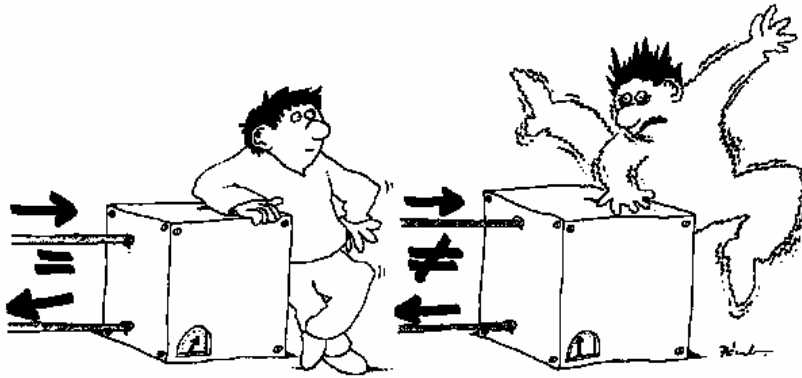


Chapitre 3 : ELECTRICITE



3.1 Électrostatique

3.2 Circuits électriques



~~3.3 Magnétisme~~

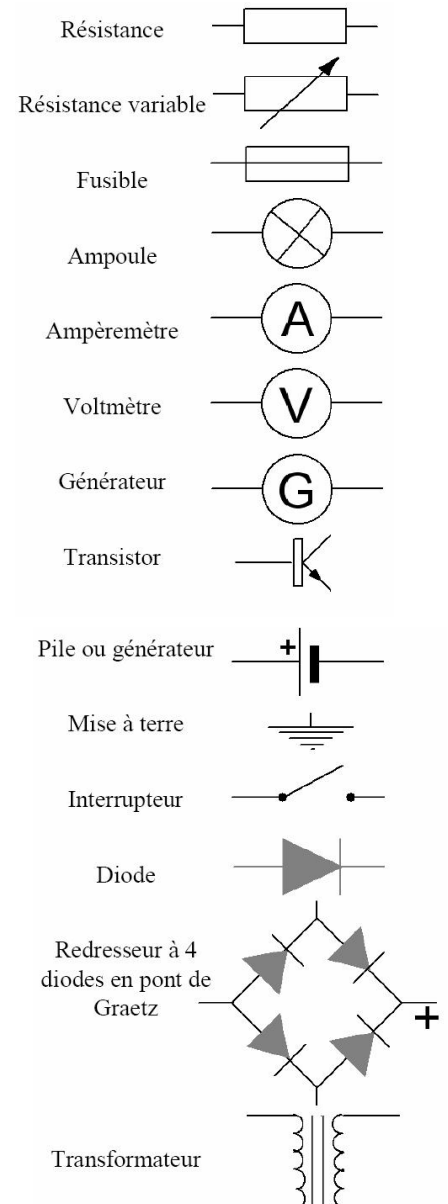
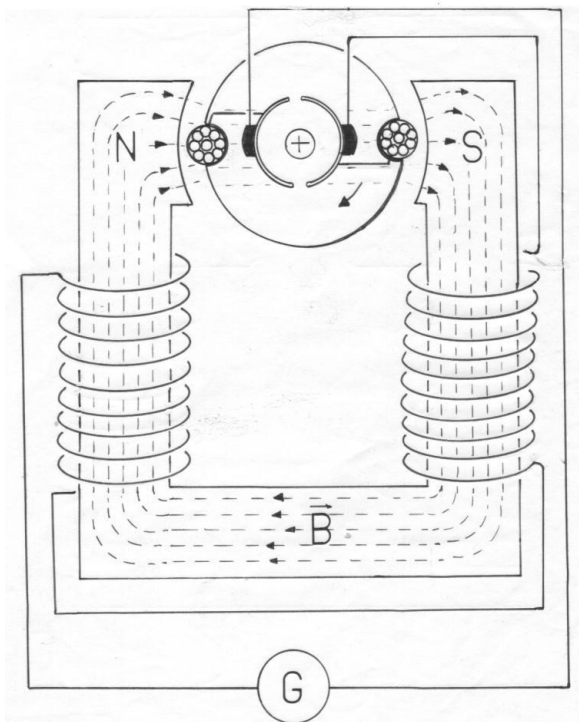


Table des matières ELECTRICITE

3.1 ELECTROSTATIQUE	1	b) Résistances en parallèle	20
3.1.1 Histoire de l'électrostatique	1	c) Résistances en série et parallèle	20
Charles Augustin de Coulomb (1736 - 1806)	2	3.2.9 Sécurité électrique	21
et Henry Cavendish (1731 - 1810)	2	(0) Définition des termes	21
3.1.2 Propriétés de la charge	2	(1) Risques d'incendie	21
1) Charge et quantification de la charge	2	(2) Risques d'électrocution	21
2) L'atome et le principe de neutralité	3	(3) Tableau des effets du courant :	22
3) Forces de Coulomb entre charges électriques	3	(4) Risques courus et prescriptions électriques pour notre protection :	23
4) Conducteurs et isolants	4	Protection contre le courant de défaut - relais FI	23
3.1.3 Electrification	4	Exercices sur la sécurité électrique	24
1) Electrification par frottement	4	Corrigé des exercices - Courant électrique (E 13 - E 14)	24
2) Electrification par contact	4	Corrigé des exercices - tension et puissance (E 16)	25
3) Electrification par influence	5	Corrigé des exercices - loi d'Ohm (E 19)	25
4) Mise à la terre	5	Corrigé des exercices sur les circuits (E 20)	25
3.1.4 Quelques machines électrostatiques	5	Corrigé des exercices - Sécurité électrique (E 23)	26
1) L'électroscope	5	3.3 ELECTROMAGNETISME	27
2) La cage de Faraday	5	3.3.1 Champ d'induction magnétique B produit par des aimants	27
3) Le générateur de Van de Graaf	5	Historique	27
3.1.5 La tension électrique U et le potentiel V	6	Le spectre et le champ d'induction magnétique B	27
Exercices - charges électriques	6	Expérience des aimants coupés.	28
Corrigé des ex. - charges et forces (E 7)	7	3.3.2 Champ d'induction magnétique B produit par des courants	28
3.2 CIRCUITS ELECTRIQUES	8	Historique	28
3.2.1 Eléments d'histoire de l'électricité	8	Observation du spectre d'un fil parcouru par un courant	28
Histoire de Galvani et de Volta	8	Explication du magnétisme des aimants	29
Principaux découvreurs de l'électrocinétique :	9	Dispositif pour magnétiser un aimant	29
3.2.2 Le courant électrique ou intensité I	10	3.3.3 L'expérience d'Oersted	29
3.2.3) Conducteurs et isolants...	10	Réalisation de l'expérience d'Oersted	30
1) Conducteurs métalliques	10	3.3.4 Le champ d'induction magnétique terrestre B_T	30
2) Conducteurs ioniques	11	3.3.5 Force de Laplace entre un courant et un champ B	31
3) Isolants	11	Expérience de Laplace	31
4) Semi-conducteurs	12	Exercices sur la force de Laplace	32
5) Supraconducteurs	12	3.3.6 Applications de la force de Laplace	32
3.2.4 Modèle d'un circuit électrique	13	1) Le haut-parleur	32
Exercices - courant électrique	13	2) Le moteur électrique	32
3.2.5 La tension U ou différence de potentiel électrique	14	Corrigé des exercices forces de Laplace	33
Quelques ordres de grandeurs de tension en volts et analogie hydraulique - électrique	15	Corrigé haut-parleur et moteur	33
3.2.6 L'énergie W et la puissance électrique P	15		
Exercices - tension et puissance	16		
3.2.7 La résistance et la loi d'Ohm	16		
Exercices - lois d'Ohm	19		
3.2.8 Circuit avec des résistances en série et en parallèle	20		
a) Résistances en série	20		

3.1 ELECTROSTATIQUE

3.1.1 Histoire de l'électrostatique

- **Thalès de Milet**, vers 600 avant notre ère, tente d'expliquer le phénomène d'attraction de l'ambre frotté par un tissu et de corps légers comme les cheveux. C'est lui qui introduira le terme d'électricité qui vient du grec "élektron" (ηλεκτρον) qui signifie ambre.
- **Aristote** (384 -322 av. J.-C.) décrit dans son "Histoire Naturelle" un étrange poisson (appelé actuellement torpille), qui porte de chaque côté de la tête un appareil musculaire produisant des charges électriques par lequel l'animal est capable de paralyser ses proies ou d'affaiblir ses ennemis. Toutefois, le philosophe ignore l'existence de cet organe.
- Pendant de nombreux siècles, des phénomènes comme la foudre ou le feu Saint-Elme (aigrettes lumineuses à l'extrémité des pointes avant un orage) ne furent pas associés à l'électricité.
- **Bède le Vénérable** (673-735) : "L'ambre échauffé par frottement s'attache à ce qu'on lui applique." Il y aurait donc, selon ses propos, une relation entre chaleur et électricité.
- **William Gilbert** (1544-1603) : "Le verre, le soufre, les pierres précieuses et la résine ont les mêmes propriétés d'électrisation que l'ambre." Il construit aussi le premier électroscope.
- **Otto von Guericke** (1602-1686) construit la première machine électrostatique.
- **Stephen Gray** (1670-1736) découvre l'électrisation par influence et introduit les notions de conducteur et isolant.
- Charles François de Cisternay **Du Fay** (1698-1739) et l'abbé Nollot (1700-1770) découvrent "deux types d'électricité" :

Nom :	"L'électricité vitreuse" (charge +)	"L'électricité résineuse" (charge -)
Produite par :	verre + soie	résine + fourrure
- Il étudie ensuite les forces attractives et répulsives. Par la suite, on appellera cette théorie, "**théorie des deux fluides**."
- **Benjamin Franklin** (1706-1790) essaye de réunifier la théorie des deux fluides après quelques expériences dont la célèbre où il attire la foudre avec un cerf-volant et pose que :
 - + Excès d'électricité = électricité positive
 - Manque d'électricité = électricité négative
 - Pour cela, il introduit le concept de charge électrique uniquement positive et admet le principe de conservation de la charge.
- **Coulomb** (1736-1806) et **Cavendish** (1731-1810) montrent, en 1790, la relation entre forces et charges grâce à leur balance de torsion (voir page suivante).
- **Joseph John Thomson** (1856-1940) découvre l'électron en 1897 au laboratoire Cavendish de l'université de Cambridge (où avait travaillé Newton) et où l'on découvrira plus tard le proton et le neutron (1932). Il obtient le prix Nobel en 1906.
- **Robert Millikan** (1868-1953) fait en 1913 une expérience qui lui permet de déterminer la charge de l'électron. Il obtient le prix Nobel en 1923.

Contrairement à ce que l'on avait imaginé, le porteur de charge élémentaire (électron) est chargé négativement. D'après nos connaissances actuelles, l'électron est apparemment la plus petite particule chargée de la nature ; de plus, il est non décomposable en d'autres particules plus petites.

Le problème de l'électrisation par frottement n'est pas encore totalement résolu aujourd'hui.



Charles Augustin de Coulomb (1736 - 1806)

et Henry Cavendish (1731 - 1810)

Bien que connue sous le nom de loi de Coulomb, la loi qui exprime la force électrostatique existant entre deux charges a été en fait découverte par Henry Cavendish. Ceci n'est pas surprenant quand on connaît la personnalité étrange de ce dernier.

Charles Augustin de Coulomb est un noble français. Il a commencé sa carrière comme ingénieur militaire et s'est progressivement intéressé à la recherche scientifique. Au début de la Révolution française, pour des raisons de sécurité, il se retire dans une petite ville de province où il effectue des expériences. En 1777, il se présente à un concours organisé par l'Académie des Sciences sur l'amélioration des boussoles. Il avait observé qu'en suspendant une boussole à un cheveu ou un fil très fin, le couple de forces exercé sur l'aiguille était proportionnel à l'angle. Ce principe de la balance de torsion lui permet de mesurer avec précision les forces électrostatiques et de formuler la loi relative à ces forces. Ces résultats sont normalement publiés et on lui attribue donc cette importante découverte.

Cavendish est anglais, contemporain mais inconnu de Coulomb. Il a déjà effectué des expériences électrostatiques semblables à celles réalisées par Coulomb avec la balance de torsion. Cavendish est une personne excentrique, extraordinaire : timide, distrait, il vit dans l'isolement et tient absolument à mourir dans la solitude. Il ne terminera jamais ses études à Cambridge car il est terrorisé à l'idée de devoir rencontrer ses professeurs lors des examens. Autant que possible, il évite les contacts personnels, particulièrement avec les femmes.

Cavendish provient d'une famille riche. Il n'a jamais eu besoin d'argent et ne s'en soucie jamais. Il consacre toute sa vie à la recherche scientifique. Il fait de nombreuses découvertes importantes. Cependant, il publie très peu, n'étant pas intéressé par le crédit que ses découvertes pourraient lui apporter. Ses recherches en électricité précèdent de nombreuses découvertes effectuées des décades plus tard. Tout ce travail reste cependant ignoré jusqu'à ce que James Clark Maxwell prenne connaissance des carnets de note de Cavendish, plusieurs dizaines d'années après sa mort. Cavendish a toutefois publié une partie de ses recherches sur les propriétés de l'hydrogène gazeux. Les expériences qui ont permis de découvrir le gaz rare aujourd'hui appelé argon seront cependant ignorées jusqu'à ce qu'on les répète un siècle plus tard.

L'expérience la plus importante de Cavendish est celle qui a permis de mesurer la masse de la Terre. D'après la loi de la gravitation universelle, l'accélération à la surface de la Terre vaut $g = GM_T/R_T^2$, où G représente la constante universelle, M_T la masse de la Terre et R_T son rayon. Puisque g et R_T sont facilement mesurables, la détermination soit de G soit de M_T permet d'évaluer l'autre grandeur. Cavendish a utilisé une balance de torsion pour mesurer les faibles forces gravitationnelles exercées par deux grosses sphères fixées aux extrémités d'une barre libre de pivoter. Ces expériences lui ont permis de déterminer une valeur de G et, dès lors, la masse de la Terre.

La balance de torsion est très utilisée pour mesurer les forces électrostatiques qui sont de très faible amplitude.



3.1.2 Propriétés de la charge

1) Charge et quantification de la charge

Depuis 1897 (J.-J. Thomson), on sait que la charge élémentaire est l'électron, une particule élémentaire :

de masse $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ et de charge : $q_e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

La charge est la propriété fondamentale de l'électricité (comme la masse en mécanique) et elle s'exprime en **coulombs (C)** en mémoire de Charles Augustin de Coulomb (cf. page précédente). Pour une charge de 1 coulomb, il faut donc $6,24 \cdot 10^{18}$ charges élémentaires.

Un corps chargé positivement (+) a un défaut d'électrons.

Un corps chargé négativement (-) a un excès d'électrons.

Le premier principe de l'électrostatique est celui de la quantification de la charge :

Toute charge Q est multiple de la charge élémentaire ou charge de l'électron q_e .

Principe de quantification : $Q = n q_e$ (où n est un nombre entier)

« Tranquillement installé dans ma peau de chat, j'ai soudain ressenti de violentes secousses. Avec d'autres électrons, nous voilà projetés, sans pouvoir réagir, sur l'extrémité d'un bâton d'ébonite, serrés comme des sardines, puis jetés sur un métal froid, où nous pouvions enfin bouger dans toutes les directions. Je me souviens d'un embranchement avec deux aiguilles. Nous nous sommes séparés ; les uns dans l'une, les autres dans l'autre. J'ai senti que je bougeais, j'étais dans l'aiguille mobile. Ce n'était pas si mal mais ça a pu durer indéfiniment quand, tout à coup, nous avons été <aspirés> vers le haut de l'aiguille et avons retrouvé les autres à l'embranchement ; nous allions tous dans le même sens. Conduit par un fil, j'ai terminé mon voyage dans le sol ; quel immense réservoir d'électrons, il y a toute la place que l'on veut (...). » (Extrait des « Mémoires d'un électron de conduction »)

2) L'atome et le principe de neutralité

On constate que dans l'univers la matière est neutre ou tend à retourner à la neutralité. Si l'on considère l'atome, brique élémentaire de tout matériau, on sait qu'il est composé de :

- * Un noyau formé de n protons de charges positives et m neutrons (où $m > n$ sauf pour H ($m=0$)). Schématiquement, les protons ont tendance à se repousser par des forces électriques et les neutrons les retiennent au moyen de la force nucléaire.
- * Un nuage de n électrons chargés négativement et mal localisés, se trouve autour du noyau à une distance considérable de celui-ci (comparée à la dimension du noyau).
- * Le proton est 1835 fois plus lourd que l'électron et si l'on compare la dimension de l'atome (1 angström = 100 pm) à celle d'un terrain de football, le noyau est de la grosseur d'une petite bille placée au centre et les électrons, non localisables, se trouvent dans les bords du terrain.

