

Notions de base en électrocinétique

L'électrocinétique est l'étude générale des circuits électriques. Ethymologiquement le terme signifie que l'on va étudier comment se déplacent les charges (la plupart du temps des électrons) dans ces circuits.

L'électrocinétique est une sous-partie de l'*électromagnétisme*, qui est la branche de la physique qui étudie tous les phénomènes de nature électrique ou magnétique. L'électromagnétisme est une des parties les plus importantes de la physique, au même titre que la mécanique ou que la thermodynamique.

Dans nos sociétés actuelles, nous utilisons en permanence des circuits électriques, à différentes échelles, que ce soit les circuits intégrés de nos ordinateurs, téléphones portables ou téléviseurs ou les circuits du réseau EDF, qui s'étendent sur l'ensemble du territoire. Il suffit donc de regarder un peu autour de nous pour voir à quel point nos modes de vie actuels sont dépendants de l'électricité.

L'électrocinétique est la discipline fondamentale derrière deux disciplines plus "appliquées" :

- L'électronique, qui étudie plus spécifiquement les "petits" circuits qui traitent l'information, comme par exemple les circuits d'un ordinateur ou d'un téléphone portable. Ces circuits "intelligents" contiennent en général, en plus de résistances, bobines et condensateurs, des diodes et surtout de nombreux transistors
- L'électrotechnique ou "électronique de puissance", qui étudie les plus "gros" circuits où l'électricité est plutôt utilisée comme source d'énergie : par exemple les circuits électriques d'une maison, d'une usine ou d'un moteur électrique.

Après un bref historique, ce chapitre va présenter les notions de base de l'électrocinétique (charge, courant, tension, puissance), ainsi que deux lois fondamentales : la loi des noeuds et la loi des mailles.

Bref historique de l'étude des phénomènes électriques



FIGURE 1 – Trois manifestations de l'électricité dans la nature : des éclairs lors d'un orage, une anguille électrique (qui envoie des décharges électriques suffisamment fortes pour tuer un être humain), et de l'ambre (avec une fourmi fossilisée à l'intérieur).

Il est facile d'observer des phénomènes électriques dans la nature, le plus impressionnant (et dangereux) étant la foudre, ce courant électrique de très forte intensité qui s'établit entre les nuages et le sol lorsque ces derniers acquièrent des charges opposées.

À plus petite échelle, il est commun d'observer des manifestations de ce que l'on appelle communément "l'électricité statique" : certains objets, lorsqu'on les frotte, se chargent et sont alors capables d'attirer à eux de petits objets.

Une des premières traces écrites de la description de ce phénomène remonte à *Thalès de Millet* (Grèce, 640 avant JC - 550 avant JC) qui remarque que l'ambre jaune frottée par une peau de chat a cette propriété. Ambre en grec ancien se disait *elektron*.

Pendant le moyen âge, peu d'avancées sont faites en Europe mais de nombreuses découvertes sont faites en Asie et dans le monde Arabe, notamment sur le magnétisme, avec la découverte des aimants et le perfectionnement de la boussole. On verra en fin d'année que l'électricité et le magnétisme sont deux phénomènes complémentaires, que l'on regroupe sous le nom d'*électromagnétisme*.

Dans le monde occidental, les choses s'accroissent lors de la Renaissance en Europe. Citons quelques unes des découvertes les plus marquantes :

- Au 17^{ème} siècle, William Gilbert en Angleterre commence à étudier avec attention les phénomènes électriques (c'est lui qui est à l'origine du mot *électricité*).

L'allemand Otto Von Guericke, les anglais Stephen Gray et Robert Boyle ainsi que le français Charles François de Cisteray du Fay poursuivent ses travaux et améliorent la compréhension de l'électricité statique.

Du Fay postule pour la première fois l'existence de deux type d'électricité, qu'il appelle *vitreuse* et *résineuse* (et que l'on appelle aujourd'hui charges positives et charges négatives).

Aux Pays-Bas, Petrus van Musschenbroek invente le premier condensateur, la "bouteille de Leyde", qui permet d'accumuler des charges de façon à donner des chocs électriques au public avide de sensations fortes dans les foires et les fêtes foraines.

- Au 18^{ème} siècle, Benjamin Franklin, l'un des fondateurs des Etats Unis d'Amérique, fait des expériences en accrochant des objets métalliques à des cerf-volants lors d'orages et montre ainsi que la foudre est un phénomène électrique, puis invente le paratonnerre.

En France, Charles Augustin de Coulomb (1736 - 1806) découvre la loi de l'interaction entre deux charges (loi de Coulomb) à l'aide d'un instrument (appelé *pendule de torsion*) qu'il a lui même mis au point.

En Angleterre, Henry Cavendish (1731 - 1810) perfectionne les condensateurs et introduit la notion de capacité. Dans un autre domaine, il utilise le pendule de torsion inventé par Coulomb pour déterminer la masse de la Terre.

En Italie, Luidgi Galvani (1737 - 1798) s'intéresse aux effets de l'électricité sur les animaux et montre qu'une cuisse de grenouille se contracte (comme si elle redevenait vivante) lorsqu'on la soumet à une décharge électrique. Il montre ainsi que la communication entre le système nerveux et les muscles se fait via des phénomènes électriques.

En étudiant avec attention les expériences de Galvani, un autre physicien italien, Alessandro Volta (1745 - 1827) entre en désaccord avec certaines conclusions de Galvani sur l'*électricité animale* et découvre que la combinaison de deux métaux différents permet de générer de l'électricité. Il invente en 1800 la première *pile électrique*, un empilement de plaques de cuivre et de zinc séparées par du carton imbibé d'acide. C'est une avancée majeure, car pour la première fois les scientifiques vont disposer d'une source fiable et durable d'électricité, au lieu d'avoir recours à des machines qui créent de l'électricité statique par frottements.



