5 LE COURANT ET LA RÉSISTANCE

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

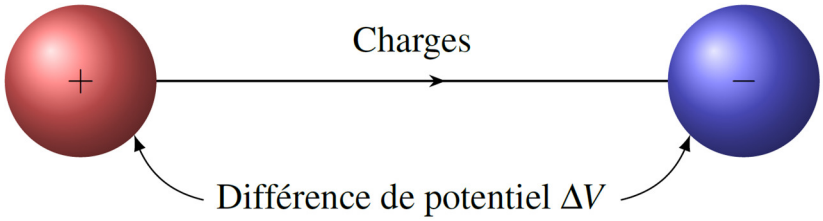
Découvrez comment résoudre ce problème dans ce chapitre.

5.1 LE COURANT

Définition du courant

On a vu dans les chapitres précédents que les charges peuvent se déplacer dans les conducteurs. Stephen Gray fut le premier à mettre en évidence ces déplacements de charge en 1729. En chargeant l'extrémité d'une tige métallique, il découvrit que l'autre extrémité devenait aussi chargée. Cela signifiait que les charges avaient pu se déplacer d'un bout à l'autre dans la tige de fer. Il venait de mettre en évidence le mouvement des charges électriques. À la fin de l'été, Gray parvint à transmettre une charge dans un fil métallique de près de 230 m de long soutenue par des fils de soie (pour l'isoler). (Bien sûr, plusieurs avaient reçu des décharges électriques avant cette date, mais ce n'est pas évident que ce choc est dû au passage des charges dans le corps.)

Prenons un exemple pour illustrer pourquoi il y a des courants. Supposons qu'on relie deux objets conducteurs (des sphères sur la figure) à l'aide d'un fil conducteur. Un objet a une charge positive et l'autre objet 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 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 soient égaux.



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 charge qui passe durant un temps infinitésimal.

Définition du courant instantané

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

Le courant est donc la dérivée de la charge.

Exemple 5.1.1

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

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

Autre unité de charge

La charge que peuvent fournir les batteries 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

$$1Ah = 3600C$$

On peut même en faire des jeux de mots, comme cet électricien de Québec qui a appelé son entreprise *Ampèreheure Néron*…

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

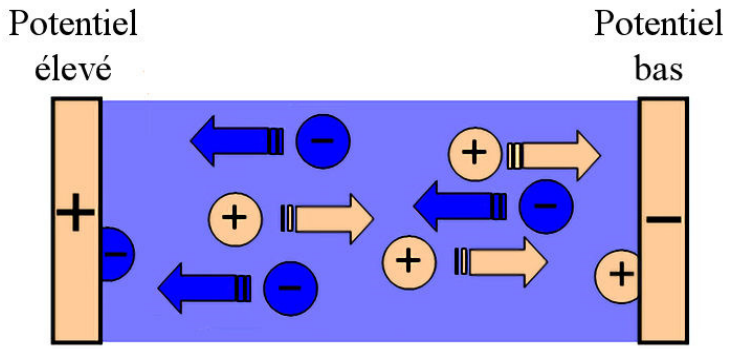
Pour qu'il y ait un courant, il faut que les charges puissent se déplacer dans la matière, donc que la matière soit conductrice. Toutefois, on peut se demander comment les charges électriques, c'est-à-dire des protons et des électrons, peuvent se déplacer facilement dans la matière.

Les ions dans des solutions et des gaz

S'il y a des ions dans un gaz ou une solution, ceux-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 librement dans tout le métal assez facilement. Ces électrons s'appellent des *électrons libres* ou des *électrons de conduction.* Seuls les électrons libres peuvent se déplacer dans les métaux alors que les charges positives (les atomes auxquels il manque un ou des électrons) ne peuvent se déplacer. Tous les courants dans les métaux sont donc faits uniquement par des mouvements d'électrons.

En gros, ce sont les électrons de valence qui sont ainsi partagés par les atomes. 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

Ainsi, chaque atome d'or fournit 1 électron libre, alors que dans le plomb, chaque atome fournit 4 électrons libres.

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 certains atomes fournissent 1 électron alors que d'autres en fournissent 2. De plus, ce nombre d'électrons partagé par les atomes augmente un peu avec la température. Il reste que la différence entre la valence et le véritable nombre d'électrons partagé par atome n'est jamais bien grand. On va donc négliger cette différence dans ce cours.

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

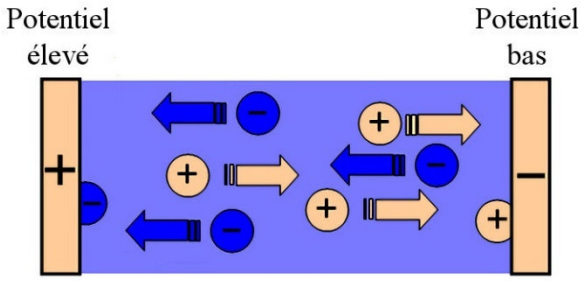
Le sens du courant est toujours celui de la direction du mouvement des charges si on suppose que ce sont uniquement les charges positives qui se déplacent. Puisque le déplacement des charges positives se fait toujours de façon à diminuer la charge de l'objet ayant le potentiel le plus élevé et faire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

Sens du courant

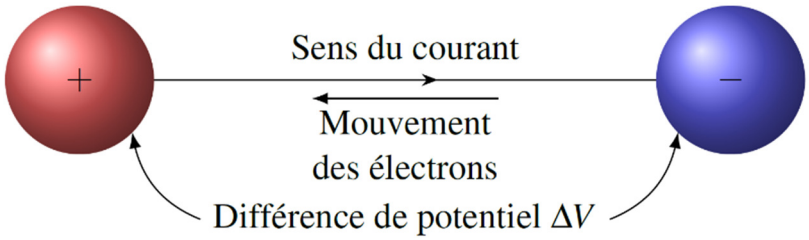
Le courant est le sens de déplacement des charges positives.