L'atome est donc neutre dans la plupart des cas. Si ce n'est pas le cas, on dit qu'il est ionisé.

Principe de neutralité : $\sum Q = 0$ dans un système isolé

En général, la somme des charges est nulle dans un système à l'équilibre.

3) Forces de Coulomb entre charges électriques

Par expérience, on constate que : les charges de même signe se repoussent
les charges de signe contraire s'attirent.

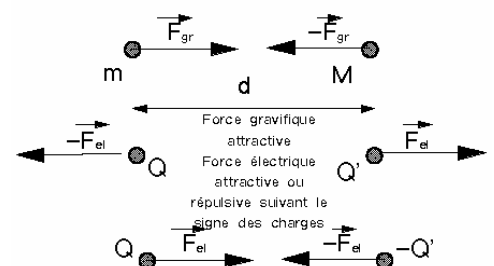
La loi de Coulomb est analogue à la loi de la gravitation (Newton). F_{el} et F_{gr} sont les forces électriques et de gravitation ; Q et Q' les 2 charges ; m et M les 2 masses

$$F_{el} = k \frac{QQ'}{d^2}$$

$$k = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$$

$$F_{gr} = G \frac{mM}{d^2}$$

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$$



Si l'on généralise, la force est le produit de masse ou la charge au carré et d'une constante divisée par la distance au carré.

Quelques exercices permettent de vérifier que la force électrique est de l'ordre de 10^{40} fois plus que la force gravifique. Rappelons que l'on distingue 4 types de forces :

- 1) **gravifique** faible à très longue distance (galaxie)
- 2) **électrique** moyenne à moyenne distance (atome)
- 3) **nucléaire forte** à courte distance (noyau)
- 4) Il y a encore la force **nucléaire faible** qui rend compte des désintégrations radioactives. Elle est relativement proche de la force électrique.

4) Conducteurs et isolants

Dans un conducteur électrique, un électron de la dernière couche est très faiblement lié à l'atome. Il participe au transport de charges c'est à dire à la conduction et on l'appelle **électron libre**.

Dans un isolant, tous les électrons sont liés et il ne peut pas y avoir de transport de charge à moins d'ioniser les atomes.

On retrouvera un commentaire plus détaillé dans le chapitre de l'électrocinétique.

3.1.3 Electrification

1) Electrification par frottement

On peut détacher des charges d'un isolant par frottement. On appelle ce phénomène la **triboélectricité**.

- En frottant un bâton **d'ébonite ou de PVC** (résine qui se **charge -**) avec une peau de chat, des électrons sont arrachés de la fourrure et transférés vers l'ébonite ou le PVC.
- En frottant un bâton de **verre ou de plexiglas** (qui se **charge +**) avec de la soie, des électrons sont arrachés du bâton et transférés vers la soie.

On a déterminé, de façon totalement empirique, une liste de substances que l'on appelle la série triboélectrique, et dont voici un extrait :

*Fourrure de lapin / lucite / verre / quartz / laine / fourrure de chat / soie / coton / bois / ambre /
résine / métal / téflon.*

Les substances proches du début de la liste ont tendance à perdre des électrons, tandis que les substances situées vers la fin de la liste ont tendance à les attirer. Quand on frotte deux objets l'un contre l'autre, celui dont le matériau est le plus proche du début de la liste, tend à prendre une charge électrique positive, ou vitreuse, tandis que celui dont le matériau est le plus proche de la fin de liste tend à acquérir une charge négative, ou résineuse. Ainsi électrifie-t-on plus facilement de l'ambre en le frottant avec de la fourrure que l'on électrifie du verre en le frottant avec de la soie. Du point de vue théorique, on connaît cependant mal les phénomènes d'électrification par frottement et, selon l'état des surfaces ou le temps qu'il fait, la disposition relative des substances dans la série triboélectrique varie.

2) Electrification par contact

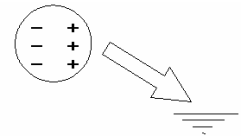
Si deux corps A et B sont en contact, le transfert d'électrons est spontané.

* A est chargé négativement, quelques électrons vont sur B.

* A est chargé positivement (défaut d'électrons), quelques électrons de B vont sur A et il y a donc un défaut d'électrons sur B (qui va se charger positivement).

3) Electrification par influence

On approche un corps chargé positivement d'un deuxième corps neutre et les charges - viennent face aux charges + du premier corps. Il suffit alors de relier momentanément le deuxième par un conducteur à la terre (réservoir de charges) et le voilà chargé négativement.



4) Mise à la terre

La terre est un immense réservoir de charges. Si l'on met un corps chargé à la terre, la terre compense tout de suite le défaut ou le manque d'électrons.

3.1.4 Quelques machines électrostatiques

1) L'électroscope

Un électroscope se compose d'une tige métallique portant une petite sphère à l'une de ses extrémités et à l'autre deux minces feuilles d'aluminium (ou d'or).

La tige est fixée, à l'aide d'un bouchon isolant, dans un récipient de verre qui protège les feuilles des courants d'air.

Lorsque l'on touche la sphère métallique conductrice avec un corps électrisé, une partie de la charge électrique se communique à la tige et se répartit jusque dans les feuilles qui se repoussent.

On peut aussi construire l'électroscope avec une seule lame mobile et une graduation qui montre l'importance de la charge.

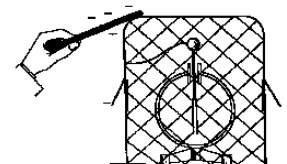


2) La cage de Faraday

Une cage de Faraday est conductrice et la charge électrique s'y répartit sur sa surface extérieure car les charges de même signe se repoussent le plus loin possible sur la surface. On ne constate pas d'effets électriques à l'intérieur de la cage.

Lors d'un orage, si la foudre tombe sur une voiture, on ne ressent pas d'effets électriques si l'on est à l'intérieur de la voiture.

Une radio mise sous une cage de Faraday ne reçoit plus d'ondes longues (LW) électromagnétiques.

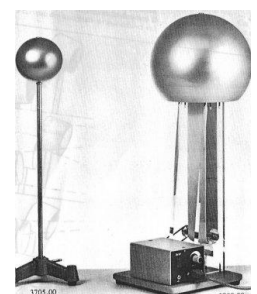
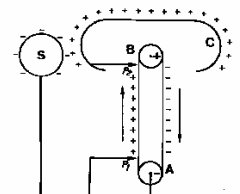


3) Le générateur de Van de Graaf

La machine de Van de Graaf se compose d'une large courroie en caoutchouc fermée sur elle-même et tendue entre deux tambours cylindriques aux axes parallèles. Le tambour inférieur est en métal et entraîne la courroie dans sa rotation grâce à un moteur. Le tambour supérieur est le plus souvent en plexiglas. Le frottement de la courroie contre le tambour en plexiglas électrise ce dernier positivement tandis que la courroie prend une charge négative.

Le peigne va se charger positivement par influence de la courroie négative. Il va transmettre la charge positive au capuchon où les charges + se répartissent également sur la surface. Le tambour inférieur relié à la terre régénère les charges : la demi courroie de droite abandonne en partie sa charge négative en passant sur le tambour inférieur. En passant par le peigne P_1 , la courroie est neutralisée et pourra à nouveau se charger sur le cylindre en plexiglas.

La sphère S est reliée à la terre et se charge négativement par rapport à la machine pour que la charge totale du système soit nulle. Lorsque l'on place S

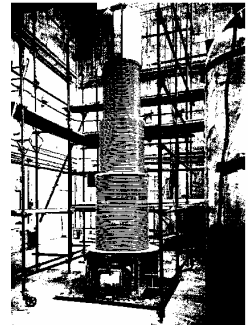


dans le voisinage de C, des étincelles jaillissent entre S et C ; elles peuvent atteindre une longueur de 10 cm.

Robert Lenison Van de Graaf (1901 - 1967), savant américain fit ses études à l'université d'Alabama où il obtint en 1923 le grade de Master Of Science. Il passa alors à la Sorbonne et ensuite à Oxford où il acquit en 1928 le titre de docteur en sciences.

C'est à Oxford que Van de Graaf conçut l'idée de construire un nouveau type de générateur électrostatique.

De 1929 à 1931, on trouve Van de Graaf à l'université de Princeton où il travaille avec K. Compton. De 1934 à 1960, il fut professeur de physique au Massachusetts Institute of Technology.



De puissants générateurs de Van de Graaf sont utilisés pour accélérer les particules qui opéreront les transmutations nucléaires artificielles. La figure ci-contre montre l'accélérateur de Van de Graaf de Saclay (Paris). Hauteur : 7 m.

3.1.5 La tension électrique U et le potentiel V

Rappelons que plus l'altitude d'un corps est grande, plus son énergie potentielle de pesanteur est élevée. Par analogie avec l'altitude d'un corps de masse m dans le champ de la pesanteur, on peut définir l'énergie potentielle W_{el} et le potentiel V d'une charge q dans un champ électrique.

$$W_p = m g h \quad \text{et} \quad W_{\text{el}} = q V$$

Le potentiel est donc une mesure de l'énergie potentielle des charges q.

La tension U ou différence de potentiel $U_{12} = V_1 - V_2 = U$ est une mesure de la différence d'énergie potentielle des charges q.

Il faut donc mesurer le potentiel en un point par rapport à une référence 0 et la tension entre deux points (par exemple 1 et 2).

La tension ou le potentiel se mesurent en **volts** en mémoire d'Alessandro Volta. $[V] = [U] = V$

$$V = W_{\text{el}} / q$$

$$U = \Delta W_{\text{el}} / q$$

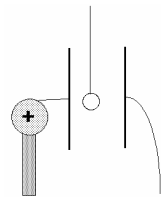
Pour mieux saisir la notion de potentiel ou de tension, on peut s'imaginer que la charge est un petit ressort qui est plus ou moins comprimé ou tendu selon sa tension. Il a donc plus ou moins d'énergie potentielle. Attention, ce modèle n'est qu'une analogie entre deux phénomènes de natures très différentes !

On pourrait aussi comparer le potentiel à l'altitude et la tension à la dénivellation.

Exercices - charges électriques

- 1) On est en présence d'un corps électrisé. Comment déterminer le signe de sa charge électrique ?
- 2) Une personne tente d'électriser une tige métallique qu'elle tient dans une main en la frottant avec un chiffon. Expliquer pourquoi elle n'y parvient pas.

- 3) Une boule métallisée est suspendue entre deux plaques métalliques parallèles chargées, l'une positivement et l'autre négativement. La boule frappe alternativement les plaques et s'arrête après quelques coups, les plaques étant déchargées.
- a) Quelle plaque la boule va-t-elle frapper en premier ?
b) Expliquer ce qui s'est passé.
- 4) Un bâtonnet de matière plastique chargé négativement est suspendu par des fils isolants. On approche de l'une de ses extrémités une tige métallique neutre tenue par l'intermédiaire d'un manche isolant. La tige et le bâtonnet s'attirent.
- a) Expliquer cette attraction.
b) Si le bâtonnet avait été chargé positivement, qu'aurait-on observé ?
- 5) Calculer la force électrique entre deux charges positives de 1 C placées à un mètre l'une de l'autre.
- 6) Une charge de 10 nC se trouve à 50 cm d'une charge Q. Elle est attirée par une force de 0,1 N. Déterminer Q.
- 7) Deux petites sphères sont chargées électriquement. On triple la distance qui les sépare. Comment varie l'intensité des forces électriques qui s'exercent sur ces sphères ?
- 8) Comparer les forces gravifique et électrique dans l'atome d'hydrogène en sachant que la distance entre proton et électron est de $5,3 \cdot 10^{-11}$ m. On le comparera ensuite au rapport diamètre de la galaxie / diamètre atome qui est de 100'000 a.l./1 Å soit $9,467 \cdot 10^{30}$. Montrer ensuite que le rapport des forces électrique et gravifique s'approche de celui entre l'horizon cosmologique (rayon de l'univers = 13 GAL.) et le noyau de l'atome (10^{-14} m).
- 9) Quelle est la force de répulsion électrique s'exerçant entre 2 protons dans un noyau de fer si l'on suppose que la distance qui les sépare est de $4 \cdot 10^{-15}$ m ? Comment expliquer la cohérence du noyau ?
- 10) Dans le modèle de Bohr, l'électron se comporte comme un satellite qui orbite autour du noyau sous l'effet de la force électrique. Le rayon de la trajectoire est $r = 1 \text{ Å} = 10^{-10}$ m. Calculer la vitesse et la période de l'électron autour du noyau.



Corrigé des ex. - charges et forces (E 7)

- 1) Avec un corps dont on connaît la charge.
- 2) Les charges quittent la tige car elle n'est pas isolante.
- 3) Par influence, les électrons de la boule se déplacent, donc les charges + sont vers la plaque chargée - et inversement. Lorsque la boule touche la plaque chargée -, elle prend une charge - et est repoussée par la plaque chargée - et attirée par la plaque chargée +.
- 4) a) Par influence, les électrons se déplacent donc les charges + de la tige sont vers le bâtonnet et les 2 corps s'attirent. b) Même chose : les charges - de la tige ...
- 5) 9000 MN ou $9 \cdot 10^9$ N.
- 6) $Q = Fd^2/(kq) = 0,28 \text{ mC}$.
- 7) Elle est divisée par 9 (carré de la distance).
- 8) Le rapport F_{el} / F_{gr} est de $2,273 \cdot 10^{39}$. Le rapport des distances vaut $1,23 \cdot 10^{40}$ (Univers/noyau).
- 9) La force $F = 14,43$ N et la cohérence du noyau vient du fait que la force nucléaire est beaucoup plus grande que la force électrique.
- 10) $v = (kq^2/(mr))^{1/2} = 1591 \text{ km/s}$ et $T = 2\pi r/v = 3,95 \cdot 10^{-16} \text{ s}$

3.2 CIRCUITS ELECTRIQUES

3.2.1 Eléments d'histoire de l'électricité

Histoire de Galvani et de Volta

Tout a commencé de façon bien étrange, par les expériences de Galvani sur les pattes des grenouilles : **Galvani** était professeur d'anatomie à l'université de Bologne en Italie. On savait que l'on pourrait provoquer des secousses sur des muscles d'animaux morts depuis peu en leur imprimant des chocs électriques. Galvani émit l'hypothèse que l'action des nerfs était de nature électrique et voulut vérifier cette idée expérimentalement. L'expérience eut lieu en 1786 et, comme cela arrive souvent dans le domaine de la science, au moment critique la chance servit le savant. Galvani et ses assistants faisaient une expérience sur les pattes arrière d'une grenouille disséquée. Un de ses assistants s'occupait des pattes pendant qu'un autre, à quelque distance de là, manœuvrait la machine électrostatique. Ils remarquèrent que si le scalpel touchait les nerfs de la grenouille au moment où la machine produisait une étincelle, les muscles se contractaient. Ils attirèrent l'attention de Galvani sur ce phénomène nouveau. Galvani vérifia que cela se répétait chaque fois que la lame de cuivre du scalpel touchait la plaque d'expérimentation en fer, réalisant ainsi un contact avec la terre. Ce fut le début de l'électricité.

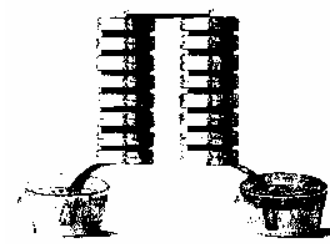
Galvani pensa alors que puisqu'un éclair était probablement une immense étincelle électrique, il devait produire les mêmes effets que l'étincelle de son laboratoire. Il relia des pattes de grenouille par des crochets de cuivre à un grillage de fer sur le toit de sa maison, par temps d'orage, et, effectivement, chaque éclair provoqua une contraction des pattes. Ayant renouvelé l'expérience par beau temps, Galvani constata avec surprise qu'il arrivait aux pattes de se contracter aussi dans ces conditions. Poursuivant plus avant, il plaça les pattes sur une plaque de fer et put observer une contraction chaque fois que le crochet de cuivre qui traversait le nerf prenait contact avec la plaque en fer. Il recommença l'expérience avec différents métaux, et constata que pour obtenir l'effet de contraction, il fallait établir le contact entre deux métaux différents, par exemple le fer et le cuivre, et que les contractions étaient plus violentes avec certains couples de métaux qu'avec d'autres. Il attribua ces effets à l'« électricité animale », et considéra les métaux comme faisant partie d'un circuit qui permettait à cette électricité animale de s'écouler et de stimuler les nerfs.



