

**Remarque**

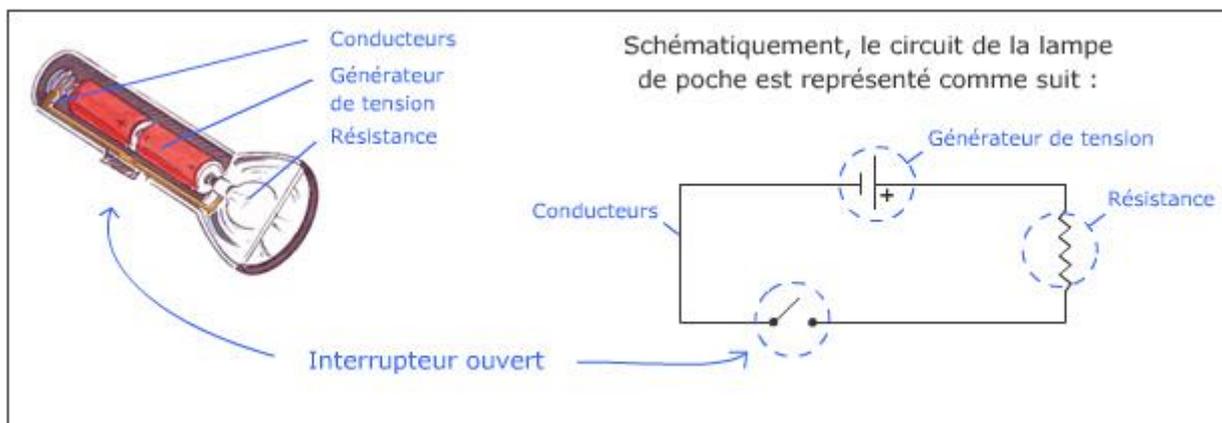
Toutes les informations de cette page sont disponibles en version animée (en Flash) à l'adresse suivante : <http://www.bbemg.be/fr/index-cem/electricite-champs/notions-electricite.html>

**Introduction**

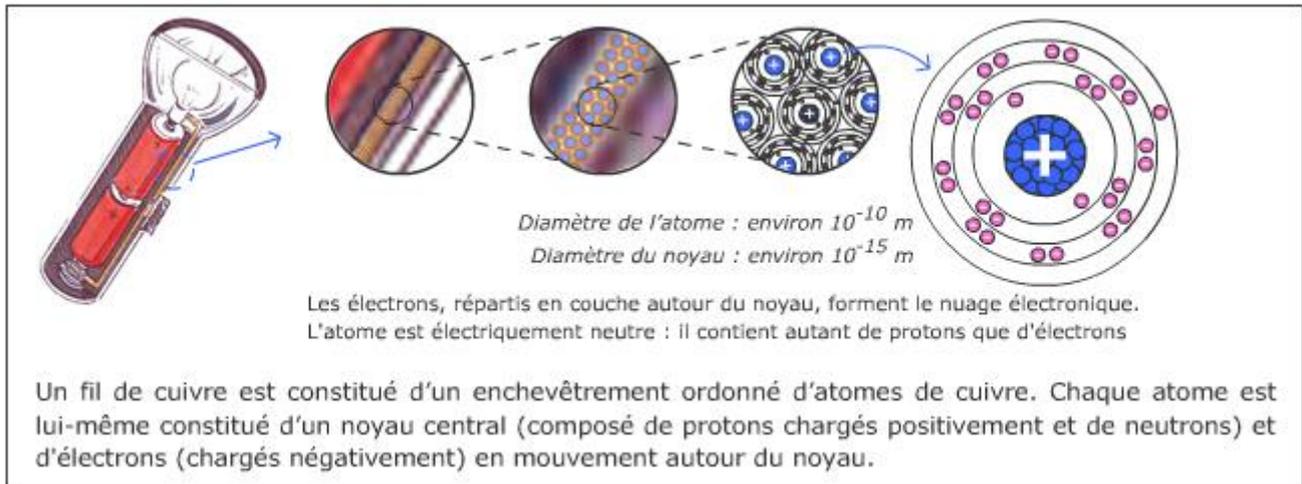
Nous utilisons quotidiennement de nombreuses formes d'énergie : le pétrole, le vent, l'eau, le soleil sont des vecteurs d'énergie, au même titre que l'énergie de notre propre corps et celle des animaux. Ces énergies permettent d'effectuer un travail (par exemple : un mouvement, de la lumière ou de la chaleur).

Parmi ces énergies, il en est une qui utilise l'énergie des électrons : c'est l'électricité. Sa fabrication, son transport et son utilisation sont possibles grâce aux caractéristiques de l'électromagnétisme. L'électricité et l'électromagnétisme sont intimement liés. Dans ce module, nous vous proposons de (re)découvrir des notions d'électricité à avoir en tête afin d'aborder sereinement le domaine de l'électromagnétisme et ses champs électriques et magnétiques.

Nous illustrons ces notions à l'aide d'un premier circuit électrique très simple : celui d'une lampe de poche.

**Le courant électrique**

Pour bien comprendre l'origine du courant électrique, il est nécessaire d'entrer au cœur des fils de cuivre constituant le circuit de la lampe de poche. Imaginons donc une super loupe nous permettant de voir l'infiniment petit.



Quand la lampe est éteinte, il règne une agitation naturelle et des mouvements désordonnés dans les lamelles de cuivre.

En fonctionnement, les mouvements sont coordonnés. Ce sont ces mouvements qui sont à l'origine du courant électrique.



Les particules en mouvement sont les électrons.

Chaque électron possède une charge électrique. L'intensité du courant électrique en une section du circuit correspond à la quantité de charges électriques qui traversent cette surface en une seconde.

$$\text{Intensité du courant électrique (en ampère, A)} \leftarrow I = \frac{q}{t}$$

Charge électrique (en coulomb, C)

Temps (en seconde, s)

La charge électrique d'un électron est égale à  $1,6 \times 10^{-19}$  C. A partir de la formule, on peut dire qu'un courant de 1 A équivaut au passage de  $6,25 \times 10^{18}$  électrons par seconde :

La charge électrique  $q$  est égale à  $1,6 \times 10^{-19}$  C multiplié par le nombre d'électrons  $n$ .

Donc,  $I = \frac{1,6 \times 10^{-19} \text{ C} \times n}{t}$

Après transformation de la formule, on obtient  $n = \frac{I \times t}{1,6 \times 10^{-19} \text{ C}}$

Si  $I = 1$  A et  $t = 1$  sec, alors  $n = 6,25 \times 10^{18}$  électrons

L'intensité du courant électrique se mesure à l'aide d'un ampèremètre. Il en existe différents modèles. Voyons-en ici le principe général:



**Comment mesurer un courant à l'aide d'un ampèremètre ?**

- L'ampèremètre se place en série dans le circuit
- Il faut tenir compte du sens du courant
- Il peut se placer n'importe où dans le circuit
- Dans notre lampe de poche, l'intensité du courant est de 700 mA

Le circuit de la lampe de poche

L'intensité du courant électrique est :

- de quelques centaines de milliampères (mA) dans une lampe de poche,
- de l'ordre de quelques ampères (A) dans un appareil électroménager,
- de l'ordre de plusieurs centaines d'ampères dans une ligne à haute tension.

**Remarque :**

L'intensité du courant joue un rôle important dans la gravité de l'électrocution, mais d'autres facteurs doivent également être pris en compte. En effet, le risque d'électrocution dépend de la tension de la source touchée et de la résistance que notre corps offre au passage du courant.

Cette tension dans la lampe de poche alimentée par 2 piles de 1,5 V est de 3 V. La résistance électrique de notre peau étant élevée, les courants sont extrêmement faibles.

D'autres facteurs entrent également en jeu dans la gravité d'une électrocution, comme par exemple, la fréquence de la tension. Nous présenterons plus longuement les différentes notions dans les modules suivants.

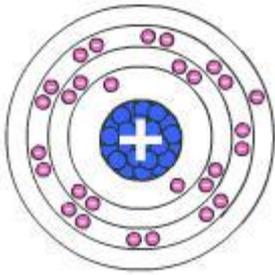
## Matériaux conducteurs et isolants

Dans notre lampe de poche, le courant électrique circule dans des fils en cuivre : le cuivre est un matériau conducteur de l'électricité. Le risque d'électrocution étant inexistant, les fils ne sont pas recouverts d'un matériau isolant protecteur (par exemple du PVC), comme c'est le cas pour tous les câbles électriques raccordés au réseau.

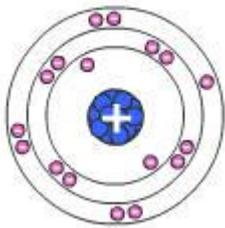
Voyons d'où vient la différence entre les matériaux conducteurs et les matériaux isolants.

Les propriétés chimiques, physiques et électriques d'un atome ou d'une molécule sont liées au nombre d'électrons et à leur répartition sur différentes couches (voir le tableau de Mendeleïev et les explications complémentaires en annexe).

Les électrons de la couche la plus externe, appelée la couche de valence, participent aux liaisons entre les atomes. Elle contient 8 électrons au maximum. C'est le nombre d'électrons dans la couche de valence qui permet de distinguer un conducteur d'un isolant.



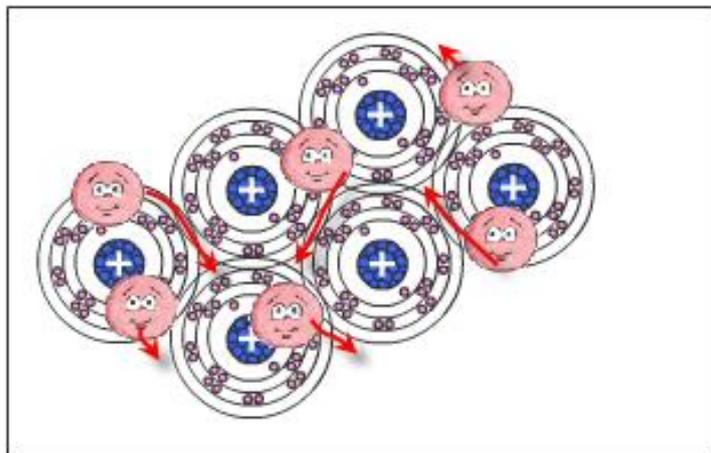
Si moins de 4 électrons sont présents dans la couche de valence (un seul électron dans l'exemple ci-contre), ils seront libres de se déplacer entre les atomes et ils participeront à la conduction du courant. Le matériau est conducteur de l'électricité.



Si plus de 4 électrons sont présents dans la couche de valence (7 électrons dans l'exemple ci-contre), ces électrons sont alors plus étroitement liés à leur atome/molécule et ils sont impliqués dans des liaisons plus fortes avec les atomes (ou molécules) voisins. Il n'y a donc pas ou peu d'électrons libres, donc pas ou peu de transfert d'électrons entre les atomes/molécules; dans un isolant, les électrons ne peuvent se déplacer dans le matériau, mais la séparation des charges positives et négatives est possible. Les isolants jouent un rôle important en électricité statique. Le matériau est un isolant électrique.

