4 LE COURANT, LA RÉSISTANCE ET LES SOURCES

On laisse fonctionner une ampoule de 60 W pendant 10 heures. La différence de potentiel aux bornes de l'ampoule est de 120 V. Combien coute cette énergie si le prix est de 10 ¢ du kWh ?

fantasystock.deviantart.com/art/Light-Bulb-Zoom-2-62823301

Découvrez comment résoudre ce problème dans ce chapitre.

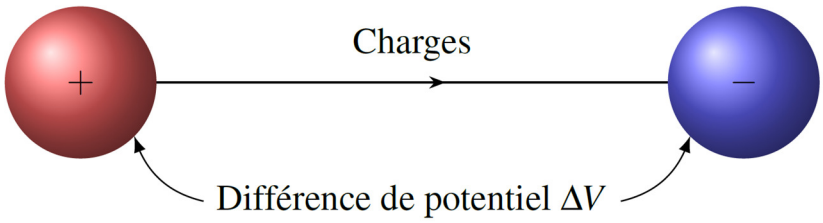
4.1 LE COURANT

La définition du courant

On a vu dans les chapitres précédents que les charges peuvent se déplacer dans les conducteurs.

À l'équilibre, le potentiel est le même partout dans le conducteur et il n'y a pas de champ électrique dans le conducteur. Les charges sont alors immobiles dans le conducteur. Il se peut cependant que le potentiel ne soit pas le même partout. Dans ce cas, il y a un champ électrique dans le conducteur (puisque le potentiel varie) et il y a une force sur les charges. Les charges se déplacent alors pour tenter de rétablir l'équilibre. C'est ce mouvement de charges qu'on va explorer dans ce chapitre.

Prenons un exemple pour illustrer. Supposons qu'on relie deux sphères conductrices à l'aide d'un fil conducteur. Une sphère a une charge positive et l'autre sphère a une charge négative. Si le fil est conducteur, les deux sphères et le fil deviennent tous le même conducteur et ils doivent tous avoir le même potentiel. Si on suppose que seules les charges positives se déplacent, la sphère positive va donc donner des charges positives à la sphère négative pour diminuer le potentiel de la sphère positive et augmenter le potentiel de la sphère négative jusqu'à ce que les deux potentiels soient égaux. Il y aura donc un déplacement de charge dans le fil.



Quand des charges se déplacent, il y a un courant. Plus il y a de charges qui se déplacent par unité de temps, plus le courant est grand. On peut donc définir ainsi le courant.

Définition du courant moyen

$$I = \frac{\text{charge}}{\text{temps}} = \frac{Q}{\Delta t}$$

Les unités de ce courant sont des C/s. On a donné le nom d'*ampère* à cette unité.

L'ampère (*A*)

$$1A = 1\tfrac{C}{s}$$

Ainsi, s'il passe une charge de 900 C en 1 minute dans un fil, le courant dans le conducteur est de 900 C/60 s = 15 A.

Si la charge ne s'écoule pas à un taux constant, on peut définir le courant instantané comme étant la petite charge qui passe durant un temps infinitésimal.

Définition du courant instantané

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

Exemple 4.1.1

Le courant dans un fil varie en fonction du temps selon la formule

$$I = 6\tfrac{A}{s^2} \cdot t^2 + 3A$$

Combien de coulombs sont passés par ce fil entre t = 1 s et t = 5 s ?

La charge passée par le fil durant un temps dt est

$$\begin{aligned} dQ &= Idt \\ &= \left(6\tfrac{A}{s^2} \cdot t^2 + 3A\right)dt \end{aligned}$$

Si on somme toutes ces charges entre t = 1 s et t = 5 s, on a

$$\begin{aligned} Q &= \int_{1s}^{5s} \left(6\tfrac{A}{s^2} \cdot t^2 + 3A\right)dt \\ &= \left[2\tfrac{A}{s^2} \cdot t^3 + 3A \cdot t\right]_{1s}^{5s} \\ &= \left[2\tfrac{A}{s^2} \cdot (5s)^3 + 3A \cdot 5s\right] - \left[2\tfrac{A}{s^2} \cdot (1s)^3 + 3A \cdot 1s\right] \\ &= 265C - 5C \\ &= 260C \end{aligned}$$

Comment les charges peuvent-elles se déplacer dans certaines substances ?

Pour qu'il y ait un courant, il faut que les charges puissent se déplacer dans la matière, donc que la matière soit conductrice. Toutefois, on peut se demander comment les charges électriques, c'est-à-dire des protons, des électrons ou des ions, peuvent se déplacer facilement dans la matière.

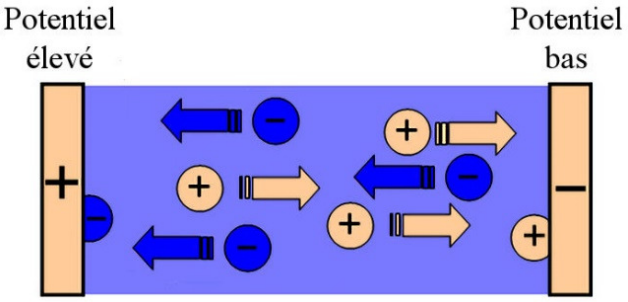
Les ions dans des solutions et des gaz

S'il y a des particules chargées dans un gaz ou une solution, celles-ci pourront se déplacer assez librement pour faire un courant. L'eau pure ne conduit pas très bien l'électricité parce

qu'il n'y a pas beaucoup d'ions dans l'eau. Ajoutez du sel, qui va se séparer en ions Na^+ et Cl^-, et vous obtiendrez un liquide qui conduit l'électricité beaucoup plus facilement. Plus il y aura d'ions, plus le passage du courant sera facile.

Les gaz ne sont pas de très bons conducteurs d'électricité parce qu'il n'y a pas beaucoup d'ions dans un gaz. Mais si on chauffe le gaz (en gros à plus de 3000 K), les atomes du gaz commenceront à s'ioniser. On aura alors un gaz composé d'ions (les noyaux atomiques auxquels il manque un ou plusieurs électrons) et d'électrons libres et ce gaz sera un très bon conducteur d'électricité. On appelle un tel gaz un plasma. Le Soleil est composé de plasma.

Notez que dans ces deux cas, les charges positives et négatives peuvent se déplacer. Quand il y a une différence de potentiel, les charges positives se déplacent vers l'endroit où le potentiel est le plus bas et les charges négatives se déplacent vers l'endroit où le potentiel est le plus grand. Ainsi, les charges positives se déplacent dans une direction pendant que les charges négatives se déplacent dans la direction opposée.



www.schoolphysics.co.uk/age11-14/Electricity%20and%20magnetism/Current%20electricity/text/Electrolysis_/index.html

Les métaux

Le déplacement des charges est nettement plus difficile dans les solides. Alors que les charges peuvent se déplacer assez facilement dans les gaz et les liquides, les atomes peuvent difficilement se déplacer dans un solide. Ainsi, beaucoup de solides ne permettent pas le passage des charges électriques.

Il y a toutefois une exception : les métaux. Dans les métaux, la liaison entre les atomes est un peu particulière. Dans ce type de liaison, appelée *liaison métallique*, quelques électrons des atomes se retrouvent dans des orbitales partagées par tous les atomes du métal. Ces électrons peuvent alors se déplacer assez facilement dans tout le métal. Ces électrons s'appellent des *électrons libres* ou des *électrons de conduction.* Seuls les électrons libres peuvent se déplacer dans les métaux. Les charges positives (les atomes auxquels il manque un ou des électrons) ne peuvent pas se déplacer. Tous les courants dans les métaux sont donc faits uniquement par des mouvements d'électrons.

Ce ne sont pas tous les électrons de l'atome qui sont partagés. Par exemple, il y a 29 électrons dans un atome de cuivre, mais un seul de ces électrons se retrouve dans les orbitales partagées avec les autres atomes. Le nombre d'électrons partagés par chaque atome s'appelle la *valence* de l'atome. La table suivante nous indique la valence de certains métaux.

Métal	Valence	Métal	Valence	Métal	Valence
Cu	1	**Sr**	2	**Hg**	2
Ag	1	**Ba**	2	**Al**	3
Au	1	**Nb**	1	**Ga**	3
Be	2	**Fe**	2	**In**	3
Mg	2	**Zn**	2	**Sn**	4
Ca	2	**Cd**	2	**Pb**	4

La densité d'électrons libres dans un métal dépend uniquement de la nature du métal. Pour un métal donné, il y a une certaine densité d'électrons caractéristique de ce métal. Cette densité d'électrons (en électrons par m³) est notée n_e.

On calcule cette densité d'électrons libres en trouvant la densité d'atomes dans le métal. Comme chaque atome partage un nombre électrons égal à la valence, on doit multiplier la densité d'atomes par la valence de l'atome pour obtenir la densité d'électrons. On a donc

$$\begin{aligned} n_e &= \text{valence} \cdot \frac{\text{nombre d'atomes}}{\text{volume}} \\ &= \text{valence} \cdot \frac{\frac{\text{masse}}{\text{masse molaire}} \text{nombre d'Avogadro}}{\text{volume}} \\ &= \text{valence} \cdot \frac{\text{masse}}{\text{volume}} \cdot \frac{\text{nombre d'Avogadro}}{\text{masse molaire}} \\ &= \text{valence} \cdot \text{masse volumique} \cdot \frac{\text{nombre d'Avogadro}}{\text{masse molaire}} \end{aligned}$$

Ce qui nous donne (en utilisant le symbole μ pour la masse molaire) la formule suivante.

Densité d'électrons libres

$$n_e = \text{valence} \cdot \frac{\rho N_A}{\mu}$$

La réalité est un peu plus subtile. Par exemple, dans le cuivre, chaque atome fournit en réalité 1,3 électron libre en moyenne. C'est que la valence du cuivre peut être de 1 ou 2. Ainsi, certains atomes fournissent 1 électron alors que d'autres en fournissent 2. On va donc ignorer cette subtilité dans ce cours en utilisant toujours la valeur donnée dans la table.

Les électrons dans les orbitales partagées peuvent se déplacer assez librement dans le métal, et ce, dans toutes les directions. C'est un peu comme si ces électrons libres agissaient comme un gaz dans le métal. Il existe d'ailleurs des modèles de conduction (comme le modèle de Drude) dans lesquelles on suppose que les électrons de conduction forment un genre de gaz d'électrons dans le conducteur. Notez toutefois que ce gaz n'obéit pas à l'équation $PV = nRT$ puisque l'énergie des électrons, qui est celle des niveaux partagés, est plus grande que ce qu'on devrait avoir selon cette équation. On appelle ce genre de gaz un *gaz de Fermi*.

À partir d'ici, on va s'intéresser uniquement aux courants dans les métaux. À moins d'indication contraire, le conducteur est un métal.

Le sens du courant conventionnel

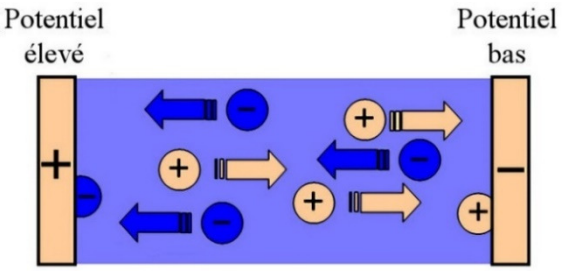
Le sens du courant conventionnel est toujours celui de la direction du mouvement des charges si on suppose que ce sont uniquement les charges positives qui se déplacent. Puisque le déplacement des charges positives se fait toujours de façon à diminuer la charge de l'objet ayant le potentiel le plus élevé et faire augmenter la charge de l'objet ayant le potentiel le plus bas, on peut en déduire la conclusion suivante.

Sens du courant conventionnel

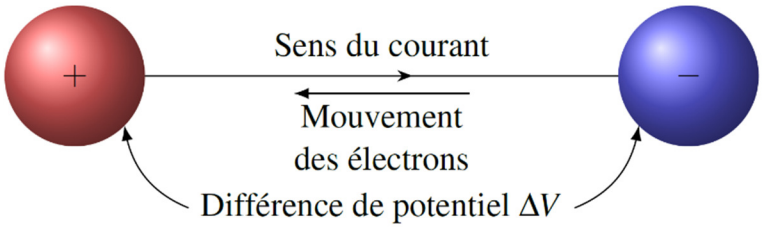
Le courant est le sens de déplacement des charges positives.

Le courant va toujours de l'objet ayant le potentiel le plus élevé vers l'objet ayant le potentiel le plus bas.

Il y a un petit problème avec cette idée. Très souvent, le courant n'est pas fait uniquement par un mouvement de charges positives. Par exemple, dans une solution, on a vu que les charges positives et négatives se déplacent pour faire le courant. Dans cette image, il y a un courant conventionnel vers la droite. Ce courant correspond à des charges positives se dirigeant vers la droite, mais aussi à des charges négatives se dirigeant vers la gauche. L'effet produit par des charges négatives allant vers la gauche est identique à l'effet produit par des charges positives allant vers la droite ; dans les deux cas, le mouvement des charges fait diminuer le potentiel de l'objet de gauche et augmenter le potentiel de l'objet de droite.



Dans un métal, le courant est fait par un déplacement de charges négatives seulement et ces charges vont de l'objet négatif vers l'objet positif dans le but d'équilibrer les potentiels. Elles vont donc de l'objet ayant le potentiel le plus bas vers l'objet ayant le potentiel le plus élevé, donc dans le sens contraire du courant conventionnel.



Le mouvement des électrons dans un métal est donc toujours dans la direction opposée au sens du courant conventionnel !