Volta était professeur de physique à l'Université de Pavie. Il refit l'expérience de Galvani, et tout d'abord accepta ses explications. Mais poussant plus loin l'expérimentation, il fut spécialement intrigué par la nécessité d'utiliser deux métaux différents pour obtenir la réaction. Il en vint à penser que le simple contact de deux métaux différents, comme le cuivre et le zinc, avait une sorte de pouvoir d'entraînement sur le « fluide électrique », comme une pompe, et tendait à le faire s'écouler. Il essaya des métaux divers, pas seulement pour leur action sur les muscles, mais aussi pour le goût qu'ils produisaient sur la langue, ou pour l'impression lumineuse provoquée quand l'un touchait le palais et l'autre le front. Comme Galvani, il remarqua que certains couples de métaux étaient plus actifs que d'autres et rangea les métaux utilisés dans l'ordre suivant : zinc, laiton, étain, fer, cuivre, argent, or de telle sorte que, plus les métaux étaient éloignés dans la série, plus leur réaction était intense. Finalement sur le corps humain, il découvrit le "potentiel de contact" : par exemple quand le zinc est en contact avec le cuivre, le zinc se charge positivement et le cuivre négativement.

Pour mesurer la petite différence de potentiel produite, il utilisa un instrument très ingénieux, l'électroscope condensateur, et remarqua que les potentiels développés par des paires de métaux permettaient à nouveau de les classer dans le même ordre que précédemment.

En 1800, dans une lettre à Sir Joseph Banks, président de la Royal Society à Londres, Volta décrivait un appareil nouveau qu'il venait d'inventer et qui produisait des effets très étonnants. Le principe de cet appareil s'appuyait sur les observations suivantes : ayant remarqué que le zinc se chargeait toujours positivement au contact du cuivre, Volta voulut accroître l'effet de contraction produit par le courant en multipliant le nombre de contacts, chacun ajoutant son action à celle des autres. Il se rendit compte qu'il n'y avait aucun intérêt à organiser une série zinc, cuivre, zinc, cuivre, etc., parce que l'augmentation de potentiel dans le sens cuivre zinc était annulée par la diminution de potentiel dans le sens zinc cuivre. Il essaya alors autre chose. Il intercala entre chaque couple de métaux un tampon neutre, non métallique, papier ou cuir trempé dans la saumure ou dans un acide, et ceci dans l'ordre cuivre, zinc, tampon,



cuivre, zinc, tampon, etc. Il remarqua qu'il avait ainsi multiplié l'effet, car sa pile de disques lui donnait un choc électrique, assez faible il est vrai. Mais il découvrit aussi, à son grand étonnement que, tout en donnant des chocs, elle n'épuisait pas sa charge : la pile continuait de donner des chocs chaque fois qu'il en touchait les extrémités. Il disait qu'elle semblait contenir "une charge inépuisable et une action perpétuelle sur le fluide électrique".

Il venait d'inventer la pile électrique et de mettre, pour la première fois, à la disposition de l'homme, un courant électrique continu.

Ci-contre, on a représenté un modèle de la pile de Volta. Les plaques sont en zinc (Z) et en argent (A). On sent une décharge si on met un doigt dans chaque récipient qui contient de l'eau salée.

Il y eut une polémique féroce entre Galvani suivi par ses disciples, qui croyaient à l'« *électricité animale* », et Volta, convaincu que l'effet électrique venait du contact entre des métaux différents. La pile de Volta semblait constituer la preuve définitive de sa théorie qui, cependant, n'était qu'une demi vérité. Le principe de la conservation de l'énergie était très vaguement compris à cette époque et il était possible pour Volta de croire que ses métaux différents continueraient à produire indéfiniment du courant, comme une machine à mouvement perpétuel. En réalité, bien entendu, sa pile cesse de fonctionner quand son énergie chimique est épuisée, mais les expériences de Volta nécessitaient une consommation de courant si minime qu'il n'y avait jamais épuisement. On conserve même, au Laboratoire de Physique d'Oxford, une pile qui fait tinter une cloche électrostatiquement depuis 1840 (ci-contre).

Il nous est maintenant facile de faire la part de vérité et d'erreur dans chacune des théories de Volta et de Galvani. La contraction musculaire que Galvani attribuait à juste titre à une impulsion électrique venue des nerfs, avait une deuxième origine, ce qui compliquait le problème. Les effets produits par les étincelles d'une machine électrostatique ou par un éclair, dès l'instant où le contact avec la terre était assuré par un conducteur de quelque nature que ce fût, étaient dus à ce que les pattes se chargeaient d'abord, puis se déchargeaient quand l'étincelle se produisait. D'autre part, quand les effets étaient produits par le contact de métaux différents sans étincelle, les liquides dans le corps de la grenouille avaient une action chimique sur les métaux et formaient avec eux les éléments de la pile, produisant ainsi le courant stimulant. Volta avait raison au sujet des différences de potentiel entre les métaux, mais il ne comprenait pas que les tampons de sa pile, trempés de liquide, n'étaient pas de simples conducteurs inertes, mais des agents chimiques actifs qui maintenaient la différence de potentiel et apportaient de l'énergie.

J'ai décrit les travaux de Galvani et de Volta en détail parce qu'ils présentent de remarquables exemples de découverte scientifique. Dans ce genre de recherches, la chance joue très souvent un rôle mais elle ne fait pas tout : il faut un esprit entraîné à l'observation et capable d'intuition pour interpréter les résultats, et une volonté tenace pour poursuivre des expériences jusqu'à obtenir une explication satisfaisante. Comme Lagrange l'aurait dit, "Les hasards n'arrivent qu'à ceux qui les méritent."

La pile de Volta éveilla un intérêt intense dans le monde scientifique de l'époque parce que le courant électrique était alors un phénomène entièrement nouveau et inattendu. En quelques mois, des batteries vraiment puissantes, produisant de forts courants furent imaginées. On découvrit aussi que le courant électrique sépare les éléments des corps composés.



Principaux découvreurs de l'électrocinétique :

- **Luigi Galvani**, physicien italien, (1737-1798) observe, en 1786, les contractions des muscles d'une grenouille posée sur une plaque de cuivre, dont on avait approché des nerfs la pointe d'un scalpel en acier. Il attribue ce phénomène à une *électricité animale*, interprétation combattue victorieusement par Volta, qui met en cause le contact de deux métaux différents (acier - cuivre).
- **Alessandro Volta**, physicien italien, (1745-1827) est mis sur la piste par Galvani et invente la pile électrique en 1800. L'unité de tension ou potentiel électrique porte son nom.
- **André-Marie Ampère**, physicien français, (1775-1836) trouve la loi qui permet de calculer un champ d'induction magnétique à partir du courant. Il invente le galvanomètre, le télégraphe électrique et, avec Arago, l'électro-aimant. L'unité d'intensité du courant porte son nom.
- **Georg Simon Ohm**, physicien allemand, (1789-1854) découvre, en 1827, la loi reliant la tension et le courant dans une résistance électrique.
- **Gustav Kirchhoff**, physicien allemand, (1824-1887) formalise les lois qui permettent de calculer les circuits en courant continu.

3.2.2 Le courant électrique ou intensité I

"Ce jour-là, je comptais les électrons qui passaient devant moi dans un conducteur. Au début, les électrons s'agitaient dans tous les sens ; alors ajouter ceux qui passaient dans un sens et retrancher ceux qui passaient dans le sens opposé, quelle histoire ! Juste après la fermeture d'un interrupteur, les choses se sont améliorées : le mouvement des électrons s'est ordonné. Notre travail restait pourtant très pénible puisque à chaque seconde, le nombre d'électrons dépassait 10^{19} . Nous étions relevés toutes les minutes pour récupérer... On a fini par créer des machines pour nous remplacer."

Extrait des mémoires d'un conducteur d'électrons.

L'intensité du courant électrique I mesure la charge débitée par unité de temps :

$$I = \Delta Q / \Delta t$$

Son unité est l'ampère [I] = A, donnée en souvenir du physicien français André-Marie Ampère.

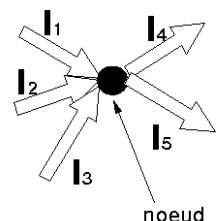
Le courant électrique va du plus (+) au moins (-) par définition mais les électrons qui le composent vont du moins (-) au plus (+). En effet, le courant électrique est une notion du début du 19^{ème} siècle et ce n'est qu'en **1897** que **J.-J. Thomson découvrit l'électron** qui a une charge négative et va donc du moins (-) au plus (+). Le sens du courant n'a pas été changé depuis 1897 et va toujours en sens inverse des électrons.

L'électricité étant une notion abstraite, nous pouvons tenter de faire comprendre les notions en comparant le courant électrique I dans un fil au débit D d'eau dans une conduite.



Si plusieurs fils 1, 2 et 3 se rejoignent en un nœud et repartent par les fils 4 et 5, la somme des courants qui arrivent en 1, 2 et 3 est égale à la somme des courants qui repartent en 4 et 5 car il ne peut pas y avoir d'accumulation de charges dans le circuit. C'est la **loi de Kirchhoff des courants** qui exprime la **conservation du courant** au passage d'un nœud.

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_4 + I_5$$



3.2.3) Conducteurs et isolants...

Les matériaux utilisés pour la construction des nombreux appareils utilisant l'électricité doivent posséder des propriétés qui les rendent aptes à ces applications soit par leurs caractères de bons conducteurs, soit à l'inverse, par le fait qu'ils sont isolants.

Ce sont évidemment les métaux et leurs alliages qui constituent la quasi-totalité des conducteurs de l'électricité. Il faut noter, d'ailleurs, qu'un bon conducteur de l'électricité est en même temps un bon conducteur de la chaleur.

1) Conducteurs métalliques

Les charges peuvent circuler grâce aux **électrons libres** du métal. Il s'agit en général d'un électron de la dernière couche (périphérique) de l'atome qui est très peu lié au noyau. Les électrons libres forment une sorte de "mer d'électrons" qui permet aux charges de se déplacer facilement dans le métal.

Le **cuivre** et l'**aluminium**, mais aussi l'argent, l'**or**, le plomb, le zinc, le laiton, le mercure et le tungstène, sont les principaux métaux de l'industrie électrique.

- De couleur rouge, le **cuivre** d'usage courant contient moins de 0,01% d'impuretés. C'est le meilleur conducteur après l'or et l'argent. Il se soude facilement ; sa ductilité (propriété d'être étiré en fils) est grande, tout comme sa malléabilité, ce qui explique son rôle prépondérant du point de vue électrique.
- L'**or**, matériau inoxydable et bon conducteur est parfois utilisé pour des connecteurs.
- L'**aluminium** est un métal produit en aussi grande quantité que le cuivre qu'il remplace parfois dans certaines applications électriques comme les lignes à haute tension. C'est surtout sa masse volumique beaucoup plus faible (environ 2700 kg/m³ au lieu de 8900 kg/m³ pour le cuivre), alliée à la possibilité d'acquérir un poli superficiel bien blanc et brillant, qui le rendent si utile.
- Le **laiton** est un alliage de cuivre et de zinc, allant jusqu'à une proportion de 45% pour ce dernier. Sa couleur jaune le distingue très nettement du cuivre. Ayant une dureté et une résistance mécanique supérieures à celles du cuivre, il le remplace avantageusement à chaque fois que des effets mécaniques sont demandés par exemple pour les contacts, plots, prises de courant, douilles de lampes, interrupteurs, commutateurs.
- L'**étain, allié au plomb**, constitue la soudure bien connue des électriciens.
- Le **nichrome** (alliages de nickel et de chrome) constitue la majorité des résistances électriques des appareils chauffants à cause de la constance de sa résistance quelle que soit la température.
- Le **tungstène**, dont la température de fusion dépasse 3'000°C, reste l'élément constitutif des ampoules à incandescence à l'intérieur desquelles il est porté à 2'700°C en émettant le rayonnement lumineux dont nos habitations ne sauraient plus se passer.
- Le **mercure**, seul métal qui soit liquide à la température ordinaire, trouve une application dans les interrupteurs de puissance à contact liquide.

Nous verrons avec la loi d'Ohm, que les meilleurs conducteurs dans l'ordre décroissant sont :

- | | | |
|----|-------------|--|
| 1) | L'argent | un peu cher |
| 2) | Le cuivre | le plus utilisé (presque tous les fils) |
| 3) | L'or | inoxydable |
| 4) | L'aluminium | très léger mais difficile à souder (lignes HT) |

2) Conducteurs ioniques

L'énergie électrique se transmet par les ions d'une solution ou de l'air (ionisé lors d'un coup de foudre). Le déplacement des ions permet un courant de charges électriques par exemple dans :

- | | | |
|----|-----------------------|-----------------------------------|
| 1) | L'eau | <i>lorsqu'elle n'est pas pure</i> |
| 2) | Les solutions salines | <i>sels, acides...</i> |

3) Isolants

Les **électrons** de la couche périphérique sont **fortement liés au noyau**. Les charges ne peuvent donc presque pas se déplacer. Autant les conducteurs sont nécessaires pour la mise en œuvre de l'énergie électrique. Autant il est indispensable que des isolants aussi parfaits que possible apportent leur aide pour cette domestication. Les plus anciens d'entre eux sont d'origine minérale mais on utilise dans les appareils actuels des produits issus de la chimie (polymères, fibres, résines...)

- Le **mica** est un silicate d'aluminium et de potassium, L'un des trois constituants du granit (avec le quartz et le feldspath) est le meilleur de tous. Utilisable sans difficulté jusqu'à 500°C, on le trouve dans les fers à repasser, grille-pain et autres appareils chauffants.
- Le **verre et la fibre** composés de silice, de chaux et de carbonate de sodium ont de nombreuses applications comme isolants de lignes aériennes (isolateurs).
- Les **céramiques** sont fabriquées à partir de l'argile, de kaolin (silicate de magnésium). Le **papier** huilé, le **coton** tissé en toile ou en gaine, le **bois**, à condition de rester en atmosphère sèche et le **caoutchouc** d'origine végétale ont d'excellentes propriétés d'isolants. Mais ils sont maintenant remplacés par :
- Une gamme étendue de matières **plastiques (polymères)** et des **résines** synthétiques dont les propriétés sont chaque jour améliorées.

4) Semi-conducteurs

C'est une série de matériaux qui ne sont ni conducteurs ni isolants. On les utilise principalement pour faire les circuits électroniques qui sont les briques de base des appareils qui transmettent et gèrent l'information. (Montres, machines à calculer, radio, ordinateur, TV ...). Les plus utilisés sont :

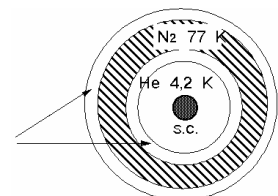
- Le silicium Si O_2 le plus utilisé car assez bon marché.
- Le germanium Ge utilisé pour les premiers semi-conducteurs.
- L'arséniure de gallium Ga As utilisé en optoélectronique.

5) Supraconducteurs

En 1919 on a découvert que certains métaux (mauvais conducteurs de surcroît) perdent toute résistance au passage des charges au-dessous d'une **température critique** de l'ordre de 10 degrés Kelvin (-263°C voir exemples ci-dessous). Expérimentalement, on a constaté qu'un courant électrique pouvait circuler dans un supraconducteur pendant plus d'une année sans perdre d'énergie. On peut avoir une image du phénomène en se représentant les électrons par paires, liés par un "pseudo ressort", qui rebondissent sans perdre d'énergie sur le réseau atomique. On donne ci-dessous quelques températures critiques :

- Niobium	9,46 K	- Etain	3,72 K	- Vanadium	5,3 K
- Plomb	7,18 K	- Indium	3,41 K	- Aluminium	1,19 K
- Certains alliages jusqu'à environ 23 K.					

Le schéma ci-contre montre la coupe d'un réfrigérant supraconducteur. On utilise deux bouteilles de Dewar (thermos) l'une dans l'autre avec de l'hélium liquide à 4,2 K à l'intérieur et de l'azote liquide à 77 K autour de la première enceinte car des températures de l'ordre de 10 K sont assez difficiles à obtenir.