FIGURE 2 – L'apparition de la *pile électrique* : expériences de Galvani sur les cuisses de grenouille et Alessandro Volta montrant sa première "pile" à Napoléon Bonaparte

Au 19^{ème} siècle, toutes les connaissances et les théories de l'électromagnétisme (telles qu'on les enseigne encore aujourd'hui) se mettent en place, puis, vers la fin de ce siècle, les applications pratiques des phénomènes électriques (moteurs, ampoules) commencent à apparaître et à se généraliser.

- Au début du siècle, le danois Hans Christian Orsted montre le lien entre les phénomènes électriques et les phénomènes magnétiques. Cette étude sera approfondie par le français André-Marie Ampère (1775 - 1836), qui introduit les termes de *tension* et de *courant* et invente le *galvanomètre* (le premier Ampèremètre).
 - En Allemagne, Georg Ohm pose les bases pour l'analyse mathématique des circuits électriques et Gustav Kirchhoff (également connu pour ses travaux fondateurs en spectroscopie) énoncent les lois générales des circuits électriques (loi des mailles et loi des nœuds).
 - L'anglais Michael Faraday travaille sur l'électrolyse en chimie, et, en physique, poursuit avec talent les travaux sur l'électromagnétisme, qui lui permettent de développer le premier moteur électrique.
 - Le développement d'une théorie de l'électromagnétisme se termine (plus ou moins) avec l'écossais James Clerk Maxwell (1831 - 1879) qui établit quatre équations (les *équations de Maxwell*, que vous verrez l'an prochain) qui permettent à elles seules d'expliquer tous les phénomènes électriques ou magnétiques. Ces équations montrent (entre autres) qu'il peut exister des ondes électromagnétiques, et les physiciens vont rapidement comprendre que la lumière fait partie de cette famille d'ondes.
 - Le physicien allemand Heinrich Hertz (1857 - 1894) confirme les théories de Maxwell en générant pour la première fois des ondes électromagnétiques (en l'occurrence des ondes radio) en laboratoire. C'est le début de la radio et des télécommunications sans fil.
 - La deuxième moitié du 19^{ème} siècle est marquée par un très grand nombre d'invention de machines utilisant l'électricité et le développement du *génie électrique*. Parmi les inventeurs les plus prolifiques, citons les américains Alexander Graham Bell (téléphone), Thomas Edison (ampoule électrique), Nikola Tesla (moteur à induction, réseau électrique AC) et Georges Westinghouse, les anglais Oliver Heaviside et William Thompson (devenu Lord Kelvin) et l'allemand Werner Von Siemens.
- Ces inventions sont une des causes principales de la *seconde révolution industrielle* à la fin du 19^{ème} siècle.

Au 20^{ème} siècle apparaît l'électronique, avec la naissance de composants (diodes et transistors) et de circuits permettant de faire des calculs logiques et de traiter l'information, qui ont fini par donner naissance aux ordinateurs et autres smartphones actuels.

- En 1904, l'anglais John Ambrose Fleming invente la première diode (diode à vide ou "valve de Fleming"). Le premier circuit permettant le calcul booléen (portes logiques) est fabriqué en 1919.
- Vers 1945, aux Bell labs aux Etats-Unis, l'américain John Bardeen étudie les semi-conducteurs et met au point avec ses collaborateurs le premier transistor en 1947. Ils recevront le prix Nobel neuf ans plus tard. Aujourd'hui, le transistor est le composant de base de l'électronique, et les microprocesseurs actuels peuvent en contenir plusieurs milliards.
- Dans les années 1950, Jack Kilby (qui travaillait pour Texas Instruments) et Robert Noyce (le fondateur de Intel) inventent les premiers *circuits intégrés* grâce à une technologie permettant de graver un grand nombre de transistors sur une même plaque de Silicium. C'est le début de la miniaturisation des composants électroniques.
- En 1964, IBM fabrique le premier ordinateur à circuits intégrés. En 1971 apparaissent les microprocesseurs, en 1973 les disques durs et en 1974 les micro-ordinateurs.

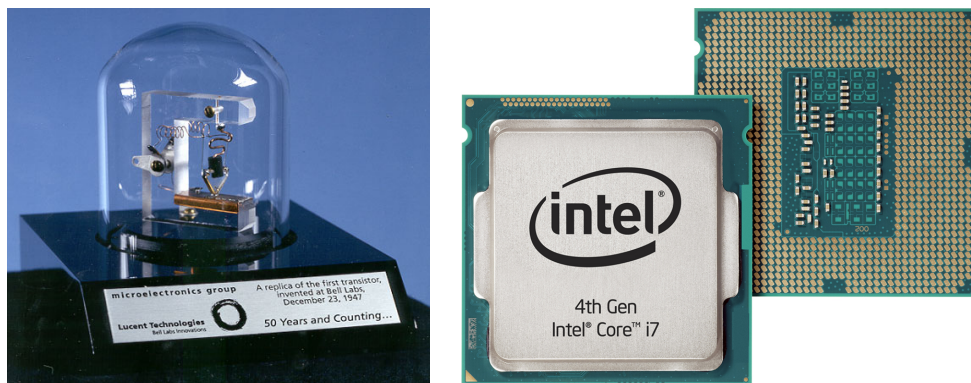


FIGURE 3 – La miniaturisation en marche : à gauche, une réplique du premier transistor. À droite, un microprocesseur Intel Core i7, qui contient plus d'un milliard de transistors (mesurant quelques dizaines de nanomètres chacun)