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 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.



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

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 avait un courant. On a alors pris une chance et supposé que ce sont les charges positives qui se déplacent.

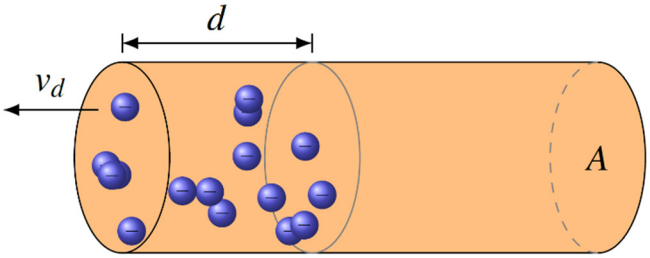
Maintenant qu'on sait que ce sont les charges négatives qui se déplacent dans un métal, on pourrait changer la convention. Certains l'ont même fait. Ainsi, dans les écoles secondaires de l'état de New York, on a décidé de définir le sens du courant comme étant le sens de déplacement des électrons. Il semble que cela n'a fait qu'augmenter la confusion des élèves, spécialement s'ils déménageaient dans un autre état…

De toute façon, c'est bien inutile de changer la convention parce que le courant n'est pas toujours dans le sens contraire du déplacement des charges. Dans certains cas, comme dans des solutions avec des ions positifs, le courant est effectivement dans le sens de déplacement des ions.

5.2 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 qu'il y a une subtilité plus tard). 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 la trouver, 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 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 électrons libres dans cette partie du fil. La charge totale (en valeur absolue) est donc

$$Q = Ne$$

Le nombre d'électrons libres dans une substance dépend uniquement de la nature de cette substance. Pour une substance donnée, il y a une certaine densité d'électron caractéristique de cette substance. Cette densité d'électrons (en électrons par m³) est notée n.

On calcule cette densité d'électrons libres en trouvant la densité d'atome dans le métal. Comme les atomes partagent les électrons de valence, on doit multiplier la densité d'atomes par la valence de l'atome. On a donc

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

Ce qui nous donne

Densité d'électrons libres

$$n = \text{valence} \cdot \frac{\rho N_A}{M}$$

Revenons maintenant à notre fil. Le nombre d'électrons libres est donc

$$\begin{aligned} N &= \text{densité} \cdot \text{volume} \\ &= n \cdot \text{volume} \\ &= nAd \end{aligned}$$

puisque le volume de la région qui nous intéresse est Ad. Notre charge est donc

$$Q = nAde$$

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 la vitesse (qu'on va noter v_d pour *vitesse de dérive*), le temps est

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

Le courant est donc

$$I = \frac{nAde}{d / v_d}$$

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

$$I = nAev_d$$

Notez qu'on utilise parfois le concept de densité de courant dans un fil. Cette densité est

$$J = \frac{I}{A}$$

Dans ce cas, notre équation de la vitesse de dérive devient

$$J = nev_d$$

Exemple 5.2.1

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 $I = nAv_d e$. Toutefois, il doit connaitre la densité d'électrons libres.

La densité d'électron libre est

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

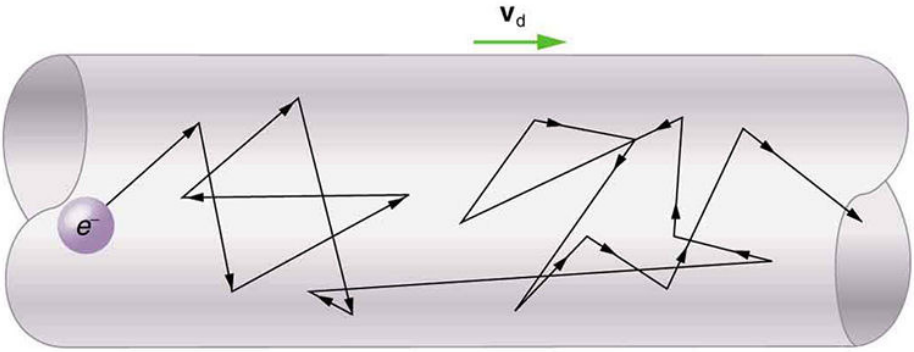
La vitesse est donc

$$\begin{aligned} I &= nAv_d e \\ 10A &= 1,808 \times 10^{29} m^{-3} \cdot \pi (0,001m)^2 \cdot v_d \cdot 1,602 \times 10^{-19} C \\ v_d &= 0,00011 \tfrac{m}{s} = 0,11 \tfrac{mm}{s} \end{aligned}$$

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 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

5.3 LE CHAMP ÉLECTRIQUE DANS LE 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 cet atome). 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 mouvements 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 évidemment 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. Il semble y avoir contradiction. 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 de la 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 montrent que la vitesse de dérive est proportionnelle au champ électrique dans la substance.

$$v_d \propto E$$

La constante de proportionnalité entre la vitesse de dérive et le champ électrique s'appelle *la mobilité des électrons* et elle est notée μ_e. On a alors

$$v_d = \mu_e E$$

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, 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.

