

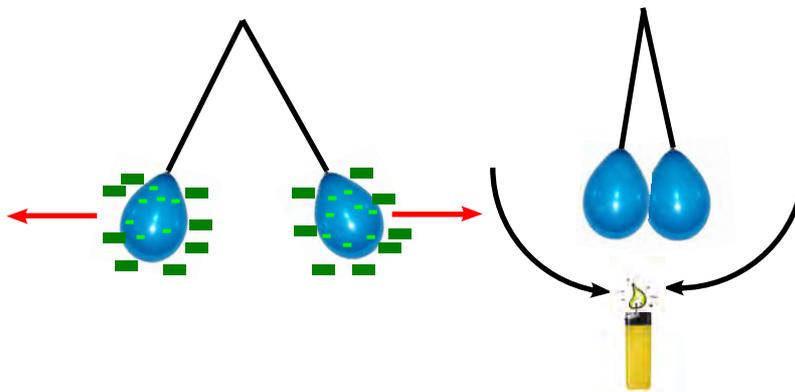
ÉLECTRICITÉ

Pierre BOUTELOUP

I- LA FORCE ÉLECTRIQUE

1-Deux ballons

Frottons deux ballons de baudruche identiques avec une peau de chat et suspendons-les au même point du plafond. On constate qu'ils s'écartent car ils se repoussent. On dit qu'ils sont chargés électriquement. Amenons légèrement en dessous la flamme d'un briquet, ils reviennent se toucher. La flamme du briquet a rendu l'air conducteur de l'électricité (plasma, comme dans un éclair d'orage) et ils se sont déchargés.



Vu que les deux ballons sont identiques et frottés de la même façon, ils ont la même charge électrique. Donc, deux charges identiques se repoussent.

2-Deux types de charges

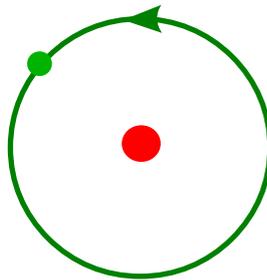
Amenons la main ou un métal près d'un ballon ainsi chargé, on constate une attraction. Il y a donc attraction entre un objet chargé et un objet conducteur de l'électricité. Amenons une plaque de polystyrène, il ne se passe rien. Il n'y a donc pas de force entre un objet chargé et un objet isolant. Pour interpréter le fait qu'il puisse y avoir attraction ou répulsion, on imagine deux types de charges, $+$ et $-$. Deux charges identiques se repoussent, et deux charges opposées s'attirent.

Mais qu'est-ce qu'une charge électrique ? C'est une invention humaine. La réalité est qu'on peut classer toutes les particules en trois catégories : la catégorie des neutres (neutron, neutrino) sans action électrique. La catégorie conventionnellement appelée $+$ (proton) et la catégorie appelée $-$ (électron), de telle façon que les objets de la catégorie $+$ attirent les objets de la catégorie $-$ et réciproquement, les $+$ se repoussent entre eux, et les $-$ se repoussent également entre eux. On peut montrer que les ballons étaient chargés négativement.

II- LIEN AVEC LA STRUCTURE DE LA MATIÈRE

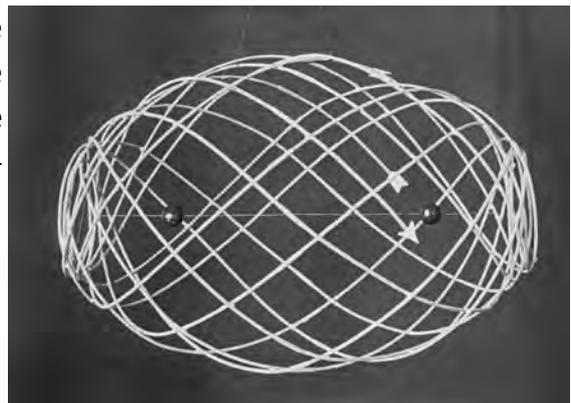
1-L'atome d'hydrogène

On peut expliquer ainsi la structure des atomes, en particulier du plus simple d'entre eux, l'atome d'hydrogène. Un électron tourne autour du proton, la force d'attraction électrique étant compensée par la force centrifuge. C'est le modèle planétaire de l'atome. Le proton est immobile, car il est environ 2000 fois plus lourd que l'électron. Toutes les charges sont des multiples entiers positifs ou négatifs de la charge de l'électron, de telle manière que l'atome d'hydrogène est neutre et sans action électrique importante sur un objet dans son voisinage. Remarquons que la force électrique est énormément plus forte que la gravitation, mais cette force est masquée habituellement par le fait que les objets usuels sont toujours neutres ou très faiblement chargés.



