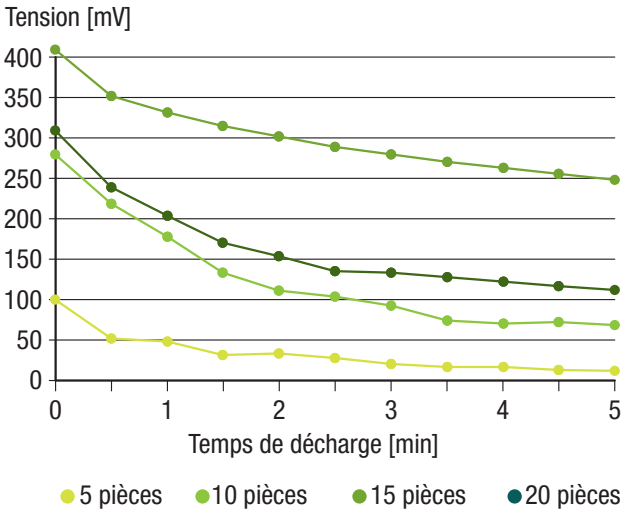
Remarque finale : l'accumulateur présenté ici s'assèche rapidement, en moins d'une heure. Une fois sec, il ne fonctionne plus. On peut réutiliser tout le matériel (buvard et cuivre ; il faut nettoyer le cuivre avec de la laine d'acier) et refaire une pile secondaire de Ritter.

Etude de la pile secondaire de Ritter

(peut servir de base à des TP pour des élèves motivés par la science ou la physique)

Influence du nombre de disques de cuivre sur la tension (charge à 4.5 V pendant 5 minutes)

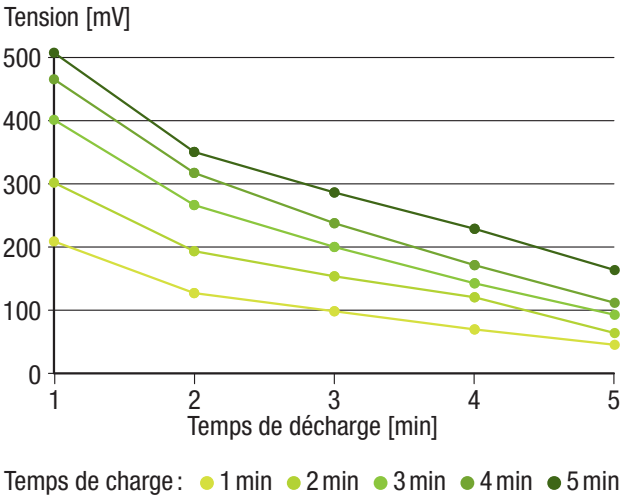
Temps de décharge [min]	Tension [mV] en fonction du nombre de pièces de cuivre			
	5 pce	10 pce	15 pce	20 pce
0	100	280	410	310
0,5	52	219	352	239
1	48	177	332	203
1,5	31	134	314	170
2	33	112	301	153
2,5	28	104	288	136
3	21	92	279	133
3,5	17	75	271	127
4	16	70	263	122
4,5	13	72	256	116
5	12	68	248	112



Avec la feuille de cuivre utilisée ici, on s'aperçoit qu'avec 15 pièces l'effet est optimum. Le reste des mesures sera donc fait avec 15 « étages » à la pile secondaire de Ritter. Cela s'explique facilement : plus il y a d'éléments, plus la charge possible est grande, mais la résistance augmente aussi, ainsi que les problèmes de contact avec les différents constituants de la pile secondaire de Ritter ; il y a donc un optimum. Celui-ci dépend de beaucoup de facteurs, comme l'épaisseur de la feuille de cuivre et celle du buvard, la qualité du contact entre les différents éléments, etc.

Influence du temps de charge (15 disques de cuivre, charge à 4.5 V)