L'atome de cuivre constituant le circuit électrique de la lampe de poche possède 29 électrons.

Sa couche de valence contient un électron. Cet électron est libre de circuler d'un atome de cuivre à l'autre. C'est cet électron qui participe à la conduction du courant électrique.



L'or, le fer, ou encore l'aluminium sont des exemples de matériaux conducteurs.

Le PVC, ou polychlorure de vinyle, est composé d'une chaîne d'atomes de carbone, associée à des atomes d'hydrogène et de chlore (cf. figure ci-dessous). Les électrons des couches de valence des trois atomes sont fortement impliqués dans les liaisons intermoléculaires : ils ne se déplacent pas.

Le PVC (ou polychlorure de vinyle), contrairement au cuivre, est constitué d'une succession organisée d'atomes différents: des atomes de carbone, d'hydrogène et de chlore.



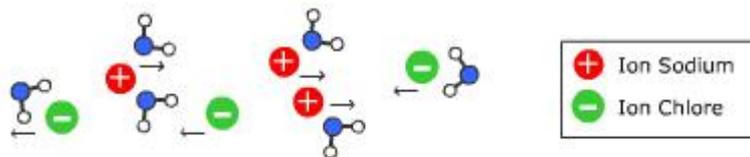
- Atome de carbone
- Atome d'Hydrogène
- Atome de Chlore

Le bois sec, le papier, la porcelaine, le verre, l'eau pure ou encore la glace sont des exemples de matériaux isolants. L'isolant nous évite des contacts intempestifs avec les parties conductrices : notre corps étant conducteur de l'électricité, une détérioration de l'isolant entraînerait un risque d'électrocution.

Dans un fil de cuivre, ce sont les électrons qui participent directement à la conduction du courant. Dans un liquide, ce sont les ions. Un ion est un atome ayant soit gagné (ion négatif), soit perdu un électron (ion positif).

L'eau pure, tout comme la glace, est un bon isolant électrique : les deux atomes d'hydrogène sont fortement liés à l'atome d'oxygène (liaison covalente), il n'y a ni électrons libres, ni ions ... et donc pas de conduction de l'électricité.

Par contre, des "impuretés" telles que le sel ou le plomb, par exemple, la rendent conductrices : ce sont ces éléments, sous forme d'ions, qui apportent les charges nécessaires à la conduction du courant.



L'eau qu'elle soit du robinet, conditionnée en bouteille ou présente dans nos rivières transporte donc le courant électrique. Ce sont également des ions qui sont responsables de la conduction électrique du corps humain.

		<p>Les molécules d'eau liquide ne restent pas figées les unes par rapport aux autres. Elles se déplacent et les liaisons hydrogènes se défont et se reforment entre les molécules.</p>
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: blue;">●</span> Atome d'oxygène</li> <li><span style="color: white; border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 2px;">○</span> Atome d'hydrogène</li> <li> Molécule d'eau (H<sub>2</sub>O)</li> <li><span style="color: red;">—</span> Liaison hydrogène entre les molécules d'eau</li> </ul> </div>		<p>Sous forme de glace, les molécules d'eau sont organisées en un réseau cristallin. Les liaisons hydrogènes sont omniprésentes.</p>
		<p>Inversement, sous forme de vapeur, les molécules d'eau sont libres les unes par rapport aux autres.</p>

Au niveau atomique, les notions de conducteurs et d'isolants sont complexes. L'annexe "Matériaux conducteurs et isolants" vous permettra d'aller plus loin dans la compréhension des différences entre ces matériaux.

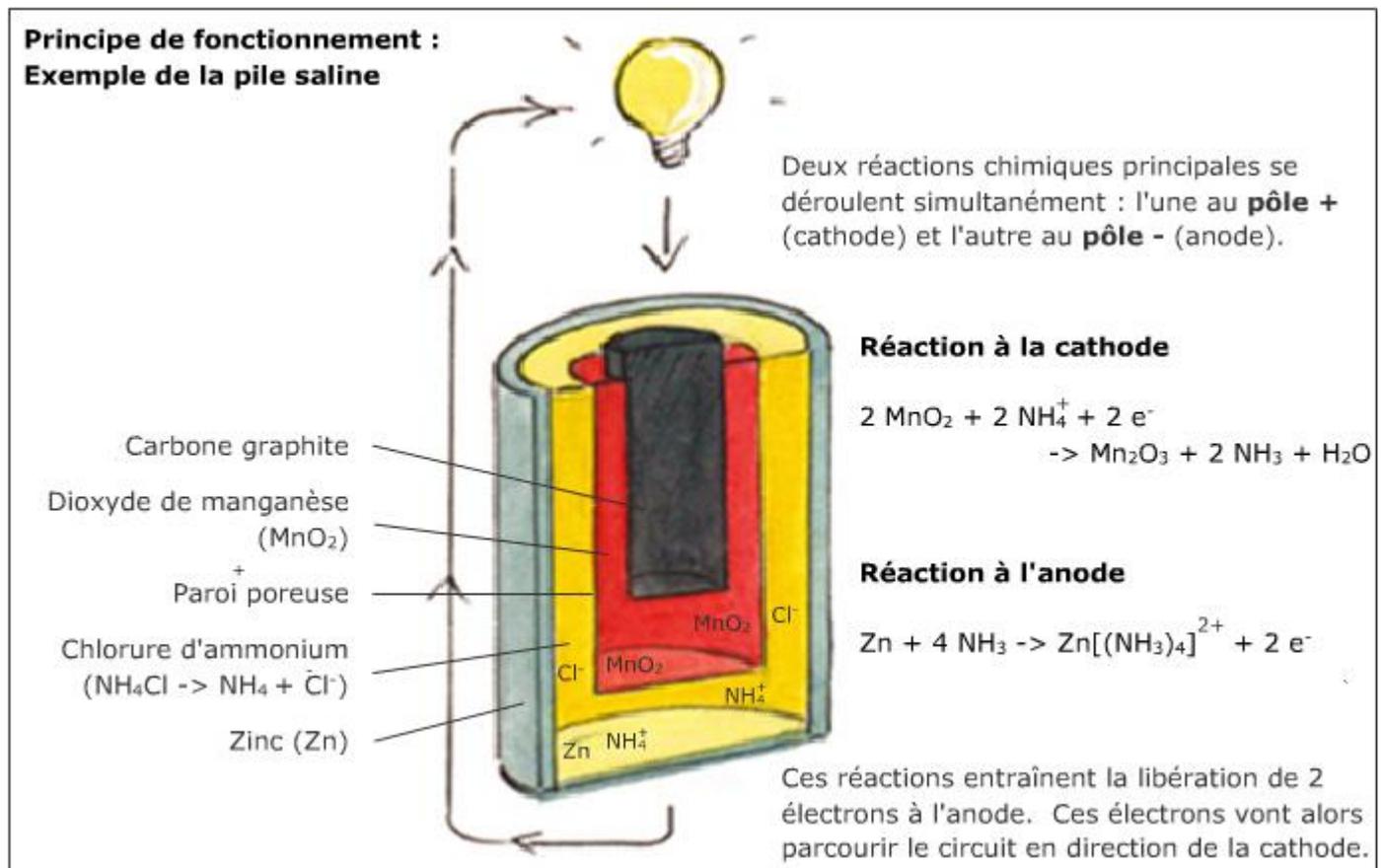
**Remarque :** Les matériaux semi-conducteurs ont des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants. Le lecteur intéressé trouvera quelques informations utiles en annexe.

## Les générateurs de tension

Les générateurs électriques sont des dispositifs permettant de produire de l'énergie électrique à partir d'une autre forme d'énergie. Nous l'avons vu, quand la lampe de poche est éteinte, les mouvements des électrons libres dans le fil de cuivre sont désordonnés. Lorsque la lampe de poche est allumée, il en va tout autrement : les déplacements des électrons sont orientés dans la même direction... ils se déplacent du pôle négatif de la pile à son pôle positif (\*).

(\*) C'est le sens réel de déplacement des électrons. Toutefois, les électriciens utilisent le sens conventionnel où le courant se déplace de la borne + à la borne -. Ce sens conventionnel vient du fait que les physiciens du XIXème siècle ne connaissant pas la structure de la matière, ont postulé que le courant correspondait à un déplacement de charges positives.

Les réactions chimiques qui se passent dans la pile permettent aux électrons d'acquérir l'énergie nécessaire pour parcourir le circuit de la lampe de poche. Cette énergie, c'est le potentiel électrique. La différence de potentiel entre le pôle + et le pôle - de la pile est maintenue jusqu'à épuisement des réactifs.



Pour bien comprendre ce qu'est le potentiel électrique, faisons une comparaison entre l'eau dans un château d'eau et les charges électriques dans la pile de la lampe de poche.

"Et si on disait que ..."

Le potentiel électrique, c'est la différence d'altitude entre le niveau supérieur de l'eau dans le réservoir et le tuyau d'arrosage.

Les piles seraient le château d'eau.

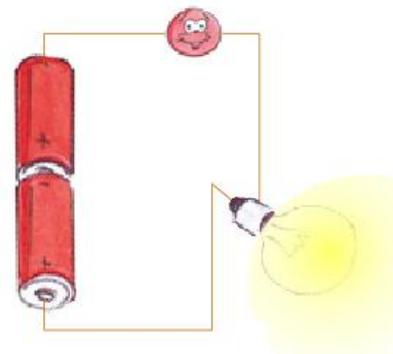
Les électrons seraient les molécules d'eau.

L'intensité du courant serait le débit d'eau à la sortie du tuyau d'arrosage.

Le réservoir est complètement rempli. Les molécules d'eau dévalent à toute allure du réservoir. Le débit d'eau est maximal.



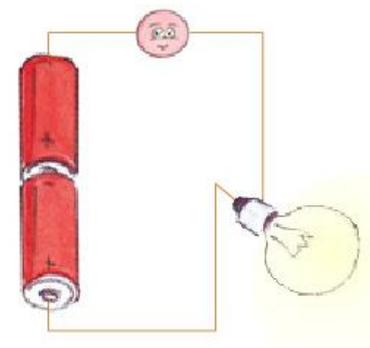
Les piles sont neuves, elles contiennent les réactifs nécessaires. A la sortie de la pile, les électrons sont nombreux et ils possèdent de l'énergie en suffisance pour parcourir le circuit. L'intensité est maximale : l'ampoule brille de tout son éclat.



Le réservoir est presque vide. Le débit d'eau est plus faible.



Les piles sont usées, les réactions chimiques ne se produisent plus. Les électrons n'ont plus suffisamment d'énergie pour parcourir le circuit : l'ampoule s'éteint.