Ce déplacement des charges dans un métal dans le sens contraire du courant peut porter à confusion au départ et on peut se demander pourquoi on a fait ce choix pour la direction du courant. On a fait ce choix tout simplement parce qu'on ne savait pas du tout si c'était des charges positives ou des charges négatives qui se déplacent dans les substances quand il y a un courant. On a alors pris une chance et supposé que ce sont les charges positives qui se déplacent.

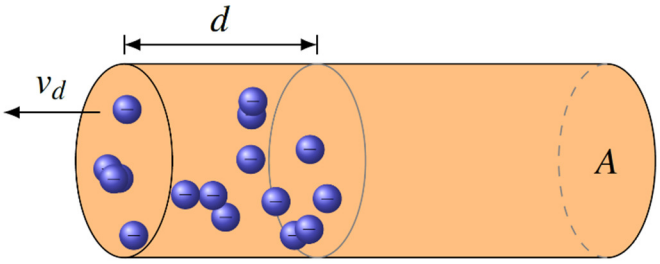
Maintenant qu'on sait que ce sont les charges négatives qui se déplacent dans un métal, ne pourrait-on pas changer la direction du courant conventionnel ? Certains le font. Parfois, dans des cours d'électronique, on travaille avec le *electron flow* qui est un courant dans la direction du mouvement des électrons. Dans ce cas, ce n'est pas trop mêlant parce qu'on considère uniquement des courants dans des métaux en électronique. Toutefois, en général, ça deviendrait mêlant parce que le courant n'est pas toujours dans le sens contraire du déplacement des charges positives. Dans certains cas, comme dans des solutions avec des ions positifs, le courant est effectivement dans le sens de déplacement des ions.

À partir de maintenant, quand on demande la direction du courant, on demande nécessairement la direction du courant conventionnel.

4.2 LA VITESSE DE DÉRIVE

La vitesse de dérive est la vitesse des charges qui font le courant. (En fait, c'est un genre de vitesse moyenne. On verra, plus tard, qu'il y a une subtilité). On va faire uniquement le calcul de la vitesse dans le cas où le courant est fait par des électrons parce que c'est ce qu'on a dans les métaux.

Pour trouver cette vitesse, prenons une section de fil parcouru par un courant, comme sur la figure de droite.



Calculons le courant en calculant la charge qui arrive au bout du fil pendant le temps qu'il faut pour que l'électron le plus à droite (à une distance d du bout du fil) sur la figure arrive au bout du fil à gauche.

Commençons par trouver la charge qui arrivera au bout. Évidemment, tous les électrons à gauche de l'électron le plus à droite seront arrivés au bout du fil. La charge est donc la somme de toutes les charges des électrons libres illustrés sur la figure. Disons qu'il y a N_e électrons libres dans cette partie du fil. La charge totale (en valeur absolue) est donc

$$Q = N_e e$$

Avec une densité d'électrons libres n_e, le nombre d'électrons libres est

$$\begin{aligned} N_e &= \text{densité} \cdot \text{volume} \\ &= n_e \cdot \text{volume} \\ &= n_e A d \end{aligned}$$

puisque le volume de la région qui contient les électrons est Ad (où A est l'aire du bout du fil). La charge est donc

$$\begin{aligned} Q &= N_e e \\ &= n_e A d e \end{aligned}$$

Pour calculer le courant, on doit diviser cette charge par le temps que prendra cette charge pour arriver au bout. Ce temps correspond au temps qu'il faudra au dernier électron pour arriver. Comme ce dernier électron est à une distance d du bout et qu'il se déplace vers le bout du fil à une certaine vitesse (qu'on va noter v_d pour *vitesse de dérive*), le temps est

$$\Delta t = \frac{d}{v_d}$$

Le courant est donc

$$\begin{aligned} I &= \frac{Q}{\Delta t} \\ &= \frac{n_e A d e}{d / v_d} \end{aligned}$$

Si on simplifie, on obtient la relation suivante entre le courant et la vitesse de dérive.

Lien entre le courant et la vitesse de dérive des électrons

$$I = n_e A e v_d$$

Exemple 4.2.1

Un fil d'aluminium ayant un rayon de 1 mm est parcouru par un courant de 10 A. Quelle est la vitesse de dérive des électrons dans le fil ? La densité de l'aluminium est 2700 kg/m³ et sa masse molaire est de 26,9815 g/mol.

On trouve la vitesse de dérive avec $I = n_e A v_d e$. Toutefois, il doit connaitre la densité d'électrons libres pour y arriver. La densité d'électron libre est

$$\begin{aligned} n_e &= \text{valence} \cdot \frac{\rho N_A}{\mu} \\ &= 3 \cdot \frac{2700 \frac{kg}{m^3} \cdot 6{,}02 \times 10^{23} mol^{-1}}{26{,}9815 \times 10^{-3} \frac{kg}{mol}} \\ &= 1{,}808 \times 10^{29} m^{-3} \end{aligned}$$

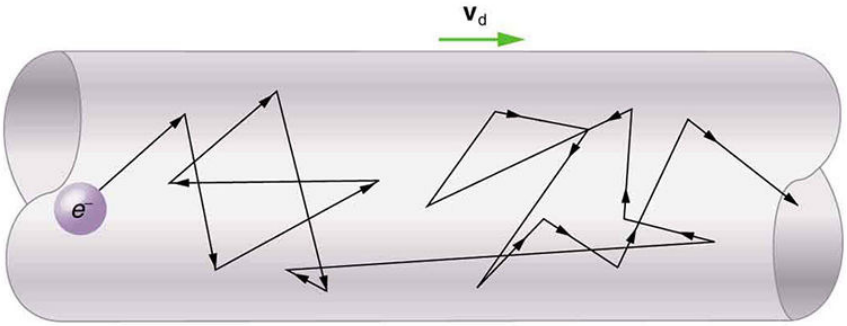
(Cette densité est toujours très élevée, dans les 10^{28} à 10^{29} électrons par m³.)

La vitesse de dérive est donc

$$I = n_e A v_d e$$
$$10A = 1{,}808\times10^{29} m^{-3} \cdot \pi\left(0{,}001m\right)^2 \cdot v_d \cdot 1{,}602\times10^{-19} C$$
$$v_d = 0{,}00011 \tfrac{m}{s} = 0{,}11 \tfrac{mm}{s}$$

Cette vitesse est vraiment basse. Il faut presque 2½ heures pour qu'un électron passe d'un bout à l'autre d'un fil de 1 mètre ! On peut alors se demander pourquoi une lumière du plafond s'allume aussi vite quand on l'ouvre s'il faut plusieurs heures pour que les électrons passent de l'interrupteur à la lampe. En fait, il n'est pas nécessaire d'attendre que les électrons atteignent la lampe. Dès qu'on place l'interrupteur à « on », tous les électrons libres du fil se mettent en mouvement en même temps (ou presque puisque les modifications de vitesse se propagent à la vitesse de la lumière). Ce sont donc les électrons qui étaient déjà dans le fil de l'ampoule qui se mettent en mouvement et qui font fonctionner la lampe.

Notez que les électrons ne font pas un simple mouvement de translation dans un métal quand il y a un courant. Les électrons agissent comme un gaz et se déplacent très rapidement dans le métal même en l'absence de courant. La vitesse de dérive correspond à un léger décalage, dans une direction, de la position moyenne de ce mouvement rapide. Ce mouvement ressemble un peu à ce qu'on peut voir sur cette figure.



freelyelectrons.blogspot.com/2017/09/electron-drift-velocity.html

4.3 LE CHAMP ÉLECTRIQUE DANS UN CONDUCTEUR

Il doit y avoir un champ électrique

On pourrait premièrement penser qu'il y a un courant dans un fil parce que les électrons se repoussent mutuellement et qu'un électron en mouvement pousserait ainsi tous les autres électrons pour faire un courant, un peu comme de l'eau dans un tuyau. Toutefois, il ne faut pas oublier que les électrons ne sont pas les seules particules chargées dans le métal. Il y a aussi les atomes positifs (ils sont positifs puisque les électrons de valence ne sont plus avec ces atomes). Un électron dans un métal est repoussé par les autres électrons, mais attiré par les atomes positifs. Or, toutes ces forces s'annulent exactement, ce qui signifie que les

électrons ne sont pas poussés par les autres électrons. Cette force nulle sur les électrons contribue d'ailleurs à faire en sorte que les électrons de conduction agissent comme un gaz dans un métal (dans un gaz, il n'y a pratiquement pas d'interaction entre les molécules).

Mais, en fait, est-ce qu'il doit y avoir une force pour déplacer les électrons ? Selon la première loi de Newton, les charges pourraient se déplacer à vitesse constante pour faire un courant sans qu'il soit nécessaire qu'il y ait une force. Toutefois, sauf dans de très rares cas (la supraconductivité qu'on verra à la fin de ce chapitre), il y a une interaction entre les charges en mouvement et les atomes positifs qui ne se déplacent pas. Cette interaction fait perdre de l'énergie aux électrons de conduction et fait gagner de l'énergie aux atomes du métal. Pour compenser cette perte d'énergie des électrons, il doit y avoir une force qui agit sur les électrons pour les maintenir en mouvement. C'est un peu comme une voiture en mouvement à vitesse constante : le moteur doit faire constamment une force pour compenser l'énergie perdue à cause de la friction de l'air pour que l'auto puisse continuer à vitesse constante. Ici, il doit y avoir une force électrique qui agit constamment sur les charges en mouvement pour compenser les pertes d'énergies.

Cette force électrique doit être faite par un champ électrique dans le conducteur. Cela semble entrer en contradiction avec les chapitres précédents où on a dit que le champ électrique dans un conducteur est nul. En fait, il n'y a aucune contradiction, car on dit que le champ dans un conducteur est nul **à l'équilibre**. Or, s'il y a un courant, c'est que nous ne sommes pas à l'équilibre et qu'il peut donc y avoir un champ électrique dans le fil.

L'étude de passage des électrons à travers le réseau d'atomes d'une substance est d'un niveau nettement supérieur au niveau collégial (cela se fait avec la mécanique quantique). On va se contenter du résultat de ces études qui montre que le lien entre la vitesse de dérive et le champ électrique dans la substance est

$$v_d = \mu_e E$$

Dans cette formule, μ_e s'appelle *la mobilité des électrons*. La valeur de μ_e nous indique si les électrons ont de la facilité à se déplacer dans la matière. Plus μ_e est grand, plus la vitesse de dérive est grande pour un même E, ce qui signifie qu'il est plus facile pour un électron de se déplacer dans la substance. La valeur de μ_e dépend uniquement de la substance dans laquelle les électrons se déplacent. Voici quelques valeurs de cette mobilité des électrons.

Substance	Mobilité (m²/Vs)	Substance	Mobilité (m²/Vs)
Nanotubes de carbone	7,9	Aluminium	0,0012
Argent	0,0056	Zinc	0,0008
Cuivre	0,0033	Étain	0,00039
Magnésium	0,0017	Plomb	0,00023

Ces valeurs indiquent que les électrons ont près de 25 fois plus de facilité à se déplacer dans l'argent que dans le plomb.

Le courant est le même partout dans un fil

Dans un fil parcouru par un courant, le courant doit être le même partout. La quantité de charge qui arrive dans une partie du fil pendant un certain temps doit être égale à la quantité de charge qui quitte cette partie du fil.

Si les quantités de charges n'étaient pas égales, alors la charge du petit morceau augmenterait ou diminuerait constamment. Or, la charge de chaque petit morceau de fil ne change pas quand le courant circule. Les charges qui arrivent et qui quittent doivent donc être égales. De toute évidence, cela signifie que le courant à gauche doit être le même que le courant de droite. Puisque cela doit être vrai pour chaque morceau de fil, le courant doit être le même partout dans le fil.

Cela signifie aussi que le courant qui entre dans l'objet parcouru par le courant doit être le même que le courant qui sort de l'objet.

Le champ électrique a la même grandeur partout dans un fil si le fil est toujours fait de la même substance et a un diamètre constant

On a ce lien entre le courant et la vitesse de dérive.

$$I = n_e A e v_d$$

Si la taille du fil est toujours la même (A constant) et que le fil est toujours fait de la même substance (n_e constant), alors v_d doit être constante si I est constant. Avec un fil ayant toujours la même grosseur, la vitesse de dérive doit donc être la même partout.

Si la vitesse de dérive est constante, alors le champ électrique doit être constant. En effet, l'équation

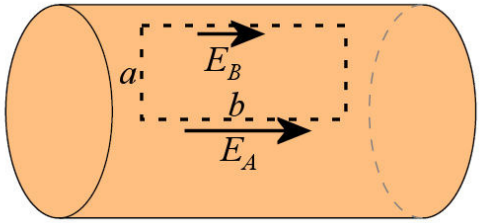
$$v_d = \mu_e E$$

indique clairement que si la mobilité μ_e est constante (ce qui est le cas si le fil est toujours fait de la même substance), alors E (qui est la grandeur du champ) est constant si v_d est constante.

Avant de conclure que le champ a la même grandeur partout dans le fil, il faut s'assurer que le courant est réparti uniformément dans le fil. Il se pourrait, par exemple, que la vitesse de dérive soit plus grande au centre du fil que sur les bords et donc que le champ soit plus

grand au centre du fil. On peut prouver que le champ est le même partout dans le fil en utilisant l'équation suivante.

$$\sum_{un\ tour} \Delta V = 0 \quad \rightarrow \quad \sum_{un\ tour} \vec{E} \cdot \overrightarrow{\Delta s} = 0$$



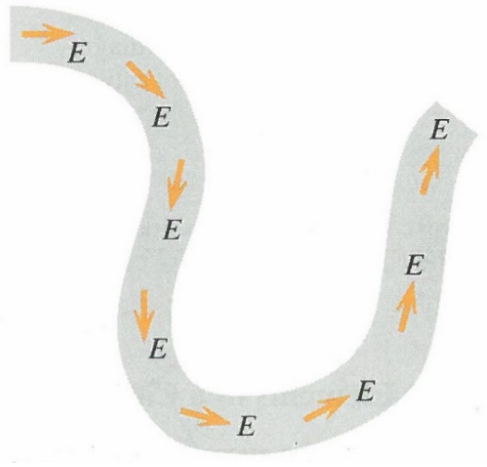
en prenant la trajectoire montrée sur la figure. Sur la figure, on a supposé que le champ n'est pas le même au centre que près de la surface. Les mesures a et b sont les longueurs des côtés du rectangle qui forment la trajectoire.