En 1987, on a découvert des **céramiques supraconductrices à haute température** (> 76 K) qui sont malheureusement assez cassantes. Les développements futurs permettront peut-être une utilisation plus courante de ces matériaux.

Ces céramiques sont à base de terres rares (lanthane, strontium, baryum et yttrium) et d'oxyde de cuivre ; on les appelle les **oxydes de Zürich**.

3.2.4 Modèle d'un circuit électrique

La circulation de l'énergie électrique est quelque chose d'invisible. On peut la comparer avec cette machine qui fournit de l'énergie hydraulique. L'eau qui chute produit de l'énergie. Chaque partie de cette machine a un rapport avec un circuit composé d'une batterie alimentant une ampoule au travers d'une résistance variable.

1) Générateur = pompe

Il est composé d'une "vis d'Archimède. Il est l'équivalent d'une batterie. Le sommet de la vis correspond à la borne positive ; celle-ci génère des charges en force suffisante pour allumer l'ampoule du circuit correspondant. La hauteur de l'élévateur correspond à la tension.

2) Vanne = interrupteur et résistance variable

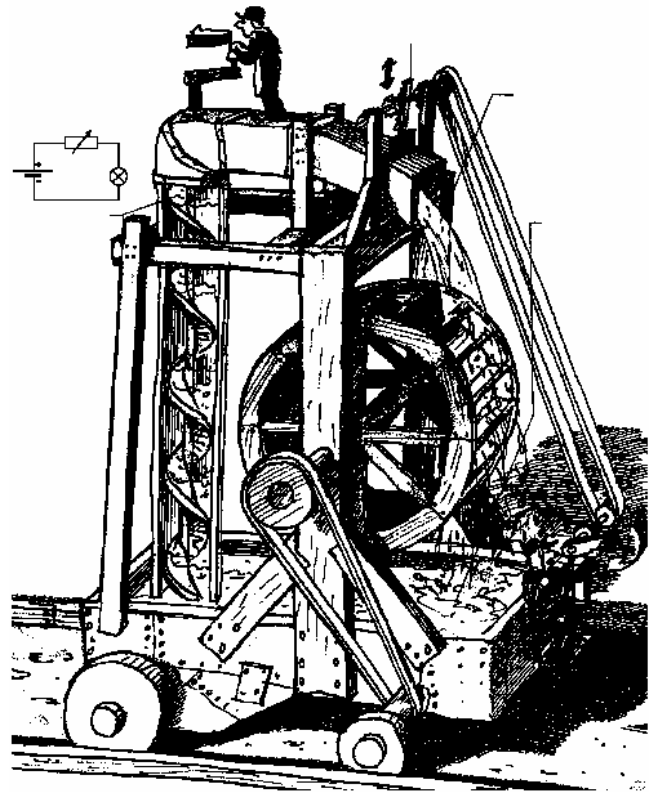
Lorsque celle-ci est ouverte, suffisamment d'eau se déverse sur la roue à aube et actionne la machine. La vanne règle le débit et la résistance variable règle l'intensité du courant au travers de l'ampoule.

3) Tuyaux ou voie d'eau = fils conducteurs

La quantité d'eau qui coule par unité de temps correspond au courant. Elle dépend de la hauteur de l'élévateur (tension) et de la position de la vanne (résistance variable)

4) Roue à aube = consommateur

Après avoir coulé le long des aubes, en entraînant la roue dans un mouvement de rotation qui correspond à l'énergie dégagée par l'ampoule du circuit électrique, l'eau a perdu toute son énergie. On arrive ainsi à la borne négative de la batterie.

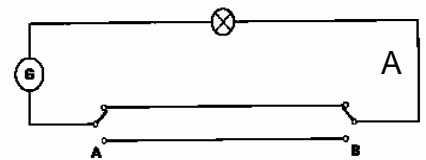


Tiré du livre "Comment ça marche" (Macaulay).

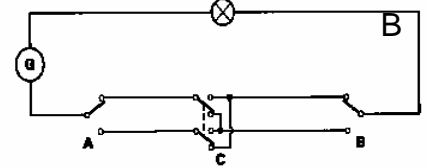
Exercices - courant électrique

- 1) Une batterie débite un courant $I = 1,5 \text{ A}$ pendant $t = 70$ heures. Quelle est la charge Q mise en jeu pendant cette durée t ?
- 2) Une batterie d'automobile porte l'inscription : $45 \text{ Ah} / 200 \text{ A}$
 - a) Pendant quelle durée t la batterie peut-elle débiter un courant $I = 1 \text{ A}$?
 - b) Calculer la charge électrique Q que cette batterie fait circuler pendant les deux secondes du démarrage du moteur en admettant que le courant est de $I = 120 \text{ A}$.
- 3) Un coup de foudre est un phénomène pouvant durer quelques dixièmes de seconde et au cours duquel une suite de 5 à 40 décharges électriques ont lieu entre un nuage et le sol. Chacune de ces décharges met en jeu une quantité d'électricité d'environ 1 C et dure environ $10 \mu\text{s}$.
 - a) Quel courant électrique, supposé constant durant la décharge, passe dans le canal de l'éclair ?
 - b) Que penser de l'hypothèse du courant constant ?

- 4) Une ampoule électrique est parcourue par un courant $I = 0,5 \text{ A}$. Quelle charge électrique Q traverse cette ampoule en une minute ?



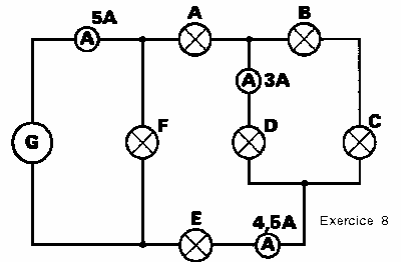
- 5) Si 3600 milliards d'électrons traversent un fil siège d'un courant continu en 0.001 s, que vaut l'intensité I du courant ?



- 6) Expliquer à quoi servent les circuits A et B ci-contre.

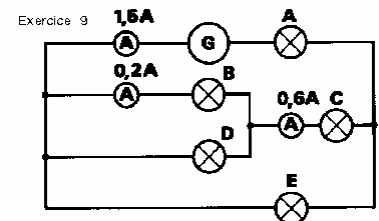
- 7) Une guirlande lumineuse comprenant 10 ampoules montées en série est branchée sur une source de courant.

- Dessiner un schéma de ce circuit.
- Si une ampoule ne fonctionne plus, que se passe-t-il ?
- Mêmes questions si les 10 ampoules sont montées en parallèle.



- 8) Quelles sont les intensités des courants qui traversent les ampoules A, B, C, D, E et F ?

- 9) Quelles sont les intensités des courants qui traversent les ampoules A, B, C, D et E ?



3.2.5 La tension U ou différence de potentiel électrique

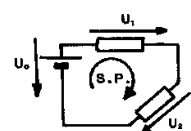

Le **potentiel V** est une mesure de l'énergie potentielle des charges q. La **tension ou différence de potentiel** $U_{12} = V_1 - V_2$ est une mesure de la différence d'énergie potentielle des charges q. La tension s'appelle **U** à cause du terme allemand **Urspannung** qui signifie tension d'origine.

$V = W_{el} / q$ et $U = \Delta W_{el} / q$

La définition de l'énergie électrique est donnée dans le paragraphe suivant et elle est liée à la charge et à la tension ou au potentiel. La tension ou le potentiel se mesurent en **volts** en mémoire d'Alessandro **Volta**. $[V] = [U] = \mathbf{V}$. Il faut mesurer le potentiel par rapport à une référence 0 V **mais la tension se mesure entre deux points 1 et 2**.

Pour mieux saisir la notion de potentiel ou tension, on pourrait s'imaginer que la charge est un petit ressort qui est plus ou moins comprimé ou tendu donc qui a plus ou moins d'énergie potentielle. Attention, ce modèle permet juste de se faire une vague idée de cette notion. On pourrait aussi comparer le potentiel à l'altitude et la tension à la dénivellation. Ainsi, une centrale au fil de l'eau aurait une faible tension (dénivellation) et un gros courant (débit) et une centrale à haute chute (Hongrin, Dixence, Emosson...) aurait une haute tension (dénivellation) et un faible courant (débit).

Dans un circuit électrique fermé, la somme des tensions prises dans un sens défini le long d'une boucle mesurée selon le sens de parcours (S.P) est nulle. C'est la **loi de Kirchhoff des tensions**. Si l'on prend un circuit simple formé d'un générateur et d'un récepteur, les tensions du générateur et du récepteur sont égales ; si l'on tourne dans le même sens, une tension est positive et l'autre négative ; la somme est donc nulle :



Loi de Kirchhoff des tensions = loi de conservation de la tension

$$-U_0 + U_1 + U_2 = 0$$

Quelques ordres de grandeurs de tension en volts et analogie hydraulique - électrique

		Circuit hydraulique (cascade)	Circuit électrique
10^8	valeur moyenne d'un coup de foudre	Objets	Roue à godets
10^6	générateur électrostatique		Générateur
400'000	Ligne à très haute tension		Eau en circulation
100'000	tubes à rayons X utilisés en radiographie		Résistance où a lieu l'effet Joule
25'000	réseau S.N.C.F. récent	Grandeurs physiques	Conduite (tuyau)
20'000	sortie d'une centrale électrique		Masse d'eau m débitée par seconde
1'500	alimentation du R.E.R.		Énergie dissipée sous forme de chaleur dans la résistance.
220-380	réseau domestique		Énergie potentielle mgh perdue par une masse m d'eau tombant d'une hauteur h
25	seuil moyen des tensions dangereuses		Énergie W = dissipée par une charge q.
12	batterie d'automobile		La grandeur obtenue en multipliant la gravitation g par h s'exprime en J/kg.
4,5	pile		La tension U s'exprime en J/... = V
$70 \cdot 10^{-3}$	neurone		Le débit massique est la masse par unité de temps $\Delta m = m/t$.
$90 \cdot 10^{-3}$	cellule musculaire.		L'intensité I du courant est la charge par unité de temps $I = \dots\dots\dots$
			Il se mesure en kg/s.
			Elle se mesure en
			La puissance s'exprime par : $P = W/t = mgh/t = D_m g h$.
			La puissance s'exprime par : $P = \dots\dots\dots$

Extrait des mémoires d'un électron de conduction.

"... Dans le conducteur, on fait ce que l'on veut : on se promène d'atome en atome, on croise des copains, on s'entrechoque..."

Mais dès qu'un générateur est branché, finie la liberté ! Une force irrésistible nous impose de faire le tour du circuit et, ce qui est moins amusant, de traverser le générateur. On y est brutalement poussé en avant..."

"Tout se passe bien lorsque le générateur est adapté au circuit. Sinon... attention aux dégâts ! Un électron se trouvait dans le filament d'une ampoule 4,5 V. Un maladroit l'a branchée sur le secteur (230 V). Le filament a fondu et mon copain électron a eu chaud aux oreilles ! Il y a eu comme un grand vent de panique dans le réseau atomique. Il s'en souviendra longtemps !"

3.2.6 L'énergie W et la puissance électrique P

L'énergie électrique est l'énergie potentielle d'une charge électrique :

$$\Delta W = q U \quad \text{et} \quad W = q V$$

Dans notre analogie hydraulique, l'énergie serait potentielle :

$$\Delta W_{el} = q U \quad \text{<---->} \quad \Delta W_{mec} = m g \Delta h$$

La charge correspond à la masse

La tension correspond au produit de la gravitation g et de la dénivellation Δh .La puissance électrique est le produit de la tension et du courant, rappelons qu'elle se mesure en **watt W** ou joules par seconde.

$$\Delta P_{el} = \Delta W / t = q U / t = (q/t) U = I U \Rightarrow \boxed{P = U I} \quad [W = J/s] \quad \text{qui est la loi de Joule}$$

La loi de Joule $P = U I$ peut se

mémoriser par un moyen mnémotechnique simple : PUIssance.

La puissance hydraulique vaut $m g h / t = (m/t) g h = D g h$; on peut la comparer avec $P_{el} = U I$ (car le débit D correspond au courant I et la dénivellation h fois la gravitation g à la tension U).

Exercices – tension et puissance

- 1) Une prise 230 V est protégée par un fusible de 10 A. Quelle est la puissance maximale que l'on peut tirer de la prise électrique ?
- 2) Une pile de 9 V entretient dans un circuit la circulation de $6 \cdot 10^{16}$ électrons par seconde. Quelle énergie fournit-elle en 1 minute ?
- 3) La puissance de la centrale hydroélectrique de Nendaz est de 480 MW. L'énergie est envoyée sur trois phases (courant triphasé). La tension entre chaque phase et la terre est de 220 kV sur le transformateur de sortie de l'usine. Quelle est l'intensité du courant dans chaque phase de la ligne à haute tension ?
- 4) Un grille pain consomme une puissance électrique de 1000 W sur le réseau 230 V. Il faut alors une minute pour griller deux tranches de pain. Déterminer le coût de l'opération sachant que le kWh est facturé 25 centimes.
- 5) Une guirlande lumineuse comprend 20 ampoules identiques de 15 W montées en parallèle. Elle est branchée à une prise 230 V.
 - a) Quelle est la différence de potentiel aux bornes de chaque ampoule ?
 - b) Quelle est l'intensité du courant qui traverse chaque ampoule ?
 - c) Que se passe-t-il si la prise est protégée par un fusible de 6 A ?

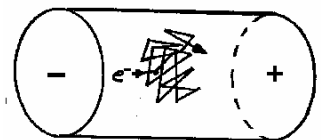
3.2.7 La résistance et la loi d'Ohm

"... A la sortie du générateur, nous traversons des résistances, petites bêtes à deux pattes ; on rentre par l'une et on sort par l'autre. Bien sûr, il y a un peu de bousculade à l'entrée de certains consommateurs ; ils résistent plus que d'autres - c'est comme une canalisation d'eau qui tout à coup se rétrécit (c'est mon copain électron d'une molécule d'eau qui me l'a dit) - mais après l'enfer du générateur, quel calme ce voyage dans les résistances !..."

Extrait des mémoires d'un électron de conduction.

Dans un conducteur, les électrons voyagent par chocs successifs sur les atomes du matériau. Un de leurs trajets pourrait être celui représenté ci-contre.

Pour se représenter le trajet d'un électron dans un conducteur, on peut s'imaginer la situation suivante :



"Deux heures du matin, une rue déserte balayée par le vent qui souffle dans le sens de la rue. Un ivrogne a été mis à la porte du dernier bar. Il ne peut tenir sur ses jambes que sur une distance de 5 mètres après quoi il tombe et part dans une direction quelconque. Sous l'influence du vent (que l'on peut comparer au champ électrique), il avance quand même légèrement mais sa vitesse de progression dans la rue reste extrêmement faible..."

Le mouvement des électrons est extrêmement sinueux (figure ci-dessus) avec une vitesse de l'ordre de 100'000 km/s entre deux chocs. Mais, par un mouvement de proche en proche, la vitesse de transmission du courant sur un fil est de l'ordre de 100'000 km/s. Le trajet d'un électron le long d'un conducteur est de l'ordre de 1 mm/s à cause de ses chocs et retours en arrière successifs (on pourrait comparer l'électron à l'ivrogne décrit ci-dessus). Le tableau de la page suivante donne quelques valeurs.

Ces chocs sont à l'origine d'une perte d'énergie. On peut les modéliser par une force de frottement qui travaille le long du trajet de l'électron et qui produit une transformation d'énergie électrique en énergie thermique appelée effet Joule, donc une diminution du potentiel (énergie des électrons) le long du conducteur.

On dit que le conducteur offre une résistance au passage du courant d'électrons. Il faudra donc une tension aux bornes du conducteur pour compenser la perte d'énergie des électrons et leur permettre d'avancer dans le conducteur.

Nous allons définir la résistance R du conducteur : si l'on met une faible tension U aux bornes d'un conducteur de résistance R , le courant sera faible car l'énergie pour compenser le travail des forces de frottement sera faible et permettra donc peu de passages des charges électriques. Si on augmente la tension, le courant augmentera aussi proportionnellement. Nous en tirons la **première loi d'Ohm** :

$$U = R I \quad [R] = \Omega$$

La résistance $R = U/I$ s'exprime en volt par ampère ou **ohms** Ω^1 en souvenir de Georg Simon Ohm qui découvrit cette loi en 1827. Un moyen mnémotechnique simple pour se souvenir de cette loi consiste à se rappeler un des cantons primitifs de la Confédération Suisse.