La différence de potentiel électrique entre deux points d'un circuit est exprimée en volts (V).

Une des piles de la lampe de poche est capable de maintenir une différence de potentiel de 1,5 V entre ses pôles + et - : c'est sa force électromotrice (f.é.m.). La différence de potentiel est faible : la pile est un générateur basse tension (\*).

(\*) "Tension/potentiel électrique", "différence de potentiel", et même "force électromotrice"... comment s'y retrouver dans ce vocabulaire hétéroclite qui semble pourtant désigner un même concept !

Un peu de vocabulaire !

**Le potentiel électrique**, c'est l'énergie potentielle électrique par unité de charge.

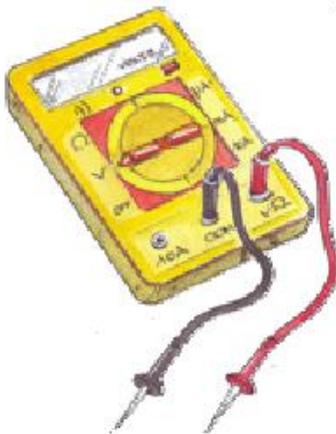
**La force électromotrice** (f.é.m.) désigne souvent la tension délivrée par un générateur électrique.

**La tension électrique** représente l'évolution du champ électrique le long d'un circuit :

- en régime stationnaire, c'est à dire lorsque les conditions de fonctionnement restent stables, la tension électrique est égale à la différence de potentiel,
- en régime variable, c'est mathématiquement plus complexe ! Nous n'entrerons pas plus avant dans ces considérations dans le cadre de ce module.

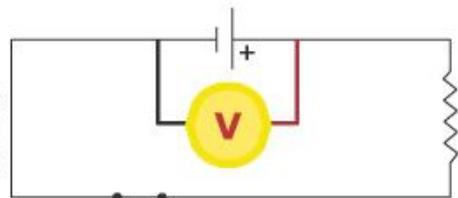
Le circuit de la lampe de poche, alimenté par 2 piles de 1,5 V, a une différence de potentiel de 3 V. La différence de potentiel entre deux points est associée à l'énergie qu'il faut à un électron pour se déplacer entre ces deux points.

La tension se mesure à l'aide d'un voltmètre. Il en existe différents modèles. Voyons-en ici le principe général :



#### Comment mesurer une tension à l'aide d'un voltmètre ?

- Le voltmètre se place en parallèle dans le circuit
- Il faut tenir compte du sens du courant
- Il faut le placer aux bornes d'un élément électrique. S'il est branché sur les fils de cuivre, il indiquera 0
- Dans notre lampe de poche, la tension est de 3 V



La tension est :

- de l'ordre de quelques volts (V) dans un circuit électronique et dans une lampe de poche,
- de 230 V entre la phase et le neutre de nos prises électriques (120 V aux USA)
- de 15 à 380 kilovolts (kV) entre les phases d'une ligne à haute tension.

**Remarque :**

Le potentiel, aussi élevé soit-il, n'est pas un facteur de risque d'électrocution. C'est de la différence de potentiel qu'il faut se prémunir.

Pour s'en convaincre, prenons le cas d'un oiseau posé sur une ligne à haute tension.

Pourquoi ne se fait-il pas électrocuter ?

Pour y avoir électrocution, il faut passage d'un courant et donc une différence de potentiel entre deux points. Les deux pattes de l'oiseau étant sur le même câble électrique, elles sont au même potentiel. Par contre, si en battant des ailes, l'oiseau touche un autre câble, il y aura une différence de potentiel entre son aile et ses pattes et un passage de courant. Il en est de même si l'oiseau est simultanément en contact avec le pylône et le câble (le pylône est isolé des câbles et relié à la terre, il est donc au potentiel de la terre).

Ce qui est dangereux ce n'est pas le potentiel auquel on se trouve, mais la différence de potentiel car l'intensité du courant qui traverse le corps est proportionnelle à la différence de potentiel entre les points de contact.

Un autre exemple est l'expérience des cheveux qui se dressent sur la tête : notre corps est également porté à une tension très élevée, sans que nous en ressentions des effets.



(Source: Maison de la Science, Université de Liège)

## La tension continue et alternative

Il existe deux grandes familles de générateurs électriques : à tension continue et à tension alternative.

On parle de tension continue (ou de courant continu) lorsque les électrons, s'écoulent toujours dans le même sens, de la borne négative à la borne positive du générateur. C'est le cas de la lampe de poche. Les piles sont des générateurs de tension continue.

La situation est différente pour les appareils branchés sur le réseau électrique : dans ce dernier, les électrons changent leur sens de déplacement 100 fois (120 fois aux USA) par seconde : on parle de tension alternative à la fréquence de 50 Hz (hertz). En 50 Hz, la tension passe alternativement par une valeur maximale positive, puis par zéro, puis par une valeur maximale négative, puis par zéro et ainsi de suite... 50 cycles par seconde (forme sinusoïdale).

### Que se passe-t-il au niveau des électrons ?

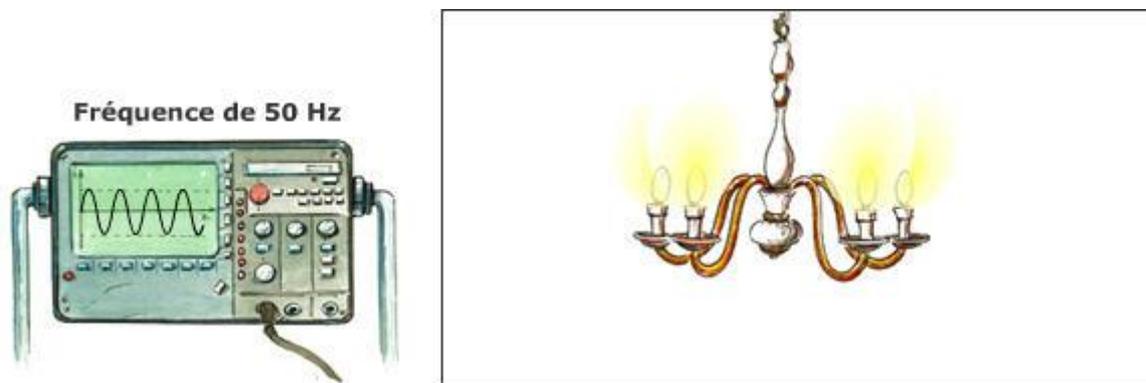
Quand nous activons un interrupteur, la lumière s'allume instantanément. De là à dire que le courant (et donc les électrons) se déplace à la vitesse de la lumière, il n'y a qu'un pas ... que nous ne franchirons pas en réfléchissant au niveau atomique.

Les électrons ne se déplacent dans le sens du courant que d'un petit mètre par heure, en courant continu. Cependant, lorsque les électrons « poussés » par le générateur ou l'alternateur entrent dans le circuit électrique, il se produit des chocs en chaîne entre les électrons. De proche en proche, le mouvement se déplace effectivement à la vitesse de la lumière... mais ça n'a rien à voir avec la vitesse des électrons dans le sens du courant

**Remarque :** les électrons se déplacent en fait très rapidement, mais en zig zag : leur trajectoire n'est pas rectiligne, mais déviées par les chocs qui se produisent lorsqu'ils se rencontrent.

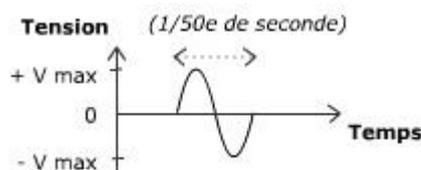
En courant alternatif, les électrons, oscillant à 50 Hz, restent quasiment à leur place. Leur mouvement ressemble à une vibration.

La fréquence peut être visualisée à l'aide d'un oscilloscope. Cet appareil est un voltmètre perfectionné qui permet de suivre l'évolution au cours du temps de la tension d'un signal électrique. Dans l'illustration ci-dessous, nous voyons que la tension du lustre évolue d'une manière sinusoïdale à une fréquence de 50 Hz.



### Evolution d'une manière sinusoïdale à une fréquence de 50 Hz?

Cela signifie que la tension fait 50 fois par seconde le cycle "valeur positive maximale / 0 V / valeur négative maximale / 0 V".

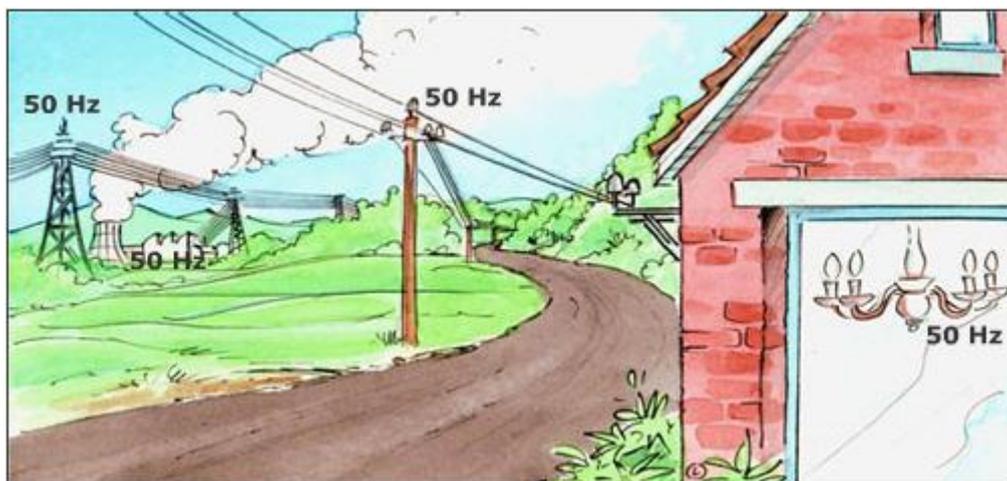


**Attention :** L'appareil électrique qui reçoit la tension alternative n'a pas besoin des maxima ou minima ni des valeurs nulles. C'est pourquoi, on a défini une grandeur utile dite efficace. La valeur efficace est une image de l'équivalent en grandeur continue d'une grandeur non continue. La valeur efficace d'une grandeur oscillant de manière sinusoïdale est équivalente à sa valeur maximale divisée par la racine carrée de 2 c'est-à-dire 1,41. Les valeurs des tensions alternatives indiquées sur les alimentations ou sur les récepteurs usuels sont des valeurs efficaces.

230 V entre la phase et le neutre de nos prises électriques est la valeur efficace de la tension. Les valeurs maximales ou valeurs crêtes sont de +325 et - 325 V.

A la fréquence du réseau électrique (50 oscillations par seconde), nous ne percevons pas les allumages successifs de la lampe, car le filament n'a pas le temps de refroidir, et donc de s'éteindre. Le phénomène de la persistance rétinienne fait également que notre œil n'est pas sensible à des variations aussi rapides.