2-La molécule H_2^+

On peut également expliquer la formation des molécules. La molécule la plus simple est H_2^+ . L'électron tombe sur un des protons, le survole en rase-mottes, puis la force centrifuge l'éjecte alors vers l'autre proton. On obtient une trajectoire stable à trois dimensions en forme de 8. Lorsque l'électron est entre les deux protons, il va très lentement, ce qui fait qu'il est la plupart du temps là. Mais quand il est là, chaque proton est plus attiré vers le centre par l'électron que repoussé par l'autre proton qui est loin. Si les deux protons sont trop près, ils se repoussent. L'électron lie donc les deux protons à une distance bien précise l'un de l'autre. Toutes les molécules sont ainsi stabilisées par des électrons qui font la navette d'un atome à l'autre. On peut voir, ci-contre à droite, la maquette de la molécule ion hydrogène suivant la vieille théorie quantique, fabriquée par le Deutsches Museum de Munich, utilisant les calculs de Wolfgang Pauli, ca. 1923.

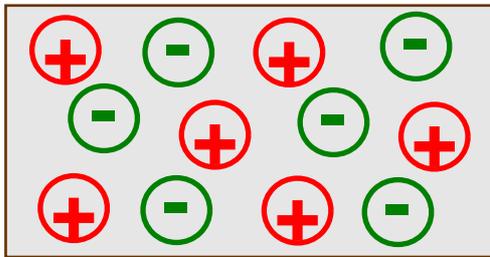


Bien sûr, tout cela est approximatif, vu qu'à cette échelle, c'est la mécanique quantique qui s'applique.

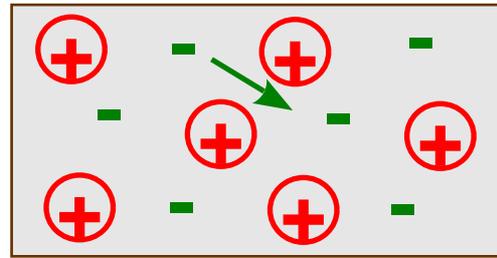
3-Conducteurs et isolants

La matière est globalement neutre. Dans un isolant, tous les électrons sont attachés à un atome particulier. Dans un conducteur métallique, certains électrons sont libres de se déplacer dans tout le volume de l'objet. Quand une charge est entourée d'un rond, cela veut dire conventionnellement qu'elle est fixe. Tous les métaux sont conducteurs, et c'est même la définition d'un métal : un métal est un corps pur (un seul type d'atome) qui conduit le courant électrique.

Isolant

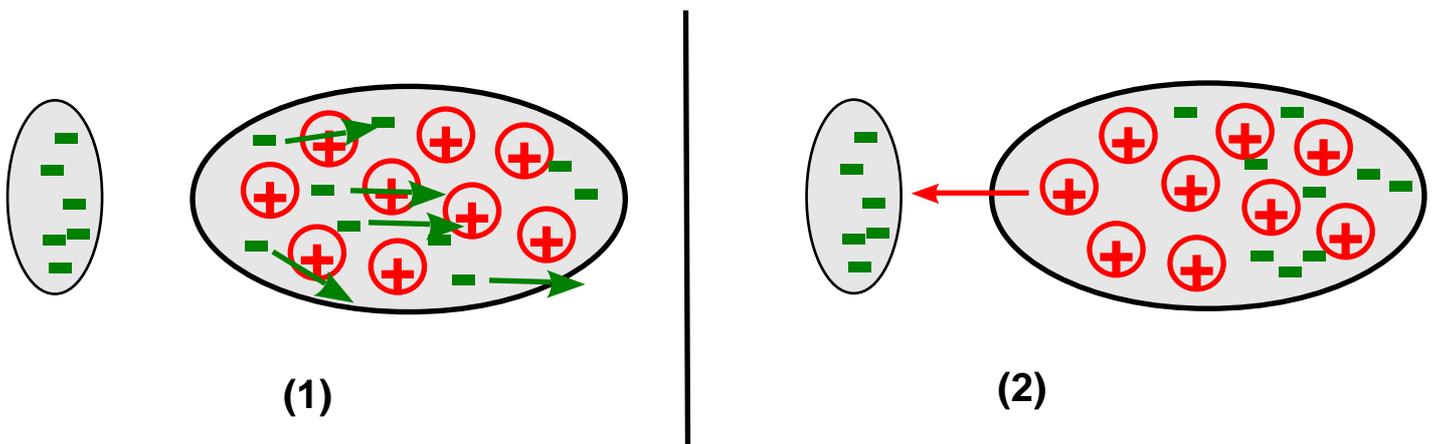


Conducteur



4-Attraction entre un objet chargé et un objet conducteur

Prenons par exemple un objet chargé négativement. Dans un premier temps, les électrons du conducteur repoussés fuient l'objet chargé. Dans un deuxième temps, en face de l'objet chargé, il y a plus de charges positives, et l'attraction se manifeste.



Imaginons un électron qui s'agit et tend à quitter le métal. Le même phénomène que précédemment se produit, et sur le métal, en face de l'électron, se développe une zone positive qui l'attire et le fait revenir dans le métal. Sauf conditions extrêmes de température ou de potentiel, les électrons ne peuvent donc pas s'échapper des métaux.