Depuis, les composants électroniques n'ont cessé de se miniaturiser. En 1975, Gordon Moore, un des fondateurs d'Intel, énonce sa célèbre "loi de Moore" : le nombre de transistors que l'on arrivera à faire contenir sur un microprocesseur doublera tous les deux ans. Cette loi a été remarquablement bien vérifiée jusqu'à maintenant, la taille des plus petits transistors actuels étant de l'ordre d'une dizaine de nanomètres (à comparer avec la dizaine de centimètres des premiers transistors). Cependant, la taille des transistors étant entrain de se rapprocher de la taille d'un atome ($0,1nm$), nous allons dans les 10 ou 20 prochaines années atteindre les limites de la loi de Moore, et il faudra alors faire preuve de beaucoup d'imagination (ou revoir complètement le fonctionnement des ordinateurs) pour continuer à faire des machines de plus en plus performantes.

I Charge, courant, tension

1) Notion de charge électrique

Quand on frotte vigoureusement une règle en plastique (ou en verre) avec de la laine, on constate qu'elle est ensuite capable d'attirer ou de repousser des petits objets (par exemple des petits morceaux de papier).

Cette interaction n'est pas de nature gravitationnelle car sinon la règle n'aurait pas besoin d'être frottée pour attirer les petits objets.

La seule façon d'expliquer cette expérience est donc d'admettre l'existence d'une autre interaction, que l'on appellera "interaction électrique" (ou plus rigoureusement "interaction électrostatique"), du nom grec de l'ambre ("elektron"), une pierre dont les grecs de l'antiquité avaient remarqué la capacité à attirer les petits objets lorsqu'on la frottait.

On constate que certains objets sont soumis à cette interaction et d'autre non. On décide donc d'introduire une nouvelle caractéristique de la matière, qui traduira le fait que celle-ci soit sensible ou non à l'interaction électrique. Cette caractéristique s'appelle la *charge*. C'est l'équivalent de la masse pour l'interaction gravitationnelle.

Si on répète l'expérience de la règle frottée avec d'autres matériaux, on constate que, contrairement à l'interaction gravitationnelle, l'interaction électrique est parfois attractive et parfois répulsive. On va traduire cela mathématiquement en disant que la charge est une grandeur algébrique (c'est à dire qu'elle peut être positive ou négative) et que l'interaction est attractive lorsque les charges sont de signes opposés et répulsive si elles sont de même signe.

Plus précisément, le français Charles Augustin Coulomb a montré qu'une charge q_1 exerce sur une charge q_2 une force :

$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{u}$$

où $\vec{u}$ est un vecteur unitaire dirigé de q_1 vers q_2 , r est la distance qui sépare les charges et ϵ_0 est une constante appelée *permittivité diélectrique du vide*. On constate bien que la force est attractive si q_1 et q_2 sont de signes opposés et répulsive s'ils sont de même signe.

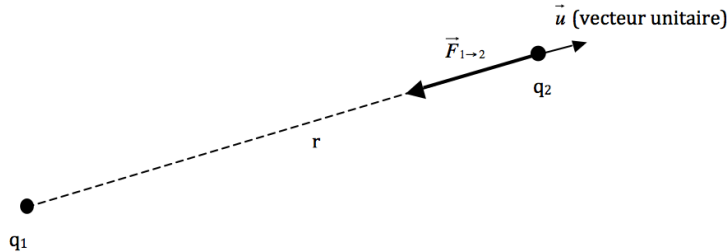


FIGURE 4 – Force de Coulomb entre deux charges (ici de signes opposés puisqu'elles s'attirent).

On a rendu hommage aux travaux de Coulomb en donnant son nom à l'unité de charge (dans le système international), abrégé en C.

À l'échelle microscopique, on sait que les particules chargées élémentaires qui constituent la matière sont le proton et l'électron. Par convention, on a choisi d'attribuer une charge positive au proton et négative à l'électron. Le neutron lui n'a pas de charge, il est donc insensible à l'interaction électrostatique.

En valeur absolue, le proton et l'électron ont la même charge appelée "charge élémentaire" : $e \simeq 1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$. A priori, cette charge est la plus petite charge pouvant exister et un objet chargé aura forcément une charge qui est un multiple entier de e .

La charge est une grandeur *extensive* (i.e. additive) et *conservative*, c'est à dire qu'elle ne peut pas être créée ou détruite (de même que la masse ou l'énergie, en physique classique).

2) Courant électrique

Du point de vue de leurs propriétés électriques, on classe les matériaux dans deux catégories principales : les isolants et les conducteurs.

Les isolants sont les milieux dans lesquels les charges sont fixes et ne peuvent donc pas se déplacer à grande échelle dans le milieu. On peut citer comme exemples le bois, la plupart des matières plastiques, le verre...

Les conducteurs sont des milieux dans lesquels certaines charges (jamais toutes) sont "libres", c'est à dire qu'elles peuvent se déplacer dans le milieu (si une force électrique les y incite). Les conducteurs courants sont :

- Les métaux, dans lesquels les charges mobiles sont les électrons (ou plutôt certains électrons, que l'on appelle "électrons de conduction")
- Les solutions aqueuses, dans lesquelles les charges mobiles sont tous les ions (anions ou cations)
- Les plasmas (gaz ionisés) dans lesquels les charges mobiles sont les noyaux (chargés positivement) et les électrons

Les *semi-conducteurs* (dont fait partie le silicium) sont des matériaux aux propriétés intermédiaires entre les isolants et les conducteurs, ils sont extrêmement utiles en électronique. La conduction y est

assurée par les électrons et les "trous" (qui sont des "absences d'électrons", équivalents à des charges positives).