La tension alternative est produite dans les centrales électriques. Elle est conservée tout au long du trajet de l'électricité vers nos habitations.



La production de l'électricité à une fréquence de 50 Hz se fait dans les centrales à l'aide d'un générateur haute tension. Il est constitué d'une turbine et d'un alternateur :

- La turbine est mise en rotation par l'action de l'eau (centrale hydroélectrique), du vent (éolienne), de la vapeur (centrale thermique, Turbine-Gaz-Vapeur, nucléaire)... L'énergie mécanique acquise est convertie en énergie électrique au niveau de l'alternateur.
- L'alternateur est composé d'une partie fixe, le stator, et d'une partie mobile, le rotor. On peut dire, d'une manière simplifiée, que la vitesse de rotation du rotor entraîne la génération au niveau du stator d'une tension sinusoïdale à la fréquence de 50 Hz.

## L'énergie et la puissance

### L'énergie

L'énergie nécessaire à faire fonctionner l'ampoule et tout appareil électrique est apportée par les charges qui les traversent et par le potentiel électrique de ces charges :

$$E = q \cdot V$$

Diagramme illustrant la relation entre l'énergie, la charge électrique et le potentiel électrique :

- Energie** (en joule, J) est représenté à gauche.
- Potentiel électrique** (en volt, V) est représenté à droite.
- Charge électrique** (en coulomb, C) est représenté en bas.
- Des flèches bleues indiquent que l'énergie est le produit de la charge et du potentiel.

L'énergie abandonnée par une charge électrique dans un appareil électrique est proportionnelle à la différence de son potentiel électrique mesuré à l'entrée et à la sortie de l'appareil. L'énergie d'un électron à la sortie d'une pile de 1,5 V sera deux fois plus faible qu'à la sortie de deux piles de 1,5 V.

L'unité officielle de l'énergie est le joule.

Ce que reprend notre facture d'électricité, c'est l'énergie consommée sur une certaine période de temps,

qui dépend du déplacement d'une certaine quantité de charges et du potentiel électrique. Notre consommation électrique est calculée en kWh.

D'où vient le calcul de la consommation d'électricité en kWh?

L'énergie  $E$  libérée par une charge électrique  $q$  subissant une différence de potentiel  $V$  est exprimée par  **$E = q \cdot V$**

Or, nous avons vu que l'intensité du courant est égale à la charge qui parcourt un circuit par unité de temps :  **$I = q / t$**

On a donc :  $E = I \cdot t \cdot V$

Cette formule montre que l'énergie dépend du courant, du temps et de la différence de potentiel.

Puisque la puissance dépend de la tension et du courant ( **$P = V \cdot I$** , cfr écran suivant), on a :

$$E = P \cdot t \text{ (en W} \cdot \text{h ou kW} \cdot \text{h)}$$

Prenons un exemple :

Un lustre de 4 ampoules de 60 W allumé pendant 2 heures consommera  $4 \cdot 60 \text{ W} \cdot 2\text{h} = 480 \text{ Wh}$ . Sur la même période, la lampe de poche consommera 4,2 Wh.

### Remarque :

Dans l'ampoule à incandescence, l'énergie électrique est transformée en énergie lumineuse et en énergie thermique (chaleur). Il n'y a pas à proprement parler de pertes d'énergie, mais plutôt de transformation d'une énergie en une autre. Toutefois, nous avons l'habitude de parler de "perte d'énergie" quand une partie de l'énergie n'est pas utilisée pour la fonction première de l'appareil. Ici, on dira que l'ampoule perd de l'énergie lumineuse au profit de l'énergie thermique.

Une ampoule basse énergie perd moins d'énergie thermique : elle chauffe moins. Le rendement de l'ampoule dépend du rapport entre les énergies lumineuses et thermique. Nous y reviendrons.

### La puissance

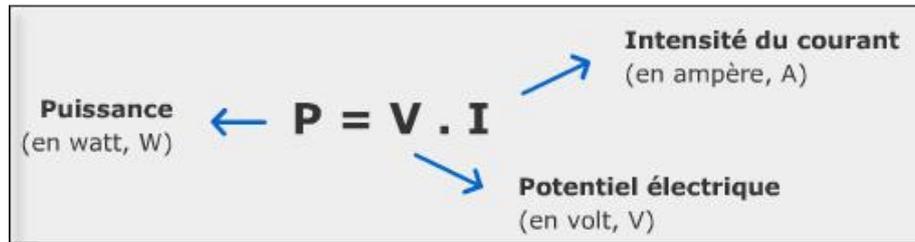
La puissance d'un appareil électrique est définie comme étant le débit d'énergie, c'est-à-dire l'énergie consommée par unité de temps. Elle s'exprime en watt.

$$\text{Puissance (en watt, W)} \leftarrow P = \frac{E}{t} \rightarrow \begin{array}{l} \text{Energie (en joule, J)} \\ \text{Temps (en seconde, s)} \end{array}$$

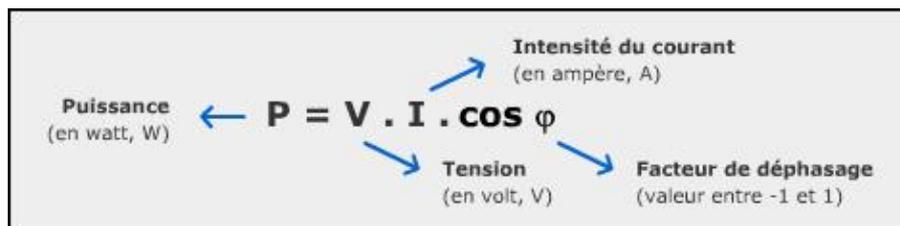
La puissance d'un appareil chauffant est la quantité de chaleur que l'appareil est capable de fournir par unité de temps. Un four électrique de 2200 watts consomme chaque seconde une quantité d'énergie de 2200 joules.

La puissance d'un appareil avec un moteur permet de connaître le travail que le moteur peut effectuer par unité de temps. Une foreuse de 500 W ou 500 joules/seconde percera moins facilement un mur de pierre qu'une autre de 1000 W ou 1000 joules/seconde.

En courant continu (\*), la puissance dépend de la tension (V) et du courant (I) par la relation :



(\*) En courant alternatif, le calcul de la puissance est un peu différent: il faut tenir compte du déphasage entre la tension et le courant. En fonction de l'appareil alimenté (par exemple un moteur), les deux grandeurs ne sont pas toujours maximales en même temps. La formule devient:



Nous y reviendrons quand nous décrirons le fonctionnement des moteurs.

Prenons un exemple : dans notre lampe de poche, sous une différence de potentiel de 3 V (2 piles de 1,5 V), l'ampoule sera parcourue par un courant de 0,7 A. La puissance est donc de 2,1 W. L'intensité lumineuse dépend de la puissance électrique.

La puissance est apportée par le générateur électrique : les piles ou les accumulateurs dans la lampe de poche, l'alternateur des centrales électriques pour le lustre et tous les appareils raccordés sur le réseau.

### Puissance des piles et des accumulateurs

Dans les lampes de poche, on utilise souvent des piles alcalines ou des accumulateurs. La puissance de ces générateurs est de l'ordre de quelques watts à quelques dizaines de watts.

Le choix d'un type de piles ou d'accumulateurs par rapport à un autre va dépendre de leurs caractéristiques respectives qui devront être en adéquation avec l'usage que nous voulons en faire.

Parmi les caractéristiques électriques, retenons leur tension (en V), leur capacité (en mA.h), et le courant maximal qu'elles peuvent fournir (en A). D'autres caractéristiques telles que leur encombrement et leur poids ou, pour les accumulateurs, le temps d'autodécharge ou le nombre de cycles de charge/décharge permis peuvent aussi être déterminantes dans le choix de l'un par rapport à l'autre.

Les caractéristiques des piles et accumulateurs dépendent principalement des réactifs en présence.

## Puissance du réseau

En 2004, la capacité de production en Belgique atteignait plus de 15 000 mégawatts (Source : Synergrid)

		* Chiffres provisoires				
		2004*	2003	2002	1999	1994
Le tableau ci-contre donne une idée de la capacité de production par source d'énergie primaire (en MW ou megawatts, càd des millions de watts)	Nucléaire	5.801,5	5.761,0	5.761,0	5.713,0	5.528,0
	Thermique classique	6.800,3	6.800,1	6.845,9	7.226,4	7.427,5
	Biogaz	25,9	25,9	25,9	11,8	1,8
	Déchets et vapeur de récupération	201,3	200,1	196,9	147,1	124,0
	Cogénération	1.340,8	1.339,6	1.272,7	1.057,4	410,1
	Lac et fil de l'eau	107,6	107,6	106,0	97,0	95,5
	Pompage	1.307,0	1.307,0	1.307,0	1.307,0	1.307,0
	Eolienne	92,8	66,9	31,0	9,3	5,2
	<b>BELGIQUE</b>	<b>15.677,2</b>	<b>15.608,2</b>	<b>15.546,4</b>	<b>15.569,0</b>	<b>14.899,1</b>

L'électricité ne pouvant être stockée, la production doit s'adapter à la demande : la production doit être en équilibre avec la consommation. Les réseaux nationaux de transport de l'électricité sont interconnectés. L'interconnexion permet à chaque pays de faire face rapidement aux déséquilibres entre la production et la consommation : les pays s'échangent l'énergie électrique.

### Remarque :

Tout déséquilibre entre production et consommation se traduit par une modification de la vitesse de rotation des alternateurs des centrales électriques des réseaux interconnectés.

D'une manière simplifiée, on peut donc dire que l'équilibre entre la production et la consommation est contrôlé à l'aide de la fréquence (50 Hz en nos contrées). Un changement dans la fréquence indique un déséquilibre : si la fréquence dépasse les 50 Hz, cela signifie que la production est supérieure à la consommation; si elle descend en dessous de 50 Hz, la consommation est supérieure à la production. L'équilibre est traduit par une fluctuation très faible de la fréquence. Afin de conserver cet équilibre, la vitesse des alternateurs est ajustée en permanence en augmentant ou diminuant la rotation des turbines.

Nous y reviendrons plus longuement dans le module sur la production et le transport de l'électricité ("Trajet de l'électricité")

## La résistance

En continu (\*), la différence de potentiel électrique et le courant dans un matériau sont liés par la résistance électrique du matériau. Il s'agit de la loi d'Ohm :

$$\text{Potentiel électrique (en volt, V)} \leftarrow V = R \cdot I \rightarrow \text{Intensité du courant (en ampère, A)}$$

↗
**Résistance**  
 (en ohm, Ω)

(\* En alternatif, on ne parle pas de résistance, mais d'impédance. La loi d'Ohm devient :

$$\text{Potentiel électrique (en volt, V)} \leftarrow \mathbf{V = Z \cdot I} \rightarrow \text{Intensité du courant (en ampère, A)}$$

Impédance (en ohm,  $\Omega$ )

L'impédance électrique mesure l'opposition d'un circuit électrique au passage d'un courant alternatif sinusoïdal.