On va suivre la trajectoire en partant du coin inférieur gauche en allant dans le sens contraire des aiguilles d'une montre. Comme le champ est perpendiculaire à la trajectoire sur les côtés de longueur a, les valeurs de $\vec{E} \cdot \overrightarrow{\Delta s}$ sont égales à 0 pour ces deux côtés. On a alors

$$\begin{aligned}\sum_{un\ tour} \vec{E} \cdot \overrightarrow{\Delta s} &= E_A \cdot b \cdot \cos 0° + 0 + E_B \cdot b \cdot \cos 180° + 0 \\ &= E_A \cdot b - E_B \cdot b \\ &= \left(E_A - E_B\right) \cdot b\end{aligned}$$

Or, cette somme doit être nulle. Cela peut se produire uniquement si $E_A = E_B$. Cela montre que la grandeur du champ doit être le même partout dans le fil. (On verra plus tard que la somme des $\vec{E} \cdot \overrightarrow{\Delta s}$ sur un tour n'est plus nul quand le courant change en fonction du temps, ce qui signifie que la conclusion obtenue ici n'est pas valide si le courant change en fonction du temps.)

En conclusion, on a montré que la grandeur du champ électrique est la même partout dans un fil fait de la même substance et ayant un diamètre constant. Le champ est toujours dans la direction du courant, qui est lui-même toujours dans la direction du fil. Ce champ va toujours de l'extrémité du fil ayant le potentiel le plus élevé vers de l'extrémité du fil où le potentiel est le plus bas.

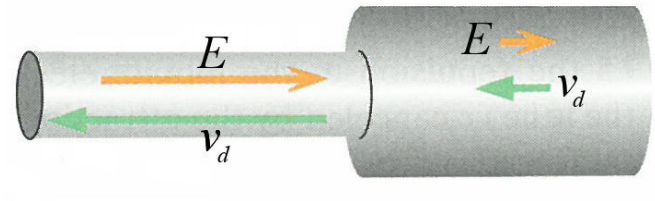


Matter & Interaction, Chabay, Sherwood, Wiley

Faites bien attention : le champ et la vitesse de dérive ont toujours les mêmes grandeurs uniquement si le fil est toujours fait de la même substance et a toujours le même diamètre. Si le diamètre change, alors l'équation

$$I = n_e A e v_d$$

montre clairement que la vitesse de dérive diminue si le diamètre augmente (pour des fils faits de la même substance) puisque le courant doit toujours être le même. Si la vitesse de dérive diminue, alors le champ électrique doit aussi diminuer selon $v_d = \mu_e E$.



Matter & Interaction, Chabay, Sherwood, Wiley

La grandeur du champ électrique dans le fil

Imaginons un fil qui relie deux objets ayant des potentiels différents. Si la différence de potentiel entre ces deux objets est ΔV, alors la différence de potentiel entre les deux extrémités du fil est aussi ΔV. Or, si on va d'un bout à l'autre du fil (qui a une longueur ℓ), la différence de potentiel entre les deux bouts du fil est

$$\Delta V = -E\ell\cos\theta$$

En se déplaçant le long du fil, l'angle entre le champ et le déplacement est 0° ou 180° (puisque le champ est toujours parallèle au fil à l'intérieur de celui-ci). Le cosinus vaut donc 1 ou -1. Comme on s'intéresse uniquement à la valeur absolue de la différence de potentiel, cette différence de signe n'a aucune importance et la valeur absolue de la différence de potentiel est donc

$$|\Delta V| = E\ell$$

La grandeur du champ électrique dans le fil est donc

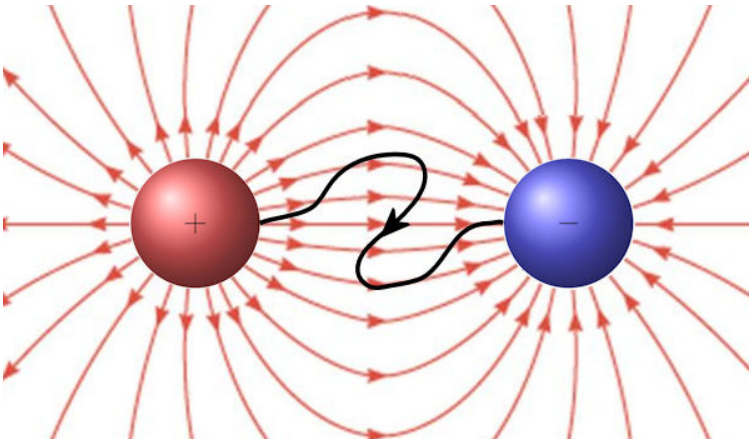
Grandeur du champ électrique dans le fil de longueur ℓ

$$E = \frac{|\Delta V|}{\ell}$$

D'où vient le champ ?

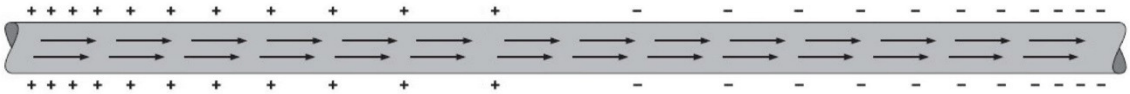
On a vu qu'il faut un champ électrique pour que les charges se déplacent quand il y a un courant. On pourrait premièrement penser que le champ vient des objets chargés situés à chaque bout du fil puisqu'il doit y avoir un champ électrique entre ces objets.

La figure suivante montre le champ électrique entre 2 sphères chargées et un fil (en noir) qui relie les deux sphères. On peut également voir la direction du courant dans le fil (qui, bien sûr, va de l'objet ayant le plus grand potentiel à l'objet ayant le plus petit potentiel).



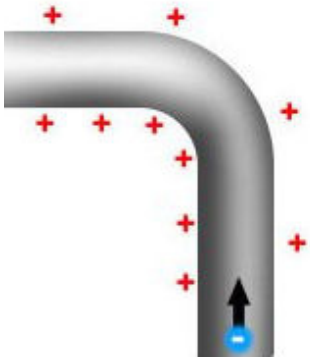
De toute évidence, le champ fait par les sphères n'explique pas tout. Premièrement, le champ dans le fil doit avoir une grandeur constante alors que le champ fait par les sphères n'a pas une grandeur constante. Deuxièmement, le champ fait par les sphères n'est pas toujours dans la bonne direction. Si on examine un point au milieu du fil (à peu près à l'endroit où est située la flèche montrant la direction du courant sur la figure), on constate que le champ entre les sphères est vers la droite alors que le courant à cet endroit est vers le bas et vers la gauche. De toute évidence, il doit y avoir quelque chose d'autre qui fait un champ électrique pour que le champ total dans le fil ait toujours la même grandeur et qu'il soit toujours dans la direction du courant dans le fil.

Ce sont des charges en surface du fil qui vont faire ce champ. Ces charges vont se distribuer pour que le champ électrique soit constant dans le fil et qu'il soit toujours dans la direction du courant. Par exemple, voici la distribution de charge qu'on devrait avoir dans un fil rectiligne si le champ était uniquement fait par les charges en surface sur le fil.



On voit que la densité de charge positive diminue régulièrement à mesure qu'on va vers la droite. Puis, toujours en continuant vers la droite, la densité de charge surface devient négative et augmente régulièrement. Notez que ces charges vont également modifier le champ électrique à l'extérieur du fil.

La figure de droite montre une distribution de charge de surface qu'on pourrait avoir avec un fil qui change de direction. Dans ce cas, la densité de charge est plus grande sur le côté intérieur du virage pour générer la force centripète sur les charges négatives en mouvement dans le virage. Cette distribution permet aussi au champ de changer de direction pour suivre le fil.



www.quora.com/How-does-the-electric-field-therefore-the-electric-force-in-a-wire-remain-parallel-to-the-wire-even-if-it-is-randomly-curved-current-still-flows

Mais d'où viennent ces charges et comment savent-elles comment elles doivent se distribuer pour faire un champ de grandeur constante dans le fil ? Imaginons qu'on branche, entre deux sphères chargées, un fil toujours fait de la même substance et ayant un diamètre constant. Juste après le branchement du fil, le champ n'est pas du tout uniforme dans le fil, ce qui veut dire que la vitesse de dérive et le courant ne sont pas partout les mêmes dans le fil. Ainsi, si on examine un petit bout de fil, il se pourrait que la charge qui arrive dans le petit morceau ne soit pas exactement la même que la charge qui quitte le morceau.

Si la charge qui arrive n'est pas identique à celle qui quitte, cela signifie que le petit morceau accumule de la charge. Puisque le morceau est un conducteur, cette charge va aller se placer en surface. C'est ainsi que chaque petit morceau acquiert ses charges en surface.

La charge qui apparait en surface génère un champ électrique qui modifie le champ électrique dans le fil, ce qui change les courants et tend à équilibrer le courant qui entre et le courant qui sort. Tant que le courant qui entre et le courant qui sort ne sont pas identiques, le morceau se charge et cette charge modifie le champ pour équilibrer les courants. Assez rapidement, la charge du petit morceau atteint la valeur nécessaire pour que les courants soient les mêmes. C'est ainsi que les charges en arrivent à se distribuer pour que le courant, la vitesse de dérive et le champ électrique soient partout les mêmes dans le fil. Les charges de surface nécessaires pour générer le champ dans le fil sont très faibles. (Elles sont tellement faibles qu'il est très difficile de les détecter, sauf si la différence de potentiel entre les bouts du fil est très grande.)

Tout cela se fait très rapidement. Les changements de champ électrique se propagent pratiquement à la vitesse de la lumière à partir du point de branchement. Avec un fil de quelques mètres, tout se fait en quelques nanosecondes.

On ne va pas tenter de déterminer la distribution de charge en surface sur le fil. Contentons-nous de savoir qu'il doit y avoir des charges en surface pour obtenir le champ de grandeur constante dans le fil et que toutes ces charges de surface se mettent en place très rapidement quand on branche le fil.

Notez que les variations de champ se propagent à la vitesse de la lumière en suivant le fil, mais elles peuvent aussi passer d'un fil à un fil voisin à travers le vide. Comme les charges en surface influencent aussi les champs à l'extérieur du fil, les modifications de champ dans un fil influencent le champ dans un fil voisin. Par exemple, imaginons un fil très long qui relie deux sphères chargées. Supposons que le fil est tellement long qu'il faudrait 1 seconde pour passer d'un bout du fil à l'autre à la vitesse de la lumière.

Au départ, le fil est branché à la sphère négative, mais pas à la sphère positive. Quand on le branche à la sphère positive, le champ électrique commence à s'ajuster dans le fil à partir du point de contact avec la sphère positive et les effets de la modification se propagent à la vitesse de la lumière. On pourrait alors croire qu'il faudra au moins une seconde pour que la modification du champ parcourt tout le fil et arrive à l'autre bout du fil (connecté à la sphère négative). Selon ce raisonnement, il faudra attendre au moins 1 seconde avant qu'un courant apparaisse dans le fil près de la sphère négative. Toutefois, les charges en surface qui vont apparaitre dans le fil près de la sphère positive vont aussi faire un champ à l'extérieur du fil et ce champ va modifier le champ électrique à l'intérieur du fil près de la sphère négative qui est tout près. Puisqu'il y a un champ dans le fil, on va voir apparaitre un courant dans le fil près de la charge négative bien avant que la perturbation du champ ait parcouru tout le fil. Ce courant initial n'est pas nécessairement égal au courant final qu'il y aura une fois que toutes les charges de surface seront ajustées à leurs valeurs finales.

4.4 LA RÉSISTANCE

La définition de la résistance

On remarque que certains matériaux laissent plus difficilement passer les charges que d'autres. On dit alors que ces matériaux sont plus *résistants.* Si, pour une même différence de potentiel entre les extrémités de l'objet, le courant dans un objet est plus petit que dans un autre, on dit que ce matériau est plus résistant au passage du courant.

On en vint à définir ainsi la résistance d'un objet (cette définition, datant de 1827, est due à Georg Simon Ohm).

Définition de la résistance

$$\Delta V = RI$$

Cette résistance est donc en V/A. On donna le nom d'*ohm* à cette unité.

Définition de l'ohm (Ω)

$$1\Omega = 1\frac{V}{A}$$

Il existe aussi la *conductance* (G) qui est simplement l'inverse de la résistance ($1/R$). Elle se mesure en A/V, qui sont des Siemens (S) (autrefois, l'unité était le mho (ohm écrit à l'envers) et le symbole de l'unité était le ℧).

Erreur fréquente : appeler $\Delta V = RI$ la loi d'Ohm

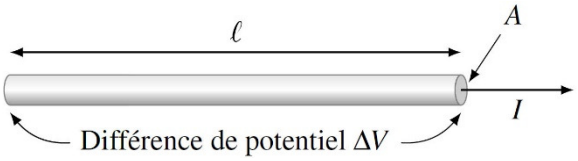
Cette équation n'est pas la loi d'Ohm, c'est la définition de la résistance. Nous verrons plus loin la loi d'Ohm.

De quoi dépend la résistance d'un objet ?