Métal	Mobilité (m^2/Vs)	Métal	Mobilité (m^2/Vs)
Argent	0,0056	Aluminium	0,0012
Cuivre	0,0033	Étain	0,00039
Magnésium	0,0017	Plomb	0,00023
Zinc	0,0008		

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.

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

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

$$I = nAev_d$$

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

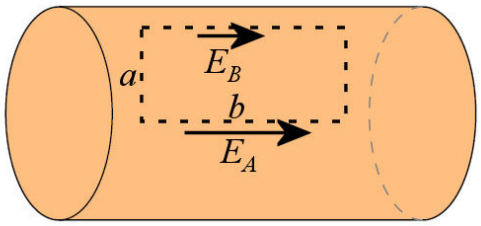
Si la vitesse de dérive est constante, alors le champ électrique doit être constant. En effet, l'équation

$$v_d = \mu_e E$$

indique clairement que si la mobilité μ_e est constante (ce qui est le cas 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 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

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



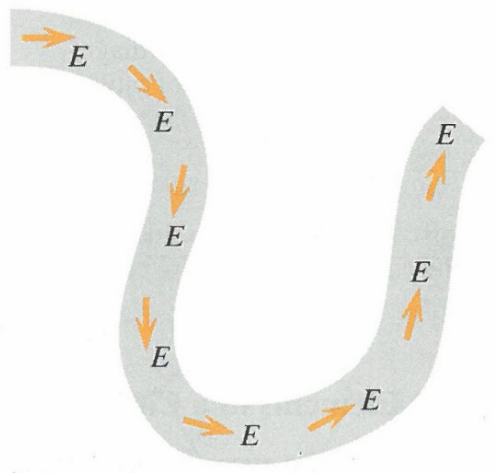
en prenant la trajectoire montrée sur la figure. Sur la figure, on a supposé que le champ n'était pas le même au centre que près de la surface. Les mesures a et b sont les longueurs des côtés du rectangle qui forment la trajectoire. On va suivre la trajectoire en partant du coin inférieur gauche en allant 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

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

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 du côté du fil ayant le potentiel le plus élevé vers le côté du fil où le potentiel est le plus bas.

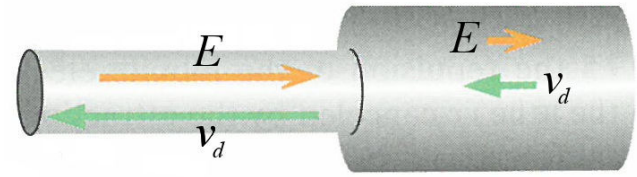


Matter & Interaction, Chabay, Sherwood, Wiley

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 un diamètre constant. Si le diamètre change, alors l'équation

$$I = nAev_d$$

montre clairement que la vitesse de dérive diminue si le diamètre augmente (pour des fils tous 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 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 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

$$\Delta V = -El\cos\theta$$

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

$$|\Delta V| = El$$

La grandeur du champ électrique dans le fil est donc

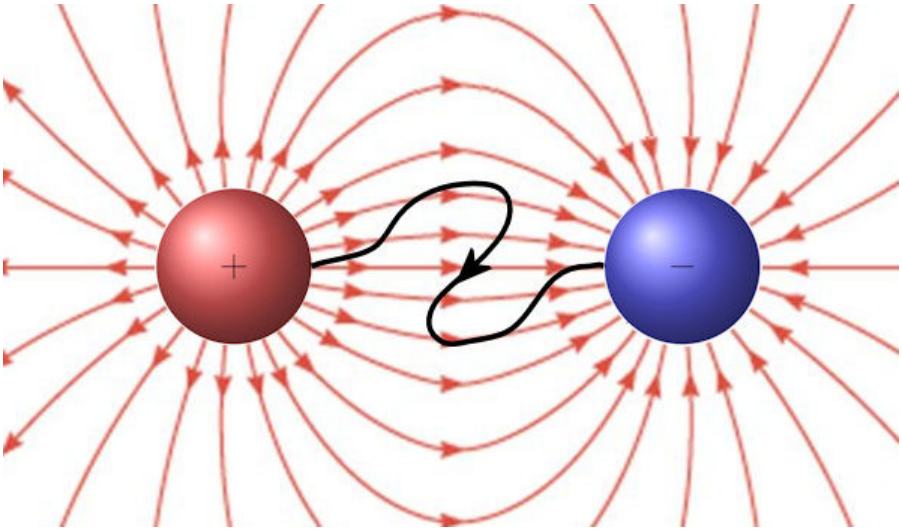
Grandeur du champ électrique dans le fil de longueur *l*

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

D'où vient le champ ?