Quand il y a un mouvement d'ensemble des charges dans un conducteur, on parle de *courant électrique* (comme on parlerait d'un courant marin quand l'eau se déplace).

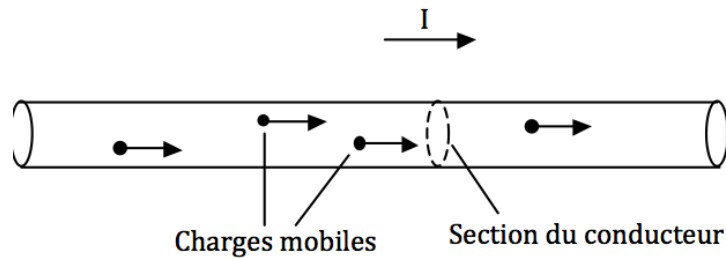


FIGURE 5 – Courant électrique dans un conducteur

Ce courant est caractérisé par son *intensité*. L'intensité est le débit de charge :

$$i = \frac{dq}{dt}$$

où dq est la charge totale qui traverse une section S du conducteur pendant le temps infinitésimal dt .

L'intensité du courant s'exprime en Ampères : $A = C.s^{-1}$, elle se mesure à l'aide d'un *ampèremètre*, qui se branche en série dans la branche du circuit où on cherche à connaître l'intensité du courant.

L'intensité est une grandeur *algébrique* : elle peut être positive ou négative, selon le sens dans lequel on l'oriente. Dans un métal, comme les porteurs de charge sont les électrons (chargés négativement), il faut orienter I dans le sens opposé à celui des électrons si on veut qu'elle soit positive.

3) Potentiel électrique et tension

Considérons un tuyau rempli d'eau et ouvert à ses deux extrémités. On sait tous que l'eau s'écoulera dans le tuyau s'il y a une différence d'altitude entre les deux extrémités. En effet, s'il y a une différence d'altitude, il y a une différence d'énergie potentielle de pesanteur ($E_p = mgh$) entre les deux extrémités, et l'eau va spontanément s'écouler (à cause du poids) "du haut vers le bas", c'est à dire vers l'endroit où l'énergie potentielle de pesanteur est la plus basse.



FIGURE 6 – Dans le conducteur (tuyau) de gauche, l'eau ne s'écoule pas car il n'y a pas de différence d'altitude (et donc d'énergie potentielle de pesanteur) entre les deux extrémités. Par contre, il y a un courant d'eau à droite à cause de la différence d'énergie potentielle. De même, un courant électrique n'apparaît dans un conducteur que s'il y a une différence de potentiel (tension) entre ses deux extrémités.

Par analogie, on pourrait écrire exactement la même phrase en remplaçant :

— "eau" par "charge électrique"

- "tuyau" par "conducteur électrique"
- "poids" par "force électrique"
- "énergie potentielle de pesanteur" par "énergie potentielle électrique"

Ainsi, un courant ne circulera dans un conducteur que s'il y a une différence d'énergie potentielle électrique entre les deux extrémités de ce conducteur.

Définition :

Par définition, on appelle "potentiel électrique" $V(M)$ en un point M de l'espace, l'énergie potentielle électrique qu'aurait une charge q en ce point, divisée par q , soit :

$$V(M) = \frac{E_p(M)}{q}$$

On voit que le potentiel s'exprime en $J.C^{-1}$. En l'honneur d'Alessandro Volta, l'inventeur italien de la première pile électrique, on appelle "Volt" cette unité (notée V).

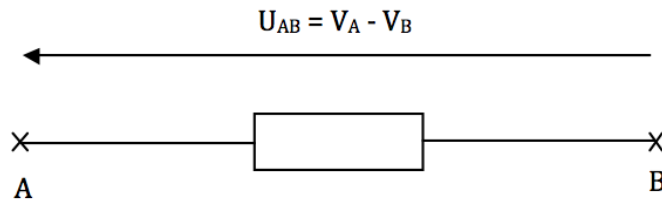
De manière équivalente, on peut dire qu'une charge q placée en un point de potentiel V a une énergie potentielle $E_p = qV$.

On a vu que pour que des charges se déplacent dans un circuit électrique, il faut qu'il y ait des différences d'énergie potentielle électrique au sein du circuit, et donc des différences de potentiel électrique.

Par définition, on appelle *tension* U_{AB} entre deux points A et B d'un circuit électrique la *différence de potentiel* entre ces deux points :

$$U_{AB} = V_A - V_B$$

Elle se représente par une flèche allant de B vers A (mais c'est toutefois une grandeur de type scalaire, pas un vecteur).



Remarque : Tout comme une énergie potentielle, le potentiel électrique est lui aussi défini à une constante près. Ainsi, seules les différences de potentiels (i.e. les tensions) ont vraiment un sens physique.

La tension se mesure avec un *voltmètre* qui se branche en dérivation, aux bornes du dipôles pour lequel on cherche à mesurer la tension.