On a vu qu'il y a un lien entre la vitesse de dérive et le champ électrique dans un objet. Ce lien est

$$v_d = \mu_e E$$

Avec un objet de longueur ℓ, le champ dans le fil est



$$E = \frac{\Delta V}{\ell}$$

On a donc

$$v_d = \mu_e \frac{\Delta V}{\ell}$$

Comme le courant est

$$I = n_e A e v_d$$

on obtient

$$\frac{I}{n_e e A} = \mu_e \frac{\Delta V}{\ell}$$

$$\Delta V = \frac{\ell}{\mu_e n_e e A} I$$

Comme on doit avoir $\Delta V = RI$, on en déduit que

$$R = \frac{\ell}{\mu_e n_e e A}$$

On peut séparer cette équation en deux parties.

$$R = \underbrace{\frac{1}{\mu_e n_e e}}_{\text{constante et substance}} \times \underbrace{\frac{\ell}{A}}_{\text{forme de l'objet}}$$

On a regroupé ensemble tous les éléments constants et ceux qui dépendent de la substance et on a regroupé ensemble tous les éléments qui dépendent des dimensions de l'objet.

Pour une même substance, tous les termes du groupe de gauche sont des constantes. La valeur de ce terme est donc toujours le même pour une substance. Le résultat de ce terme est la résistivité de la substance (noté ρ, à ne pas confondre avec la masse volumique…).

$$\rho = \frac{1}{\mu_e n e}$$

Voici la valeur de la résistivité pour quelques métaux (à 20 °C).

Métal	Résistivité (Ωm)	Métal	Résistivité (Ωm)	Métal	Résistivité (Ωm)
Argent	$1{,}587 \times 10^{-8}$	**Magnésium**	$4{,}39 \times 10^{-8}$	**Fer**	$9{,}61 \times 10^{-8}$
Cuivre	$1{,}678 \times 10^{-8}$	**Tungstène**	$5{,}28 \times 10^{-8}$	**Platine**	$10{,}5 \times 10^{-8}$
Or	$2{,}214 \times 10^{-8}$	**Zinc**	$5{,}90 \times 10^{-8}$	**Plomb**	$20{,}8 \times 10^{-8}$
Aluminium	$2{,}650 \times 10^{-8}$	**Nickel**	$6{,}93 \times 10^{-8}$	**Titane**	$42{,}0 \times 10^{-8}$

Notez que l'inverse de la résistivité ($1/\rho$) s'appelle la *conductivité* et son symbole est σ.

En utilisant la résistivité, la formule de la résistance d'un objet peut être écrite sous la forme suivante.

Résistance d'un objet (loi de Pouillet)

$$R = \rho \frac{\ell}{A}$$

Exemple 4.4.1

Un fil de cuivre a une longueur de 20 m et une résistance de 0,1 Ω à 20 °C. Quel est le diamètre du fil ?

On a

$$R = \rho \frac{\ell}{A}$$

$$0{,}1\Omega = 1{,}678 \times 10^{-8}\,\Omega m \cdot \frac{20m}{A}$$

$$A = 3{,}356 \times 10^{-6}\,m^2$$

Puisque le bout du fil est un cercle, son aire est πr^2 et on a

$$A = \pi r^2$$

$$3{,}356 \times 10^{-6}\,m^2 = \pi r^2$$

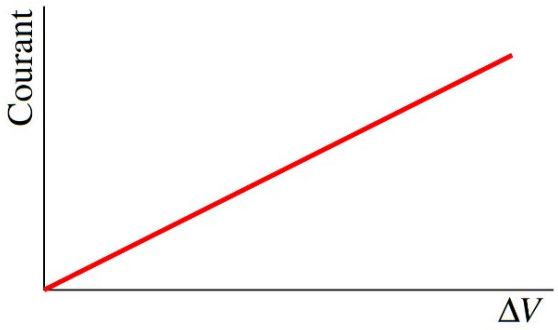
$$r = 1{,}034mm$$

Le diamètre du fil est donc de 2,068 mm.

La loi d'Ohm

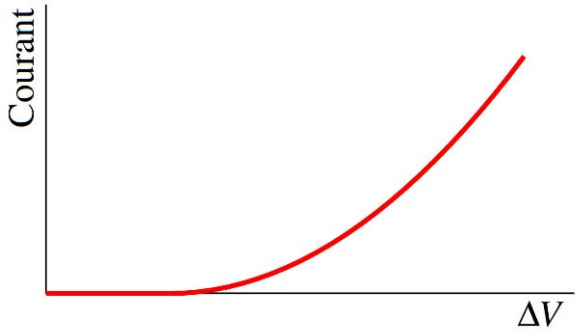
En 1827, Ohm remarque que *la résistance est constante à température constante* pour plusieurs substances. C'est cette affirmation qui est appelée la loi d'Ohm (et non pas $\Delta V = RI$).

Cela signifie que si on fait le graphique du courant en fonction de la différence de potentiel en s'assurant que la température de l'objet reste constante, on obtient, pour plusieurs substances, le graphique montré à droite. Sur ce graphique, la pente de la droite est égale à $1/R$.



Toutefois, ce n'est pas ce qu'on obtient avec certaines substances. Dans les semi-conducteurs (antimoine, arsenic, bore, carbone, germanium, sélénium, silicium, soufre et tellure), la densité d'électrons libres n_e dépend du champ électrique dans le fil, donc de la différence de potentiel appliquée entre les deux côtés de l'objet. Si n_e change, alors la résistivité change puisque

$$\rho = \frac{1}{\mu_e n_e e}$$



Cette variation de n_e fait en sorte que la relation entre I et ΔV ressemble à ce qu'on peut voir sur le graphique de droite. Une petite différence de potentiel ne produit pas de courant. Quand le champ électrique dans la substance est très faible, les charges ne sont pas dans les orbitales partagées et ne peuvent pas se déplacer. La densité de charges libres n_e est alors presque nulle et la résistivité est très élevée. Il n'y a donc pas de courant. Si on augmente la différence de potentiel (et donc le champ dans le fil), on va finir par libérer quelques charges qui vont aller dans les orbitales partagées, ce qui fera augmenter n_e. La résistivité baisse et il y a maintenant un courant. Ensuite, si on augmente encore la différence de potentiel, on va libérer encore plus de charges libres, ce qui va faire diminuer la résistivité encore plus et faire fortement augmenter le courant. Cela fait en sorte que si on double la différence de potentiel, le courant sera peut-être multiplié par 10 plutôt qu'être simplement multiplié par 2 comme ce devrait être le cas si la substance était un métal. On obtient alors une relation entre I et ΔV qui n'est pas du tout une droite, même si la température de la substance est constante.

Quand la relation entre I et ΔV pour un matériau est une droite passant par l'origine, on dit que c'est un *matériau ohmique*. Quand la relation entre I et ΔV pour un matériau n'est pas une droite ou est une droite qui ne passe pas par l'origine, on dit que c'est un *matériau non ohmique*.

La loi d'Ohm n'est donc pas vraiment une loi de la nature parce qu'elle n'est pas toujours vraie. Elle est vraie uniquement pour certaines substances (dont les métaux).

Le champ électrique et la résistivité

On peut également faire le lien entre le champ électrique, le courant et la résistivité.

$$\Delta V = RI$$
$$\Delta V = \rho \frac{\ell}{A} I$$
$$\frac{\Delta V}{\ell} = \rho \frac{I}{A}$$

Puisque $\Delta V/\ell$ est le champ électrique dans le fil, on obtient

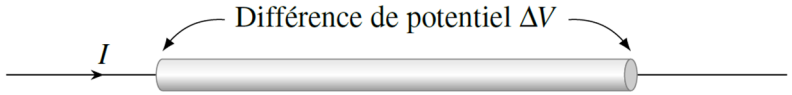
Champ électrique dans un fil

$$E = \rho \frac{I}{A}$$

4.5 LA PUISSANCE ÉLECTRIQUE

La formule de la puissance

Calculons maintenant l'énergie perdue ou gagnée chaque seconde par les charges quand elles passent d'un endroit avec un certain potentiel à un autre endroit où le potentiel est différent. Par exemple, un courant pourrait traverser un objet qui a une certaine différence de potentiel entre ses extrémités (parce que l'objet a une certaine résistance).



Comme le potentiel change, l'énergie électrique des charges change. La variation d'énergie électrique d'une charge q est

$$\Delta U = q\Delta V$$

La puissance (énergie par unité de temps) reçue par les charges est donc

$$P = \frac{\Delta U}{\Delta t}$$
$$= \frac{q\Delta V}{\Delta t}$$
$$= \frac{q}{\Delta t}\Delta V$$

où $q/\Delta t$ est la charge qui passe par unité de temps. On reconnait que cette quantité est le courant. On arrive donc à la formule suivante.

Puissance reçue ou donnée

$$P = I\Delta V$$

Avec le courant conventionnel, on a :

- Si le potentiel monte quand les charges se déplacent, ΔV est positif et la puissance est positive. Une puissance positive signifie que les charges reçoivent de l'énergie.
- Si le potentiel baisse quand les charges se déplacent, ΔV est négatif et la puissance est négative. Une puissance négative signifie que les charges donnent de l'énergie.

En pratique, on ne met pas le signe de la différence de potentiel dans la formule de puissance, mais on se rappelle que les charges reçoivent de l'énergie quand le potentiel monte et qu'elles donnent de l'énergie quand le potentiel baisse.

Cette formule est très générale et on pourra l'utiliser pour bien d'autres choses dans les chapitres suivants.

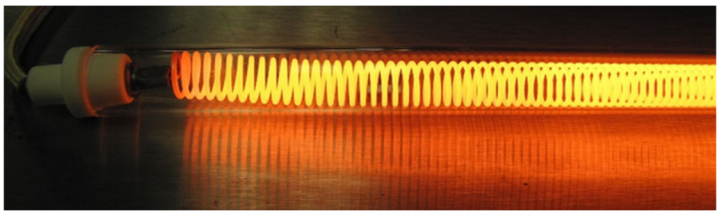
Quand la différence de potentiel vient de la résistance, alors on peut utiliser $\Delta V = RI$ pour obtenir les trois équations équivalentes suivantes.

Puissance dissipée par un objet ayant une résistance

$$P_R = I\Delta V$$
$$P_R = RI^2$$
$$P_R = \frac{\Delta V^2}{R}$$

L'effet Joule

Il est impossible que le potentiel monte quand le courant passe à travers un objet qui a une résistance. Les charges perdent toujours de l'énergie (c'est pour cela qu'on parle de *puissance dissipée*) et l'objet traversé par le courant reçoit toujours de l'énergie. Dans ce cas, l'énergie électrique est dissipée en chaleur. Comme on l'a dit précédemment, les électrons en mouvement transfèrent une partie de leur énergie aux atomes formant l'objet, ce qui se manifeste par une augmentation de température du conducteur. Cette dissipation de chaleur par un objet ayant une résistance s'appelle *l'effet Joule* puisque la loi régissant ce phénomène fut découverte par James Prescott Joule en 1840. Ce fut d'ailleurs une des étapes importantes qui mena à la découverte du principe de conservation de l'énergie. Vous pouvez voir sur l'image une substance qui dissipe de la chaleur par effet Joule. Cette chaleur dissipée fait augmenter la température de l'objet, à tel point qu'il devient rouge.



en.wikipedia.org/wiki/Joule_heating

Voyez également ce fil fondre par effet Joule.
https://www.youtube.com/watch?v=EWzES8Srhl4

Une autre unité d'énergie

Pour l'énergie électrique, on utilise très souvent le kWh pour mesurer la quantité d'énergie. Il s'agit de l'énergie obtenue avec une puissance de 1 kW pendant une heure. En joule, cela vaut

$$1kWh = 1000W \cdot 3600s$$

Ce qui donne

Le kilowattheure

$$1kWh = 3,6 \times 10^6 J$$

Erreur fréquente : Dire kilowatt par heure

L'unité est le kilowattheure (kWh), pas le kilowatt par heure (kW/h) qui n'a aucune utilité.

Erreur fréquente : Utiliser des watts pour l'énergie

Il arrive parfois que des gens peu avisés mentionnent une quantité d'énergie en kW plutôt qu'en kWh. Par exemple, l'image ci-contre provient de la revue « sciences et avenir » (No 825, novembre 2015, page 42). On dit clairement que l'énergie consommée est en térawatts, alors que ce devrait être des térawattheures. Les phrases écrites dans la revue ont autant de sens que la phrase « L'équipe de cyclistes parcourt 350 km/h par an ».

Exemple 4.5.2

On laisse fonctionner une ampoule de 60 W pendant 10 heures. La différence de potentiel aux bornes de l'ampoule est de 120 V.

a) Quelle est la résistance du filament de l'ampoule ?

On peut trouver la résistance avec la formule de la puissance dissipée.

$$P_R = \frac{\Delta V^2}{R}$$

$$60W = \frac{(120V)^2}{R}$$
$$R = 240\Omega$$

b) Combien coute cette énergie si le prix est de 10 ¢ du kWh ?

L'énergie dissipée (en kWh) est

$$\begin{aligned} E &= P\Delta t \\ &= 0,06kW \cdot 10h \\ &= 0,6kWh \end{aligned}$$

(On peut aussi faire

$$\begin{aligned} E &= P\Delta t \\ &= 60W \cdot 10 \cdot 3600s \\ &= 2\,160\,000J \end{aligned}$$

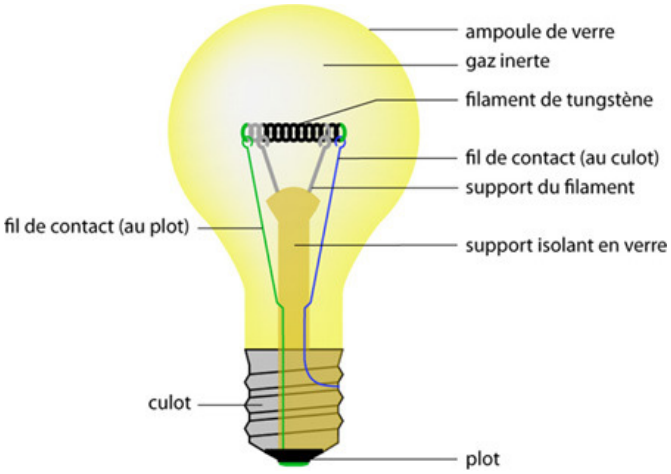
et transformer le tout en kWh.)