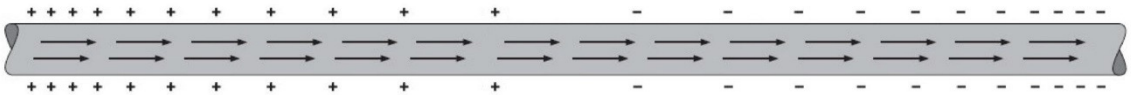
On a vu qu'il faut un champ électrique pour que les charges se déplacent quand il y a un courant. On pourrait premièrement penser que le champ vient des objets chargés à chaque bout du fil. Entre l'objet positif et l'objet négatif, il y a bel et bien un champ électrique vers la droite.

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).

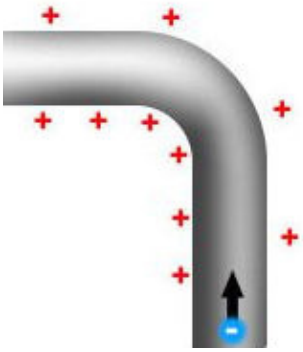


De toute évidence, le champ fait par les sphères n'explique pas tout. Premièrement, le champ dans le fil doit avoir une grandeur constante alors que le champ fait par les sphères n'a pas une grandeur constante. Deuxièmement, le champ fait par les sphères n'est pas toujours dans la bonne direction. Si 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 est vers le bas et vers la gauche au milieu du fil. 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 le champ. Ces charges vont se distribuer de telle sorte 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 obtenir le champ de même grandeur partout 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 parcoure 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.

5.4 LA RÉSISTANCE

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 corps (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)

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

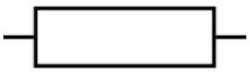
Il existe aussi la *conductance* (G) qui est simplement l'inverse de la résistance (1/R). Elle se mesure en A/V, qui sont des Siemens (S) (autrefois, l'unité était le mho (ohm écrit à l'envers) et le symbole de l'unité était le ℧).

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.

Un objet ayant de la résistance placée dans un circuit électrique est appelé *résistor* ou *résistance*. On utilisera le symbole américain pour représenter le résistor.

(norme américaine)



(norme européenne)

fr.wikipedia.org/wiki/Symbole_électronique

Les résistances employées dans les circuits ressemblent souvent à ce qu'on peut voir sur cette figure.

fr.wikipedia.org/wiki/Résistance_ (composant)

Notez un élément très important : le courant qui entre dans une résistance est le même que celui qui sort. Ceci est très logique. S'il ne sortait le même nombre de charges qu'il en entre chaque seconde, la résistance accumulerait des charges, ce qu'elle ne peut pas faire. Les charges ne font que passer à travers la résistance, elles ne s'accumulent pas dans la résistance.

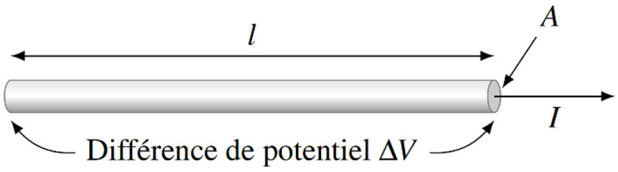
De quoi dépend la résistance d'un objet ?

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

$$v_d = \mu_e E$$

Avec un conducteur de longueur *l,* le champ dans le fil est

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



On a donc

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

Comme le courant est

$$I = nAev_d$$

(où A est l'aire du bout du fil), on obtient

$$\frac{I}{neA} = \mu_e \frac{\Delta V}{l}$$

$$\Delta V = \frac{l}{\mu_e neA} I$$

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

$$R = \frac{l}{\mu_e neA}$$

On peut séparer cette équation en deux parties

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

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 du conducteur.

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…)

$$\rho = \frac{1}{\mu_e ne}$$

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 est la conductivité σ ($\sigma = 1/\rho$).

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

Résistance d'un corps (loi de Pouillet)

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

Exemple 5.4.1

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

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

$$0,1\Omega = 1,678\times10^{-8}\,\Omega m \cdot \frac{20m}{A}$$

$$A = 3,356\times10^{-6}\,m^2$$

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

$$A = \pi r^2$$

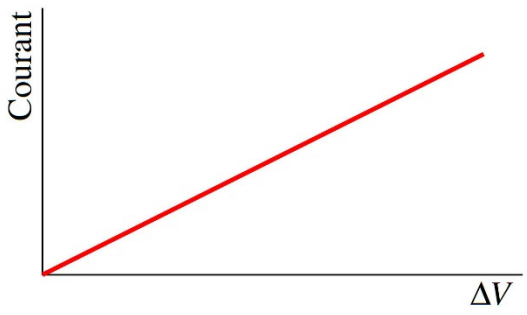
$$3,356\times10^{-6}\,m^2 = \pi r^2$$

$$r = 1,034mm$$

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

La loi d'Ohm

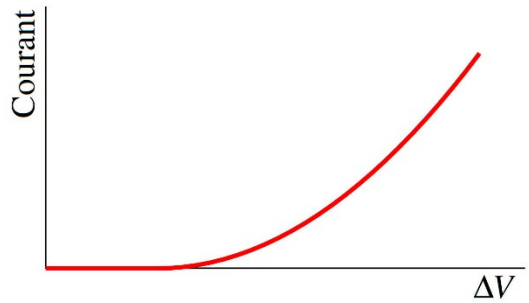
En 1827, Ohm remarque que *la résistance est constante à température constante* pour plusieurs substances. C'est cette affirmation qui est appelée la loi d'Ohm (et non pas $\Delta V = RI$).