Ordres de grandeurs de tensions et de courants usuels :

Intensités :

- Petits circuits électroniques, circuits réalisés en TP : de l'ordre du mA
- Installation électrique d'une maison (chauffage électrique, machine à laver) : de l'ordre de l'ampère ou la dizaine d'ampères (en général des disjoncteurs coupent le courant s'il dépasse 40 A)

- TGV : de l'ordre de 300 A
- foudre : de l'ordre de 10 000 A

Tensions :

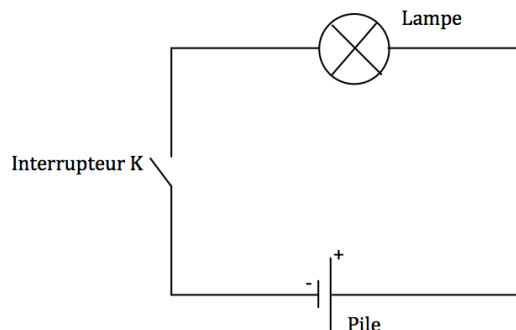
- Petits circuits électroniques : du mV jusqu'à quelques Volts
- Prises électriques d'une maison : 230 V en Europe, 110 V aux Etats-Unis
- Ligne à Haute Tension pour acheminer l'électricité sur de grandes distances : jusqu'au MV (méga volt !)
- Lors d'un orage, il peut y avoir une tension allant jusqu'à 100 MV entre les nuages et le ciel

Remarque : Electrocutation : Le corps humain conduit l'électricité à cause de la présence de nombreux électrolytes dans notre sang et nos cellules (notamment des ions Na^+ , Cl^- , K^+) donc si on est soumis à une tension importante, un courant peut circuler dans notre corps, ce qui est très dangereux. Un courant supérieur à 50 mA est suffisant pour provoquer une fibrillation du coeur (le coeur "perd son rythme"), qui peut corriger à l'aide d'un défibrillateur mais est souvent fatal en l'absence d'aide.

Un courant supérieur à 1A cause des brûlures irréversibles des tissus (peau, muscles, organes).

La gravité de l'électrocution dépend de l'intensité du courant qui a circulé, de la durée pendant laquelle il a circulé et des organes qui ont été traversés. L'intensité du courant dépend de la tension à laquelle on a été soumis ainsi que de la résistance électrique du corps, qui elle-même dépend beaucoup de l'état de surface de la peau (une peau mouillée ou avec des coupures a une résistance beaucoup plus basse qu'une peau bien sèche).

II L'approximation des régimes quasi-stationnaires ou A.R.Q.S.



Considérons un circuit électrique très simple, composé d'une pile, un interrupteur et une lampe (et des fils de connexion pour les relier entre eux) et supposons qu'initialement l'interrupteur est ouvert (donc il n'y a pas de courant électrique, i.e. les électrons ne se déplacent pas dans le circuit).

On peut se poser la question suivante : quand on ferme l'interrupteur, est-ce que tous les électrons du circuit se mettent à se déplacer en même temps ? Autrement dit : est-ce que les électrons situés loin de l'interrupteur ressentent une force électrique immédiatement après que l'on ait fermé l'interrupteur ?

En réalité la réponse est non, car le "champ électrique" ne va pas varier instantanément dans tout le circuit. Quand on ferme l'interrupteur, une onde électromagnétique va se propager dans le circuit, et mettre progressivement les électrons en mouvement.

Comme on le sait, les ondes électromagnétiques se déplacent à la "vitesse de la lumière" $c \simeq 3,0 \times 10^8 m/s$. Ainsi le temps qui s'écoule entre le moment où on ferme l'interrupteur et le moment où un électron situé à $D = 3m$ de l'interrupteur ressentira ce changement vaut : $\Delta t = \frac{D}{c} = \frac{3}{3 \cdot 10^8} \simeq 10ns$.

On voit que ce temps est extrêmement court : pas étonnant que l'on ait l'impression que l'ampoule s'allume immédiatement après que l'on ait fermé l'interrupteur.

Cependant, même si ce temps de propagation est très court, il peut être gênant si le temps de variation du courant dans le circuit est lui-même très court (pensez à un processeur d'ordinateur qui tourne à 2 GHz, donc avec une période d'une demi nanoseconde).

Lorsqu'on peut négliger le temps de propagation de l'onde électromagnétique devant le temps caractéristique des variations du courant dans le circuit, on dit que l'on est dans le cadre de "l'approximation des régimes quasi stationnaires". Cette approximation est très pratique car, dans ce cadre, on pourra considérer que le courant est exactement le même à différents endroits d'une même branche. On retiendra que cette approximation est valable lorsque :

$$\boxed{\frac{L}{c} \ll T}$$

où L représente la taille du circuit étudié (donc $\tau = \frac{L}{c}$ représente le temps de propagation d'une onde électromagnétique le long du circuit) et T représente la période du courant (ou de la tension) dans le circuit.

Cette année, on se placera systématiquement dans le cadre de l'A.R.Q.S.

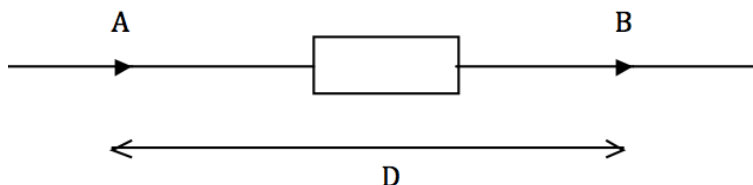


FIGURE 7 – En toute rigueur, l'intensité en B à un instant t est égale à l'intensité en A à l'instant antérieur $t - \frac{D}{c}$ (cf. le cours sur les ondes progressives), mais, dans le cadre de l'ARQS, le temps de propagation $\frac{D}{c}$ étant négligeable, on pourra dire qu'à tout instant, l'intensité en B est la même que celle en A.

Question 1 :

L'A.R.Q.S. est-elle valable pour :

- a) les circuits électriques d'une maison ? (on rappelle qu'en Europe la tension aux bornes d'une prise varie à la fréquence de 50 Hz)
- b) les circuits du processeur d'un ordinateur de fréquence de 2GHz ?
- c) les circuits d'une antenne radio de 50 m de haut, qui émet dans la bande FM ?