Une conduite ou un tuyau d'eau peuvent être comparés à une résistance R électrique car ils s'opposent au passage de l'eau par des forces de frottement. Pour un certain tuyau, plus la dénivellation (U) est forte, plus le débit (I) est grand. On retrouve donc une loi d'Ohm hydraulique.

Pour un certain tuyau de longueur L , plus sa section est grande, plus sa résistance sera faible ; plus sa longueur est grande, plus sa résistance augmentera. La seconde loi d'Ohm donne la résistance d'un conducteur en fonction de sa longueur, de la section du conducteur et du matériau.

$$R = \rho L / S \quad [\rho] = \Omega m$$

La loi de la page précédente est parfois appelée **seconde loi d'Ohm** et la constante qui caractérise le matériau s'appelle la **résistivité** ρ et se mesure en ohm mètre (Ωm) car on peut montrer facilement que :

$$\Omega = (\Omega m) m / m^2 \quad 1 n\Omega m = 10^{-9} \Omega m$$

- Le meilleur conducteur connu est l'**argent** avec une résistivité de 15,9 n Ωm .
- On utilise en général du **cuivre** de résistivité de 16,8 n Ωm .
- L'**aluminium** de résistivité de 27 n Ωm est utilisé pour les lignes électriques car il est léger et bon conducteur électrique.
- Pour les corps de chauffe, on utilise souvent le **constantan**, alliage de 60% de cuivre et de 40% de nickel de résistivité de 490 n Ωm .

Les valeurs qui ne figurent pas ici sont données dans le formulaire et tables CRP.

*La valeur de la résistance varie avec la température. En effet, les atomes du matériau ont un mouvement plus important à haute température, ce qui freine encore le mouvement moyen des électrons. La résistance R tend donc à augmenter avec la température. Dans un petit domaine de variation ($-50^\circ C \rightarrow 150^\circ C$), on peut adopter une loi de variation linéaire valable pour R ou ρ . Nous appellerons la relation ci dessous la **troisième loi d'Ohm**. La variation de la résistance ΔR est proportionnelle à la résistance R_0 et à l'élévation de température $\Delta \theta (= \Delta T)$ et la variation de la résistivité $\Delta \rho$ est proportionnelle à la résistivité ρ_0 et à l'élévation de température $\Delta \theta (= \Delta T)$.*

$$R - R_0 = \Delta R = \alpha R_0 \Delta \theta \quad \text{et} \quad \rho - \rho_0 = \Delta \rho = \alpha \rho_0 \Delta \theta$$

¹ $\Omega = V/A = J/(CA) = Nm/(AsA) = kgmm/(s^2A^2s) = kgm^2/(A^2s^3)$

α est le **coefficient de température de la résistance** et s'exprime en $1/K$ ou $1/^\circ C$. Parmi les métaux, le constantan a une résistance qui ne varie quasiment pas en fonction de la température. Les valeurs R_0 ou ρ_0 sont mesurées à $20^\circ C$ qui est la température de laboratoire. Les valeurs de α sont données dans le formulaire et tables CRP.

On peut modifier l'expression de la loi de Joule ($P = UI$) en tenant compte de la loi d'Ohm ($U = RI$) :

$$P = (RI)I \Rightarrow P = RI^2$$

$$P = U(U/R) \Rightarrow P = U^2/R$$

Ci-dessous, on a calculé quelques valeurs de la vitesse moyenne (extrêmement lente) des électrons libres pour un courant de 1 A et 1 électron libre par atome en moyenne. On se rend compte que la vitesse moyenne d'un électron dans un fil est extrêmement faible alors que celle de la transmission de l'électricité est quasiment instantanée (proche de la vitesse de la lumière) :

Métal	Masse atomique	masse volumique	n. é libres par m^3	diamètre	Vitesse	Résistivité ρ [$10^{-8} \Omega m$]
	[g]	[kg/m ³]	[$10^{28} m^{-3}$]	[mm]	[mm/s]	
Cuivre	63.546	8920	8.453	0.1	9.40	1.68
Conducteur le plus utilisé pour les installations électriques. C'est un bon conducteur facile à souder mais il est lourd.				0.5	0.38	
				1	0.09	
				5	0.004	
Or	196.97	18880	5.772	0.1	13.77	2.21
Bon conducteur inoxydable mais cher utilisé pour quelques connecteurs électroniques en informatique.				0.5	0.54	
				1	0.14	
				5	0.01	
Aluminium	26.982	2702	6.031	0.1	13.18	2.7
Conducteur léger utilisé pour les lignes haute tension. Il est difficile à souder.				0.5	0.53	
				1	0.13	
				5	0.01	
Tungstène	183.85	19350	6.338	0.1	12.54	5.6
La température de fusion de ce métal est de $3410^\circ C$. On l'utilise donc pour les filaments des ampoules qui peuvent être portés à très haute température et émettre une lumière très blanche.				0.2	3.13	
				0.5	0.50	
				1	0.13	
				5	0.01	
Laiton	64	8470	7.97	0.1	9.97	7
Alliage 70% Cu et 30% Zn particulièrement résistant utilisé dans les contacts des interrupteurs.				0.5	0.38	
				1	0.09	
				5	0.004	
Constantan	60	8200	8.23	0.1	9.66	49
Alliage 60% Cu et 40 % Ni de résistance qui ne varie quasiment pas avec la température. Il est utilisé pour les corps de chauffe.				0.5	0.39	
				1	0.10	
				5	0.004	

Exercices - lois d'Ohm

Loi d'Ohm 1

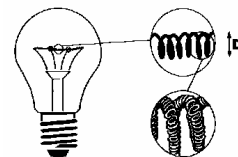
- 1) Il apparaît une tension $U = 10 \text{ V}$ entre les extrémités d'un fil lorsqu'il est parcouru par un courant $I = 5 \text{ A}$. Déterminer sa résistance R .
- 2) Un thermoplongeur de puissance $P = 400 \text{ W}$ est branché sur une prise 230 V . Calculer l'intensité du courant I qui le traverse et sa résistance électrique R .
- 3) Une ampoule de phare d'automobile a une puissance de 60 W quand elle est branchée aux bornes d'une batterie de 12 V . Calculer la résistance de cette ampoule.
- 4) Un thermoplongeur a une puissance $P = 400 \text{ W}$ quand il est branché sur une prise $U = 230 \text{ V}$. Que devient sa puissance P' si on le branche sur $U' = 115 \text{ V}$?
- 5) Une résistance $R = 24 \Omega$ a une puissance thermique $P = 600 \text{ W}$. Calculer l'intensité du courant I qui la traverse et l'énergie dégagée en 1 h .
- 6) La tension appliquée aux bornes d'un corps de chauffe varie de 5% . Quelle variation de puissance en résulte-t-il ?

Loi d'Ohm 2

- 7) Un corps de chauffe est immergé dans l'eau d'un bûcher. Il est raccordé à une source de tension fixe de 12 V . On désire augmenter la puissance de chauffage. Faut-il allonger ou raccourcir le fil du corps de chauffe ?
- 8) Un fil de 90 cm de longueur et de $0,30 \text{ mm}$ de diamètre a une résistance de 6Ω . Calculer la résistivité de l'alliage qui le constitue.
- 9) On branche par mégarde une ampoule « $12 \text{ V } 15 \text{ W}$ » sur une source de tension de 6 V . Le courant qui traverse cette ampoule est-il deux fois plus petit que le courant nominal (en fonctionnement normal) ?
- 10) Calculer la résistance d'un cordon de connexion en cuivre de 1 m de longueur et de $2,5 \text{ mm}^2$ de section.
- 11) Un axone (fibre nerveuse) peut être considéré comme un long cylindre de $10 \mu\text{m}$ de diamètre et de 30 cm de longueur. Quelle est sa résistance R si sa résistivité est de $2 \Omega\text{m}$?

Loi d'Ohm 3

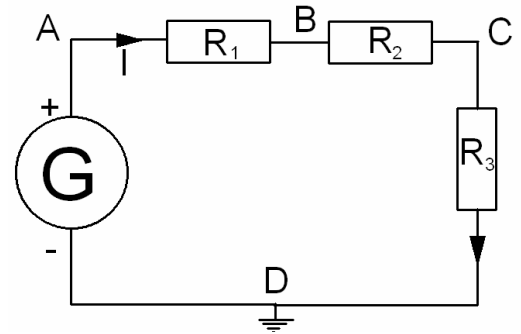
- 12) *Un fil de fer a une résistance de $0,5 \Omega$ à 20°C .*
 - a) *Quelle est sa résistance quand on le chauffe au rouge, à 900°C ?*
 - b) *Même question pour un fil de constantan.*
- 13) *Le filament d'une ampoule est enroulé en une double spirale. Le matériau choisi est le tungstène à cause de la haute température de son point de fusion (3400°C). On peut porter donc ce fil à une température très élevée. Une ampoule marquée « 60 W et 230 V », par exemple, est munie d'un filament d'environ $0,020 \text{ mm}$ de diamètre et de 67Ω de résistance à 20°C .*
 - a) *Quelle est la longueur du filament de cette ampoule ?*
 - b) *Quelle est l'utilité de la double spirale du filament et pourquoi ne se consume-t-il pas ?*
 - c) *Calculer la température du filament grâce à la résistance à chaud.*



3.2.8 Circuit avec des résistances en série et en parallèle

a) Résistances en série

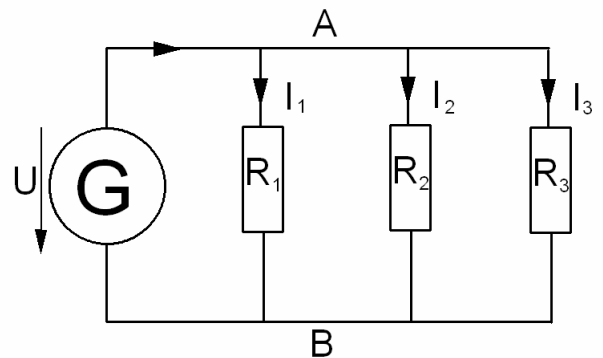
Le circuit ci-contre est composé de 3 résistances $R_1 = 2 \Omega$; $R_2 = 3 \Omega$ et $R_3 = 1 \Omega$ branchées en série et parcourues par un courant $I = 2 \text{ A}$.



- Appliquer les lois d'Ohm et de Kirchhoff pour trouver les tensions aux bornes des résistances et du générateur.
- Quelle est la valeur de la **résistance équivalente série** $R_{\text{és}}$ qui est traversée par le même courant I lorsqu'elle est soumise à la même tension du générateur U ?
- Prouver que $R_{\text{és}} = R_1 + R_2 + R_3 = \sum R_i$.

b) Résistances en parallèle

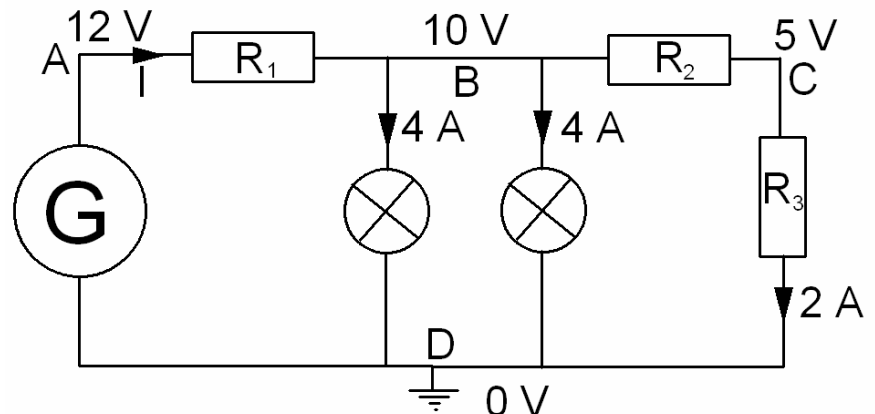
Le circuit ci-contre est composé de 3 résistances $R_1 = 2 \Omega$; $R_2 = 3 \Omega$ et $R_3 = 4 \Omega$ branchées en parallèle et parcourues par différents courants. La tension du générateur est de 12 V .



- Appliquer les lois d'Ohm et de Kirchhoff pour trouver les courants au travers des résistances et du générateur.
- Quelle est la valeur de la **résistance équivalente parallèle** $R_{\text{ép}}$ qui est traversée par le même courant I lorsqu'elle est soumise à la même tension du générateur U ?
- Prouver que $1/R_{\text{ép}} = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 = \sum 1/R_i$.

c) Résistances en série et parallèle

Le circuit ci-contre est défini par des potentiels de 12 V , 10 V , 5 V et 0 V aux points A, B, C et D. Les courants sont de 4 A dans les 2 ampoules et 2 A dans la résistance R_3 .

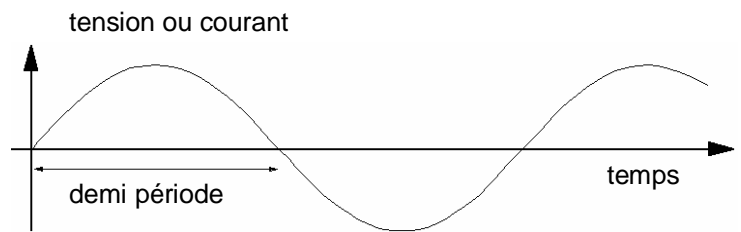


- Appliquer les lois d'Ohm et de Kirchhoff pour trouver le courant I , les tensions et les résistances du circuit.
- Quelle est la valeur de la résistance $R_{\text{ép}}$ qui est traversée par le même courant I lorsqu'elle est alimentée par le même générateur G . On l'appelle **résistance équivalente série parallèle**.

3.2.9 Sécurité électrique

(0) Définition des termes

ALTERNATIF : Le courant ou la tension alternative (en fonction du temps) varie comme la fonction sinus. C'est-à-dire que la tension passe de 0 à U puis à 0, $-U$ et 0 pendant la période. La période est le temps nécessaire pour que la grandeur retrouve la même valeur.



HERTZ : Pour la tension de notre réseau électrique, la fréquence est de 50 Hertz ou 50 périodes par seconde. La grandeur va donc passer de sa valeur minimale à sa valeur maximale 100 fois par seconde.

MISE A TERRE : Lorsque l'on parle de mise à terre, ce n'est pas que l'on pose un objet par terre mais que l'on branche le boîtier métallique de l'appareil avec un fil (de couleurs jaune et verte) relié à la terre par l'intermédiaire des tuyaux d'eau (qui sont en cuivre).

L'appareillage électrique doit être conçu pour éviter les risques d'incendie et d'électrocution.

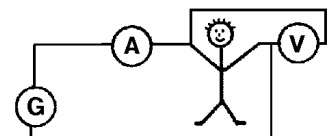
(1) Risques d'incendie

Une intensité trop grande du courant électrique pourrait faire chauffer les fils ($P = RI^2$) et provoquer un incendie. Pour prévenir ce risque, on utilise un **fusible**, petit fil qui fond à basse température (les premiers qui ont été construits étaient fait en plomb) dès que l'intensité dépasse une certaine grandeur, et coupe le circuit. On utilise couramment des **disjoncteurs** thermiques ou électromagnétiques qui permettent de réamorcer le circuit sans changer de dispositif.

(2) Risques d'électrocution

Faisons une petite expérience où nous sommes branchés à un générateur, mesurons la tension entre nos deux mains et le courant qui nous traverse.

Nous allons successivement prendre un générateur continu puis alternatif en prenant bien garde de rester dans une plage de tension entre 0 et au maximum 50 V qui n'est pas trop dangereuse pour notre corps. Nous pourrions mesurer la résistance de notre corps (U/I) et les grandeurs du courant et de la tension. A un certain stade, les effets du courant commencent à devenir désagréables.



Nous allons découvrir que :

- * La résistance du corps pouvant énormément varier suivant qu'il est sec, humide ou dans un bain, c'est le courant qui provoque la contraction musculaire (y compris celle du muscle cardiaque), ce qui est dangereux.
- * Le courant continu donne l'impression d'une brûlure alors que le courant alternatif provoque un picotement.
- * Notre résistance (U/I) au courant alternatif est plus grande qu'au courant continu et a tendance à diminuer quand le courant augmente. En fonction du contact, elle n'est cependant pas constante au cours du temps pour un même courant et dépend du contact métal-peau et de la transpiration cutanée. Elle peut varier entre 10 et 100 k Ω environ et dépend des 7 facteurs de la page suivante :

- 1) L'état de la peau (mouillée, moite, transpiration...)
- 2) La pression de contact.
- 3) L'aire de la surface de contact.
- 4) Du parcours du courant dans le corps humain.
- 5) De la tension à laquelle le corps est soumis.
- 6) des états physiologiques et psychologiques.
- 7) Des autres résistances des vêtements, des chaussures, des gants, des sols, des éléments de bâtiments...