Cela signifie que si on fait le graphique de du courant en fonction de la différence de potentiel en s'assurant que la température de l'objet reste constante, on obtient 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 dépend du champ électrique dans le fil, donc de la différence de potentiel appliquée entre les deux côtés de l'objet. Si n change, alors la résistivité change puisque

$$\rho = \frac{1}{\mu_e ne}$$



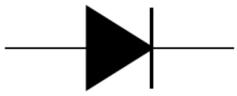
Cette variation de n fait en sorte que la relation entre I et ΔV ressemble à ce qu'on peut voir sur le graphique de droite. Une petite différence de potentiel ne produit pas de courant. Quand le champ électrique dans la substance est très faible, les charges ne sont

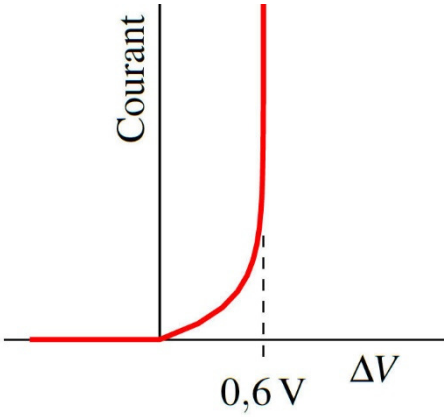
pas dans les orbitales partagées et ne peuvent pas se déplacer. La densité de charges libres n est alors presque nulle et la résistivité est très élevée. Il n'y a donc pas de courant. Si on augmente la différence de potentiel (et donc le champ dans le fil), on va finir par libérer quelques charges qui vont aller dans les orbitales partagées, ce qui fera augmenter n. 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).

Terminons en montrant le graphique de I en fonction de ΔV d'une diode. Les diodes sont des éléments qui ne laissent passer le courant que dans un sens (un peu comme une valve). Ce graphique montre qu'un courant (peu importe sa valeur) passera dans un sens dès qu'on applique une différence de potentiel supérieure à 0,6 V, mais il n'y aura pas de courant dans l'autre sens, peu importe la valeur de la différence de potentiel appliquée (en fait, il y a une limite). De toute évidence, la diode n'est pas ohmique. En passant, le symbole de la diode est montré à gauche. La flèche pointe dans la direction vers laquelle le courant peut passer.





Le champ électrique et la résistivité

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

$$\Delta V = RI$$

$$\Delta V = \rho \frac{l}{A} I$$

$$\frac{\Delta V}{l} = \rho \frac{I}{A}$$

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

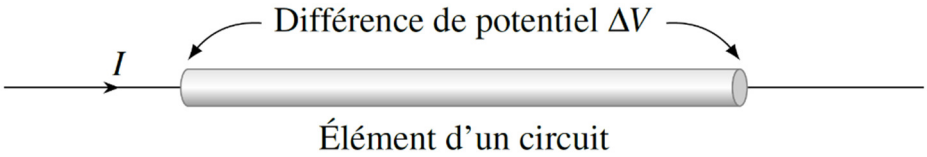
Champ électrique dans un fil

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

5.5 LA PUISSANCE ÉLECTRIQUE

La formule de la puissance

Calculons maintenant l'énergie perdue chaque seconde par les charges quand elles passent dans un élément d'un circuit. Il y a donc un courant I qui passe dans l'élément et il y a une différence de potentiel ΔV aux bornes de l'élément.



Comme le potentiel change, l'énergie électrique des charges change. On va supposer que le potentiel baisse quand le courant passe d'un côté à l'autre. La variation d'énergie électrique d'une charge q est

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

On a mis un signe négatif parce que le potentiel des charges baisse et que ΔV est la valeur absolue de la différence de potentiel. Si les charges perdent de l'énergie, alors l'élément reçoit de l'énergie. L'élément reçoit donc

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

Le signe est différent parce que l'élément reçoit l'énergie alors que les charges perdaient de l'énergie. La puissance (énergie par unité de temps) reçue par l'élément est donc

$$\begin{aligned} P &= \frac{\Delta U}{\Delta t} \\ &= \frac{q\Delta V}{\Delta t} \\ &= \frac{q}{\Delta t}\Delta V \end{aligned}$$

où $q/\Delta t$ est la charge passant dans l'élément par unité de temps. On reconnait que cette quantité est le courant traversant l'élément. On a donc

Puissance reçue ou donnée par un élément d'un circuit

$$P = I\Delta V$$

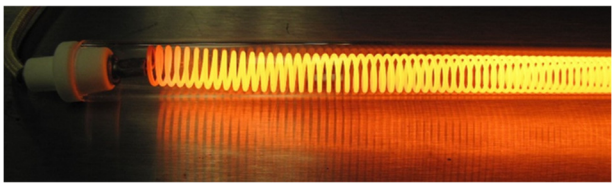
L'élément reçoit de l'énergie si le potentiel baisse quand on suit le courant.
L'élément donne de l'énergie si le potentiel monte quand on suit le courant.