III Vocabulaire de l'électrocinétique

Un circuit électrique associe en général un *générateur* (dipôle actif, qui génère une tension, et donc un courant si le circuit est fermé) à un ou plusieurs *récepteurs* (passif) qui utilisent l'énergie électrique fournie par le générateur.

Pour que le courant puisse circuler dans un circuit électrique, il est nécessaire que celui-ci soit *fermé* : le courant ne peut pas circuler si le circuit est ouvert à un endroit.

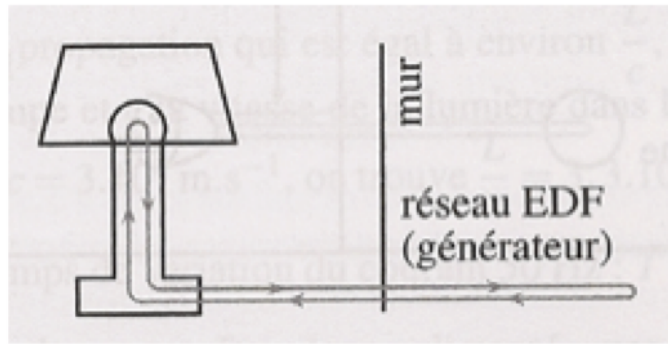


FIGURE 8 – Illustration du fait que les circuits électriques se referment toujours, même si ça n'est pas toujours apparent (ainsi, le câble de connexion entre la lampe et la prise contient deux fils dans lesquels le courant va en sens inverse).

Quand on représente schématiquement un circuit électrique, on prend parfois la liberté d'oublier certains fils car on sait que le circuit doit se refermer (donc on peut "sous-entendre" les fils qui ferment le circuit).

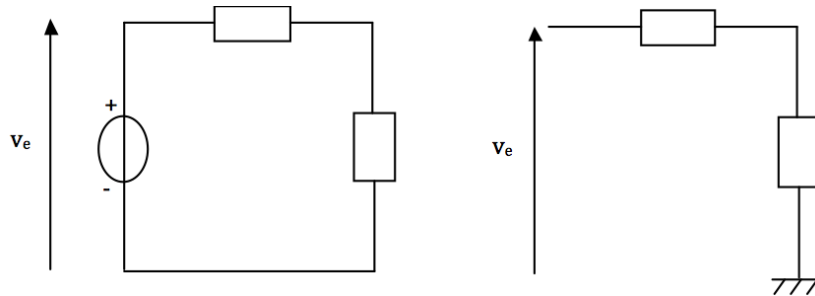


FIGURE 9 – Circuit complet (à gauche) et représentation simplifiée (à droite) où certains fils de connexion ont été omis.

Il est important de connaître la signification des termes suivants, qui reviennent souvent en électronique :

- Masse : Puisque le potentiel électrique est défini à une constante près, on a le droit de choisir un point du circuit en lequel on dit que le potentiel est nul. Ce point est appelé la "masse" du circuit (sur un schéma, on l'indique par un "bateau"). On voit que le choix de la masse est purement conventionnel (et n'a aucune conséquence physique) : lorsqu'on analyse un circuit électrique, on peut choisir de mettre la masse où on veut.

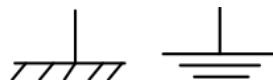


FIGURE 10 – Symboles électroniques de la masse (à gauche) et de la Terre (à droite).

- Terre : En électricité la "terre" désigne le sol (ou, si on préfère, la planète Terre toute entière) vu comme un conducteur électrique (à cause de la présence d'humidité et d'ions) de taille quasi-infinie. Du fait de sa taille, on considère que le potentiel électrique de la Terre est constant, même si celle-ci reçoit ou perd des charges, et il est alors commun de le choisir nul (la terre coïncide alors avec la masse). Les prises électriques d'une maison comportent en général une "prise de terre" : c'est le petit barreau métallique qui dépasse de la prise. Ce morceau de métal est relié

par un fil au sol, c'est à dire à un pieu métallique enfoui sous la maison (ou à une canalisation en métal). L'intérêt d'une prise de terre est d'éviter les électrocutions, notamment avec les appareils à carcasse métallique (comme par exemple les machines à laver) : la carcasse de l'appareil est reliée à la prise de terre. Si à un moment, la carcasse entre en contact avec un fil électrique (et qu'il apparaît donc une tension non nulle entre le carcasse et le sol, ce qui serait très dangereux pour une personne qui toucherait l'appareil), un courant va circuler dans la prise de terre et sera détecté par un *disjoncteur différentiel* qui coupera le circuit.

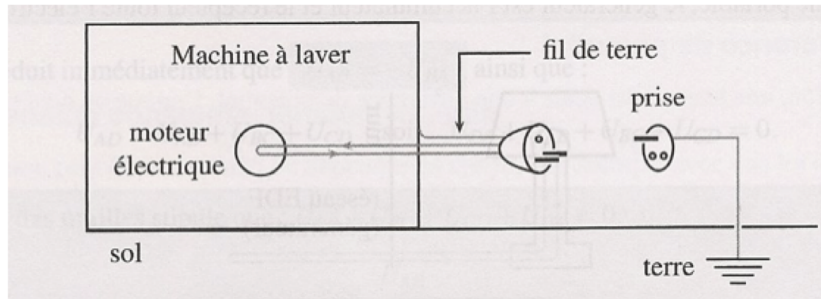
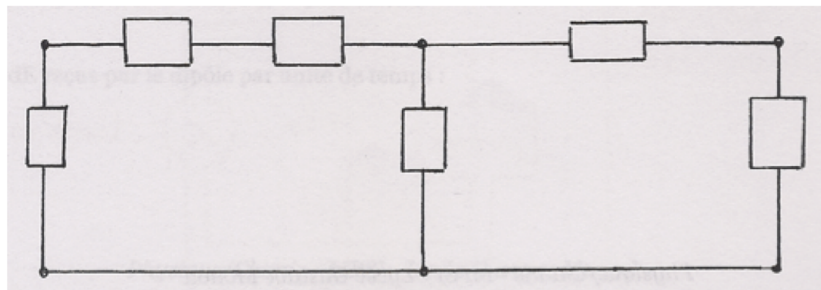


FIGURE 11 – Utilisation d'une prise de Terre pour se protéger des électrocutions.