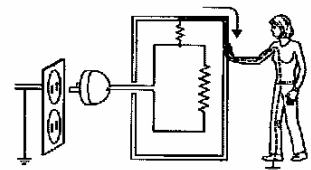
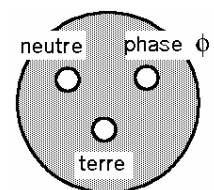
Commentaire : Le courant continu est plus dangereux que le courant alternatif pour notre corps car il peut provoquer une électrolyse du sang et des liquides de notre corps. Un courant à très haute fréquence n'est pas dangereux car il passe uniquement à la surface de notre corps (expérience avec le transformateur de Tesla).

(3) Tableau des effets du courant :

Courant en [mA]	Effet du courant alternatif 50 Hz sur le corps humain
0 - 0,5	Aucun
0,5 - 2	Picotement
2 - 10	Douleur et contraction musculaire
10 - 20	Augmentation de la douleur et, aux alentours de 15 mA, la contraction des muscles est telle que l'on ne peut plus relâcher le métal.
20 - 100	Paralysie des muscles respiratoires
100 - 3000	"Fibrillation ventriculaire" le cœur arrête de battre normalement et se contracte "au gré du courant".
> 3000	Arrêt cardiaque

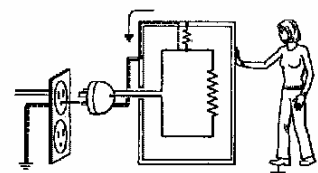
Les trois bornes de la prise électrique :

- * La **phase** : arrivée d'énergie (fil chaud) [rouge ou marron]
- * Le **neutre** : retour d'énergie en général à 0 V (fil froid) [bleu]
- * La **terre** : protection contre les électrocutions [jaune et vert]



Mise à la terre des boîtiers des appareils électriques :

Le courant de défaut est la partie du courant provenant du fil de phase qui se referme par la terre au lieu de revenir par le fil du neutre (voir les dessins ci-contre).



La mise à terre est une mesure de protection qui empêche le courant de défaut de passer par la personne pour aller se refermer dans la terre.

(a) Le boîtier de l'appareil n'est pas mis à la terre. Le courant va donc se refermer à travers la personne, par la terre.

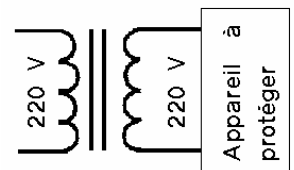
(b) Le boîtier de l'appareil est mis à la terre. Le courant va donc se refermer directement par la terre, via l'appareil.

(4) Risques courus et prescriptions électriques pour notre protection :

Les tensions au-delà de 50 V (25 V dans un local humide) sont dangereuses et nécessitent quelques précautions. La tension du téléphone est inférieure à 50 V sauf la sonnerie qui dépasse quelque peu cette valeur.

L'électrocution peut avoir lieu entre la phase et le neutre ou entre la phase et la terre :

- **électrocution phase – neutre** : les risques sont grands car la protection contre l'électrocution est impossible mais il arrive rarement que l'on touche les deux bornes à la fois. Il existe maintenant des prises où l'on ne peut pas mettre ses doigts. (mettre des protections dans les prises pour les enfants !).
- **électrocution phase – terre** : il existe trois types de protection :
 - a) **Mise à la terre** du boîtier métallique de l'appareil comme décrit plus haut.
 - b) Le **transformateur d'isolation** (230 V - 230 V) permet une séparation entre le neutre et la terre (tension flottante). La personne qui touche une seule borne la met directement à la terre et ne se fait pas électrocuter.
 - c) Dans les endroits humides comme les caves, on doit poser un **"relais à courant de défaut" (FI)** qui déclenche la phase dès que le courant à travers la terre dépasse 10 mA. En effet, dès qu'une personne touche un fil électrique, le courant s'établit entre elle et la terre et revient à travers la terre. Le disjoncteur ou relais à courant de défaut est décrit au paragraphe suivant.

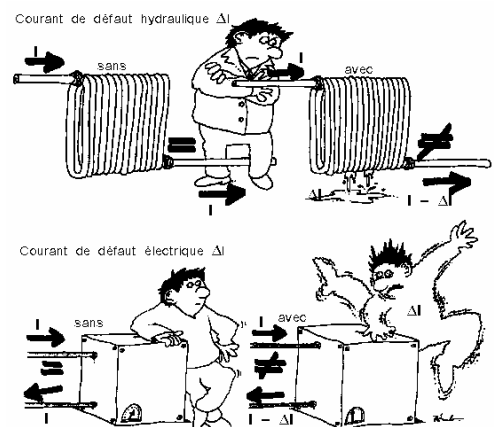


Protection contre le courant de défaut - relais FI

Le courant de défaut FI (false intensity) consiste en une partie du courant qui, au lieu de terminer son parcours dans les fils, passe par la terre via un utilisateur qui est électrocuté : $I = \Delta I + I'$

Pour donner une comparaison, l'eau qui passe à travers ce radiateur ne se retrouve pas intégralement à la sortie des tuyaux car il y a une fuite par terre. Le courant de défaut est aussi une fuite de courant.

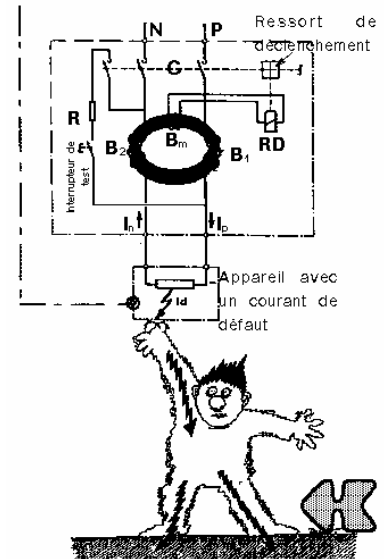
Pour le détecter, comme il est impossible de mesurer directement le courant qui passe dans la terre, il faut détecter si le courant I_P qui entre est égal à celui I_N qui sort. C'est le principe de mesure du relais FI (false intensity).



Attention : l'explication qui suit est une "piste noire" !

Le conducteur de phase P (aller) est enroulé sur une bobine B_1 autour d'un tore T en fer doux et induit une tension dans une bobine de mesure B_m . Le conducteur du neutre N (retour) est enroulé en sens inverse sur une bobine B_2 autour du même tore T en fer doux et induit une tension qui s'oppose à la première dans la même bobine de mesure B_m . Si les courants de phase I_P et de neutre I_N sont égaux, ils induisent des tensions égales et opposées dans la bobine de mesure B_m et le relais de déclenchement R_D n'est pas alimenté. Dans le cas contraire, il y a une légère tension induite qui suffit pour déclencher le relais et ouvrir les contacts C sur la phase et le neutre.

Pour tester le relais, il suffit de créer une légère différence de courant au moyen de la résistance R . Le relais doit déclencher dès que la différence entre les courants dépasse 5 à 10 mA.



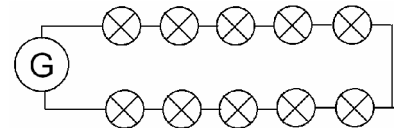
Exercices sur la sécurité électrique

- Un oiseau pose une patte sur une ligne à haute tension. Que se passe-t-il s'il y pose les deux pattes ? Que se passerait-il s'il posait l'autre patte sur un autre conducteur (éventuellement connecté à la terre) ?
- En admettant que vous ayez une résistance de 50'000 Ω , quelle est la tension qui devient dangereuse pour vous ?
- Quel est le courant que reçoit une personne qui se trouve dans son bain ($R = 1500 \Omega$) et dont le sèche-cheveux branché sur la prise 230 V tombe dans le bain ? Quels sont ses effets ? Est-ce important que l'appareil soit enclenché ? Expliquer.
- Y a-t-il un risque de recevoir un choc électrique avec une batterie de voiture (12 V) ? Quels types de risques sont possibles avec ce type de batterie ?
- Pourquoi est-il particulièrement important de mettre à la terre les appareils électriques lorsqu'on les utilise à l'extérieur ou dans la cave ?
- Une personne tombe par terre électrocutée avec un fil électrique à la main. Que faire ?
- Un enfant introduit un crayon gris dans les bornes de la prise électrique. Est-ce dangereux ?
- Entre la phase et le robinet (relié à la terre), on mesure une tension de 230 V. Pourquoi ne puis-je pas faire fonctionner une lampe électrique en la branchant entre phase et robinet ?
- On a alimenté un lave-linge avec un cordon à 2 fils. Pouvez-vous prévoir les risques d'accidents ? Si le fil de terre était branché, est-ce que le risque d'électrocution serait éliminé ?
- Lors d'un violent orage, un câble haute tension est tombé sur un autocar. Quelle solution proposer pour les secours ?

Corrigé des exercices - Courant électrique (E 13 – E 14)

- $Q = I t = 1,5 \cdot 70 \cdot 3600 = 378 \text{ kC}$.
- a) 45 h ; b) 240 C.
- a) 100 kA ; b) Incorrecte mais permet de calculer un courant moyen.
- $Q = I t = 0,5 \cdot 60 = 30 \text{ C}$.
- $I = N q_e / \Delta t = 0,576 \text{ mA}$.
- Ils permettent d'allumer et d'éteindre et allumer à n'importe quel interrupteur de la pièce.

- 7) b) Toutes les ampoules s'éteignent; c) une seule s'éteint.
 8) A : 4,5 A ; B : 1,5 A ; C : 1,5 A ; D : 3 A ; E : 4,5 A ; F : 0,5 A.
 9) A : 1,5 A ; B : 0,2 A ; C : 0,6 A ; D : 0,4 A ; E : 0,9 A.



Corrigé des exercices - tension et puissance (E 16)

- 1) $P = UI = 2300 \text{ W}$.
 2) $I = 6 \cdot 10^{16} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 9,6 \text{ mA}$ et $W = U I t = 5,184 \text{ J}$.
 3) $I = P/(3U) = 727,3 \text{ A}$.
 4) $W = P t = 1 \text{ kW} \cdot (1/60) \text{ h} = 0,0167 \text{ kWh} \Rightarrow \text{coût} = 4,167 \text{ mFrs}$.
 5) a) $U = 230 \text{ V}$ (ampoules en parallèle) ; b) $I = P/U = 0,065 \text{ A}$; c) Rien car $20 \cdot I = 1,3 \text{ A} < 6 \text{ A}$.

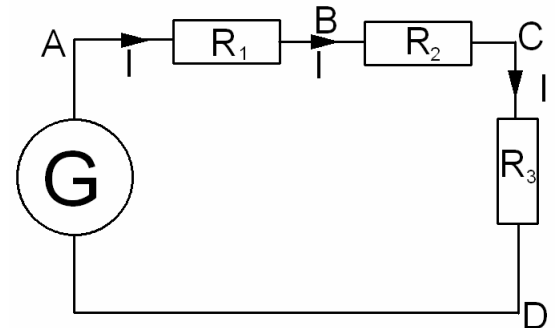
Corrigé des exercices - loi d'Ohm (E 19)

- 1) $R = U/I = 2 \Omega$.
 2) a) $I = P/U = 1,74 \text{ A}$; b) $R = U/I = 132,25 \Omega$.
 3) $R = U/I$ et $I = P/U \Rightarrow R = U^2/P = 2,4 \Omega$.
 4) $P = U^2/R$; La puissance diminue donc d'un facteur 4.
 5) a) $I = (P/R)^{1/2} = 5 \text{ A}$; b) $W = 0,6 \text{ kWh} = 2,16 \text{ MJ}$.
 6) $1,052 = 1,1$ ($P = U^2/R$) $\Rightarrow 10\%$.
 7) $P = U^2/R$; diminuer la résistance et raccourcir le conducteur.
 8) $\rho = RS/L = 4,7 \cdot 10^{-7} \Omega \text{m}$. Le fil est en constantan (60% Cu et 40% Ni)
 9) $I_{\text{nom}} = P/U = 1,25 \text{ A}$ et $R = U^2/P = 9,6 \Omega$; si R constante : $I = U/R = 0,625 \text{ A}$; comme la résistance diminue avec la température donc avec la tension, le courant I est plus petit que $I_{\text{nom}}/2$.
 10) $R = 6,72 \text{ m}\Omega$.
 11) $R = 7,64 \text{ G}\Omega$.
 12) a) $R_{(900^\circ\text{C})} = 3,36 \Omega$; b) $R'_{(900^\circ\text{C})} = 0,5 \Omega$.
 13) a) $R = 4\rho L/(\pi d^2) \Rightarrow L = \pi R d^2/(4\rho) = 0,376 \text{ m}$; b) La double spirale limite l'encombrement ainsi que le refroidissement par rayonnement du filament. L'ampoule est remplie d'argon ou de krypton à $\sim 0,5 \text{ bar}$ pour que le filament ne brûle pas avec l'oxygène. c) $\Delta R = R - R_{20} = \alpha \Delta \theta R \Rightarrow \Delta \theta = \Delta R/(\alpha R) = 3040^\circ\text{C} \Rightarrow \theta = 3060^\circ\text{C}$.

Corrigé des exercices sur les circuits (E 20)

a) Résistances en série

Le circuit ci-contre est composé de 3 résistances $R_1 = 2 \Omega$; $R_2 = 3 \Omega$ et $R_3 = 1 \Omega$ branchées en série et parcourues par un courant $I = 2 \text{ A}$.



Lois de Kirchhoff : Même courant I pour le générateur et les 3 résistances.

$$\begin{aligned} \text{Loi d'Ohm :} \quad U_1 &= R_1 I = 2 \cdot 2 = 4 \text{ V} \\ U_2 &= R_2 I = 3 \cdot 2 = 6 \text{ V} \\ U_3 &= R_3 I = 1 \cdot 2 = 2 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\text{Loi de Kirchhoff : } U_G = U_1 + U_2 + U_3 = 4 + 6 + 2 = \underline{12 \text{ V}}$$

$$\text{Résistance équivalente série } R_{\text{és}} = U_G/I = 12/2 = \underline{6 \Omega} = 2 \Omega + 3 \Omega + 1 \Omega$$

$$\text{Donc : } \boxed{R_{\text{és}} = R_1 + R_2 + R_3 = \sum R_i}$$

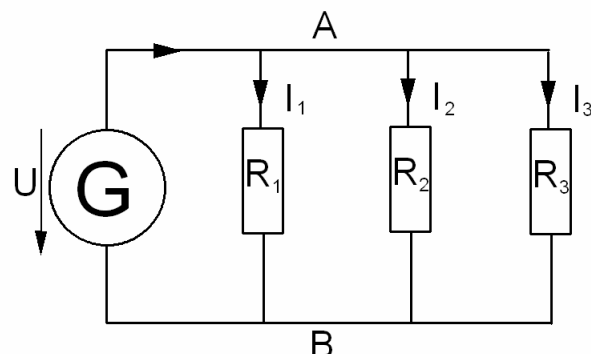
b) Résistances en parallèle

Le circuit ci-contre est composé de 3 résistances $R_1 = 2 \Omega$; $R_2 = 3 \Omega$ et $R_3 = 4 \Omega$ branchées en parallèle et parcourues par différents courants. La tension du générateur est de 12 V .

Lois de Kirchhoff : Même tension U pour le générateur et les 3 résistances.

$$\begin{aligned} \text{Loi d'Ohm :} \quad I_1 &= U/R_1 = 12/2 = 6 \text{ A} \\ I_2 &= U/R_2 = 12/3 = 4 \text{ A} \\ I_3 &= U/R_3 = 12/4 = 3 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\text{Loi de Kirchhoff : } I = I_G = I_1 + I_2 + I_3 = 6 + 4 + 3 = \underline{13 \text{ A}}$$



Résistance équivalente parallèle $R_{ép} = 12/13 = 0.923 \Omega$.

Loi de Kirchhoff : $13 \text{ A} = I = U/R_{ép} = I_G = I_1 + I_2 + I_3 = U/R_1 + U/R_2 + U/R_3 = 6 \text{ A} + 4 \text{ A} + 3$

A Donc : $1/R_{ép} = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 = \Sigma 1/R_i$

c) Résistances en série et en parallèle

Le circuit ci-contre est défini par des potentiels de 12 V, 10 V, 5 V et 0 V aux points A, B, C et D. Les courants sont de 4 A dans les 2 ampoules et 2 A dans la résistance R_3 .