Nous y reviendrons quand nous parlerons des moteurs.

Pour une différence de potentiel identique, le déplacement des électrons ne sera pas identique dans tous les matériaux : un matériau plus résistant laissera moins facilement passer les électrons. Les matériaux résistent plus ou moins bien au passage du courant. Dans un matériau plus résistant, les électrons se cognent plus et sont ralentis. Ils perdent leur énergie. L'énergie perdue est transmise au matériau sous forme de chaleur.

La résistance d'un matériau dépend de plusieurs paramètres, selon la loi de Pouillet :

$$\text{Résistance (en ohm, } \Omega \text{)} \leftarrow \mathbf{R = \frac{\rho \cdot L}{S}} \rightarrow \text{Section (en mètre au carré, m}^2\text{)}$$

Résistivité (lettre grecque rho) (en ohm . mètre,  $\Omega \cdot m$ )      Longueur (en mètre, m)

- La résistivité (ou la nature) d'un matériau : plus elle est grande, plus il résistera au passage du courant
- La longueur : plus elle augmente, plus la résistance augmente
- La section : plus elle diminue, plus la résistance augmente

En fonction de l'application, on cherchera à obtenir une faible ou une forte résistance des matériaux conducteurs.

### Recherche d'une faible résistance

Cette recherche de faible résistance est particulièrement importante au niveau des câbles alimentant, par exemple, les gros appareils électroménagers : un câble trop résistant (au sens électrique du terme) encourrait le risque de surchauffer, entraînant éventuellement un risque d'électrocution (détérioration de l'isolant!) et un risque d'incendie.

Dans la lampe de poche, les pertes d'énergie sont extrêmement faibles au niveau du fil de cuivre. Il s'agit par contre de s'assurer de la qualité des contacts entre les piles et le fil : en cas de mauvais contact, la résistance peut devenir tellement importante qu'elle empêchera le courant de circuler.

### Recherche d'une forte résistance

Le principe de fonctionnement des ampoules à incandescence est basé sur la perte d'énergie thermique. Tout est mis en œuvre pour que les pertes

soient importantes au niveau du filament :

- il est composé de tungstène, un matériau présentant une résistivité supérieure à celle du cuivre et une température de fusion élevée (3410°C);
- il est relativement long : le filament de tungstène est enroulé en hélice, afin d'augmenter la longueur du filament, et donc également la quantité de lumière visible;
- il est très fin (pas trop fin cependant, au risque de fondre trop rapidement lors de l'échauffement).

Le filament présente donc une résistance au passage du courant. L'énergie électrique est transformée en chaleur. La chaleur est tellement intense que sans le vide d'air dans l'ampoule (ou la présence d'un gaz inerte), le filament se détériorerait et s'enflammerait.

Une grande partie du rayonnement d'incandescence des filaments de tungstène est émis dans l'infrarouge... qui chauffe sans éclairer.

Seuls quelques pourcents (5%) de l'énergie électrique sont transformés en lumière visible au niveau du filament, le reste est dissipé en chaleur. Les ampoules à incandescence sont finalement plus des appareils de chauffage que d'éclairage ! Il existe aujourd'hui d'autres types de lampes qui ne sont pas basées sur une dissipation thermique d'énergie (par exemple, les lampes à faible consommation, les LED...) ... nous y reviendrons dans le module "Usages de l'électricité".

## L'électricité statique

Jusqu'ici, nous avons parlé de l'électricité associée à un mouvement coordonné des électrons, mais il existe également une autre forme d'électricité : il s'agit de l'électricité dite statique car les électrons ne peuvent pas circuler. C'est le cas dans les matériaux isolants (\*) : quand on frotte les matériaux entre eux, les électrons de l'un sont arrachés et récupérés par l'autre.

(\*) C'est également le cas dans les matériaux conducteurs, lorsqu'ils sont isolés d'autres matériaux conducteurs. Les charges se répartissent alors uniformément sur l'ensemble du matériau conducteur. C'est par exemple ce qui se passe lorsque nous roulons en voiture par temps sec : la voiture se charge d'électricité statique. La carrosserie est conductrice, mais elle est isolée du sol par les pneus.

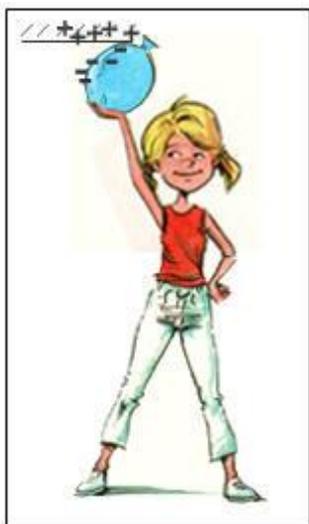
La quantité de charges échangées dépend des matériaux mis en contact, de leur surface, du pourcentage d'humidité... Certains matériaux ont une grande facilité à perdre des charges ou à en acquérir et donc à devenir respectivement plus positifs ou plus négatifs

Matériaux classés selon leur tendance à devenir plus positif à plus négatif :  
Fourrure de lapin – verre – nylon – laine - fourrure de chat – coton – soie - Dacron – polyvinylchloré – polyéthylène – caoutchouc – Téflon

### Remarque :

Le frottement n'est pas nécessaire pour provoquer un déplacement des charges d'un matériau vers un autre. En fait, le frottement ne fait qu'amplifier le déplacement de charges qui se fait naturellement lors d'un simple contact entre deux matériaux.

Prenons l'exemple du ballon de baudruche.



(1) le ballon, les cheveux sont neutres au départ (avant frottement), c'est-à-dire qu'ils contiennent autant de charges négatives que positives;

(2) le frottement entre les cheveux et le ballon produit un transfert d'électrons des cheveux au ballon : le ballon se charge négativement;

(3) lorsque ce ballon chargé négativement est approché du plafond, il va y modifier localement la répartition des charges : les charges positives du plafond se rapprochent du ballon alors que les charges négatives s'en éloignent. Le ballon colle au plafond par attraction électrostatique.

Le retour à la neutralité électrique du ballon se fait lentement : le ballon se décolle progressivement du mur.

La décharge peut prendre différentes formes selon la géométrie des objets mis en contact, la conductivité du milieu qui sépare les surfaces chargées et la conductivité des surfaces elles-mêmes. Dans notre exemple, l'humidité de l'air permet un écoulement des charges négatives du ballon vers les molécules d'eau contenues dans l'air. Si l'air est très sec, le ballon restera attiré plus longtemps.

Quand le retour à la neutralité électrique se produit de manière quasiment instantanée, on parle de décharge électrostatique.

Lors de la décharge, il se produit un équilibrage de potentiel entre les deux matériaux initialement portés à des tensions différentes en raison de l'accumulation de charges positives d'un côté et négatives de l'autre.

Qu'en est-il de la décharge que nous ressentons lorsque nous touchons la carrosserie en sortant de notre voiture, en particulier en période de gel\* ?

Le frottement de l'air sur la carrosserie pendant le roulage amène la voiture à se charger d'électricité statique. Les pneus étant isolants, la voiture sera portée à un potentiel électrique plus élevé que la terre. En tant qu'occupants de cette voiture, nous serons soumis à ce même potentiel.

En posant le pied par terre pour sortir de la voiture, si la résistance électrique de nos semelles n'est pas très grande, des charges vont s'écouler vers le sol, nous remplaçant ainsi au potentiel de la terre.

Si, après avoir posé le pied au sol, on approche la main de la carrosserie, les charges de la voiture vont s'écouler vers le sol par le chemin le plus simple pour elles, c'est-à-dire notre propre corps. Ce contact électrique peut s'établir un peu avant le contact physique du fait du claquage de l'air : un bon contact électrique avec la carrosserie (faible résistance) conjugué à une très petite surface de passage de courant (ici = la pointe des doigts) provoque un courant très intense (quelques ampères) et très localisé qui produit une sensation désagréable mais inoffensive. La décharge est quasi instantanée (quelque milliardième de seconde).

Si par contre, on touche la carrosserie avant de mettre le pied au sol, il y a très peu d'échanges de charges car notre potentiel est environ identique à celui de la voiture. Au moment de poser le pied au sol, toutes les charges excédentaires de notre corps et de la voiture vont s'écouler vers le sol. Aucune sensation ne sera ressentie au niveau de la main et du pied car le contact est déjà établi avec la carrosserie d'une part et avec la terre d'autre part.

(\* ) La voiture se charge plus fortement en électricité statique en période de gel car il y a généralement moins d'humidité dans l'air susceptible d'écouler les charges électriques.

## Et dans notre corps?

Dans les séquences précédentes, nous avons passé en revue les notions de courant, de matériaux conducteurs et isolants, de différence de potentiel, d'énergie et de puissance, de résistance, ... On peut également retrouver ces notions au niveau du corps humain car nous fonctionnons également à l'électricité !

En effet, le système nerveux, par exemple, est un formidable réseau électrique de communication. La communication entre le cerveau et le corps se fait à l'aide de signaux électriques et chimiques : l'électroencéphalogramme enregistre l'activité électrique de notre cerveau (EEG).

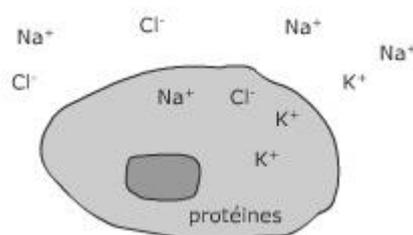
Le cœur possède des cellules spécialisées qui génèrent automatiquement des impulsions électriques. Ces dernières sont à l'origine de l'activité électrique dans les différentes cellules cardiaques, dont les cellules musculaires responsables de la contraction du cœur. L'électrocardiogramme (ECG) enregistre l'activité électrique globale de notre cœur.

Dans un fil de cuivre, c'est le mouvement des électrons qui est à l'origine du courant électrique. Dans le corps humain composé majoritairement d'eau, ce sont les ions qui jouent ce rôle.

La transmission du signal électrique d'une cellule à l'autre est le résultat d'une répartition différente des ions entre l'intérieur et l'extérieur des cellules.

Les concentrations des ions positifs et négatifs sont différentes de part et d'autre de la membrane cellulaire:

- les ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  sont plus nombreux à l'extérieur de la cellule,
- les ions  $\text{K}^+$  et les protéines chargées négativement sont plus nombreux à l'intérieur de la cellule.