III- LE CIRCUIT ÉLECTRIQUE

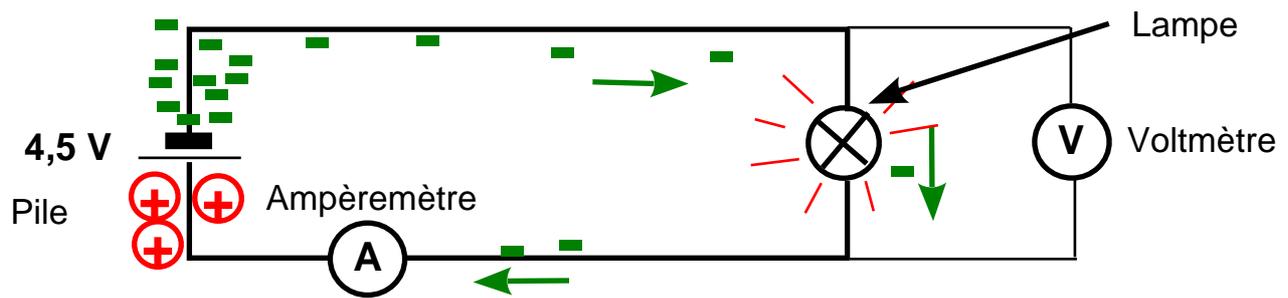
1-Notion de potentiel

De la même manière qu'une masse m attirée par la Terre possède l'énergie potentielle $E_p = m g h$, une charge électrique q possède, mise au milieu d'autres charges, l'énergie potentielle $E_p = q V$; V est le potentiel en Volt (V). Il suffit de retenir que le potentiel est proportionnel à l'énergie potentielle d'un électron.

2-Circuit électrique

Prenons une pile, type pile de 4,5 V appelée **générateur** branchée sur une lampe appelée **récepteur** par un circuit fermé (au sens d'une ligne fermée en mathématique). Tous ces objets sont appelés dipôles. La réaction chimique dépose des électrons sur le pôle - et retire des électrons sur le pôle +. Le potentiel n'est plus le même sur les deux pôles. Il se crée une différence de potentiel appelée tension (la tension se mesure donc toujours **entre deux points**, donc avec un **voltmètre** qui est branché en dérivation), 4,5 V pour la pile précédente. Cette tension mesure l'énergie dont dispose l'électron pour, partant du pôle -, rejoindre le pôle +, comme l'énergie potentielle de

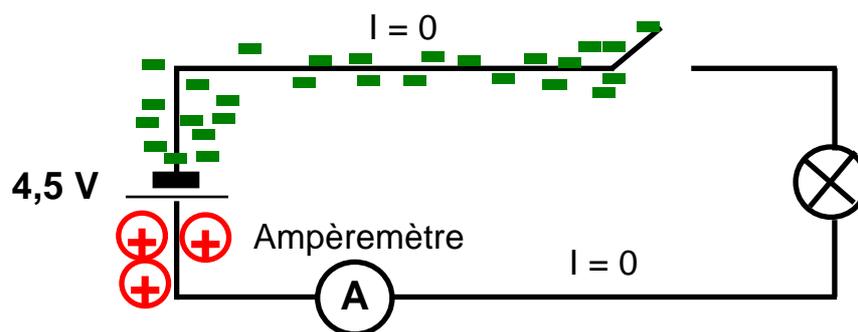
pesanteur mesure l'énergie dont dispose un skieur déposé en haut de la montagne par un téléphérique, pour rejoindre en descendant le fond de la vallée.



On peut montrer que la tension est proportionnelle à la densité d'électrons sur le pôle -, ce qui donne une image très intuitive de la tension. Plus la tension est élevée, plus les électrons sur le pôle - sont nombreux et se repoussent. Ils commencent à circuler dans le fil pour s'éloigner les uns des autres et finissent par être attirés par l'autre pôle chargé positivement. On a vu que les électrons ne peuvent que circuler dans le fil, ils ne peuvent pas s'en échapper. Il y a apparition d'un courant électrique. L'intensité en Ampère (A) est proportionnelle au débit d'électrons **en un point** du fil. On la mesure avec un **ampèremètre** mis en série dans le montage. Dans la pile aussi circule un courant électrique, mais il correspond à un déplacement d'ions (molécules chargées en solution), comme d'ailleurs le courant qu'on peut faire circuler dans l'eau (l'eau est faiblement conductrice).

3- Interrupteur

S'il y a une interruption dans le fil avec un interrupteur ouvert par exemple (attention, terminologie opposée à celle d'un robinet), les électrons qui ne peuvent pas s'échapper dans l'air sont bloqués, et comme ils se repoussent tous, en cascade, tout le courant s'arrête. On dit que le circuit est ouvert. Pour qu'il y ait un courant, il faut donc une **chaîne fermée ininterrompue de conducteurs**, le générateur (ici la pile) en faisant partie.