Cette énergie coute

$$\begin{aligned} Cout &= 0,6kWh \cdot 10\tfrac{¢}{kWh} \\ &= 6¢ \end{aligned}$$

L'ampoule

Une ampoule à incandescence est un simple filament de métal qui a une résistance. En faisant passer un courant dans le filament, il y a de la chaleur dissipée, ce qui fait monter la température du filament. La chaleur dissipée est telle que la température du filament atteint de 2000 °C à 3000 °C et le filament émet alors de la lumière puisqu'on a vu que les objets chauds émettent du rayonnement. Sachez que seulement 5 % de l'énergie dissipée par le filament est sous forme de lumière visible (le reste étant du rayonnement à des longueurs d'onde invisibles, tel que de l'infrarouge et de l'énergie perdue par convection et par conduction).



ontroverselbc.wordpress.com/types-et-usages-des-ampoules/lampes-a-incandescence/

Le filament de l'ampoule est en tungstène, car il peut rester solide jusqu'à des températures élevées. Toutefois, ce métal s'enflamme s'il devient trop chaud en présence

d'oxygène. On a donc placé le filament à l'intérieur d'une ampoule de verre dans lequel il n'y a pas d'oxygène. Cette ampoule est emplie d'argon ou de krypton qui sont des gaz inertes et qui ne réagiront donc pas avec le tungstène. Au bout d'un certain temps, l'ampoule finit par ne plus fonctionner parce que le filament de tungstène se sublime lentement quand il est chaud. À un moment donné, il devient trop mince, il casse et le courant ne peut plus passer.

Il arrive souvent que l'ampoule brule quand on l'allume. C'est qu'à ce moment, le passage du courant fait changer la température du filament très rapidement. Celui-ci passe de 20 °C à environ 2500 °C en une fraction de seconde. Cette variation rapide de température entraine une expansion thermique rapide, qui peut entrainer un stress qui va faire casser le filament.

Le chauffage par effet Joule

Si vous chauffez votre maison à l'électricité, vous vous chauffez par effet Joule. En passant un courant à travers un conducteur ayant une résistance, il se dégage de la chaleur. Les plinthes électriques ne sont rien d'autre qu'un conducteur ayant une résistance. Noter que l'efficacité d'une plinthe est identique à l'efficacité d'une ampoule pour chauffer puisque l'effet Joule est en jeu dans les deux cas. Ainsi, même si 95 % de l'énergie libérée par une ampoule à incandescence n'est pas sous forme de lumière, cette énergie n'est pas perdue, car elle permet de chauffer la maison avec la même efficacité qu'une plinthe électrique. Ce n'est pas tellement grave si vous laissez vos lumières allumées l'hiver et ce n'est pas bien grave non plus si vous n'avez pas remplacé toutes vos ampoules par des ampoules DEL. C'est vrai que les ampoules DEL consomment moins d'énergie en dégageant moins de chaleur, mais si vous les utilisez, votre chauffage devra chauffer un peu plus pour compenser la chaleur qui n'est pas produite par les ampoules à incandescence. Si vous chauffez votre maison avec un chauffage au gaz ou au mazout, cela signifie un peu plus de gaz et de mazout brulés, et donc un peu plus de gaz à effet de serre. Sauve-t-on vraiment la planète en interdisant les ampoules à incandescence ?

En faisant passer du courant dans des fils, la chaleur dissipée par les fils peut aussi chauffer vos tranches de pain. Voilà, vous avez un grille-pain. Vous pouvez voir sur cette image les fils chauffés par le courant les traversant.

www.absoluteastronomy.com/topics/Grilling

Les fusibles

Il ne faudrait pas qu'un courant trop important circule dans les fils de votre maison, car la chaleur dissipée pourrait faire monter la température des fils jusqu'à ce qu'ils provoquent un incendie. Les fils pourraient même fondre, ce qui arrivera à la plupart des métaux si le courant divisé par l'aire du bout du fil (ce qu'on appelle la *densité de courant*) dépasse 500 A/cm² (en l'absence de ventilation).

Pour éviter cela, on peut installer des fusibles. Ce sont des dispositifs qui limitent la valeur du courant dans les fils pour éviter qu'ils ne chauffent trop. Le fusible n'est qu'un petit bout de fil qui va fondre si on atteint une certaine valeur du courant. Ainsi, un fusible de 10 A n'est qu'un petit bout de fil qui va fondre par effet Joule si le courant dépasse 10 A. Si le fil fond, la connexion est coupée et le courant ne peut plus circuler. Voici quelques exemples de fusibles.

obileradiostore.com/index.php?cPath=21_28#.U16jk1V5PAk

www.livecopper.co.za/categories/stove-fuses

Voyez un fusible de 1,5 A (qui limite le courant à 1,5 A) fondre dans ce vidéo.
https://www.youtube.com/watch?v=QjE1k17MsqM

Les fusibles ne sont qu'une des options possibles pour limiter le courant dans un fil. Il y a d'autres dispositifs, tels que les disjoncteurs.

4.6 LA RÉSISTANCE EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE

Comment la résistivité varie-t-elle avec la température ?

La résistivité d'une substance change avec la température. Toutefois, le changement n'est pas le même pour toutes les substances. Comme la résistivité est

$$\rho = \frac{1}{\mu_e n_e e}$$

la résistivité change si n_e ou μ_e change (e est une constante). Rappelons-nous que n_e est la densité d'électrons libres dans la substance et que μ_e nous indique si les électrons ont de la facilité à se déplacer dans la matière. Plus μ_e est grand, plus il est facile pour un électron de se déplacer dans la substance.

Dans tous les cas, μ_e diminue avec la température. Cette diminution vient de l'augmentation de l'oscillation des atomes formant le métal avec la température. Il n'est pas du tout évident que cette augmentation des oscillations rend le passage des électrons plus difficile. On peut parfois lire que les atomes ont plus de chances de venir frapper les électrons quand ils oscillent plus, mais ils ont aussi plus de chance de se tasser du chemin avec une oscillation plus grande. En fait, l'explication est plus profonde que ça. Il faut prendre la mécanique quantique, considérer l'électron comme une onde pour ensuite

calculer comment se propage l'onde des électrons dans un réseau d'atomes. On se rend compte alors que l'augmentation de l'oscillation rend le réseau cristallin moins régulier et que les ondes ont plus de difficulté à se propager dans un réseau plus déformé par les oscillations thermiques. Ainsi, puisque les électrons ont plus de difficulté à se déplacer quand la température augmente, on en conclut que

$$\mu_e \downarrow \text{ avec la température pour toutes les substances}$$

Voyons maintenant comment change n_e avec la température. Le résultat est bien différent selon le type de substance.

Les métaux

Dans les métaux, la densité d'électrons libres ne varie presque pas avec la température. Il n'y a pas beaucoup plus d'électrons partagés quand on augmente la température. On a donc

$$\mu_e \downarrow \text{ avec la température}$$
$$n_e \text{ ne varie pas avec la température}$$

Puisque

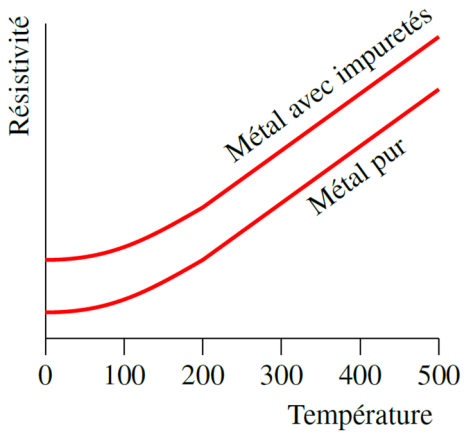
$$\rho = \frac{1}{\mu_e n_e e}$$

on voit que

$$\rho \uparrow \text{ avec la température}$$

En fait, $1/\mu_e$ augmente de façon linéaire avec la température, ce qui fait que la résistivité augmente de façon linéaire avec la température.

On obtient alors un graphique comme celui montré à droite.

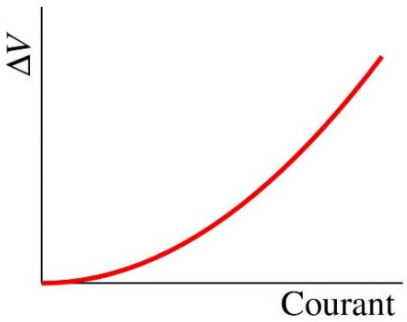


On remarque deux éléments.

1) Près de 0 K, la résistivité plafonne parce que l'oscillation des atomes cesse de diminuer quand on s'approche du zéro absolu. Même au zéro absolu, l'oscillation des atomes n'est pas nulle parce qu'il y a une énergie minimale d'oscillation comme on l'a vu au chapitre sur la mécanique quantique en ondes et physique moderne.

2) La résistivité des métaux avec des impuretés est plus grande parce que les impuretés déforment le réseau cristallin, ce qui nuit au passage des électrons.

Il faut bien faire attention si, en laboratoire, on fait le graphique de la différence de potentiel en fonction du courant pour un métal. Sur un tel graphique, la pente est égale à la résistance et on s'attend donc à obtenir une droite avec une pente constante. Toutefois, ce n'est pas toujours ce qu'on obtient. Si la chaleur dégagée dans l'objet fait trop augmenter sa température, alors l'augmentation de température fait augmenter la résistance et on obtient alors un graphique comme celui montré à droite. L'augmentation de la résistance fait alors dévier la courbe vers le haut. Notez que la résistance à une certaine valeur du courant (disons 2 A) n'est pas la pente de la courbe à $I = 2\text{A}$. C'est plutôt la pente de la droite allant de l'origine au point de la courbe à $I = 2\text{A}$.



Les semi-conducteurs

Dans les semi-conducteurs, la densité d'électrons libre n_e augmente avec la température. La plus grande énergie thermique permet la libération de nouveaux électrons libres. Plus la température est élevée, plus il y a d'électrons libres. On a donc

$$\mu_e \downarrow \text{ avec la température}$$
$$n_e \uparrow \text{ avec la température}$$

Puisque

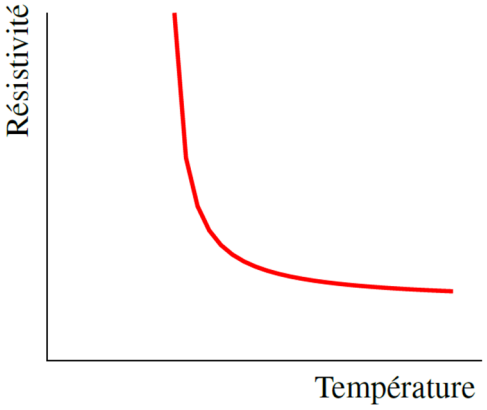
$$\rho = \frac{1}{\mu_e n e}$$

c'est difficile de dire ce qui va se passer. La baisse de la mobilité fait augmenter la résistivité, mais l'augmentation de n_e la fait diminuer. En fait, n_e augmente plus vite que μ_e baisse avec la température (jusqu'à une certaine valeur), ce qui veut dire que

$$\rho \downarrow \text{ avec la température}$$

Le graphique de droite montre comment change la résistivité en fonction de la température pour les semi-conducteurs.

Notez qu'à des températures très élevées, la résistivité des semi-conducteurs se met à remonter parce que le nombre d'électrons libres augmente de moins en moins vite à mesure que la température augmente. À partir d'une certaine température, n_e n'augmente plus assez vite pour compenser la diminution de μ_e avec la température et la résistivité se met à remonter.



La formule de la variation de la résistivité avec la température

Pour des températures près de la température ambiante, on peut faire l'approximation que la courbe de résistivité en fonction de la température est une droite. Cette approximation sera assez bonne pour les métaux, car le graphique était véritablement une droite, sauf pour de très basses températures. Pour les semi-conducteurs, l'approximation sera un peu moins bonne si on s'éloigne trop de la température de référence (celle pour laquelle on fait notre droite tangente à la courbe) parce qu'on n'avait jamais de droite sur le graphique.

Avec cette approximation on devrait donc avoir que

$$\rho = mT + b$$

où m est la pente de la droite et b est l'ordonnée à l'origine. On aurait pu alors fournir la pente et l'ordonnée à l'origine pour chaque substance, mais ce n'est pas ce qui a été fait. On travaille plutôt à partir de la valeur de la résistivité à une certaine température. On donne donc un point de la droite (ρ_0, T_0). À partir de ce point, on peut trouver l'ordonnée à l'origine.

$$\begin{aligned} \rho_0 &= mT_0 + b \\ b &= \rho_0 - mT_0 \end{aligned}$$

On utilise ensuite cette ordonnée dans l'équation de la droite pour obtenir

$$\begin{aligned} \rho &= mT + b \\ &= mT + \rho_0 - mT_0 \\ &= \rho_0 + m(T - T_0) \\ &= \rho_0 \left(1 + \tfrac{m}{\rho_0}(T - T_0)\right) \end{aligned}$$

Comme m et ρ_0 sont des constantes, on définit une nouvelle constante $\alpha = m / \rho_0$ qui se nomme *coefficient de résistivité thermique*. Cela nous permet donc d'obtenir la forme finale de la résistivité en fonction de la température.