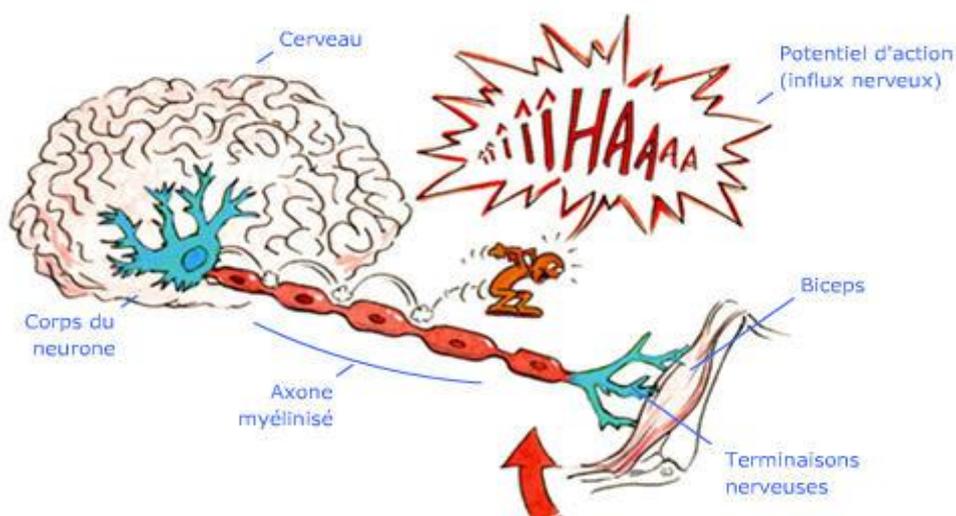


En plaçant un micro capteur à l'intérieur de la cellule et un autre à l'extérieur, on peut mesurer une différence de potentiel : au repos, l'intérieur de la cellule est plus négatif que l'extérieur (entre -20 et -100 mV). C'est le **potentiel de repos**.

En fonction des conditions de stimulation de la cellule, les ions traversent un peu, beaucoup ou pas du tout les membranes cellulaires. La différence de potentiel entre l'intérieur et l'extérieur de la cellule varie avec le déplacement des ions. Au delà d'un certain seuil, la cellule déclenche un potentiel d'action.

Les cellules excitables (comme les neurones, les cellules cardiaques ou musculaires) ont la capacité de faire varier rapidement les concentrations ioniques intra et extracellulaire, entraînant ainsi des cycles de dépolarisation et repolarisation. Il s'agit du **potentiel d'action**.

Dans le neurone illustré ci-dessous, le potentiel d'action déclenché dans le corps du neurone se propage au niveau de l'axone afin de prévenir le biceps qu'il doit se contracter.



Au niveau des terminaisons nerveuses en contact avec le muscle (les synapses), le signal électrique est traduit en un signal chimique : le potentiel d'action provoque la libération de molécules (des neurotransmetteurs), qui transmettent les informations au muscle.

Les potentiels d'action ont une intensité très faible mais ils parcourent par milliers et à chaque instant les neurones du corps humain. Leur vitesse de déplacement (\*) dépend des caractéristiques des axones, telles que leur section, la présence ou non d'une gaine de myéline...

(\*) Pour conduire les influx nerveux très rapidement, certains axones possèdent des atouts, tels que :

- une section plus grande, qui permet aux ions d'être plus libres et plus rapides dans leurs déplacements (ce qui rappelle ce que nous avons vu pour les résistances électriques!),
- une gaine de myéline qui enrobe l'axone : on dit que l'axone est myélinisé (voir l'illustration). Cette gaine est un isolant électrique. Au niveau des axones myélinisés, le potentiel d'action ne peut donc pas se propager de proche en proche. Il se propage par des sauts au niveau des zones, appelées les "Nœuds de Ranvier", où la myéline est plus fine ou absente. Cette conduction dite saltatoire entraîne une accélération de la conduction du potentiel d'action.

**Remarque :** Dans la sclérose en plaque, la gaine de myéline est détruite, ce qui provoque une diminution, voir une perte, de la conduction.

En cas de contact avec une source de tension (par exemple un câble électrique mal isolé), le corps est parcouru par un courant : on parle d'électrisation (ou d'électrocution en cas d'issue fatale). Le courant va chercher à gagner la terre en passant par le trajet offrant la résistance la plus faible possible.

La résistance du corps humain dépend notamment de la conductivité (ou de son inverse, la résistivité) des tissus traversés. Exemples de valeurs de résistance du corps humain (Source : Dawson et al, 2001)

Valeur de la résistance si le courant passe ...	... entre une main et un pied	... d'une main vers l'autre
Enfant de 1,10 m et 18 kg	1,9 kΩ	2,5 kΩ
Adulte de 1,77 m et 77 kg	1,2 kΩ	1,6 kΩ

Exemples de valeurs de conductivité de différents tissus (Source : Dawson et al, 1997)

	Conductivité en siemens/mètre (S/m)
Peau	0,1
Os	0,04
Masse grasse	0,04
Muscle	0,35
Coeur	0,1

**Remarque :** Plus la conductivité est grande, plus le tissu laisse facilement passer le courant. Les valeurs ci-contre montrent que les muscles sont de bons conducteurs par rapport aux os par exemple.

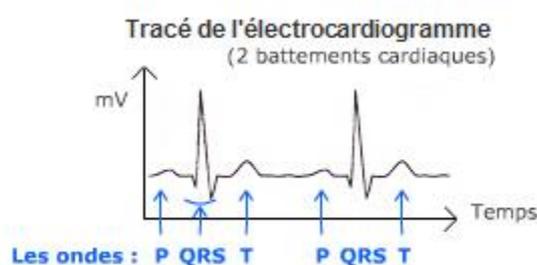
Ce courant va agir sur les muscles, exactement comme les potentiels d'action : les muscles vont se contracter, et même se tétaniser (\*), empêchant la victime de lâcher la source de tension.

(\*) Au delà de 40 contractions par seconde, le muscle n'a pas le temps de se relâcher : il est tétanisé. Une électrisation à 50 Hz peut donc provoquer une tétanisation. Cette dernière est tout à fait réversible dès que le contact avec la source de tension est rompu.

**Remarque :** La situation est différente au niveau du muscle cardiaque en raison de la durée plus importante de la période réfractaire de la contraction, c'est-à-dire de la période pendant laquelle le muscle cardiaque ne peut pas être ré-excité. Il ne peut donc se contracter jusqu'à la tétanisation.

Au niveau du cœur, l'électrisation peut vite devenir dramatique, surtout si elle a lieu au moment de l'onde T car le risque de fibrillation ventriculaire est très élevé pendant cette période, entraînant l'arrêt de la circulation sanguine. Le seuil de fibrillation ventriculaire est d'environ 50 mA maintenus pendant une seconde.

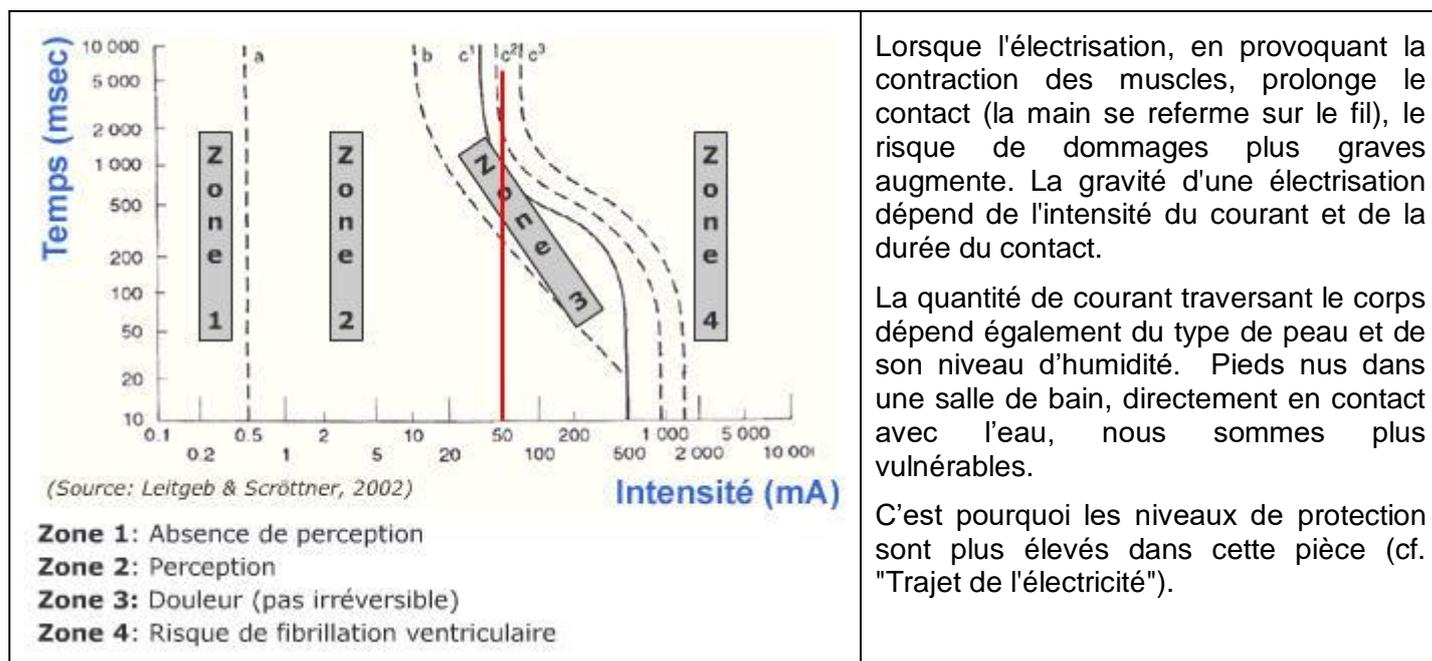
La fibrillation ventriculaire est un trouble du rythme cardiaque correspondant à la contraction rapide, désorganisée et inefficace des ventricules cardiaques.



L'onde T correspond au moment du cycle cardiaque où les ventricules se relâchent et où le sang entre dans les oreillettes. C'est le début du cycle cardiaque (voir le cycle complet dans la description de l'ECG).

Un autre danger de l'électrisation est le risque de brûlure : en se déplaçant dans le corps sous l'effet de la différence de potentiel, les ions produisent un échauffement, à la manière des électrons dans un fil de tungstène.

La gravité d'une électrisation dépend de l'intensité du courant et également de la durée du contact, du type de peau et de son niveau d'humidité.



Lorsque l'électrisation, en provoquant la contraction des muscles, prolonge le contact (la main se referme sur le fil), le risque de dommages plus graves augmente. La gravité d'une électrisation dépend de l'intensité du courant et de la durée du contact.

La quantité de courant traversant le corps dépend également du type de peau et de son niveau d'humidité. Pieds nus dans une salle de bain, directement en contact avec l'eau, nous sommes plus vulnérables.

C'est pourquoi les niveaux de protection sont plus élevés dans cette pièce (cf. "Trajet de l'électricité").