D'autre part, quand le courant passe, les électrons ne pouvant pas s'accumuler en un endroit puisqu'ils se repoussent, **l'intensité est toujours la même en tous les points d'un circuit**. Limiter le passage du courant en un endroit limite le courant dans tout le circuit. Notons que le **sens conventionnel** du courant électrique est opposé, pour des raisons historiques, à celui du déplacement des électrons.

4- Notion de résistance

Dans le modèle de Drude, le choc des électrons contre les atomes, ralentit les électrons et limite le courant. Ce choc augmente l'agitation thermique des atomes et chauffe donc le fil, c'est l'effet Joule. Plus le fil est fin, plus les électrons vont cogner les atomes et plus la résistance au passage du courant est grande. Pour une même tension, on aura donc une intensité qui dépend de la résistance R . On admettra que $U = R I$, U en V, I en A, et R en Ohms (Ω).

Quand le fil devient très chaud, les atomes s'agitent tellement que cela augmente les chocs avec les électrons et la résistance augmente donc avec la température.

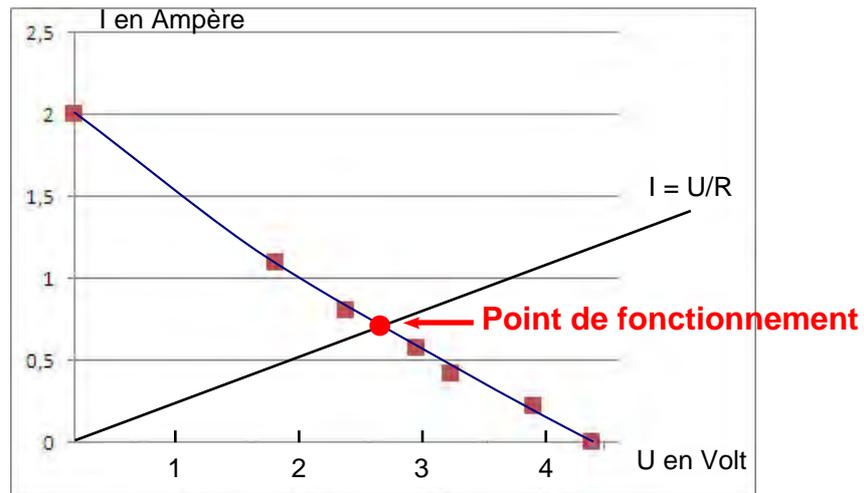
5- Caractéristique courant-tension d'un générateur

En principe, la pile est un générateur de tension, c'est-à-dire qu'on aura toujours 4,5 V quelle que soit l'intensité. Mais dans la réalité, c'est un peu différent. Dès que le courant circule, les électrons perdent de l'énergie en circulant dans la pile (résistance interne) et si le courant est très fort, la réaction chimique n'arrive pas à suivre et n'arrive plus à maintenir la densité d'électrons sur le pôle -. La tension chute. Il peut être intéressant de tracer la caractéristique courant-tension d'un générateur. Si cette caractéristique est connue, on peut obtenir graphiquement le courant si l'on branche une résistance R sur la pile avec le point de fonctionnement.

Caractéristique d'une pile de 4,5 V

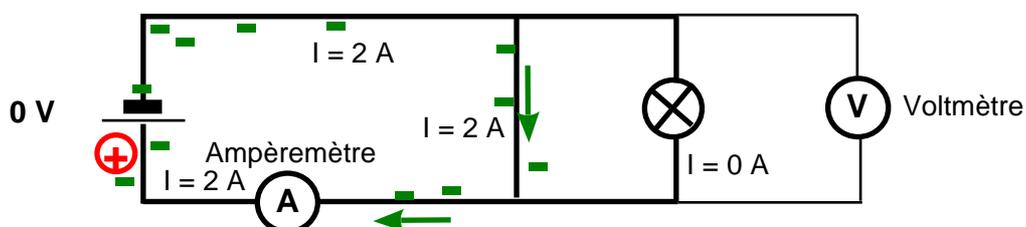
0	2
1,7	1,1
2,3	0,8
2,9	0,57
3,2	0,42
3,9	0,22
4,4	0

U en Volt I en Ampère



6-Définition du court-circuit

Il y a court-circuit quand on relie par un fil de résistance négligeable deux points d'un circuit entre lesquels existait auparavant une tension. On peut donc court-circuiter aussi bien un générateur qu'un récepteur. Si on court-circuiter un récepteur, à priori ce n'est pas grave, tout le courant va passer par le chemin le plus facile de résistance nulle, et le récepteur ne va pas fonctionner. Mais si on court-circuiter une pile, la tension va chuter à 0, mais un courant très intense va traverser la pile. La pile va être utilisée très vite. Mais elle chauffe, et si le liquide à l'intérieur se met à bouillir, elle peut exploser. Si on fait un court-circuit à la maison avec du 230 V, s'il n'y a pas d'appareil de protection pour couper le courant, cela peut mettre le feu, tellement les fils sont chauffés.