Si l'élément du circuit est une résistance, alors on peut utiliser $\Delta V = RI$ pour obtenir les trois équations équivalentes suivantes.

Puissance reçue par une résistance

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

Il est impossible que le potentiel monte quand le courant passe à travers une résistance. La résistance reçoit donc toujours de l'énergie. Dans ce cas, l'énergie électrique est dissipée en chaleur et c'est pour cela qu'on parle souvent de *puissance dissipée en chaleur* dans le cas des résistances. Comme on l'a dit précédemment, les électrons en mouvement transfèrent une partie de leur énergie aux atomes formant le conducteur, ce qui se manifeste par une augmentation de température du conducteur. Cette dissipation de chaleur par 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 permit 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.
http://www.youtube.com/watch?v=jK8FfAZmCPw

Erreur fréquente : Dire que le courant se perd dans une résistance.

Il ne se perd pas de courant dans une résistance. Le courant qui entre dans la résistance est le même que le courant qui sort de la résistance. Si ce n'était pas le cas, il y aurait des charges qui s'accumuleraient dans la résistance et elle deviendrait chargée, ce qui ne se produit pas. Ce qui se perd dans la résistance, c'est l'énergie électrique des charges qui passent à travers la résistance. Il ressort le même nombre de charges qu'il en entre dans la résistance, mais chaque charge a perdu de l'énergie électrique.

Erreur fréquente : Utiliser les mauvaises valeurs de I et de ΔV dans la formule de la puissance.

Il faut utiliser la valeur du **courant passant dans la résistance** et la **différence de potentiel aux bornes de la résistance** dans ces formules. Nous verrons des exemples de cela quand on aura des circuits.

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. 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. ».

La température de la résistance

La chaleur dégagée fera monter la température de la résistance. On va maintenant déterminer la température de la résistance si elle est dans le vide. Dans le vide, la résistance ne peut perdre de la chaleur que par rayonnement. Or, on sait que la puissance du

rayonnement émis par un corps chaud est (on a vu cela dans le cours d'ondes et de physique moderne).

$$P = \sigma A\left(T^4 - T_0^4\right)$$

Où σ est une constante qui vaut $\sigma = 5{,}67 \times 10^{-8}$ W/m² K^4, T est la température de l'objet chaud et T_0 est la température du milieu ambiant.

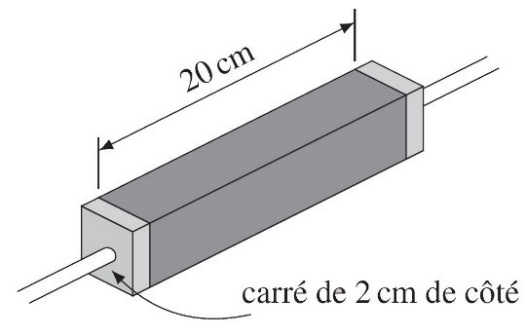
Si la puissance électrique est plus grande que la puissance du rayonnement émis, la résistance accumule de la chaleur et sa température augmente. Si la puissance électrique est plus petite que la puissance du rayonnement émis, la résistance perd de la chaleur et sa température diminue. Ainsi, à l'équilibre, la puissance électrique doit être égale à la puissance de rayonnement émis. On doit donc avoir que

La puissance émise par résistance dans le vide

$$P_R = \sigma A\left(T^4 - T_0^4\right)$$

Exemple 5.5.1

Il passe un courant de 8 A dans la résistance de 100 Ω montrée sur la figure. Quelle est la température de la résistance si elle est dans le vide et que la température du milieu ambiant est de 20 °C ?



La puissance dissipée en chaleur dans une résistance doit être égale à celle émise par la résistance. On doit donc avoir

$$P_R = \sigma A\left(T^4 - T_0^4\right)$$

La puissance dissipée en chaleur est

$$\begin{aligned} P_R &= RI^2 \\ &= 100\Omega \cdot (8A)^2 \\ &= 6400W \end{aligned}$$

On doit donc avoir

$$6400W = \sigma A\left(T^4 - T_0^4\right)$$

On doit donc maintenant trouver l'aire de cet objet. On va négliger les bouts de la résistance. Un des côtés de la résistance a une aire de 0,2 m · 0,02 m = 0,004 m². Avec les 4 côtés, l'aire est de 0,016 m². On a donc

$$6400W = \sigma A\left(T^4 - T_0^4\right)$$
$$6400W = 5,67\times10^{-8}\,\tfrac{W}{m^2K^4}\cdot 0,016m^2\cdot\left(T^4 - \left(293K\right)^4\right)$$
$$T = 1630K$$
$$T = 1357°C$$

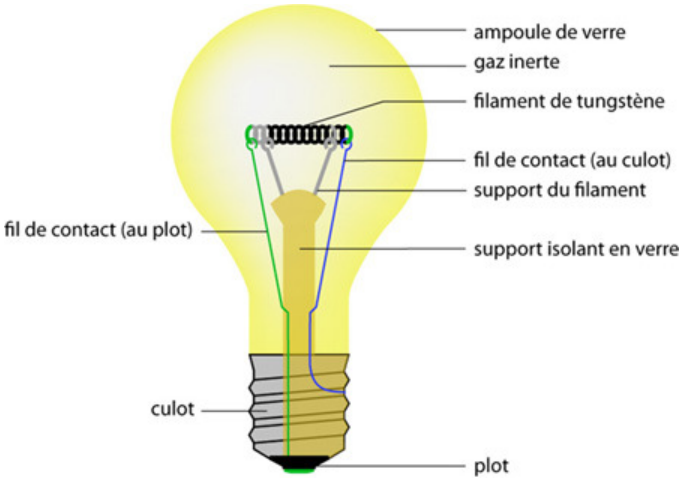
On remarque qu'on peut atteindre des températures assez élevées.