#### Remarque :

Notre corps peut également être parcouru par un courant sans que nous nous en apercevions. Il s'agit du **courant de contact**. C'est un courant qui parcourt le corps humain entre deux points de contact (généralement une main et un pied ou entre les deux mains / les deux pieds) avec des objets conducteurs portés à des potentiels différents (une machine et le sol, un robinet et le sol, un radiateur et le sol, etc...) alors que cette différence de potentiel n'est pas évidente a priori puisqu'aucun des objets n'est relié à une source de tension (\*).

(\*) Le courant de contact n'a rien à voir avec le contact avec des parties sous tension (comme c'est le cas lors d'une électrocution), ni avec les décharges électrostatiques.

C'est un courant à 50 Hz, mais qui, contrairement au courant responsable d'une électrisation ou électrocution est largement inférieur au seuil de perception : il nous traverse sans que nous nous en apercevions.

Ces courants de contact ont fait l'objet de recherches approfondies dans notre groupe de recherche (voir la page des équipes d'ingénieurs dans notre site).

L'intensité des courants de contact est généralement faible en cas d'installation électrique bien conçue et en bon état.

#### Quiz

Pour accéder au Quiz, suivre le lien suivant : <http://www.bbemg.be/fr/index-cem/electricite-champs/notions-electricite.html>

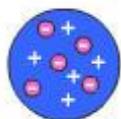
## Annexes

### Evolutions du modèle de l'atome

Contrairement aux idées reçues, la trajectoire des électrons autour du noyau n'est pas elliptique comme celle des planètes autour du soleil. Le mouvement des électrons obéit à la mécanique quantique. Ainsi, on ne peut pas déterminer précisément la position des électrons, mais seulement connaître la probabilité d'en trouver un dans une zone donnée. Pour décrire la position des électrons dans ce nuage électronique, on parle d'orbitales atomiques. La théorie des orbitales atomiques est issue des recherches en mécanique quantique.

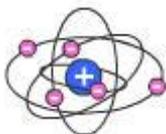
Le modèle de l'atome a évolué au cours du temps, au fur et à mesure des découvertes des propriétés de la matière.

Dans l'Antiquité, on supposait que la matière pouvait se fractionner en petits morceaux jusqu'à obtenir des grains insécables appelés atomes (vient du grec atomos qui signifie insécable, indivisible).



En 1897, JJ. Thomson décrit les électrons comme étant des corpuscules détachés de l'atome. L'atome est représenté comme une sphère positive parsemée de corpuscules négatifs (tel des prunes dans un pudding... d'où le nom de plum pudding attribué à ce modèle), le tout étant neutre.

Des expériences ultérieures ayant montré que les charges positives étaient en fait concentrées dans le noyau, ce modèle a été abandonné.



En 1911, E. Rutherford propose le modèle atomique planétaire : les électrons négatifs graviteraient autour du noyau positif à la manière des planètes autour du soleil. Entre les électrons et le noyau, il n'y a que du vide. Son modèle s'appuie sur la mécanique classique.

Cependant, selon la mécanique classique, un électron en rotation perd de l'énergie. Ce dernier devrait donc se rapprocher au fur et à mesure du noyau... jusqu'à entrer en collision avec ce dernier. Or, il n'en est rien!

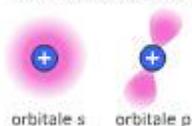


Hydrogène

En 1913, N. Bohr décrit l'atome d'hydrogène comme étant composé d'un noyau chargé positivement, et d'un électron en rotation autour de ce dernier. Son modèle de l'hydrogène reste donc planétaire, mais il le complète en situant l'électron sur des orbites électroniques d'énergie constante. L'électron conserve donc son énergie tant qu'il reste sur une orbite définie. Par contre, il peut passer d'une orbite à l'autre en absorbant ou en émettant de l'énergie. Ce modèle a permis d'expliquer les observations menées sur l'atome d'hydrogène, mais pas les mouvements des électrons dans les atomes ayant plus d'un électron.

Depuis les années 1930 et le modèle de Schrödinger, c'est la mécanique quantique qui a pris le relais.

Exemples d'orbitales



orbitale s orbitale p

Dans le modèle de Schrödinger, les orbites bien définies de Bohr deviennent des nuages de probabilité : les orbitales électroniques. Ces dernières représentent la probabilité de présence d'un électron à une distance donnée du noyau.

Contrairement à la mécanique classique, il est très difficile de se faire une représentation visuelle de l'approche quantique. C'est pourquoi le modèle planétaire est encore utilisé de nos jours.

## Nombre et répartition des électrons dans les atomes : le tableau périodique de Mendeleïev

Toutes les personnes ayant fait un peu de chimie à l'école, se souviendront certainement de ce fameux tableau périodique !

Il est dit "périodique" car il est construit autour d'une certaine répétition des propriétés des éléments. C'est en 1869 que Dimitri Mendeleïev a finalisé le classement des 63 éléments connus à l'époque. Les éléments, répartis dans 8 colonnes selon leur masse atomique croissante, présentaient des propriétés chimiques, physiques et électriques comparables colonne après colonne. Le tableau périodique des éléments était né.

Toutefois, dans le tableau de Mendeleïev, la masse atomique de certains éléments ne permettait pas de les classer parmi les éléments de propriétés comparables. Il s'est avéré au début du 20<sup>e</sup> siècle que c'était le numéro atomique qui déterminait plus précisément la périodicité des propriétés des éléments.

La masse atomique est calculée à partir de la masse du noyau, comprenant des protons et des neutrons. Ils ont chacun une masse de 1 unité atomique (de l'ordre de  $10^{-24}$  g). La masse des électrons est tellement faible, qu'elle est considérée comme négligeable : elle n'intervient pas dans le calcul de la masse atomique.

Le numéro atomique reprend quant à lui le nombre de protons qui constitue un atome donné. Par exemple, l'élément 1, l'hydrogène, comporte un proton, le carbone 6, le silicium 14, le cuivre 29 ... Un atome est neutre s'il contient le même nombre de protons que d'électrons. Le numéro atomique reflète donc également le nombre d'électrons gravitant autour du noyau.

Le tableau périodique actuel comprend plus de 100 éléments, dont 92 naturels (les autres étant produits artificiellement par réaction nucléaire). Les éléments sont organisés comme suit:

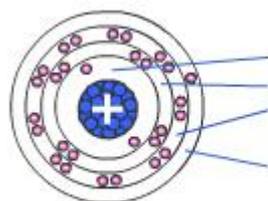
- les colonnes regroupent les éléments ayant le même nombre d'électrons dans la couche la plus externe (couche de valence) et
- les lignes les regroupent selon le nombre de couches d'électrons.

## Matériaux isolants et conducteurs : Bandes d'énergie permises et interdites

Pour bien comprendre la différence entre un matériau isolant et un conducteur, il est nécessaire de refaire un petit tour en mécanique quantique. Avec le modèle atomique de Bohr, puis celui de Schrödinger, nous avons vu qu'au sein de l'atome, les électrons ne pouvaient se déplacer que sur des niveaux d'énergie déterminés.

Les électrons qui gravitent autour du noyau, se répartissent en différentes couches selon des règles précises (\*). Lorsque les atomes sont assemblés pour former un matériau, ils s'influencent les uns et les autres. On ne parle plus de couches d'énergie, mais plutôt de bandes d'énergie, valables pour l'ensemble du matériau.

(\*) Dans un atome, les électrons se placent sur des couches de niveaux d'énergie déterminée. Ces couches sont repérées à partir du noyau par le nombre quantique principal (noté  $n$ ):



Le nombre maximal d'électrons possible pour la couche  $n$  est  $2n^2$  :

- **1e couche K** (proche du noyau) :  $n = 1$ , donc maximum 2 électrons
- **2e couche L** :  $n = 2$ , maximum 8 électrons
- **3e couche M** :  $n = 3$ , maximum 18 électrons ...

La dernière couche occupée est la **couche de valence**. Cette dernière couche ne peut contenir que **8 électrons**. Ce sont eux qui participent aux liaisons inter-atomiques.

### Remarque :

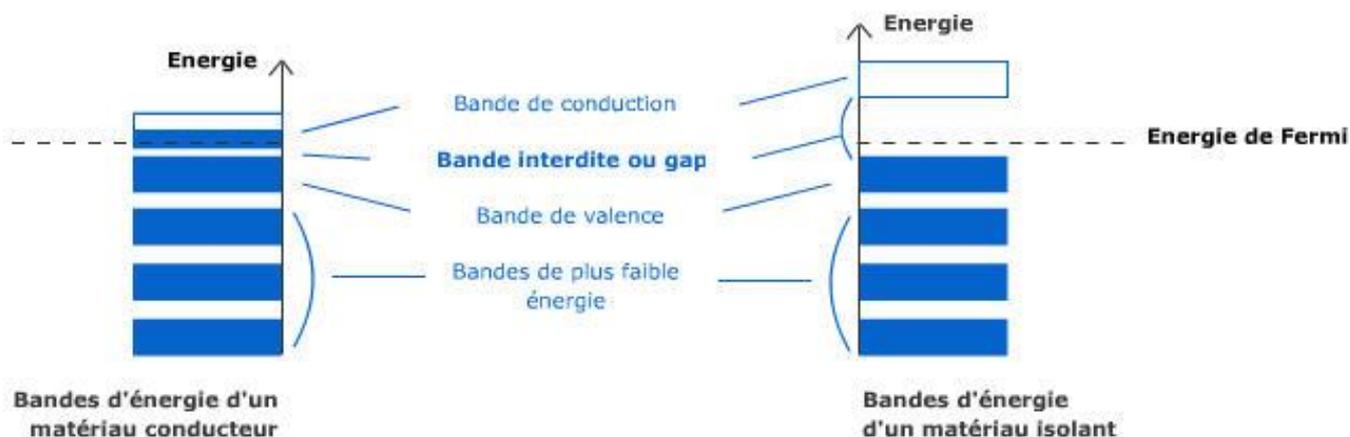
La répartition des électrons dans les différentes couches et sous-couches est régie par les règles de remplissage suivantes :

- Le principe d'exclusion de Pauli : deux électrons ayant le même état quantique ne peuvent se trouver dans la même orbitale.
- Le principe d'énergie croissante ("aufbau") : les orbitales de plus faible énergie doivent être remplies en premier.
- La règle de Klechkowsky
- La Loi de Hund

Ce sont ces règles qui déterminent le placement des électrons dans les orbitales atomiques (à l'état fondamental). L'unité d'énergie courante est l'électron volt (eV), c'est l'énergie acquise par un électron qui a subi une différence de potentiel de 1 V :  $1 \text{ eV} = 1 \text{ Volt} \times 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Coulomb} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$

### Exemple d'un matériau conducteur : le fil de cuivre

Lorsqu'une pile est raccordée aux extrémités du fil de cuivre, les électrons périphériques acquièrent de l'énergie, se déplacent dans la bande de conduction et participe ainsi à la conduction du courant. Ceci est possible parce que l'énergie nécessaire est peu importante (le niveau d'énergie de Fermi est dans la bande de conduction), mais également parce que la dernière bande ne contient qu'un électron dans l'atome de cuivre. Il reste de la place pour accepter de nouveaux électrons.