7-Le courant alternatif

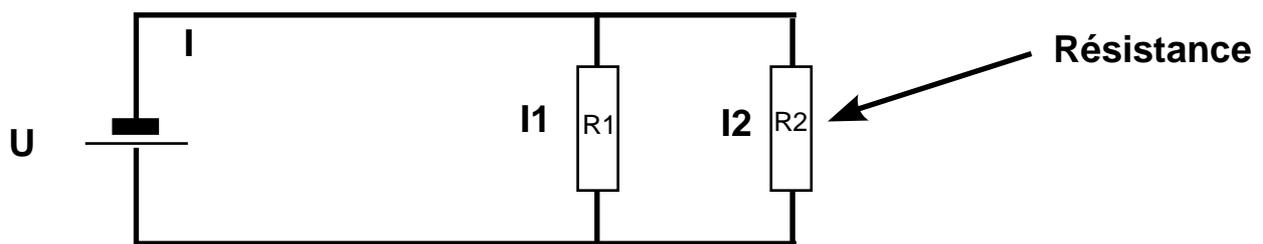
Le courant d'une pile est du courant continu. Les électrons vont toujours dans le même sens. Mais le courant d'EDF est du courant alternatif. Les électrons changent de sens tous les 1/100 de seconde. On pourrait dire que le courant continu est du vent dans le gaz d'électrons libres baignant un métal, tandis que le courant alternatif est un son dans ce gaz. On utilise le courant alternatif parce que le générateur électromagnétique principalement utilisé produit un tel courant. De plus, il est plus facile de faire des transformateurs en courant alternatif, passant de 230 V le courant du secteur à 9 V le courant chargeant une batterie de portable par exemple. Pour charger la batterie du portable, il faut une diode qui ne laisse passer le courant que dans un sens. Les diodes électroluminescentes sont des diodes qui émettent de la lumière directement à partir de l'électricité, sans passer par l'énergie thermique. Un moteur à courant continu change de sens de rotation si on change le sens du courant électrique. Si on le branche sur du courant alternatif, il vibre sans tourner.



IV-LES LOIS MATHÉMATIQUES DU COURANT ÉLECTRIQUE

1- Additivité des intensités pour des circuits en dérivation

Si l'on branche deux lampes en dérivation sur une pile de 4,5 volt, et si la pile arrive bien à maintenir sa tension à cette valeur, chaque lampe est traversée par l'intensité $I = U/R$. mais la pile est traversée par l'intensité 2 I deux fois plus grande qu'avec une lampe seule. Ainsi, les deux lampes brillent comme quand il n'y en a qu'une, mais la pile se décharge deux fois plus vite. Si une lampe grille, l'autre continue à fonctionner, et il est facile dans le montage d'ajouter ou de supprimer une lampe. L'additivité des intensités est assez évidente : deux électrons par minute sortant de la pile par exemple, donnent seulement un électron par minute traversant une lampe.



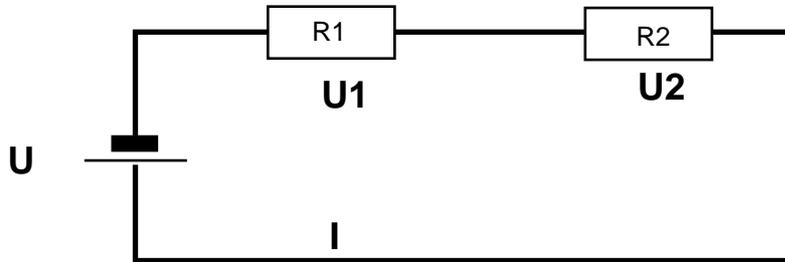
$$I = I_1 + I_2$$

$$I_1 = U/R_1 ; I_2 = U/R_2 ; I = I_1 + I_2 = U/R_1 + U/R_2$$

2- Additivité des tensions pour des objets en série

Démontons une pile de 4,5 V. On trouve à l'intérieur trois piles rondes de 1,5 V mises en série (un pôle plus est relié au pôle moins de la suivante). On observe bien que les tensions s'ajoutent : $1,5 + 1,5 + 1,5 = 4,5$. Mais les tensions s'ajoutent aussi pour des récepteurs. Branchons deux lampes de lampe de poche adaptées à une pile de 4,5 V en série sur une pile de 4,5 V. Les lampes brillent faiblement. Elles sont en sous-tension ; on dit qu'elles ne sont pas branchées sur leur tension nominale (recommandation du constructeur). Si on branche une telle lampe sur 9 V par exemple,

on dit qu'elle est en surtension, et elle peut griller. On peut vérifier qu'aux bornes des lampes il y a une tension de 2,25 V, car $2,25 + 2,25 = 4,5$. Si une lampe grille, l'autre s'éteint. D'autre part, dans un tel circuit série, il n'est pas facile d'ajouter ou de supprimer une lampe. Les deux lampes brillent pareil du fait que l'intensité est la même en tous les points d'un circuit. L'additivité des tensions est assez évidente et vient de l'additivité de l'énergie et du fait que la tension est proportionnelle à l'énergie donnée par la pile à chaque électron. L'énergie donnée par la pile se retrouve répartie additivement dans chaque récepteur.