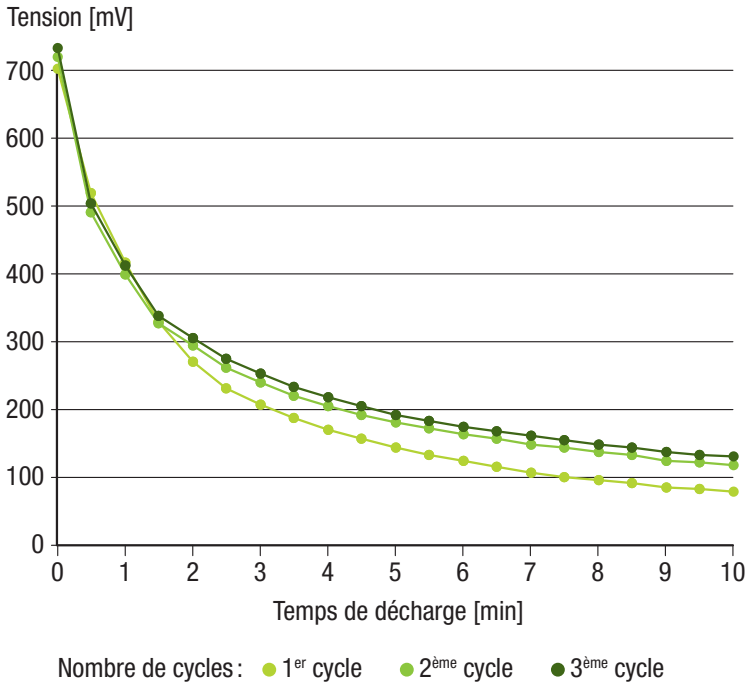
Temps de décharge [min]	Tension [mV] en fonction du temps de charge				
	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min
0	210	302	402	467	510
0,5	128	195	268	318	352
1	98	154	200	239	287
1,5	70	120	144	171	229
2	45	64	93	112	164



On peut constater que la différence de charge diminue quand on approche les 5 minutes de charge avec une pile de 4,5 V (mesure à t = 0 min dans le tableau ci-dessus), c'est pourquoi il a été choisi 5 minutes pour charger l'accumulateur.

Influence du nombre de cycles de charge / décharge (15 pièces, charge à 4.5 V pendant 5 minutes)

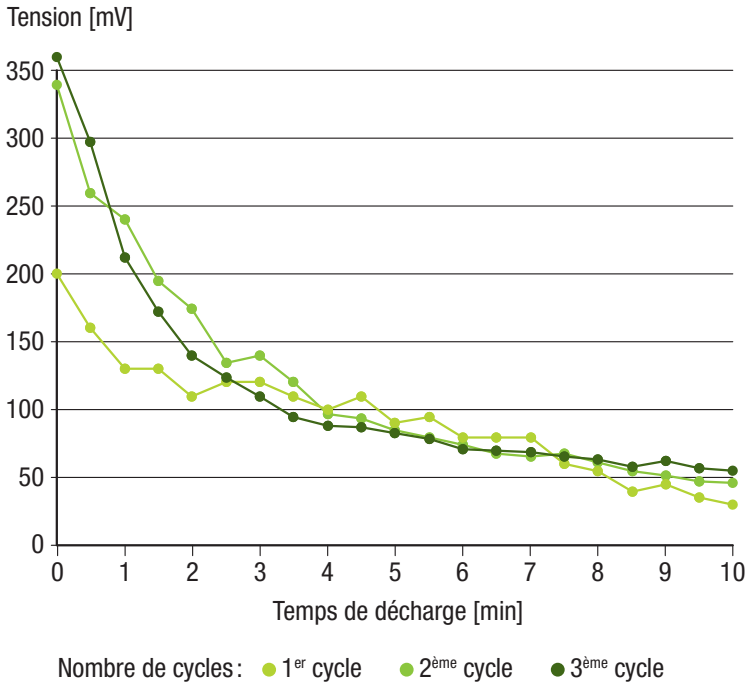
Temps de décharge [min]	Tension [mV] en fonction du nombre de cycles		
	1	2	3
0	702	720	732
0,5	519	491	503
1	417	400	412
1,5	329	327	339
2	270	294	306
2,5	232	262	274
3	207	240	252
3,5	188	221	233
4	170	205	217
4,5	156	192	204
5	144	181	193
5,5	133	172	184
6	124	163	175
6,5	116	156	168
7	108	149	161
7,5	101	143	155
8	96	137	149
8,5	91	132	144
9	86	125	137
9,5	82	122	134
10	79	118	130



L'accumulateur peut être rechargé plusieurs fois, on s'aperçoit que la charge est sensiblement la même avec 3 cycles de charge – décharge.