Résistivité en fonction de la température (pour des températures près de T_0)

$$\rho = \rho_0 \left(1 + \alpha (T - T_0)\right)$$

Voici la valeur du coefficient de résistivité thermique pour quelques métaux (à 20 °C).

Substance	α (K^{-1})	Substance	α (K^{-1})	Substance	α (K^{-1})
Argent	0,00385	**Tungstène**	0,0045	**Platine**	0,00392
Cuivre	0,00393	**Zinc**	0,0037	**Plomb**	0,0039
Or	0,0034	**Nickel**	0,0059	**Graphite**	-0,00056
Aluminium	0,00403	**Fer**	0,0050	**Germanium**	-0,048

Les deux dernières substances sont des semi-conducteurs et ont donc des coefficients négatifs puisque la résistance des semi-conducteurs diminue avec la température.

Si on multiplie l'équation de la résistivité par la longueur du conducteur et qu'on la divise par l'aire du bout du conducteur, on obtient

$$\frac{\rho\ell}{A} = \frac{\rho_0\ell}{A}\left(1+\alpha\left(T-T_0\right)\right)$$

Puisque $\rho\ell/A$ est la résistance du conducteur, on obtient

Résistance en fonction de la température (pour des températures près de T_0)

$$R = R_0\left(1+\alpha\left(T-T_0\right)\right)$$

(En fait, il y aurait quelques corrections à faire parce que les dimensions l et A changent un peu avec la température à cause de l'expansion thermique. On va négliger ces différences ici.)

Exemple 4.6.1

Un fil de platine a une résistance de 164,2 Ω à 0 °C. Quelle est la température du fil si sa résistance est de 187,4 Ω ?

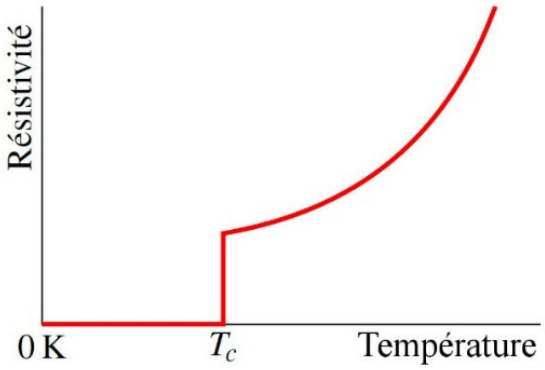
On a

$$R = R_0\left(1+\alpha\left(T-T_0\right)\right)$$
$$187,4\Omega = 164,2\Omega\cdot\left(1+0,00392°C^{-1}\cdot\left(T-0°C\right)\right)$$
$$T = 36,0°C$$

Notez que la variation de résistance avec la température permet de fabriquer des thermomètres qui affichent la température en mesurant la résistance d'un fil.

La supraconductivité

En 1911, Kammerlingh Onnes fait une découverte étonnante. La résistivité du mercure devient subitement nulle à 4,2 K (-269 °C). Voici le graphique de la résistivité du mercure à basse température.



On reconnait le début du plateau qui se forme pour les métaux à basse température, mais on voit que soudainement, à une température

inférieure à une température appelée *température critique*, la résistivité devient nulle. C'est la supraconductivité.

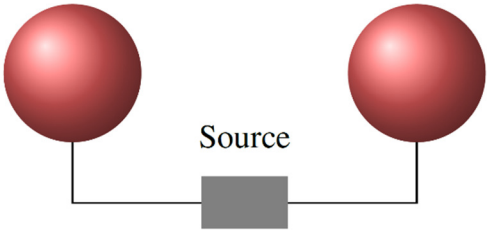
Il faut être pratiquement ceinture noire en mécanique quantique pour comprendre ce qui se passe. Les électrons forment des paires, ce qui change complètement leurs propriétés. Ils peuvent alors circuler dans le réseau cristallin sans aucune résistance.

En 1986, la plus haute température critique connue était de 23 K. Depuis, on a découvert toute une classe de céramique ayant des températures critiques beaucoup plus élevées. On a même dépassé la valeur de 77 K, ce qui permet de rendre la substance supraconductrice en la plaçant simplement dans l'azote liquide, une façon peu dispendieuse de refroidir les objets. Cela a ouvert la voie à toute une série d'applications technologiques des supraconducteurs allant des trains à lévitation magnétique à l'accélérateur de particules du CERN en Suisse. Les applications seront encore plus nombreuses si on réussit un jour à développer une substance qui est supraconductrice à température ambiante. En fait, on a découvert en octobre 2018 une substance supraconductrice jusqu'à -23 °C, mais elle est supraconductrice seulement sous une énorme pression. Pour l'instant, la température critique maximale atteinte à la pression atmosphérique est de 138 K (-135 °C).

4.7 LES SOURCES

Une source possède 2 bornes conductrices et elle va tout faire pour maintenir **une différence de potentiel constante** entre ces deux bornes.

Pour illustrer ce que fait une source pour maintenir cette différence de potentiel, imaginons que chaque borne d'une source est branchée à une sphère conductrice, comme sur la figure de droite. Juste avant le branchement, les sphères ne sont pas chargées. Disons que la différence de potentiel entre les bornes de la source est de 12 V.

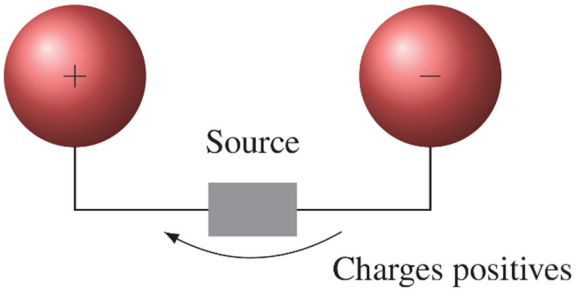


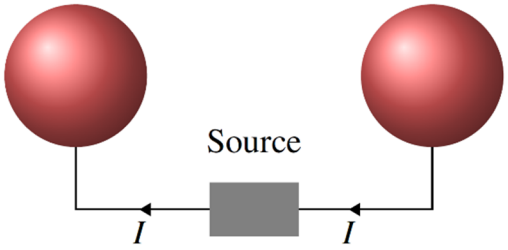
Comme les sphères ne sont pas chargées, il n'y a pas de différence de potentiel entre les 2 sphères. Toutefois, la source veut maintenir une différence de potentiel de 12 V entre ses bornes. La source va donc modifier la charge des sphères pour que la différence de potentiel entre les sphères soit de 12 V.

La source ne fait pas apparaitre de charges et elle n'est pas un réservoir de charges non plus. Elle ne fait que transporter des charges pour atteindre une certaine différence de potentiel entre les deux conducteurs reliés à ses bornes. Supposons ici que la source déplace des charges positives. La source va alors prendre des charges positives sur la sphère de droite et les envoyer sur la sphère de gauche.

La sphère de droite, qui était neutre au départ, aura alors une charge négative parce qu'elle aura plus de charges négatives que de charges positives, et la sphère de gauche, qui était

aussi neutre au départ, aura une charge positive parce qu'elle a plus de charges positives que de charges négatives. Cela signifie que la sphère de gauche aura un potentiel plus élevé que la sphère de droite avec le transfert de charge. La source va déplacer ainsi des charges jusqu'à ce que la différence de potentiel entre les sphères soit égale à la différence de potentiel entre les bornes de la source.





Puisque la source ne fait que déplacer les charges, il entre toujours autant de charges par seconde dans la source qu'il en sort, le courant arrivant à la source doit donc être le même que le courant qui sort de la source.

Très souvent, la source transfère les charges en leur donnant de l'énergie potentielle, donc en transférant les charges vers la borne où le potentiel est le plus grand (si on considère le courant conventionnel). On va voir plus loin qu'il arrive parfois que la source prenne de l'énergie aux charges. Elle joue donc un rôle équivalent à une pompe qui pompe de l'eau dans un réservoir à une plus grande altitude.

La source déplace donc les charges pour que le potentiel entre les bornes de la source ait une certaine valeur. Cette différence de potentiel entre les bornes de la source est notée $\mathscr{E}$ et peut porter plusieurs noms :

- Différence de potentiel ou d.p.p.
- Tension
- Force électromotrice ou f.e.m.
- Électromotance

Une source peut être simplement une pile comme la pile rectangulaire de la figure pour laquelle il y a une différence de potentiel de 9 V entre les bornes (qu'on voit sur le dessus de la pile). Ce peut être quelque chose de plus compliqué, comme cette source (figure de droite) sur laquelle un bouton permet d'ajuster la différence de potentiel entre les bornes (qui sont en bas à gauche). Sur l'image, il y a 50 V entre les bornes (la borne rouge en bas a un potentiel 50 V plus élevé que la borne noire un peu plus à gauche).

en.wikipedia.org/wiki/Nine-volt_battery

www.elexp.biz/tst_503e.htm

On peut trouver le travail fait par la source. Si la source prend une charge Q du côté de la borne où l'énergie potentielle est la plus basse et la transporte du côté de l'autre borne où l'énergie potentielle est plus élevée, le travail fait par la source est

$$\begin{aligned} W_{source} &= \Delta U \\ &= Q\Delta V \end{aligned}$$

Puisqu'on note la différence de potentiel de la source avec $\mathscr{E}$, on arrive à

Travail fait par une source qui déplace une charge *Q*

$$W_{source} = Q\mathscr{E}$$

On peut aussi trouver la puissance instantanée de l'énergie donnée aux charges par la source. Cette puissance est

$$\begin{aligned} P &= \frac{dU}{dt} \\ &= \frac{dq\mathscr{E}}{dt} \\ &= \frac{dq}{dt}\mathscr{E} \end{aligned}$$

Dans cette formule, *dq/dt* est la quantité de charges transportées par unité de temps et elle représente le courant à travers la source. On a donc

Puissance d'une source

$$P_{source} = I\mathscr{E}$$

Cette formule est en accord avec la formule $P = I\Delta V$ trouvée précédemment. Comme la source fait monter l'énergie potentielle des charges, la source fournit de l'énergie aux charges.

Il y a en fait trois façons principales d'obtenir une source. On peut obtenir une source avec de l'induction électromagnétique. Nous verrons ce phénomène dans des chapitres ultérieurs. On peut aussi obtenir une source avec des panneaux solaires. Finalement, on peut aussi obtenir une source grâce à des réactions chimiques en fabriquant une pile. C'est ce qui fut découvert en premier et l'histoire de cette découverte est très intéressante.

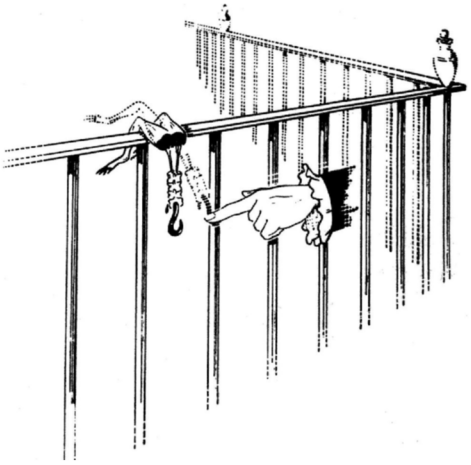
4.8 LA PREMIÈRE PILE

Après l'invention de la machine électrostatique vers 1660, nombreux sont ceux qui avaient reçu des chocs électriques. Il devenait évident que ces chocs pouvaient provoquer la contraction des muscles, même avec des organismes morts. À partir de 1780, Luigi Galvani

veut donc vérifier si les nerfs ne seraient pas des petits tuyaux servant à transporter le fluide électrique. C'est la théorie de l'électricité animale, qu'il veut prouver en utilisant un animal comme source. Pour y arriver, il fallait obtenir des effets électriques à partir d'un animal sans qu'aucune machine électrostatique soit branchée à l'animal. En effet, si une machine électrostatique était branchée à l'animal, comment pourrait-on savoir si l'électricité provient de l'animal ou de la machine ?

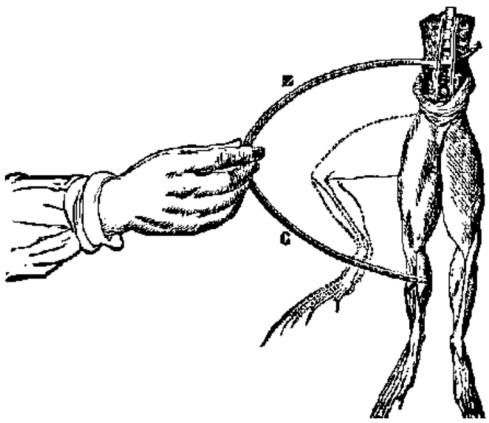
Galvani commence ses travaux sur la contraction des muscles de cuisse de grenouille en 1780. Notez que Galvani n'a pas besoin de toute la grenouille, il ne travaille qu'avec les jambes et la colonne vertébrale de ses grenouilles. Il y a même un petit crochet métallique inséré dans le bout de la colonne, à l'endroit où il avait auparavant la tête, pour pouvoir accrocher ses spécimens.

Galvani obtient un premier résultat intéressant en 1781. Il remarque alors que lorsqu'on décharge une machine électrostatique située à proximité de l'animal (sans être branchée à l'animal), on observe une contraction des muscles quand un scalpel passe à travers la colonne vertébrale. Galvani croit tenir là une preuve de l'électricité animale, mais on lui fait rapidement remarquer que les résultats pouvaient facilement s'expliquer en disant qu'il y avait séparation de charge par induction entre la grenouille et le scalpel quand la machine électrostatique est chargée. Lorsque l'appareil électrostatique se déchargeait, la séparation de charge disparaissait, ce qui engendrait un courant et provoquait la contraction des muscles.