$$U = U_1 + U_2 = R_1 I + R_2 I ; I = U / (R_1 + R_2) ; U_1 = (R_1 / (R_1 + R_2)) U ; U_2 = (R_2 / (R_1 + R_2)) U$$

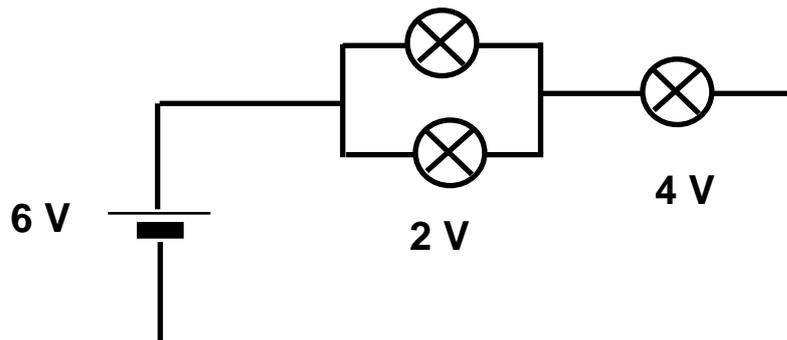
3- Puissance

La puissance mise en jeu entre deux points d'un circuit vaut $P = U I$. Si I est en ampère et U en volt, alors la puissance se mesure en watt (w). C'est assez évident ; en multipliant l'énergie donnée à chaque électron par le débit d'électrons, on a le débit d'énergie.

Pour EDF, la puissance est mesurée en kw, le temps en heure, et l'énergie consommée, c'est-à-dire le travail électrique reçu $W = P t$, en kwh.

4- Exemple de calcul dans un circuit électrique

Dans le circuit ci-dessous, le générateur fait 6 V ; les lampes ont toutes des résistances de 100 Ω. Calculer toutes les intensités et toutes les tensions.



$$6 = U_1 + U_2 = R(I/2) + RI = 3RI/2 ; U_2 = R I = 4 V$$

$$U_1 = 2 V ; I = U_2 / R = 4 / 100 = 0,04 A$$

V- SÉCURITÉ ÉLECTRIQUE

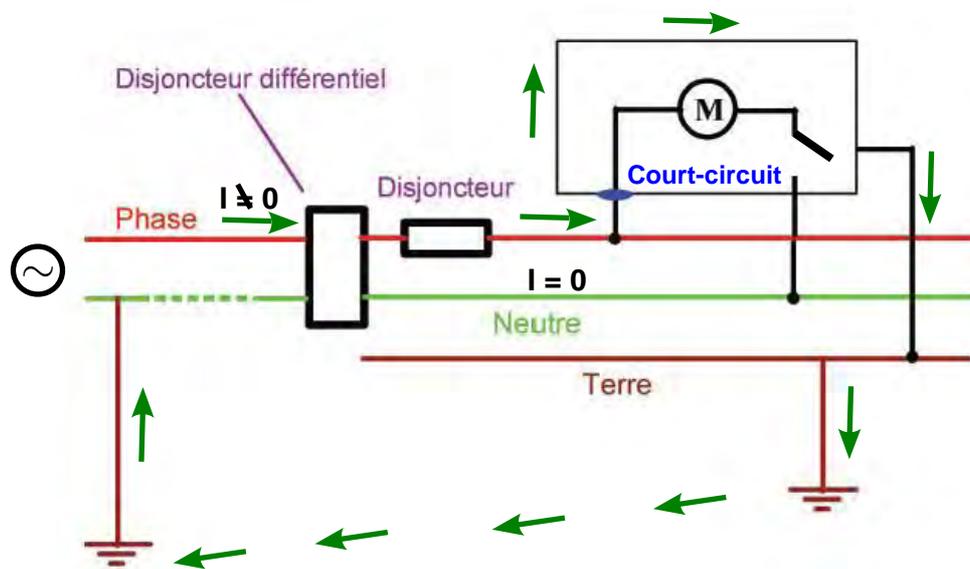
1-Le disjoncteur et les fusibles

Le disjoncteur est un dispositif électromagnétique coupant le courant s'il dépasse 35 A par exemple. Il est là pour empêcher un incendie, mais aussi pour éviter qu'EDF ne perde de l'argent. En effet, si l'on utilise un courant très intense, un courant intense circule également dans les lignes d'EDF dehors, et cela fait perdre de l'énergie qui n'est payée par personne en chauffant les fils dehors.

Pour le fusible, le principe est le même, mais quand l'intensité est trop forte, le fusible qui est généralement en plomb (qui fond à 327°) fond et coupe le courant. Le fusible est détruit.