Remarque : si un appareil électrique comporte une prise de terre, on choisit en général de mettre la masse du circuit à cet endroit là. Un appareil qui n'a pas de prise de terre (par exemple certains petits appareils à carcasse en plastique) est dit "à masse flottante".

- Dipôle : C'est un composant électronique avec deux bornes de connexion au circuit. On appelle *caractéristique* du dipôle la relation entre l'intensité i du courant qui le traverse et la tension u à ses bornes.
- Quadripôle : C'est un composant électrique à 4 bornes de connexion (deux bornes d'entrée et deux bornes de sortie). Les filtres et les amplificateurs (entre autres) sont des quadripôles.
- Noeud : C'est un point de jonction entre au moins trois fils de connexion.
- Branche : C'est une portion de circuit comprise entre deux noeuds. Des dipôles appartenant à une même branche sont dits *en série*.
- Maille : C'est un ensemble de branches formant un contour fermé.

Question 2 : Combien le circuit suivant présente-t-il de noeuds, de branches et de mailles ?



IV Les lois de Kirchhoff

Il s'agit de deux lois assez évidentes mais qui sont à la base de l'étude des circuits électriques (a priori, on peut analyser n'importe quel circuit en utilisant seulement ces deux lois). Elles ont été formalisées par l'allemand Gustav Kirchhoff en 1845.

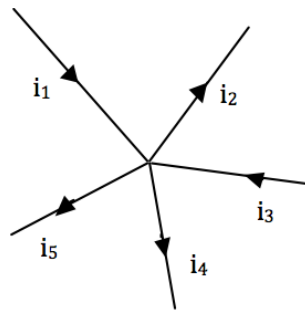
1) Loi des noeuds

Imaginons un affluent qui rencontre une rivière : le débit de la rivière en aval est égal au débit de la rivière en amont plus le débit de l'affluent.

C'est exactement ce que traduit la loi des noeuds : l'intensité totale du courant qui "rentre" dans un noeud est égale à l'intensité totale du courant qui quitte le noeud. Ceci est en réalité une conséquence directe de la *conservation de la charge*. En effet, si ça n'était pas le cas, cela signifierait que des charges sont créées (ou détruites) au niveau du noeud, ce qui est impossible.

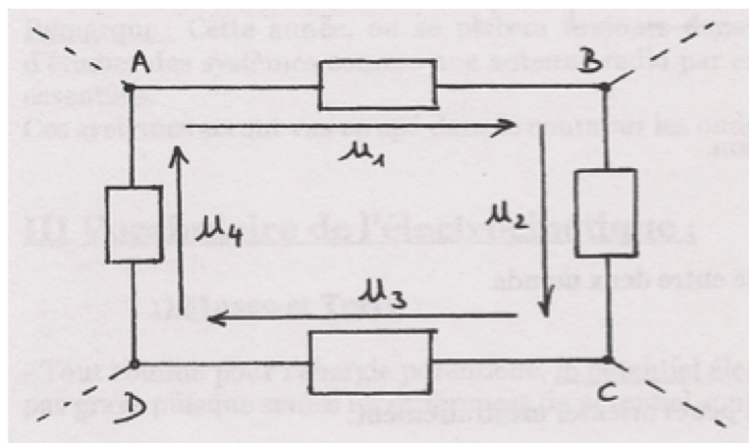
Question 3 :

Ecrire la loi des noeuds pour le noeud suivant.



2) Loi des mailles

Cette loi est simplement une conséquence du fait qu'une tension est une différence de potentiel. Ainsi, si on somme des tensions en partant d'un noeud A et en arrivant au même noeud A, la somme de toutes les tensions est égale à $V_A - V_A$, c'est à dire 0.

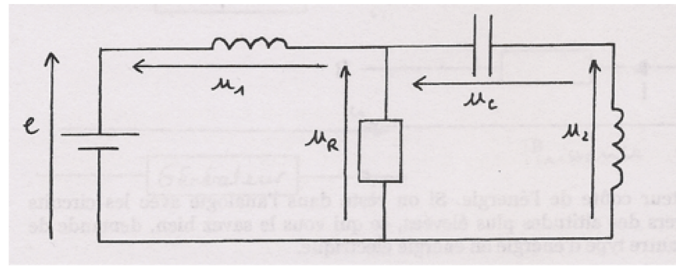
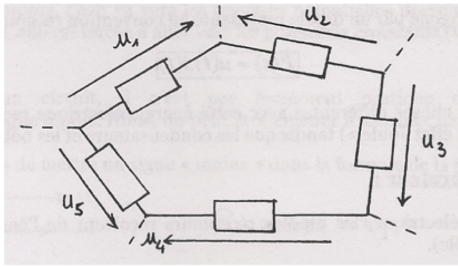


Sur le schéma ci-dessus, on a :

$$u_1 + u_2 + u_3 + u_4 = 0$$

Question 4 : Démontrer cette dernière égalité.