Marcello Pera, The Ambiguous Frog, Princeton, 1992

Une observation plus intéressante est faite par accident le 26 avril 1786. Ce jour-là, Galvani place ses cuisses de grenouille sur une clôture en fer. Il remarque alors que lorsqu'un crochet en laiton passant par la colonne vertébrale touche la clôture de fer par accident, il y a une contraction des muscles de la cuisse. Galvani est fou de joie puisqu'il a réussi à provoquer la contraction du muscle sans utiliser le générateur électrostatique, montrant ainsi qu'il y a de l'électricité dans la grenouille. Galvani explore davantage cette situation et arrive à la conclusion que la contraction se fait quand le crochet n'est pas fait du même métal que la clôture. Il faut donc deux métaux différents pour provoquer la contraction.



www.pulsedpower.eu/bioelectrics/bio_02_main.htm

Un simple arc bimétallique, comme celui de la figure de droite provoque la contraction des muscles. La contraction est plus ou moins prononcée selon les métaux utilisés. Selon Galvani, les muscles ont une charge alors que les nerfs ont une charge identique, mais de signe

opposé. Lorsqu'on relie le muscle et le nerf avec l'arc de métal, la charge s'équilibre et le mouvement de la charge provoque la contraction musculaire.

Galvani publie ses résultats en 1791 et tous les savants sont émerveillés par les résultats. Alessandro Volta est un de ceux qui reçoivent les résultats avec enthousiasme. Mais, après mures réflexions, Volta commence, à partir de 1792, à douter de l'interprétation de Galvani sur la contraction des muscles des grenouilles. Il pense plutôt qu'elle pourrait être causée par le contact des deux métaux formant l'arc. Volta pense plutôt qu'un nouveau phénomène physique a été découvert par Galvani : le contact de deux métaux crée une différence de potentiel. On peut se convaincre que l'idée de Volta n'est pas si mauvaise en plaçant deux morceaux faits de métaux différents sur notre langue. Si on met en contact les deux morceaux de métal, on aura la même sensation que lorsqu'on place les deux bornes d'une pile sur notre langue. En réalité, Volta redécouvrait cette sensation faite sur la langue par deux métaux (bien sûr, il ne faisait pas la comparaison avec une pile) puisque Georg Sulzer l'avait déjà observé en 1767.

Ainsi commence un vif débat entre Volta et Galvani. Pour Galvani, c'est la grenouille qui est la source du courant alors que pour Volta, ce sont les deux métaux qui sont la source du courant. Chacun fait une série d'expériences pour démontrer qu'il a raison. En 1794, Galvani croit bien avoir réussi lorsqu'il parvient à obtenir la contraction des muscles en utilisant des arcs faits d'un seul métal et même en obtenant la contraction sans aucun métal, en touchant directement au muscle avec le nerf. Avec ces nouvelles observations, pratiquement tous les savants de l'époque pensent que Galvani est parvenu à démontrer l'existence de l'électricité animale sans l'ombre d'un doute. Du moins jusqu'à ce que Volta contrattaque.

Volta remarque que les contractions avec un seul métal se produisent uniquement si un liquide conducteur (un électrolyte comme du sang ou de la salive) est présent. En 1796, il en arrive à la conclusion que pour qu'un courant se produise, il faut être en présence de trois substances conductrices. (Volta incluait dans ces possibilités les contacts entre trois métaux, mais il a été démontré plus tard qu'il doit y avoir la présence d'au moins un électrolyte.) Dans les expériences avec l'arc bimétallique de Galvani, il y avait deux métaux et une grenouille qui faisait office de troisième substance conductrice. Dans les nouvelles expériences de Galvani, il y avait un métal avec un liquide conducteur et une grenouille, ou il y avait deux liquides conducteurs et une grenouille. Dans tous les cas, Volta peut expliquer les résultats obtenus par Galvani avec sa nouvelle théorie plus raffinée.

Jusqu'ici, les idées de Volta ne sont qu'une alternative aux idées avancées par Galvani puisqu'il n'a jamais réussi à mettre en évidence les conséquences de sa théorie sans la présence d'une grenouille. C'est qu'à cette époque, les muscles de grenouille sont l'« appareil » le plus sensible pour détecter le mouvement des charges. Volta corrige cette lacune entre les mois d'aout 1796 et mars 1797 en mettant en évidence la séparation de charge électrique entre deux métaux à l'aide d'un électromètre, un appareil utilisé à l'époque pour mesurer la charge. L'appareil n'est pas très sensible, mais Volta parvient quand même à mettre en évidence la faible différence de potentiel entre les métaux avec

cet appareil grâce à quelques procédés ingénieux. En éliminant ainsi la grenouille de l'expérience, il montre hors de tout doute que les métaux qui sont bel et bien à l'origine du courant et non pas la grenouille.

legendaryscience.com/content/voltaic-

Puis arrive l'ultime succès. Volta applique sa théorie pour fabriquer la première pile électrique. Pour y arriver, il relie en série des disques d'argent et de zinc séparés par un carton trempé dans l'acide (figure de droite). Il publie la première description de cette pile en mars 1800 dans une lettre à la Royal Society de Londres. Quelques mois plus tard, la pile était déjà utilisée pour réaliser de nombreuses expériences partout en Europe.

Galvani ne peut pas répondre à Volta en imaginant d'autres façons de démontrer l'existence de l'électricité animale puisqu'il meurt en 1798. Mais en fait, la contrattaque de Volta a été si efficace que plus personne n'ose s'attaquer au problème de l'électricité animale pour une trentaine d'années. Pourtant, Volta n'a jamais montré que l'électricité animale est une impossibilité, il a simplement montré que les preuves de Galvani étaient insuffisantes. Pourtant, les contractions musculaires sont bel et bien provoquées par des courants électriques dans les nerfs et il faudra attendre que Leopoldo Nobili et Carlo Matteucci s'intéressent à la question à partir de 1827 pour que les travaux à ce sujet reprennent. Bien des années plus tard, on a découvert comment les charges électriques et les réactions chimiques permettent au courant électrique de circuler dans les nerfs.

Même si Volta a créé la pile électrique à partir de sa théorie, certains ne croyaient pas que le simple contact entre des conducteurs puisse créer un courant. Il devait y avoir quelque chose de plus. Les expériences de Volta montraient clairement que les conducteurs en contact subissaient des changements chimiques lors de la production de courant, mais Volta ne les remarqua pas ou ne les considéra pas, car ces effets n'étaient pas conformes à sa théorie. Il faudra attendre les années 1830 pour qu'Arthur Auguste de la Rive et Michael Faraday formulent une théorie plus réaliste de la pile impliquant des réactions chimiques entre les conducteurs.

4.9 LES PILES ET LES BATTERIES

Les termes *piles* et *batteries* sont pratiquement synonyme dans l'usage courant. Généralement, le terme *pile* est employé quand l'énergie emmagasinée est faible et le terme *batterie* est employé quand l'énergie emmagasinée est grande. Les batteries sont donc généralement beaucoup plus lourdes que les piles. De façon correcte, les batteries sont toujours rechargeables alors que la piles ne le sont pas, mais on entend quand même souvent l'expression *piles rechargeables*.

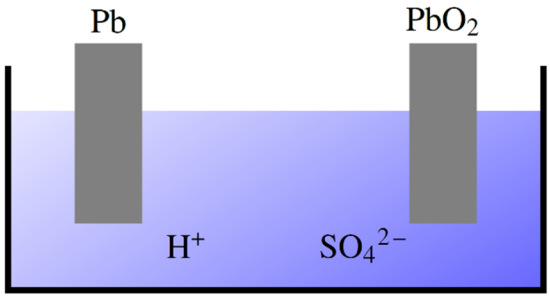
La différence de potentiel dans une batterie est faite par une réaction chimique. Selon la réaction chimique, la différence de potentiel entre les bornes prendra une certaine valeur spécifique. Toutefois, une pile ne fournira toujours que quelques volts, jamais des centaines ou des milliers de volts. Si la différence de potentiel n'est jamais bien grande, la quantité de charge qu'on peut obtenir est assez impressionnante.

Les premières piles, immenses, ne fonctionnaient pas bien longtemps (une heure au maximum) puisqu'il se formait des bulles d'hydrogène par électrolyse (un phénomène qu'on appela *polarisation*). Ces bulles isolaient alors l'électrode et bloquaient le fonctionnement de la batterie. Il fallut attendre 1836 avant que John Daniell parvienne à résoudre ce problème.

Le fonctionnement d'une batterie

Nous allons illustrer comment on peut maintenir une différence de potentiel entre deux bornes avec une réaction chimique en prenant l'exemple d'une batterie d'auto au plomb (inventée en 1854 par Wilhelm Josef Sinsteden et significativement améliorée en 1859 par Gaston Planté). Une batterie est formée d'un ensemble de cellules. Dans une batterie d'auto, nous avons 6 cellules donnant chacune une différence de potentiel d'environ 2 V, pour un total de 12 V entre les bornes de la batterie.

Chaque cellule est formée d'une borne en plomb et d'une borne en oxyde de plomb (IV) (PbO_2) baignant dans une solution aqueuse d'acide sulfurique (H_2SO_4). On retrouve donc des ions H^+ et SO_4^{2-} en solution.



Examinons ce qui se passe à chaque borne. Il se produit la réaction suivante à la tige de plomb.

$$Pb_{(s)} + SO_{4(aq)}^{2-} \rightarrow PbSO_{4(s)} + 2e^-$$

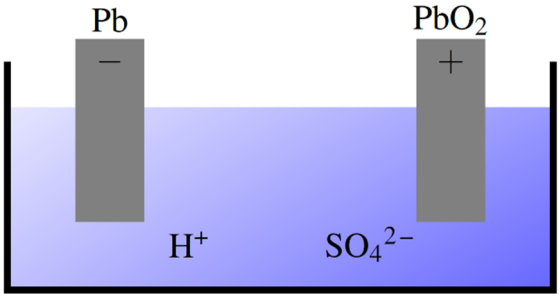
La tige de plomb va donc accumuler des électrons et se charger négativement de telle sorte que son potentiel devient négatif. La réaction cessera quand la tige deviendra trop négative, car elle repoussera alors les ions sulfate qui sont aussi négatifs. La charge et le potentiel de cette tige se stabilisent donc à une certaine valeur.

Examinons maintenant ce qui se passe à la tige d'oxyde de plomb. On a alors la réaction suivante.

$$PbO_{2(s)} + 4H_{(aq)}^+ + SO_{4(aq)}^{2-} + 2e^- \rightarrow PbSO_{4(s)} + 2H_2O$$

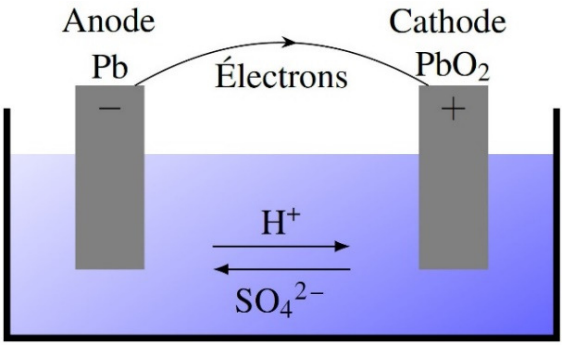
La tige d'oxyde de plomb va donc perdre des électrons et se charger positivement de telle sorte que son potentiel devient positif. La réaction cessera quand la tige deviendra trop

positive, car elle repoussera alors les ions hydrogène (protons) qui sont aussi positifs. La charge et le potentiel de cette tige se stabilisent donc à une certaine valeur.



On a donc une tige dont le potentiel a augmenté et une tige dont le potentiel a baissé. Quand le tout s'est stabilisé, la différence de potentiel entre les tiges est de 2,05 V.

Si on branche un conducteur entre les deux bornes, les électrons circuleront dans le fil en allant de la borne négative à la borne positive et on aura un courant.



La borne qui reçoit des électrons (ici la tige d'oxyde de plomb) porte le nom de *cathode* et la tige qui donne des électrons (ici la tige de plomb) porte le nom d'*anode*.

Ce courant pourra durer assez longtemps. En effet, en enlevant des électrons de la borne négative, la charge de la tige d'oxyde de plomb baisse un peu et la réaction chimique peut recommencer à cette borne pour fournir des électrons. En amenant des électrons à la borne positive, la charge de la tige baisse légèrement, ce qui permet à la réaction chimique de recommencer, ce qui élimine le surplus d'électrons. La différence de potentiel entre les tiges va donc se maintenir et le courant va continuer tant que la réaction fournira des électrons à la cathode et les éliminera à l'anode. Le tout cessera quand un des produits nécessaires à la réaction s'épuisera (une des tiges ou l'acide sulfurique dans l'eau). Typiquement, il y aura un transfert de 180 000 C (en transformant 196 g d'acide sulfurique) dans une pile de ce genre dans une batterie d'auto avant que la réaction ne cesse.

Notez qu'il a fallu attendre 2011 avant que des chercheurs n'expliquent, à partir des lois de la physique, pourquoi la différence de potentiel entre les bornes de cette cellule est de 2,05 V (ce qu'on ne peut pas faire uniquement avec la chimie). Notez qu'ils ont dû inclure les effets de la relativité d'Einstein dans le calcul pour obtenir la bonne valeur.

Pour terminer, voici quelques notes concernant les batteries. Ce n'est pas utile directement pour le cours, mais ça peut vous aider à comprendre vos batteries d'automobile.