2- Le disjoncteur différentiel et la prise de terre

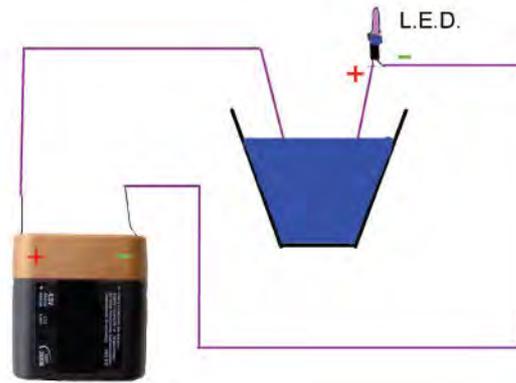
Il sort deux fils du générateur électromagnétique d'EDF. Un des fils dit **neutre** est relié à un fil qui s'enfonce dans la terre. On dit qu'il est mis à la terre. Son potentiel est donc voisin de 0 et ce fil n'est pas dangereux. L'autre fil est la **phase** et est à 230 V. Si l'installation électrique est correcte, la carcasse d'une machine à laver par exemple est mise en contact également avec la terre par la prise de terre. Si à cause d'un fil dénudé par exemple, il y a un court-circuit donc une mise en contact entre la phase et le métal de la machine, on pourrait s'électrocuter en touchant la machine qui serait au potentiel de 230 V. Mais le courant peut se fermer, de la phase à la carcasse de la machine, puis à la terre, et le courant revient au neutre d'EDF en passant par la terre qui est conductrice car mouillée. Cependant, il y a un courant dans le fil de phase et pas dans le neutre de la maison. Le **disjoncteur différentiel**, comme son nom l'indique fait la différence entre le courant dans la phase et le courant dans le neutre, et coupe le courant si il dépasse 30 mA, seuil de dangerosité pour l'homme. Même si la prise de terre est défectueuse, si un homme joue le rôle de ce fil, le courant traversant l'homme pour rejoindre par les pieds la terre, alors le disjoncteur différentiel coupe le courant suffisamment vite pour qu'il n'y ait pas électrocution.



3- Rôle de l'eau

L'eau contient des sels minéraux sous forme d'ions qui en se déplaçant assurent le passage du courant électrique. Le courant électrique est dangereux pour l'homme, justement parce que le corps humain étant plein d'eau conduit le courant électrique. Avec des mains mouillées pieds nus sur du carrelage mouillé, on peut être tué à partir de 50 V. La pièce la plus dangereuse de la maison est donc la salle de bain. L'eau a tout de même une résistance importante. C'est pourquoi,

pour montrer que l'eau conduit le courant électrique, il faut une lampe très sensible, donc une diode électroluminescente.



VI-PRODUCTION DU COURANT ÉLECTRIQUE

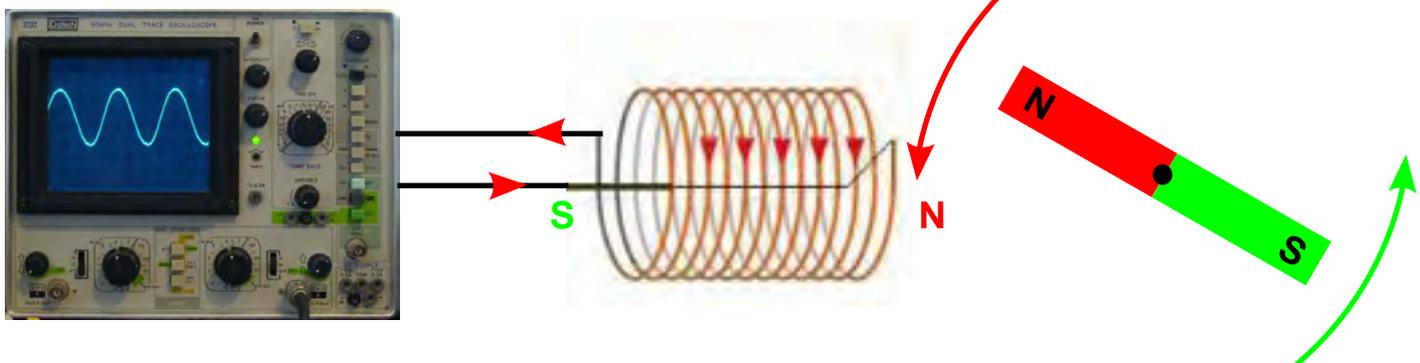
1- Les piles

Une réaction chimique au pôle - dépose des électrons sur le métal, tandis qu'au pôle +, une réaction chimique prend les électrons. Ainsi, pour la pile à hydrogène, on a :

$\frac{1}{2} \text{H}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{e}^-$ (e^- est le symbole de l'électron) au pôle - et $\frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{H}_3\text{O}^+ + \text{e}^- \rightarrow \frac{3}{2} \text{H}_2\text{O}$ au pôle + (cette réaction n'est pas au programme bien sûr).