Évidemment, si la résistance est dans l'air, elle pourra aussi se refroidir par convection et conduction et elle sera un peu plus froide que la température calculée ici.

L'ampoule

Une ampoule à incandescence est un simple filament de métal qui joue le rôle d'une résistance. En passant 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 corps 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 invisible, tel que de l'infrarouge et une autre partie de l'énergie se perd par convection et par conduction.)

Le filament de l'ampoule est en tungstène. 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 pas avec le tungstène. 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.



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

Exemple 5.5.2

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

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

Il arrive souvent que l'ampoule brule quand on l'allume. C'est qu'à ce moment, le passage du courant change rapidement la température du filament. 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.

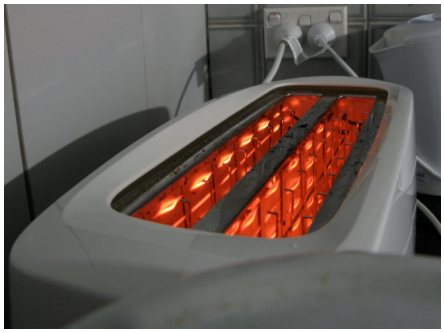
Les ampoules halogènes fonctionnent exactement sur le même principe, mais avec quelques différences. Le gaz dans l'ampoule contient un peu de gaz halogène (fluor, iode ou brome) qui va réagir avec le tungstène évaporé. Dans une ampoule ordinaire, le tungstène évaporé se dépose sur la paroi de verre de l'ampoule, ce qui noircit l'ampoule lentement. Dans l'ampoule halogène, le tungstène évaporé se combine au gaz halogène au lieu de se déposer sur la paroi de verre pour former un halogénure. Ce composé ne peut se dissocier qu'à haute température, donc près du filament, ce qui fait que le tungstène ne peut que se redéposer sur le filament. Cela permettra au filament de durer plus longtemps et évitera que la surface de l'ampoule noircisse avec le temps. Les ampoules halogènes ont également des températures plus élevées parce qu'il doit y avoir une température suffisante près du filament pour que le tungstène soit libéré. Cette température élevée permet

également une production plus efficace de lumière puisque la production de lumière est meilleure à haute température. Cela nécessite par contre l'usage de paroi en quartz. Elles fonctionnent aussi souvent avec des différences de potentiel plus basses (12 V) que les ampoules normales (120 V) parce que cela permet l'utilisation de filaments plus courts et ayant un plus gros diamètre, ce qui augmente la durée de vie du filament et permet d'atteindre la température nécessaire pour dissocier le tungstène et le gaz halogène. Avec ces améliorations, l'ampoule halogène ne perd que 5 % de son efficacité au bout de 2000 heures alors qu'une ampoule ordinaire aura perdu 10 % de son efficacité au bout de 1000 heures.

Chauffage par effet Joule

Si vous chauffez votre maison à l'électricité, vous vous chauffez par effet Joule. En passant un courant à travers une résistance, il se dégage de la chaleur. Les plinthes électriques ne sont rien d'autre qu'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 fluocompactes. C'est vrai que les ampoules fluocompactes consomment moins d'énergie en dégageant moins de chaleur, mais votre chauffage devra chauffer un peu plus pour compenser. 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 la résistance des 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 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 la densité de courant dépasse $J = 500$ A/cm² (en l'absence de ventilation).

Pour éviter cela, on installe des fusibles. Ce sont des dispositifs qui limitent la valeur du courant dans les fils pour éviter qu'ils ne chauffent trop. Dans sa version la plus simple, 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.
http://www.youtube.com/watch?v=QjE1k17MsqM

5.6 LA RÉSISTANCE EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE

Comment varie la résistivité 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

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

La résistivité changera si n ou μ_e change (e est une constante). Rappelons-nous que n 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 avec la température. Le résultat est bien différent selon le type de substance.

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

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

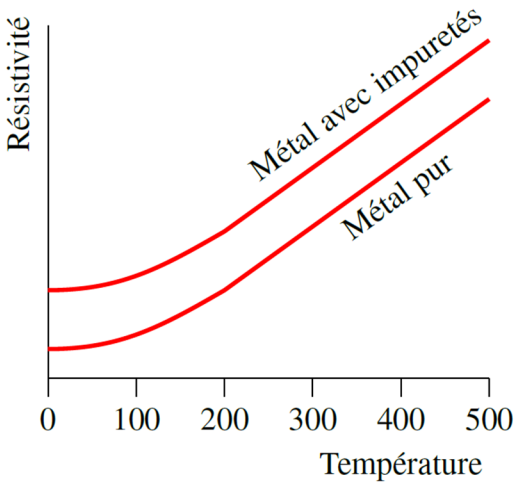
Puisque

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

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.