- La réaction d'une batterie d'auto est facilement réversible et c'est pour cela qu'on peut recharger la batterie. Dans certaines batteries, la réaction n'est pas réversible et elles ne peuvent pas être rechargées.
- À mesure qu'une batterie d'auto se décharge, la quantité d'acide sulfurique dans la solution diminue. Comme la densité de l'acide sulfurique est de 1,85 et que celle de l'eau est de 1, on peut vérifier si la batterie est chargée ou non en mesurant la densité du liquide. Quand la batterie est chargée, il y a beaucoup d'acide et la densité est aux alentours de 1,28. Quand il ne reste que 50 % de la charge, la densité est près de 1,18 et elle descendra à 1,08 quand la batterie est déchargée.
- Si votre batterie d'auto se décharge trop, il est possible que des cristaux de $PbSO_4$ se détachent des électrodes et tombent au fond de la batterie. En perdant ainsi le contact avec les électrodes, il sera impossible de reconvertir ces cristaux en plomb ou en oxyde de plomb en rechargeant la batterie. Ainsi, la batterie ne pourra pas être rechargée autant qu'une batterie neuve et elle deviendra moins performante.

La capacité des piles et des batteries

La charge totale que peut fournir une pile ou une batterie s'appelle la capacité. Elle n'est pas donnée en coulomb, mais en ampèreheure (Ah). Cette unité de charge est la charge obtenue par un courant de 1 A pendant 1 heure. En coulomb, ça donne

$$1Ah = 1\tfrac{C}{s} \cdot 3600s$$

Ce qui veut dire que

$$1Ah = 3600C$$

Exemple 4.9.1

Une batterie a une capacité de 48 Ah. Pendant combien de temps cette batterie peut-elle fournir un courant de 10 A ?

On a

$$Q = I\Delta t$$
$$48Ah = 10A \cdot \Delta t$$
$$\Delta t = 4,8h$$

Pour les petites batteries, la capacité est souvent exprimée en milliampère-heure (mAh). Voici la capacité approximative de quelques modèles de batterie communément utilisés.

AAA 1250 mAh

AA 2850 mAh

C 8350mAh

9 V 500 mAh

D 20 500 mAh

La capacité des batteries d'automobile est aux environs de 50 Ah alors que les capacités des batteries de voiture électrique tournent autour de 200 Ah.

La capacité de la batterie d'une voiture électrique (environ 200 Ah) ne semble pas tellement plus grande que celle de la batterie d'une voiture conventionnelle, mais elle contient beaucoup plus d'énergie puisque la différence de potentiel (358 V pour un Kia Niro) est beaucoup plus grande que celle de la batterie ordinaire (12 V).

Exemple 4.9.2

Combien d'énergie (en kWh) y a-t-il dans une batterie de voiture électrique qui a une capacité de 175 Ah et une différence de potentiel de 358 V entre ses bornes ?

La quantité de charge que la batterie peut fournir est de 175 Ah. L'énergie que peut fournir la batterie est donc

$$\begin{aligned} W_{source} &= Q\mathscr{E} \\ &= 175Ah \cdot 358V \\ &= 62650Wh \\ &= 62,65kWh \end{aligned}$$

L'énergie dans la batterie d'une Kia Niro est de 62 kWh alors que celle de la batterie d'une voiture conventionnelle est de 0,6 kWh.

RÉSUMÉ DES ÉQUATIONS

Définition du courant moyen

$$I = \frac{Q}{\Delta t}$$

Définition du courant instantané

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

Densité d'électrons libres

$$n_e = \text{valence} \cdot \frac{\rho N_A}{\mu}$$

Lien entre le courant et la vitesse de dérive des électrons

$$I = n_e A e v_d$$

Grandeur du champ électrique dans le fil de longueur ℓ

$$E = \frac{|\Delta V|}{\ell}$$

Définition de la résistance

$$\Delta V = RI$$

Résistance d'un objet (loi de Pouillet)

$$R = \rho \frac{\ell}{A}$$

Champ électrique dans un fil

$$E = \rho \frac{I}{A}$$

Puissance reçue ou donnée

$$P = I \Delta V$$

Puissance dissipée par un objet ayant une résistance

$$P_R = I \Delta V \qquad P_R = RI^2 \qquad P_R = \frac{\Delta V^2}{R}$$

Résistivité en fonction de la température (pour des températures près de T_0)

$$\rho = \rho_0 \left(1 + \alpha \left(T - T_0\right)\right)$$

Résistance en fonction de la température (pour des températures près de T_0)

$$R = R_0 \left(1 + \alpha \left(T - T_0\right)\right)$$

Travail fait par une source qui déplace une charge Q

$$W_{source} = Q\mathscr{E}$$

Puissance d'une source

$$P_{source} = I\mathscr{E}$$

EXERCICES

4.1 La définition du courant

1. Il est passé 30 coulombs en 5 secondes dans un fil. Quel fut le courant moyen dans le fil ?

2. Le courant en fonction du temps dans un fil est donné par la formule suivante.

$$I = 3\tfrac{A}{s^2} \cdot t^2 + 8\tfrac{A}{s} \cdot t + 2A$$

   Quelle est la charge qui est passée par le fil entre $t = 0$ s et $t = 5$ s ?

3. Il y a un courant de 10 A dans un fil. Combien d'électrons entrent dans le fil chaque seconde ?

4.2 La vitesse de dérive

4. Un fil a une longueur de 30 m et un diamètre de 2 mm. Quelle est la vitesse de dérive des électrons s'il y a un courant de 5 A dans le fil et que la densité d'électrons libres est de $n_e = 2 \times 10^{28}$ m^{-3} ?

5. Un fil d'aluminium a une longueur de 5 m et un diamètre de 1 mm. La masse volumique de l'aluminium est de 2699 kg/m³ et sa masse molaire est de 26,982 g/mol. La valence de l'aluminium est de 3.

   a) Quelle est la vitesse de dérive des électrons s'il y a un courant de 50 mA dans le fil ?
   b) Combien faut-il de temps pour qu'un électron passe d'un bout à l'autre du fil ?

6. Un fil d'aluminium ayant une masse de 4 g a une forme cylindrique (comme la plupart des fils…). La masse molaire de l'aluminium est 26,982 g/mol. Combien faut-il de temps pour qu'un électron passe d'un bout à l'autre du fil si le courant dans le fil est de 8 A ? La valence de l'aluminium est de 3.

4.3 Le champ électrique dans le conducteur

7. Il y a une différence de potentiel de 40 V entre les extrémités d'un fil de 10 m de long. Quelle est la grandeur du champ électrique dans le fil ?

4.4 La résistance

Ce tableau des résistivités peut vous être utile pour certains numéros de cette section.

Métal	Résistivité (Ωm)	Métal	Résistivité (Ωm)	Métal	Résistivité (Ωm)
Argent	$1{,}587 \times 10^{-8}$	**Magnésium**	$4{,}39 \times 10^{-8}$	**Fer**	$9{,}61 \times 10^{-8}$
Cuivre	$1{,}678 \times 10^{-8}$	**Tungstène**	$5{,}28 \times 10^{-8}$	**Platine**	$10{,}5 \times 10^{-8}$
Or	$2{,}214 \times 10^{-8}$	**Zinc**	$5{,}90 \times 10^{-8}$	**Plomb**	$20{,}8 \times 10^{-8}$
Aluminium	$2{,}650 \times 10^{-8}$	**Nickel**	$6{,}93 \times 10^{-8}$	**Titane**	$42{,}0 \times 10^{-8}$

8. Il y a une différence de potentiel de 100 V entre les extrémités d'un fil de 2 m de long. Quelle est la résistance du fil s'il y a un courant de 50 mA dans le fil ?

9. Il y a une différence de potentiel de 50 V entre les extrémités d'un fil de cuivre de 8 m de long. Le fil a un diamètre de 1 mm.

   a) Quelle est la résistance du fil ?
   b) Quel est le courant dans le fil ?

10. Deux fils ont la même résistance. Voici les caractéristiques de ces fils.

Fil de cuivre : Longueur = 10 m Diamètre = 2 mm
Fil d'aluminium : Longueur = 50 m

Quel est le diamètre du fil d'aluminium ?

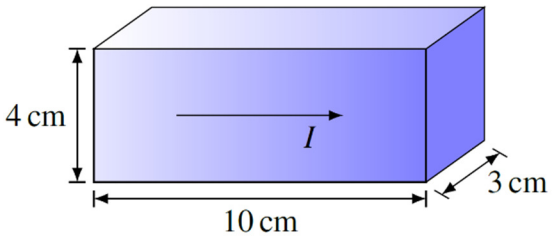
11. Un fil de 100 m de long a un diamètre de 0,1 mm et une résistance de 559 Ω. En quel matériau est fait ce fil ?

12. Deux fils sont faits de la même substance. Voici les caractéristiques de ces deux fils.

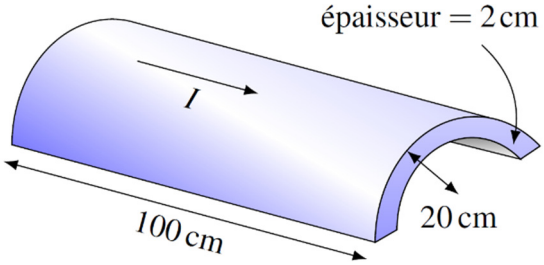
Fil 1 : Longueur = 40 m, diamètre = 1 mm et résistance = 5 Ω
Fil 2 : Longueur = 60 m et diamètre = 0,2 mm

Quelle est la résistance du fil 2 ?

13. Quelle est la résistance de cet objet en plomb ?



14. Quelle est la résistance de cet objet en platine ? (On a exactement la moitié d'un tube. Le 20 cm est le rayon de la surface externe du cylindre.)



4.5 La puissance électrique

15. Il y a un courant de 8 A qui passe dans un objet ayant une résistance de 100 Ω. Quelle est la puissance dissipée en chaleur ?

16. Il y a une différence de potentiel de 120 V entre les extrémités d'un fil de cuivre de 10 m de long et ayant un diamètre de 0,2 mm. Quelle est la puissance dissipée en chaleur par le fil ? (Utilisez la valeur des résistivités du tableau de la section 4.4.)

17. On se sert d'un fil traversé par un courant pour chauffer de l'eau. On plonge le fil (qui a une résistance de 250 Ω) dans 2,5 litres d'eau et on fait passer un courant de 4 A dans le fil. Combien faudra-t-il de temps pour que la température de l'eau passe de 20 °C à 80 °C sachant qu'il faut 4190 J pour augmenter de 1 °C la température de 1 litre d'eau ?

4.6 La résistance en fonction de la température

Les coefficients de résistivité thermique suivants peut vous être utile pour certains numéros de cette section.

Plomb : 0,0039 K^{-1} Tungstène : 0,0045 K^{-1} Fer : 0,0050 K^{-1}

18. Un objet en plomb a une résistance de 10 Ω à 20 °C. Quelle est sa résistance à 80 °C ?

19. Un objet en tungstène a une résistance de 20 Ω à 30 °C. Quelle est la température si sa résistance est de 18,2 Ω ?

20. Un fil a une résistance de 10 Ω à 0 °C et une résistance de 12 Ω à 40 °C. Quelle est sa résistance à 100 °C ?

21. Il y a un courant qui passe dans un fil en fer à 20 °C. On change alors la température tout en gardant la différence de potentiel entre les extrémités du fil constante. À quelle température la puissance dissipée en chaleur dans le fil sera-t-elle 1,25 fois plus grande qu'à 20 °C ?

4.7 Les sources

22. Il y a une différence de potentiel de 24 V entre les bornes d'une source. La source fournit un courant de 6 A.

    a) Quelle est la puissance fournie par la pile ?
    b) Quelle est l'énergie fournie par la pile en 2 minutes ?

4.9 Les piles et les batteries

23. Une pile peut donner une charge de 0,75 Ah. Au bout de combien de temps sera-t-elle vide si elle fournit un courant constant de 50 mA ?

24. Une batterie d'automobile peut fournir une charge de 50 Ah avec une différence de potentiel de 12 V. Pendant combien de temps peut-elle faire fonctionner une ampoule de 60 W ?

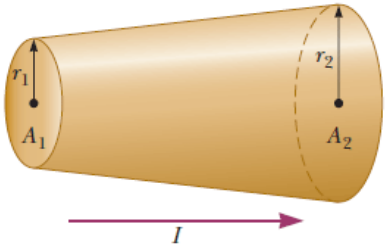
25. La borne de recharge de niveau 2 d'une voiture électrique permet de recharger la voiture avec une différence de potentiel de 240 V et un courant de 30 A. Combien faudra-t-il de temps pour recharger la batterie de l'automobile si elle peut accumuler une énergie de 60 kWh et qu'elle est complètement vide initialement ?

Défis

(Questions plus difficiles que les questions qu'il y aura à l'examen.)

26. Quelle est la résistance de cet objet de longueur L s'il est fait d'un matériau ayant une résistivité ρ ?

www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/figure-represents-section-circular-conductor-nonuniform-diameter-carrying-current-490--rad-q8670569



RÉPONSES

4.1 La définition du courant

1. 6A
2. 235 C
3. $6{,}242 \times 10^{19}$

4.2 La vitesse de dérive

4. $4{,}967 \times 10^{-4}$ m/s
5. a) $2{,}199 \times 10^{-6}$ m/s b) 26 jours 7 heures 40 minutes 56 secondes
6. 5361 s

4.3 Le champ électrique dans le conducteur

7. 4 V/m

4.4 La résistance

8. 2000 Ω

9. A) 0,1709 Ω b) 292,5 A
10. 5,62 mm
11. En magnésium
12. 187,5 Ω
13. $1{,}733 \times 10^{-5}$ Ω
14. $8{,}795 \times 10^{-6}$ Ω

4.5 La puissance électrique

15. 6400 W
16. 2696 W
17. 157,1 s

4.6 La résistance en fonction de la température

18. 12,34 Ω
19. 10 °C
20. 15 Ω
21. -20 °C

4.7 Les sources

22. a) 144 W b) 17 280 J

4.9 Les piles et les batteries

23. 15 h
24. 10 h
25. 8 heures 20 minutes

Défis

26. $R = \frac{\rho}{\pi}\frac{L}{r_1 r_2}$