2- Le générateur électromagnétique (dynamo)

A l'instant considéré, le courant induit dans la bobine crée des pôles qui freinent l'aimant



On fait tourner un aimant devant une bobine, et cela produit du courant alternatif dans la bobine. Ce n'est pas évident d'expliquer cela. À cause de la relativité d'Einstein, la force électrique est modifiée pour des charges en mouvement et on interprète cela comme une nouvelle force, la force magnétique ; mais en fait, ce n'est qu'un aspect différent de la force électrique. Que se passe-t-il quand on envoie un message avec un téléphone portable ? Des électrons ont un mouvement de va et vient dans l'antenne, cela crée une onde électromagnétique. Quand l'onde arrive dans l'antenne réceptrice, elle met en mouvement les électrons, puis ce mouvement est amplifié. La rotation de l'aimant produit l'équivalent de l'onde électromagnétique, et la bobine se comporte comme l'antenne réceptrice ci-dessus. Le système est réversible. Si on injecte un courant alternatif dans la bobine, elle se comporte comme un électroaimant et agit sur l'aimant. On obtient le moteur synchrone.

3- La cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque permet d'obtenir de l'électricité à partir de la lumière, plus précisément, c'est un convertisseur qui transforme un transfert d'énergie par rayonnement en un transfert d'énergie par travail électrique.

Le principe d'une cellule photovoltaïque est le suivant : on met en contact un semi-conducteur dopé p où les charges mobiles sont positives avec un semi-conducteur dopé n où les charges mobiles sont négatives. Au niveau de la jonction les charges se neutralisent. Ensuite aucune charge mobile ne peut rester dans cette zone, car un électron repoussé par les charges négatives fixes à gauche et attiré par les charges positives fixes à droite repart à droite. De même, une charge mobile positive repart à gauche. Si un photon arrive, il peut ioniser un atome neutre dans cette zone en créant une paire de charges positives et négatives mobiles (une paire électron trou). La charge négative part à droite et la positive part à gauche

Comme, au repos, compte tenu des tensions des jonctions métal-semi-conducteur, la tension globale est nulle, lorsque la jonction $p-n$ est éclairée, il y a création, par l'ajout d'électrons à droite et de charges positives à gauche, d'une tension donc d'un courant.

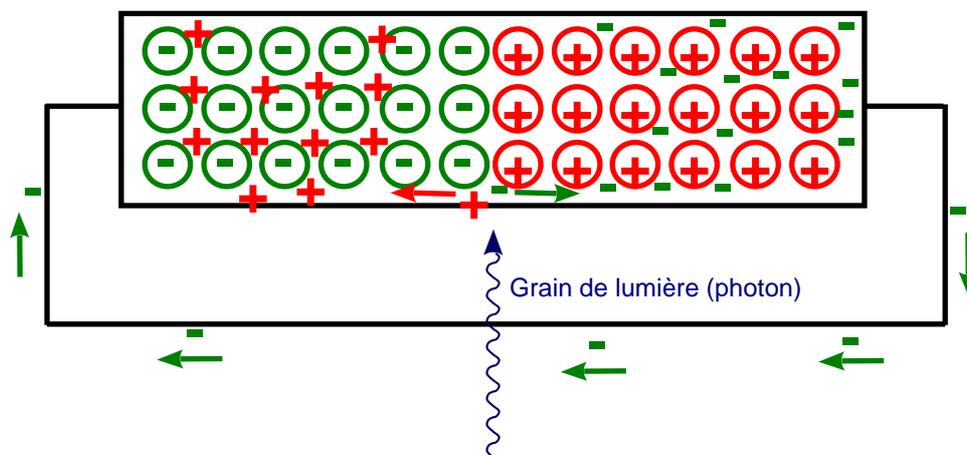
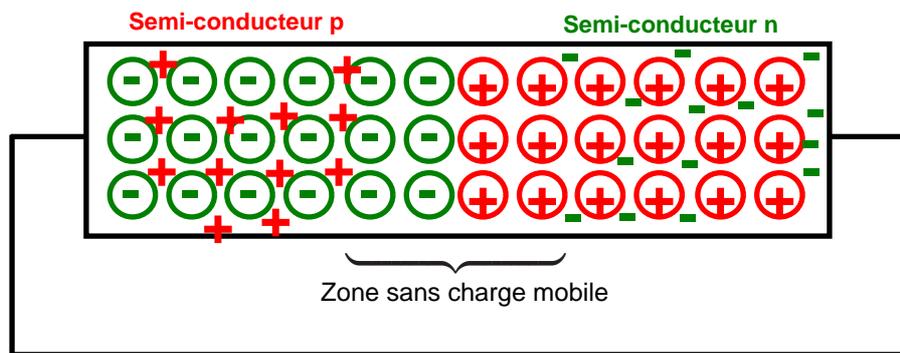


Tableau récapitulatif des grandeurs

Grandeur	Tension	Intensité	Résistance	Puissance	Énergie
Symbole	U	I	R	P	E
Unité	Volt	Ampère	Ohm	Watt	Joule
Symbole de l'unité	V	A	Ω (Omega)	W	J
Formule mathématique associée	Série : $U = U_1 + U_2$	Dérivation : $I = I_1 + I_2$	Loi d'OHM : $U = R \times I$	$P = U \times I$	$E = P \times t$ (t en secondes)