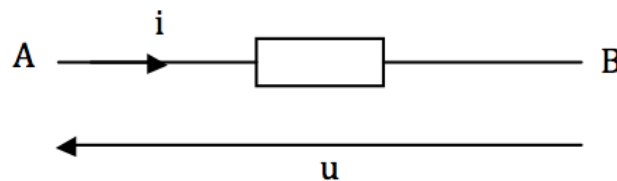
Question 5 :



- Ecrire la loi des mailles pour le circuit de gauche.
- Pour le circuit de droite, écrire les différentes relations que l'on peut déduire de la loi des mailles.

V Etude énergétique d'un dipôle : puissance reçue ou cédée

1) Récepteurs



Considérons un dipôle qui reçoit de l'énergie électrique : par exemple une résistance, une lampe, un moteur électrique....

Dans un tel dipôle (passif), le courant circule dans son sens "spontané", c'est à dire vers les énergies potentielles les plus basses, ou, autrement dit, vers les potentiels électriques les plus bas (de même que, dans un tuyau, l'eau coule "spontanément" du haut vers les bas, c'est à dire vers les endroits où son énergie potentielle de pesanteur est la plus basse).

Ainsi, on voit que si $u > 0$, alors $V_A > V_B$ et le courant va aller de A vers B. Donc, si on veut que i soit positive, il faut orienter le courant de A vers B, c'est à dire dans le sens opposé à la tension u .

Par définition, quand la flèche représentant l'intensité i et celle représentant la tension u sont de sens opposé, on dit que le dipôle est représenté en *convention récepteur*.

Comme on vient de voir, l'intérêt de représenter un dipôle récepteur en convention récepteur est qu'alors u et i sont de même signe.

Afin de calculer la puissance électrique consommée par le dipôle, calculons tout d'abord l'énergie dE reçue par le dipôle pendant un temps infinitésimal dt . Par conservation de l'énergie, l'énergie reçue par le dipôle est l'opposé de l'énergie reçue par les charges dq qui le traversent pendant dt , soit (en considérant que ces charges ont la même vitesse en entrée et en sortie et donc que leur variation d'énergie n'est due qu'à une variation d'énergie potentielle) :

$$dE = -(E_p(B) - E_p(A)) = -(dqV_B - dqV_A) = dq(V_A - V_B) = dq \times u$$

D'où la puissance (énergie par unité de temps) reçue par le dipôle :

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{dq}{dt} \times u = i \times u$$

On retiendra ce résultat par coeur : la puissance instantanée reçue par un dipôle s'écrit (si le dipôle est représenté en convention récepteur) :

$$P(t) = u(t) \times i(t)$$

Unités : Comme on le sait, l'énergie s'exprime en Joules (J) et la puissance en Watts ($W = J.s^{-1}$). On voit que les Watts sont aussi des Volts $\times$ Ampères, ce qui explique que les électriciens expriment souvent la puissance en "Volts-Ampères".

Sur une facture EDF, l'énergie consommée (en un mois par un foyer) n'est pas exprimée en Joules mais en "kilowatts-heures" (kWh). Un kilowatt-heure est l'énergie dissipée par un dipôle qui consommerait une puissance de 1 kW pendant une heure, soit $3,6 \cdot 10^6 J$. Pour les particuliers 1kWh est facturé environ 10 centimes d'euros (plus ou moins selon l'abonnement souscrit).

Remarque :

Comme on le sait, l'énergie (totale) est une grandeur conservative (en physique classique du moins) : elle ne peut donc pas être créée ou détruite. Ainsi, les dipôles récepteurs ne font que transformer l'énergie électrique qu'ils reçoivent en un autre type d'énergie. Par exemple :

- les résistances transforment l'énergie électrique en énergie d'agitation thermique (chaleur) par "effet Joule".
- les lampes la transforment en énergie lumineuse (rayonnement)
- les moteurs électriques la transforment en énergie mécanique
- les hauts-parleurs la transforment en énergie acoustique...

2) Générateurs

Puisque les dipôles récepteurs dissipent l'énergie électrique, si on veut que de l'énergie électrique reste présente dans le circuit (et donc que le courant continue à circuler), il faut que d'autres dipôles apportent en permanence de l'énergie électrique au circuit. Ces dipôles sont appelés *générateurs* ou *sources*.

Par analogie, dans un circuit hydraulique, il faut qu'il y ait une pompe pour que l'eau ne s'arrête pas de couler. L'eau s'écoule naturellement vers le bas (i.e. vers les endroits où son énergie potentielle est la plus basse) mais la pompe est capable de faire "remonter" l'eau, c'est à dire de l'amener vers les énergies potentielles croissantes.

De même, dans un générateur, le courant circule dans le sens inverse de son sens spontané, c'est à dire qu'il va vers les potentiels électriques croissants.

On comprend alors que, pour un générateur, si on veut que $u(t)$ et $i(t)$ soient de même signe, il faut les représenter dans le même sens.

Par définition, si on représente un dipôle avec la flèche de l'intensité et la flèche de la tension dirigée dans le même sens, on dit que l'on est en *convention générateur*.

En convention générateur, la puissance reçue s'écrit : $P_r(t) = -u(t) \times i(t)$ et la puissance cédée s'écrit : $P_c(t) = u(t) \times i(t)$.

Remarque : À nouveau, par conservation de l'énergie, les générateurs ne font que convertir une autre forme d'énergie en énergie électrique. Par exemple :

- les piles, batteries et accumulateurs convertissent de l'énergie chimique en énergie électrique
- dans une centrale nucléaire, l'énergie nucléaire contenue dans des noyaux instables d'Uranium est convertie en énergie thermique (on "chauffe de l'eau"), qui est convertie en énergie mécanique (la vapeur d'eau fait tourner une turbine) puis en énergie électrique (la turbine entraîne un alternateur)