Tension et potentiel : $U_1 = 12 - 10 = 2 \text{ V}$; $U_{\text{ampoule}} = 10 - 0 = 10 \text{ V}$; $U_2 = U_3 = 10 - 5 = 5 - 0 = 5 \text{ V}$.

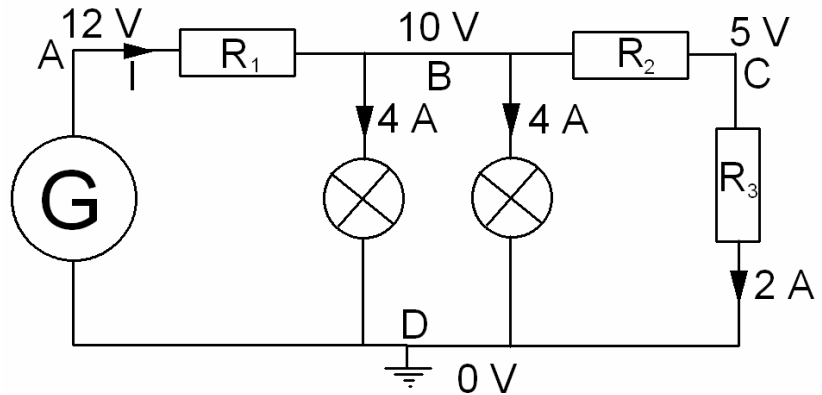
Loi de Kirchhoff :

$I = 4 + 4 + 2 = 10 \text{ A}$.

Loi d'Ohm : $R_1 = 2/10 = 0.2 \Omega$;

$R_{\text{ampoule}} = 10/4 = 2.5 \Omega$;

$R_2 = R_3 = 5/2 = 2.5 \Omega$.



Résistance équivalente série parallèle $R_{ép} = 12/10 = 1.2 \Omega$.

Corrigé des exercices - Sécurité électrique (E 23)

- 1) La différence de potentiel entre les deux pattes est quasiment nulle. En effet, la résistance du fil est très faible et $U = RI$. Il faut tenir compte des effets du champ électrique ; cela pourrait être désagréable pour des gros oiseaux ou pour des hautes tensions. Sur une ligne à haute tension, s'il y a des oiseaux, ils se posent sur le fil du sommet du pylône relié à la terre (parafoudre). Electrocuton s'il met l'autre patte sur un autre fil.
- 2) Statistiquement, un courant de 16 mA est tel que l'on ne peut plus relâcher le conducteur à cause de la contraction des muscles. $U = RI = 800 \text{ V}$ (si $R = 50 \text{ k}\Omega$).
- 3) $I = U / R = 153 \text{ mA}$. Ce courant provoque la fibrillation ventriculaire, c'est à dire que le cœur bat de manière inhabituelle au rythme du courant.
- 4) * Si le corps est sec : $I = 12 / 50'000 = 0,24 \text{ mA}$ - on ne sent pas ce courant.
* Si le corps est trempé : $I = 12 / 1500 = 8 \text{ mA}$ - choc léger.
* Le seul danger de la batterie de voiture est à cause de l'acide qu'elle contient.
- 5) Les caves ont souvent un sol humide ou en terre battue, ce qui provoque un très bon contact entre la terre et la personne; la résistance de la personne (entre phase et terre) diminue et le courant d'électrocution entre phase et terre augmente s'il y a un défaut d'isolation.
- 6) D'abord couper le courant sinon, on risque aussi de s'électrocuter en la secourant.
- 7) Oui car le graphite est un conducteur électrique. Il va s'électrocuter s'il l'introduit dans la phase.
- 8) Le robinet est à la terre qui sert de protection pour le circuit électrique et non de retour du courant. Souvent, il est impossible de la brancher ainsi car un disjoncteur à courant de défaut (FI) déclenche la phase si le courant à travers la terre dépasse 10 mA, ce qui est le cas pour notre ampoule.
- 9) S'il y a un défaut - la phase touche le boîtier métallique - une personne peut toucher le boîtier et s'électrocuter. Le boîtier métallique doit impérativement être mis à la terre pour éviter ce risque.
- 10) Les passagers et le conducteur doivent impérativement rester à l'intérieur du car. A cause de l'isolation des pneus, il est possible que la carrosse métallique soit à un haut potentiel (230'000 V ou 380'000 V) sans que les disjoncteurs (fusibles réamorçables) n'aient déclenché. En sortant du car, il y aurait électrocution entre la jambe à terre et celle dans le car. Il faut déclencher la ligne HT avant de laisser descendre les passagers.

~~3.3 ELECTROMAGNETISME~~

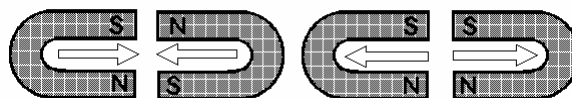
3.3.1 Champ d'induction magnétique B produit par des aimants

Historique

Les Chinois auraient découvert la boussole environ 2500 ans avant notre ère. Elle sera utilisée bien plus tard en Europe (1200 de notre ère) pour la circulation maritime.

Le terme de magnétisme vient de Thalès et de son école de Milet qui avaient découvert au VI^e siècle av. J.-C. à Magnésie la "pierre à aimant" (magnétite Fe_3O_4) qui attirait des morceaux de fer.

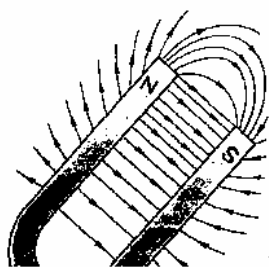
Forces entre aimants : un pôle Nord attire un pôle Sud et inversement, d'autre part, deux mêmes pôles se repoussent.



Le spectre et le champ d'induction magnétique B^2

Nous pouvons déterminer quelques spectres magnétiques produits par un ou des aimants grâce à de la limaille de fer ou une boussole. Nous pouvons voir des lignes de champ \vec{B} :

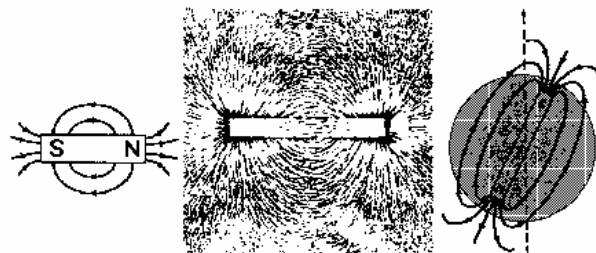
- Les lignes de champ \vec{B} qui vont du pôle nord N au pôle sud S à l'extérieur de l'aimant. Elles sont toujours fermées (ici, elles se ferment du S au N à l'intérieur de l'aimant).
- Elles ne se croisent jamais. Les contours formés par les lignes de champ sont des cercles ou des courbes (non anguleuses).
- Plus elles sont serrées, plus le champ \vec{B} est élevé à cet endroit.
- Les lignes de champ sont toujours perpendiculaires au bord de l'aimant, du fer, du nickel ou du cobalt.
- Le champ d'induction magnétique \vec{B} est un vecteur de sens nord-sud et tangent aux lignes de champ en tout point.
- Les matériaux qui renforcent le champ d'induction magnétique sont le fer, le nickel et le cobalt ; le fer est le plus courant. La majorité des lignes de champ se trouveront canalisées par ces matériaux dits "ferromagnétiques".



Le champ d'induction magnétique \vec{B} d'un aimant en fer à cheval est uniforme entre ses deux branches. Ci-dessus, on montre le champ d'induction magnétique dipolaire d'un barreau aimanté. Il peut être visualisé avec de la limaille de fer. Le champ d'induction magnétique terrestre ressemble à celui d'un barreau aimanté. Il est produit par l'effet dynamo.

On peut remarquer de plus que si l'on casse un aimant, on obtient deux nouveaux aimants. On peut casser chaque morceau en deux parties (2 aimants) jusqu'à l'atome et toujours trouver un aimant nord-sud.

(figure à la page suivante)

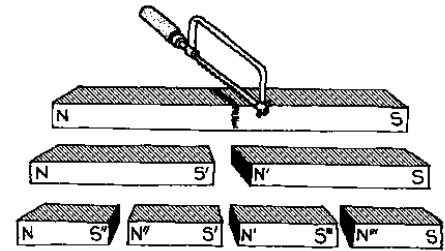


² B signifie vecteur champ d'induction magnétique. On le retrouve souvent par la suite.

Expérience des aimants coupés.

On peut couper un aimant en deux et l'on obtient deux aimants. Si l'on recoupe chacun de ces aimants en deux et que l'on répète le procédé, on obtiendra toujours un aimant NS. Il est impossible de trouver des monopôles nord ou sud uniquement.

Conclusion : On peut isoler les charges électriques mais jamais les pôles magnétiques et le monopôle magnétique n'a jamais été trouvé bien qu'il soit recherché en laboratoire (il n'y a que des dipôles nord-sud).



Nous pouvons expliquer les forces magnétiques grâce aux lignes de champ qui ont avantage à se refermer dans le fer pour "fermer le circuit magnétique".

3.3.2 Champ d'induction magnétique \vec{B} produit par des courants

Historique

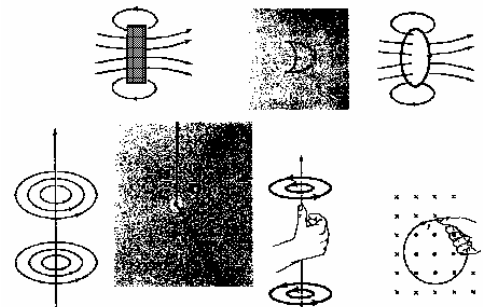
Dès 1500, on avait observé en mer lors de violents orages que les boussoles pouvaient se désaimanter mais aucune théorie n'avait été formulée. En 1820, Hans Christian Oersted remarque qu'une boussole placée à proximité d'un fil électrique parcouru par un courant n'indique plus le Nord magnétique suivant sa position. Il en déduit qu'un courant électrique crée un champ d'induction magnétique et commence à formuler un lien entre les théories de l'électricité et du magnétisme.

Observation du spectre d'un fil parcouru par un courant

Nous pouvons déterminer quelques spectres magnétiques produits par un ou des courants (fil rectiligne, solénoïde, tore et spire).

La première illustration montre que le champ d'induction magnétique \vec{B} produit par une spire est le même que celui produit par un aimant cylindrique (vu de côté). La visualisation des lignes de champ peut se faire très facilement avec de la limaille de fer car les particules s'alignent selon les lignes de champ comme des aimants.

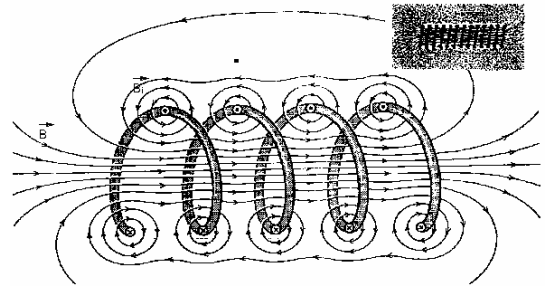
La figure suivante montre le champ d'induction magnétique \vec{B} circulaire produit par un conducteur rectiligne. Pour trouver le sens des lignes de champ, on peut utiliser la **règle de la main droite** : si le pouce indique le courant, les doigts indiquent le sens des lignes de champ. Cette règle peut aussi être appliquée à une spire.



Le **solénoïde** ou la **bobine** est la forme de fil conducteur la plus usitée pour produire un champ d'induction magnétique \vec{B} . Si la bobine est assez longue, le champ d'induction magnétique \vec{B} est parfaitement uniforme (partout le même) à l'intérieur de la bobine. On parle des spires de la bobine ou du solénoïde pour un tour de fil.

Si l'on rajoute un noyau de fer dans la bobine, le champ \vec{B} sera canalisé dans le noyau et il va être renforcé. On obtient un **électroaimant**.

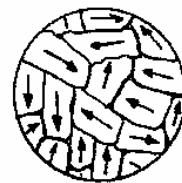
Sur la figure ci-contre, on remarque que les lignes de champ \vec{B} sont obtenues par la somme des champs B_i de chaque conducteur. Autour des fils, on retrouve des lignes de champ circulaires et le champ \vec{B} est uniforme vers le centre de la bobine.



Explication du magnétisme des aimants

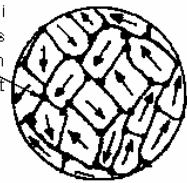
Examinons l'atome : le trajet de l'électron à grande vitesse autour du noyau forme un "courant électronique" qui crée un champ d'induction magnétique \vec{B} atomique. En général, ces champs atomiques se compensent pour donner un résultat nul mais dans certains matériaux comme le fer, le nickel et le cobalt, ces champs \vec{B} atomiques peuvent être dirigés dans le même sens et former des domaines magnétiques ou domaines de Weiss qui peuvent :

- 1) S'orienter sous l'effet d'un champ extérieur. Il s'agit du **fer doux** qui est utilisé dans les moteurs, générateurs et transformateurs pour canaliser le champ d'induction magnétique \vec{B} et le renforcer d'un facteur qui peut aller jusqu'à 5000 si le circuit magnétique est fermé.



1) Fer doux, domaines libres

Impuretés qui "épinglent" les domaines en leur interdisant tout mouvement



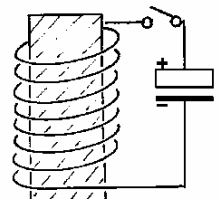
2) Aimant, domaines "épinglés"

- 2) Rester tous "bloqués" dans la même direction pour un **aimant** ou de fer dur qui doit rester aimanté au cours du temps

Dans les deux figures ci-dessus, l'aimant et le noyau de fer ont été représentés à l'état non aimanté. Les domaines du noyau de fer s'alignent s'il y a un champ d'induction magnétique \vec{B} .

Dispositif pour magnétiser un aimant

Pour aimanter un aimant, on utilise le dispositif ci-contre : un gros condensateur stocke de l'énergie électrique et se décharge d'un coup dans le solénoïde qui entoure l'aimant créant un courant énorme (un peu comme un coup de foudre) et donc un champ \vec{B} très fort qui va pouvoir déplacer les domaines magnétiques de façon durable. Il est très difficile de déplacer les domaines magnétiques dans un aimant car ils sont bloqués par les impuretés.



3.3.3 L'expérience d'Oersted

En 1820, Hans Christian Oersted (1777 - 1851) utilise une pile de Volta et remarque qu'un courant donne naissance à un champ d'induction magnétique B . Ampère reprendra ses travaux et établira des lois permettant de calculer le champ B produit par un courant.

Hans Christian Oersted (1777-1851) est célèbre pour avoir effectué les premières expérimentations mettant en évidence l'action d'un courant électrique sur une aiguille aimantée. Rétrospectivement, le texte latin qu'il rédigea le **21 juillet 1820** apparaît comme l'acte de naissance de l'électromagnétisme. Il montrait non seulement que l'aiguille

aimantée était déviée, mais que la nature du métal utilisé comme conducteur ne modifiait pas l'effet observé, que l'interposition de divers matériaux entre le fil et l'aiguille aimantée ne le modifiait pas non plus, etc. Bien qu'on ait suggéré que l'observation de l'effet électromagnétique ait été le résultat d'un heureux hasard, les historiens ont de bonnes raisons pour y voir plutôt l'aboutissement d'un «programme de recherche» largement inspiré par les conceptions philosophiques de Kant et de Schelling. Pour Kant, en effet, la matière devait être conçue comme la manifestation de deux «forces fondamentales» dont toutes les autres forces observables ne sont que des modifications. Schelling, dès la fin du XVIII^e siècle, avait repris et développé longuement cette idée, évoquant expressément la transformation des forces électriques en forces magnétiques. Toutes les forces, en leur tréfonds, sont identiques; la nature est une totalité dynamique au sein de laquelle s'opposent et se métamorphosent «forces positives» et «forces négatives». Dans ce cadre anti-mécaniste, il était facile de concevoir une multitude d'effets électrochimiques, électrogravitationnels, électromagnétiques...