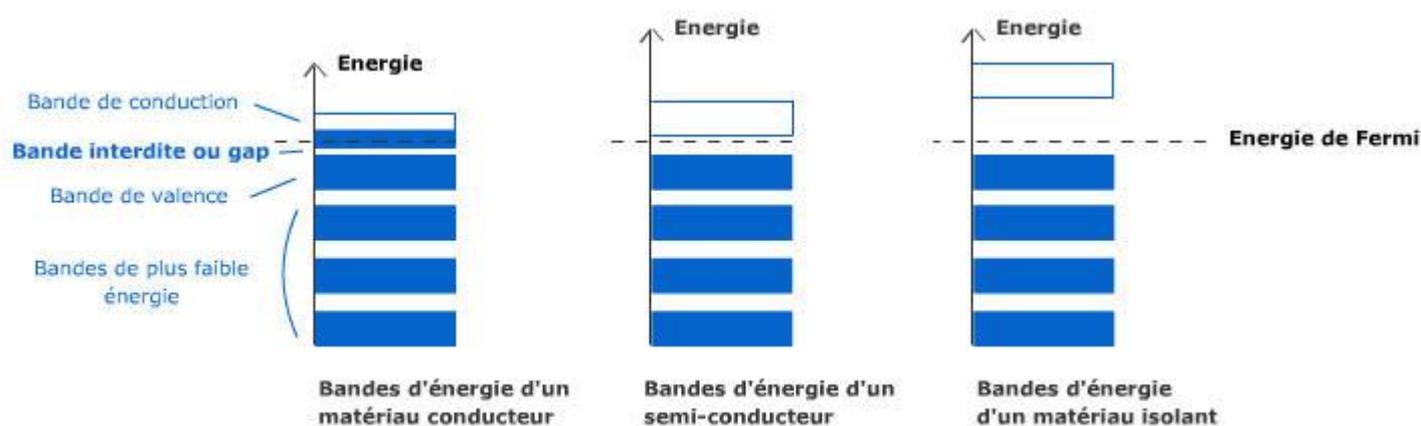


## Exemple d'un matériau isolant

Inversement, dans un isolant, les bandes de valence sont complètes. Les électrons sont fortement impliqués dans les liaisons entre les atomes et les bandes de conduction sont vides. De plus, la bande interdite est très large. Un isolant pourrait conduire le courant seulement si on lui fournit une grande quantité d'énergie, par exemple en le chauffant. En pratique, les températures nécessaires seraient tellement élevées, que l'isolant fondrait avant de conduire le courant.

## Les matériaux semi-conducteurs

Les matériaux semi-conducteurs présentent des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants.



Le germanium et le silicium sont des exemples de matériaux semi-conducteurs. Leur bande de valence n'est pas complète, elle contient 4 électrons et leur bande interdite est relativement petite. Cela signifie que l'énergie pour passer de la bande de valence à la bande de conduction n'est pas trop importante. Les électrons peuvent acquérir l'énergie nécessaire. Grâce à l'énergie acquise, les électrons de la bande de valence brisent les liaisons covalentes et passent dans la bande de conduction. Une fois dans la bande de conduction, ils se comportent comme les électrons libres des métaux : en présence d'une différence de potentiel, ils participent à la conduction du courant. L'énergie peut être apportée par une augmentation de la température, par des photons de lumière... Ce sont ces derniers qui entrent en jeu dans les panneaux photovoltaïques et qui permettent la production d'un courant continu. Nous y reviendrons.

## Comment produire une tension continue ?

### Les générateurs électrochimiques

Ils maintiennent une différence de potentiel grâce aux réactions chimiques qui se déroulent simultanément à l'anode et à la cathode. Parmi les générateurs électrochimiques, nous avons déjà parlé des piles. Ces dernières présentent toutefois l'inconvénient d'avoir les réactifs en quantité limitée. Lorsqu'ils sont épuisés, la pile n'est plus utilisable.

Les accumulateurs (ou « piles » ou « batteries » rechargeables) sont également des générateurs électrochimiques. Ils permettent de pallier l'inconvénient des piles. En effet, la réaction chimique qui entraîne la production d'électrons peut être inversée ; les électrons circulent alors dans l'autre sens, et l'accumulateur se recharge.

## Les générateurs photovoltaïques

Ils exploitent les caractéristiques semi-conductrices des matériaux qui les composent. Les cellules solaires photovoltaïques sont des semi-conducteurs capables de convertir directement l'énergie lumineuse en courant électrique. Lorsque des photons, c'est-à-dire des grains de lumière, viennent frapper un semi-conducteur, l'énergie qu'ils apportent peut provoquer le passage d'électrons de la bande de valence à la bande de conduction, donc augmenter la conductivité du matériau.

Les matériaux semi-conducteurs tels que le silicium ne présentent pas d'emblée la caractéristique d'engendrer un courant électrique. En fait, il faut qu'ils contiennent des impuretés : on dit alors qu'ils sont dopés. Cela signifie qu'ils contiennent des éléments tels que le Phosphore qui vont créer une charge globalement négative (dopé N) et d'autres tels que le Bore qui vont créer une charge globalement positive (dopé P).

Si un côté de la cellule est dopé P et l'autre dopé N, les recombinaisons des charges libres (électrons et trous) engendrent une différence de potentiel intrinsèque. Les électrons, qui en recevant l'énergie des photons sont passés dans la bande de conduction, sont entraînés des cellules N vers les cellules P. Il en résulte un courant électrique continu qui pourra être utilisé par des appareils électriques (après passage dans un onduleur qui transforme le courant continu en alternatif).

## La dynamo

Il s'agit d'une machine qui produit du courant continu à partir du mouvement. Elle a été inventée par Zénobe Gramme à la fin du 19e siècle. Malgré l'apparente similitude, cette dynamo ne doit pas être confondue avec la dynamo parfois placée sur les vélos car cette dernière fournit une tension alternative.

## Un joule, qu'est-ce que c'est?

Un joule, c'est l'énergie nécessaire pour soulever d'un mètre un livre de 102 grammes sur notre bonne vieille terre (\*). C'est également l'énergie nécessaire pour élever la température d'un gramme d'eau d'un degré Celsius.

(\*). Pour les curieux ! D'où viennent les 102 g du livre ?

L'énergie potentielle (E) nécessaire pour soulever le livre se calcule à l'aide de la formule :

$$E = m \cdot g \cdot h$$

où

- m est la masse du livre en kg, notre inconnue
- g est l'accélération de la pesanteur en m/s<sup>2</sup> et vaut 9,81 m/s<sup>2</sup> sur notre terre,
- h est la hauteur en mètre à laquelle le livre est porté.

$$m = E / g \cdot h = 1 / 9,81 \cdot 1 = 102 \text{ g} \dots \text{CQFD :-)}$$

Bref, un joule, c'est très petit !

L'énergie prend des valeurs tellement différentes selon le domaine considéré que l'unité a été adaptée et que nous ne nous rendons plus compte que nous parlons toujours de la même chose. Par exemple :

- dans l'alimentation, on parle de calories ou kilocalories (1 kcal = 4186 joules = 4,186 kJ). Par jour, nous avons besoin en moyenne de 2000 à 2500 kcals (de 8,4 à 10,5 millions de joules ou mégajoule, MJ). La dépense énergétique d'une personne de corpulence moyenne lors d'un jogging léger d'une demi-heure est d'environ 350 kcal (ou environ 1400 kJ).
- dans le domaine pétrolier, on parle de tonne d'équivalent pétrole (1 tep = 42 milliards de joules ou gigajoule, GJ). Si vous faites un plein d'essence de 50 litres par semaine, vous utilisez environ 7 litres

par jour, c.à.d. 7 kep (environ 250 MJ).  
L'énergie contenue dans 1l d'essence est environ égale à celle de 1l de mazout.

- dans le domaine de l'électricité, on parle de kilowattheure (puissance \* temps) (ou kW h = 3,6 MJ). En Belgique un ménage de 4 personnes consomme en moyenne par an 3500 kW h. Par jour, ce ménage consommera 10 kW h (équivalent à 7 ampoules de 60 W allumées en permanence), càd environ 3,6 MJ d'énergie électrique.

L'énergie contenue dans 1l d'essence ou de mazout est environ égale à 10 kW h.

En résumé, en quantité d'énergie ...

1l d'essence = 1 kep = 35 MJ = 8000 kcal (8 Mcal) = 10 kW h

### Réactifs de piles et d'accumulateurs d'usage courant, et quelques caractéristiques

	Pile saline	Pile alcaline	Accu Ni-Cd	Accu Ni-MH	Accu Li-ion
Réactif à la cathode	Dioxyde de manganèse	Dioxyde de manganèse	Oxyhydroxyde de nickel	Oxyhydroxyde de nickel	Oxyde de lithium
Réactif à l'anode	Zinc	Zinc	Cadmium	Alliage de nickel	Alliage de nickel
Electrolyte	Chlorure d'ammonium	Hydroxyde de potassium	Hydroxyde de potassium	Hydroxyde de potassium	Sel de lithium (LiPF6...)
Tension nominale par cellule	1,5 V	1,5 V	1,25 V	1,25 V	3,6 V
Avantages / Inconvénients	Prix/Durée de vie, non rechargeable	Prix/Durée de vie	Cycle de vie long, peu coûteux / Densité d'énergie faible, métaux toxiques	Densité d'énergie élevée, pas de métaux toxiques/ Cycle de vie réduit	Densité d'énergie très élevée / Coûteuse, sécurité d'utilisation ?!
Exemples d'usage	Jouets, ...	Radio, jouets, ...	Caméra, appareils médicaux portables, ...	GSM, ordinateur portable, caméra, ...	GSM, ordinateur portable, véhicules électriques...



Il existe sur le marché de nombreux types de piles et d'accumulateurs. Ils présentent chacun des caractéristiques qui leur sont propres. Toutes les piles, tous les accumulateurs ne conviennent pas dans toutes les situations. C'est pourquoi il est nécessaire de connaître leurs caractéristiques principales afin de choisir le matériel adéquat.

**Remarque : L'effet mémoire**

Quand on recharge régulièrement un accumulateur Ni-Cd (et dans une moindre mesure Ni-MH) alors qu'il n'est pas complètement déchargé, il « garde en mémoire » le seuil intermédiaire de rechargement. Ceci implique qu'il ne se déchargera ensuite que jusqu'à ce seuil, il ne fournira pas d'énergie supplémentaire (en deçà du seuil « mémorisé »), alors que de l'énergie est encore disponible. Cet effet mémoire entraîne une chute importante de l'autonomie de l'appareil alimenté.

Les accumulateurs Ni-Cd doivent donc impérativement être complètement déchargés avant d'être rechargés.