Influence du nombre de cycles de charge / décharge (20 pièces, charge à 4.5 V pendant 5 minutes)

Temps de décharge [min]	Tension [mV] en fonction du nombre de cycles		
	1	2	3
0	200	340	360
0,5	160	260	297
1	130	240	212
1,5	130	195	172
2	110	174	140
2,5	120	135	124
3	120	140	110
3,5	110	120	95
4	100	97	88
4,5	110	94	87
5	90	85	83
5,5	95	80	78
6	80	74	71
6,5	80	68	70
7	80	65	69
7,5	60	68	65
8	55	61	63
8,5	40	55	58
9	45	51	62
9,5	35	47	57
10	30	46	55

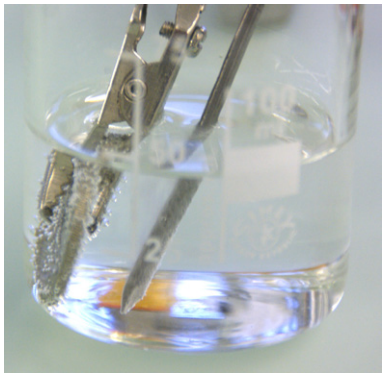


Ici, les disques de cuivre étaient « neufs » lors de la première charge, c'est pourquoi elle est moins bonne que les deux suivantes. Lors de cette première charge, il restait certainement du vernis sur les disques de cuivre et cela a rendu moins performant l'accumulateur. Du reste, lors de cette première charge, la pile s'est beaucoup échauffée, signe d'une grande consommation de courant dû à la présence de vernis sur les plaques de cuivre (donc une résistance de contact élevée). Cet échauffement ne s'est pas produit lors des deux charges suivantes.

L'ACCUMULATEUR SIMPLE : ACCUMULATEUR FER-NICKEL D'EDISON

Cette expérience est plus simple à mettre en œuvre que la batterie de Ritter, mais elle utilise du NaOH 0,1 M qui demande une manipulation prudente.

Marche à suivre



1) Le morceau de nickel utilisé ici est une ancienne pièce de 1 Fr français.

2) Si l'on branche à ce moment-là un multimètre aux bornes du montage, une faible tension de quelques millivolts peut apparaître. Celle-ci diminue avec le temps (ici, elle passe de 0,111 V à 0,078 V en 3 minutes). C'est le contact entre les différents métaux qui crée cette tension.

3) Lors de la charge, des bulles de gaz apparaissent sur le clou et sur le nickel. En effet, le fait d'appliquer une tension de 4,5 V provoque l'électrolyse de l'eau qui se décompose en oxygène (O_2) et en hydrogène (H_2). L'oxygène apparaît sur le nickel et l'hydrogène sur le fer.

4) L'accumulateur donne ici environ 1,5 V.
Pour plus de détails sur cet accumulateur, voir l'étude ci-après.

On peut observer les réactions suivantes dans cet accumulateur.

Lors de la charge (en plongeant le fer et le nickel dans la solution de NaOH, on crée à la surface de ceux-ci une couche d'hydroxyde de fer $Fe(OH)_2$ et d'hydroxyde de nickel $Ni(OH)_2$).

A l'anode (l'électrode de fer) : $Fe(OH)_2 + 2e^- \longrightarrow Fe + 2\,OH^-$

A la cathode (l'électrode de nickel) : $Ni(OH)_2 + OH^- \longrightarrow NiO_2H + H_2O + e^-$

La réaction globale est : $Fe(OH)_2 + 2\,Ni(OH)_2 \longrightarrow Fe + 2\,NiO_2H + 2\,H_2O$

Lors de la décharge.

A l'anode : $Fe + 2\,OH^- \longrightarrow Fe(OH)_2 + 2e^-$

A la cathode : $NiO_2H + H_2O + e^- \longrightarrow Ni(OH)_2 + OH^-$

La réaction globale est : $Fe + 2\,NiO_2H + 2\,H_2O \longrightarrow Fe(OH)_2 + 2\,Ni(OH)_2$

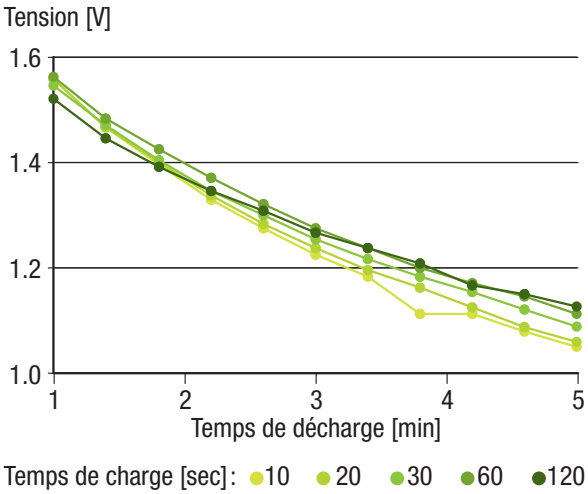
Une fois l'accumulateur déchargé, les électrodes sont à nouveau recouvertes d'hydroxyde de fer et de nickel.