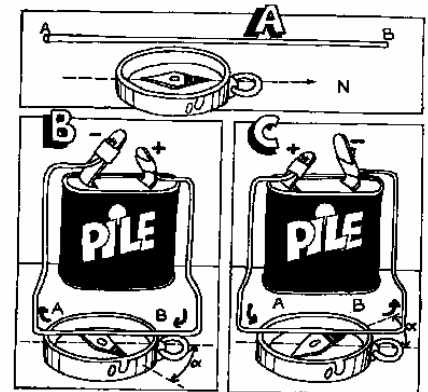
Ce point est d'autant plus intéressant qu'Oersted avait un doctorat en philosophie. Sa thèse était directement inspirée de Kant (et faisant mention de sa dette envers son ami Schelling). Il a inspiré plusieurs écrivains ou hommes de science qui avaient adopté les grandes idées de la «Naturphilosophie» ; c'est-à-dire de la «philosophie de la nature» chère aux romantiques en général et à Schelling en particulier. On peut voir là un cas remarquable de «collaboration» entre philosophie et science. Et ce même si Oersted a manifesté de la méfiance à l'égard de certaines spéculations métaphysiques par trop fantaisistes.

(Oersted en train de réaliser son expérience, d'après L. Figuier. Les merveilles de la science (1867-1870). Cliché d'après une gravure ancienne.)

Réalisation de l'expérience d'Oersted

On dispose un fil conducteur rectiligne selon une ligne du champ d'induction magnétique terrestre. Sous le fil et à moindre distance, on place une boussole qui sera initialement orientée selon le champ \vec{B} terrestre. En faisant passer un courant dans le fil, la boussole dévie d'un angle α .

- La boussole dévie à droite (ou à gauche) pour s'orienter selon la résultante des champs \vec{B} terrestre et du fil.
- A partir du courant, de l'angle et de la distance, on peut déterminer la valeur du champ d'induction magnétique terrestre horizontal.



3.3.4 Le champ d'induction magnétique terrestre B_T

Le champ d'induction magnétique terrestre \vec{B}_T au pôle est incliné d'environ $11,5^\circ$ par rapport à l'axe de rotation de la Terre. Le pôle magnétique Nord de la Terre se trouve actuellement vers l'extrême Nord-Ouest du Groenland à 69° de latitude. Il est horizontal à l'équateur magnétique et vaut environ $3,3 \cdot 10^{-5} \text{ T}$ et vertical aux pôles avec une valeur de $6,6 \cdot 10^{-5} \text{ T}$. La direction du champ d'induction magnétique terrestre subit des fluctuations et son sens s'est même inversé de nombreuses fois au cours de l'histoire de la Terre. Si nous suivons les lignes de champ \vec{B}_T terrestres, elles semblent provenir d'un barreau aimanté (ou d'une spire équatoriale) placé au centre de la Terre.

L'intérieur de la Terre est liquide et la rotation de celle-ci met en mouvement des métaux en fusion. Il y a donc des courants circulaires d'électrons libres qui créent un

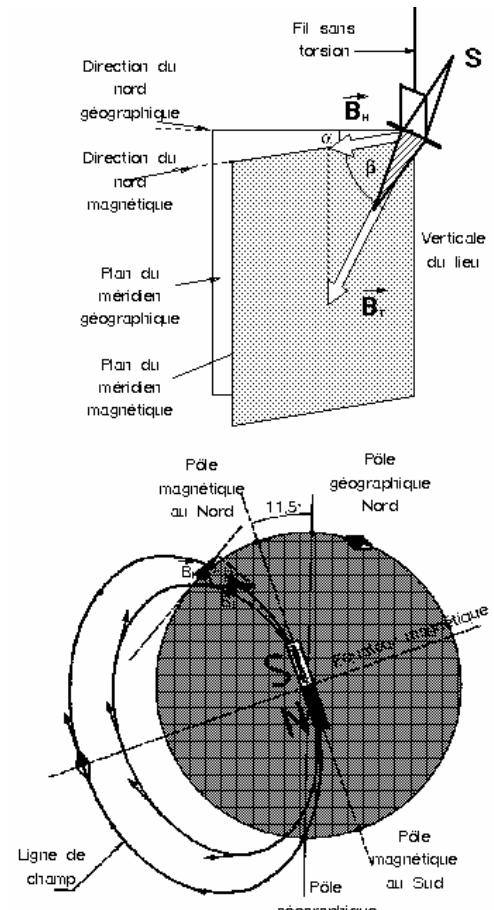
champ d'induction magnétique \vec{B}_T . L'énergie nécessaire à entretenir ces courants semble provenir de la désintégration des éléments radioactifs.

Si l'on mesure le champ d'induction magnétique \vec{B}_T en Suisse, on trouve que la **déclinaison** α , angle entre Nord magnétique et géographique vaut environ $4,5^\circ$ et oscille de quelques centièmes de degrés 2 fois par jour.

L'**inclinaison** β , angle entre l'horizontale et la ligne de champ \vec{B} vaut environ 60° et diminue de quelques centièmes de degrés chaque année.

\vec{B}_{Th} est la composante horizontale du champ, elle vaut environ $2 \cdot 10^{-5} \text{ T}$ en Suisse et l'on compense l'inclinaison du champ \vec{B}_T par un contrepoids à la pointe sud de l'aiguille pour qu'elle reste horizontale.

Notons encore que le pôle magnétique Nord de la Terre correspond au pôle sud du modèle de l'aimant qui produirait le champ \vec{B}_T terrestre et inversement pour le pôle Nord. Ceci pour que la partie aimantée Nord de la boussole montre le pôle Nord.

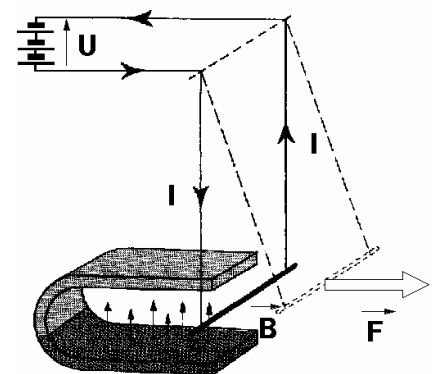


3.3.5 Force de Laplace entre un courant et un champ B

Expérience de Laplace

Une barre horizontale, reliée par deux fils conducteurs verticaux à un générateur, est placée entre les pôles d'un aimant en fer à cheval tel que le courant sera perpendiculaire au champ d'induction magnétique.

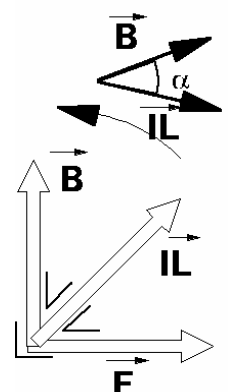
La barre subit une force et dévie à gauche ou à droite suivant le sens du courant. [On peut augmenter cette force en plaçant une bobine de N spires sur un chariot (à la place de la barre horizontale qui se trouve entre les pôles de l'aimant sur le dessin) de telle manière à ce que la bobine soit initialement entre les pôles de l'aimant.]



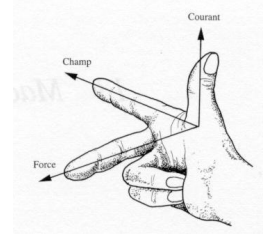
La force de Laplace est perpendiculaire au courant et au champ. Nous prendrons toujours le cas où le champ d'induction magnétique \vec{B} est perpendiculaire au courant $I(\vec{L})$:

- \vec{F} perpendiculaire au plan $(I\vec{L}, \vec{B})$
- $F = ILB$ si $I\vec{L}$ est perpendiculaire à \vec{B} sinon $F = ILB \sin\alpha$
- Le sens de \vec{F} est donné par la règle du tire-bouchon de la vis ou des trois doigts de $I\vec{L}$ jusqu'à \vec{B}

La force \vec{F} , le courant $I\vec{L}$ et le champ d'induction magnétique sont dans les 3 directions x, y et z de l'espace.



La règle du tire-bouchon consiste à visser un tire-bouchon de $I\vec{L}$ jusqu'à \vec{B} et on peut aussi utiliser la **règle des 3 doigts de la main droite** qui portent les noms de \vec{F} , \vec{B} et $I(I\vec{L})$ pour, respectivement, le majeur, l'index et le pouce.



Exercices sur la force de Laplace

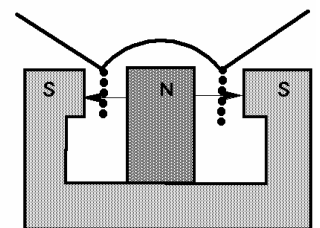
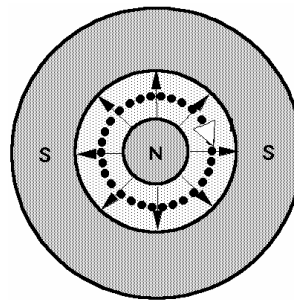
- 1) Un segment de fil de 0,5 mètre de long, parcouru par un courant de 20 A subit une force de 5 N quand il est perpendiculaire à un champ d'induction magnétique \vec{B} . Quelle est la valeur de ce champ ?
- 2) Dessiner les forces et champs \vec{B} qui s'exercent sur deux fils parallèles parcourus par le même courant I :
 - a) de même sens
 - b) de sens contraire
- 3) Un fil horizontal subit une force de 10 N dirigée vers le haut lorsqu'il est parcouru par un courant de 5 A vers la droite.
 - a) Définir le champ \vec{B} par mètre en grandeur, direction et sens.
 - b) Que vaut la force lorsque le courant est inversé et doublé ?

3.3.6 Applications de la force de Laplace

1) Le haut-parleur

Le haut-parleur est formé d'un aimant cylindrique entouré d'une carcasse en fer qui crée un champ \vec{B} radial donc toujours perpendiculaire aux spires circulaires. Ces N spires circulaires sont solidaires de la membrane et le tout est mis en mouvement sous l'effet de la force de Laplace.

Exercice : Donner le sens du déplacement de la membrane lorsque le courant I tourne dans le sens des aiguilles d'une montre sur la figure de gauche.



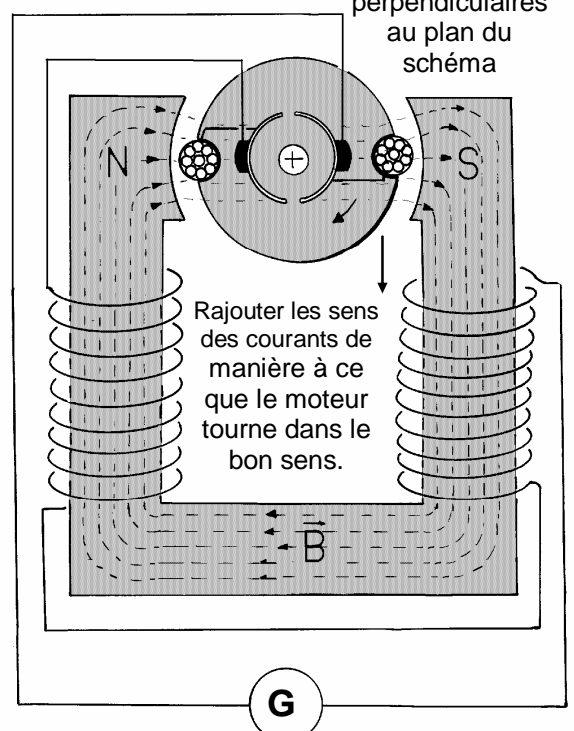
Les spires du rotor sont perpendiculaires au plan du schéma

2) Le moteur électrique

* Le générateur G fait passer un courant I dans les spires du rotor. A chaque demi-tour, le sens du courant est inversé et, de ce fait, la force de Laplace qui fait tourner le moteur est toujours dans le même sens. L'âme du rotor est en fer et conduit très bien les lignes de champ d'induction magnétique.

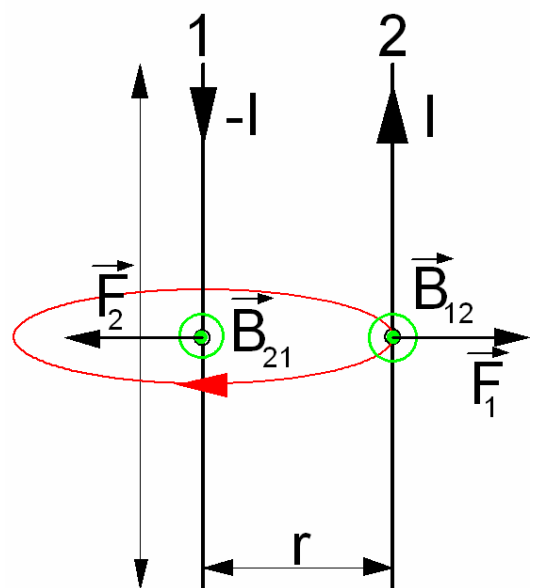
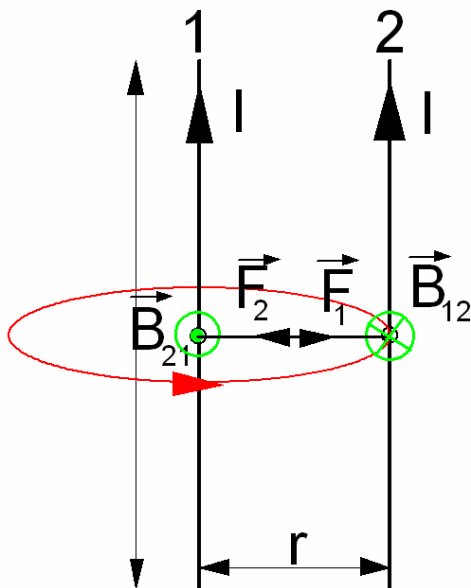
* Les spires du rotor sont en série avec les deux bobines verticales. Le courant I dans les bobines crée un champ d'induction magnétique dans le stator, l'entrefer et le rotor.

C'est donc l'interaction du courant I et du champ \vec{B} qui donne la force de Laplace du moteur.



Corrigé des exercices forces de Laplace

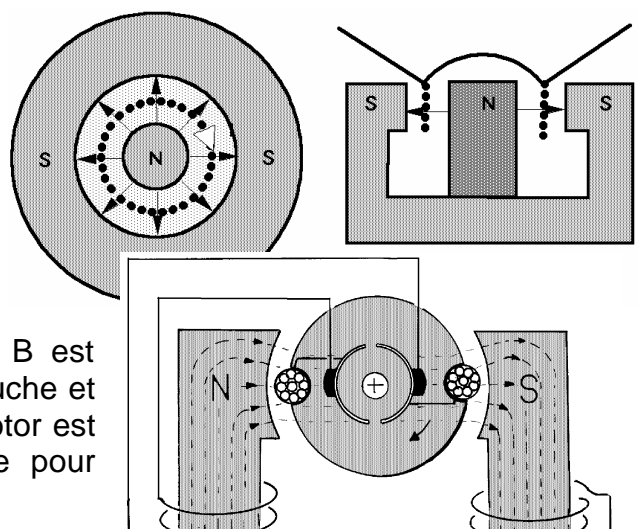
- 1) Un segment de fil de 0,5 mètre de long, parcouru par un courant de 20 A subit une force de 5 N quand il est perpendiculaire à un champ d'induction magnétique B . Quelle est la valeur de ce champ B ?
 $F = ILB \Rightarrow B = F/IL \quad B = 5/(20 \cdot 0,5) \Rightarrow \underline{B = 0,5 \text{ T}}$.
- 2) Dessiner les forces et champs \vec{B} qui s'exercent sur deux fils parallèles parcourus par le même courant I :
- de même sens : **forces attractives égales et opposées**.
 - de sens contraire : **forces répulsives égales et opposées**.



- 3) Un fil horizontal subit une force de 10 N dirigée vers le haut lorsqu'il est parcouru par un courant de 5 A vers la droite.
- Définir le champ B par mètre en grandeur, direction et sens.
 $F = ILB : 10 = 5 \cdot L \cdot B \dots$ Avec $L = 1 \text{ m} : \underline{B = 2 \text{ T}}$. Le champ B s'enfonce perpendiculairement au plan
 - Que vaut la force lorsque le courant est inversé et doublé ? La force double et s'inverse.

Corrigé haut-parleur et moteur

Haut-parleur : Donner le sens du déplacement de la membrane lorsque le courant I tourne dans le sens des aiguilles d'une montre sur la figure de gauche : D'après la règle des 3 doigts (FBI) de la main droite, la membrane est poussée vers nous perpendiculairement à la feuille. Elle monte vers le haut sur la figure de droite.



Moteur : Sur le bobinage du rotor, le champ B est horizontal. La force est verticale et monte à gauche et descend à droite. Le courant du bobinage du rotor est perpendiculaire à la feuille et sort à gauche pour rentrer à droite.