Etude de l'accumulateur d'Edison

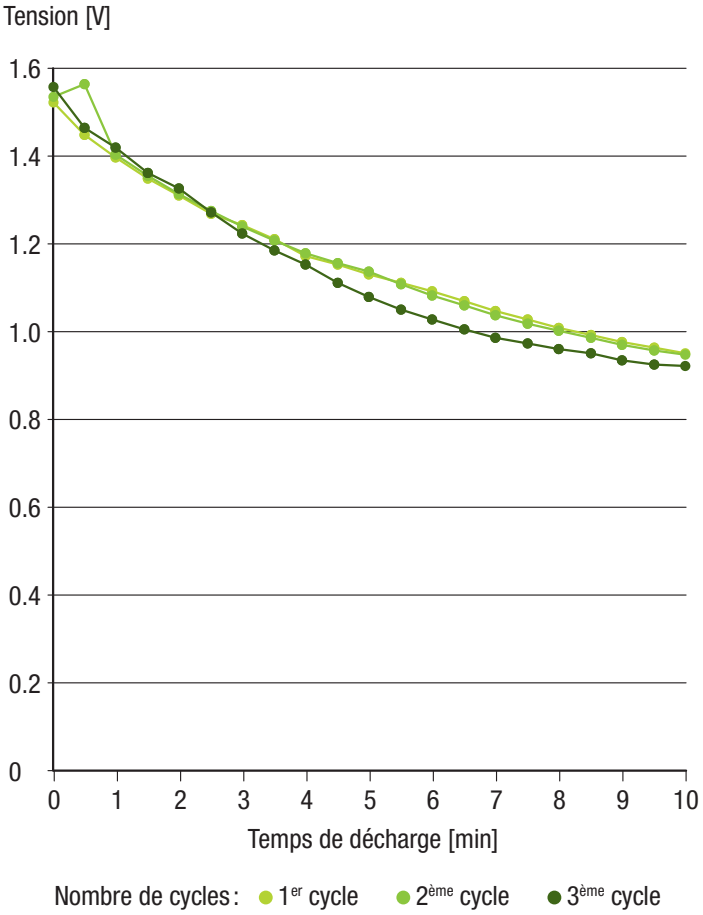
(peut servir de base à des TP pour des élèves motivés par la science ou la physique)

Influence du temps de charge (charge à 4.5 V)

Temps de décharge [min]	Tension [V] en fonction du temps de charge				
	10 sec	20 sec	30 sec	60 sec	120 sec
0	1,558	1,558	1,548	1,563	1,521
0,5	1,465	1,467	1,471	1,485	1,446
1	1,395	1,400	1,406	1,427	1,394
1,5	1,328	1,338	1,348	1,371	1,346
2	1,274	1,284	1,301	1,322	1,309
2,5	1,225	1,237	1,257	1,278	1,268
3	1,186	1,195	1,217	1,238	1,240
3,5	1,115	1,164	1,183	1,201	1,209
4	1,113	1,127	1,156	1,172	1,170
4,5	1,079	1,091	1,124	1,148	1,150
5	1,051	1,061	1,090	1,114	1,128



Cet accumulateur se charge très vite, en quelques secondes, mais il se décharge aussi très vite: au bout de 5 minutes, il a perdu 30% de sa charge.

Influence du nombre de cycles de charge / décharge (charge à 4.5 V pendant 1 minute)

Temps de décharge [min]	Tension [V] en fonction du nombre de cycles		
	1	2	3
0	1,521	1,532	1,555
0,5	1,446	1,560	1,462
1	1,394	1,401	1,416
1,5	1,346	1,354	1,360
2	1,309	1,313	1,325
2,5	1,268	1,273	1,270
3	1,240	1,239	1,223
3,5	1,209	1,205	1,184
4	1,170	1,178	1,151
4,5	1,150	1,155	1,110
5	1,128	1,134	1,077
5,5	1,109	1,106	1,050
6	1,090	1,080	1,025
6,5	1,067	1,057	1,004
7	1,046	1,037	0,986
7,5	1,026	1,018	0,971
8	1,008	1,001	0,958
8,5	0,991	0,984	0,948
9	0,976	0,969	0,932
9,5	0,961	0,957	0,925
10	0,948	0,945	0,920