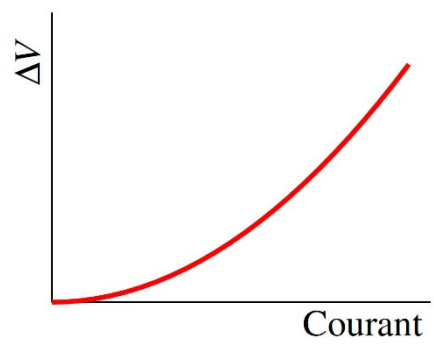
On remarque deux éléments.

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 la résistance 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 $I = 2\text{A}$.



Semi-conducteur

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

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

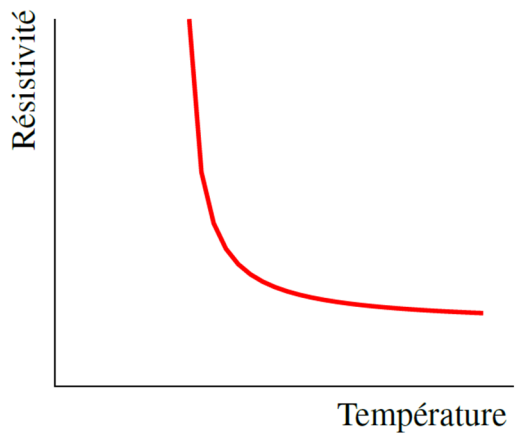
Puisque

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

on peut voir qu'il est difficile de dire ce qui va se passer. La baisse de la mobilité fait augmenter la résistivité, mais l'augmentation de n la fait diminuer. En fait, n 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 n'augmente plus assez vite pour compenser la diminution de μ_e avec la température et la résistivité se met à remonter.

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 a donc

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

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

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

Puisque $\rho l/A$ 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.)

Exemple 5.6.1

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 alors

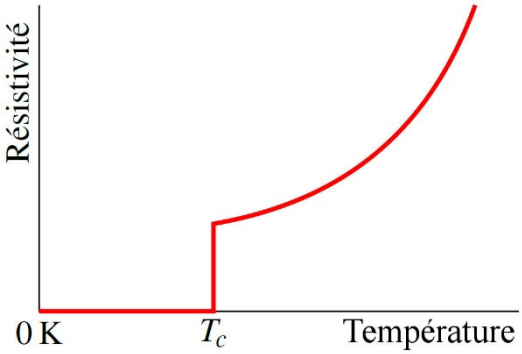
$$R = R_0\left(1+\alpha\left(T-T_0\right)\right)$$
$$187,4\Omega = 164,2\Omega\cdot\left(1+0,00392°C^{-1}\cdot\left(T-0°C\right)\right)$$
$$T = 36,0°C$$

(On peut donc fabriquer un thermomètre en mesurant la résistance d'un fil.)

La variation de résistance avec la température viendrait changer un peu la valeur de la température atteinte par la résistance dans le vide calculée précédemment. Le calcul de la température en tenant compte de la variation de la résistance avec la température est cependant un peu trop complexe pour qu'on le fasse dans ce cours.

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.

Avant 1986, la plus haute température critique connue était de 23 K. Soudainement, on découvrit toute une classe de céramique ayant des températures critiques beaucoup plus élevées. On dépassa même la valeur de 77 K, ce qui permettait de rendre la substance supraconductrice en la plaçant simplement dans l'azote liquide, une façon peu dispendieuse de refroidir les objets. Cela ouvrait 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 sera supraconductrice à température ambiante. En fait, on a découvert en octobre 2018 une substance supraconductrice jusqu'à -13,5 °C, mais seulement sous une énorme pression.

RÉSUMÉ DES ÉQUATIONS

Définition du courant moyen

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

L'ampère

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

Définition du courant instantané

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

Sens du courant

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.

Grandeur du champ électrique dans le fil de longueur *l*

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

Ce champ va du côté du fil ayant le potentiel le plus élevé vers le côté du fil où le potentiel est le plus bas.

Densité d'électrons libres

$$n = \text{valence} \cdot \frac{\rho N_A}{M}$$

Lien entre le courant et la vitesse de dérive des électrons

$$I = nAev_d$$

Définition de la résistance

$$\Delta V = RI$$

Définition de l'ohm (Ω)

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

Résistance d'un corps (loi de Pouillet)

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

Champ électrique dans un fil

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

Puissance reçue ou donnée par un élément d'un circuit

$$P = I\Delta V$$

L'élément reçoit de l'énergie si le potentiel baisse quand on suit le courant.
L'élément donne de l'énergie si le potentiel monte quand on suit le courant.

Puissance reçue par une résistance

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

Le kilowattheure

$$1kWh = 3,6\times10^6\,J$$

La puissance émise par une résistance dans le vide

$$P_R = \sigma A\left(T^4 - T_0^4\right)$$

(si on néglige la variation de la résistance avec la température.)

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)

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

EXERCICES

5.1 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. 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 ?

5.2 La vitesse de dérive

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

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

5. 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 $n = 2 \times 10^{28}$ m^{-3} ?

6. 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.

   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 ?

7. 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 ?

5.3 Le champ électrique dans le conducteur

8. 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 ?

5.4 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**	$42{,}0 \times 10^{-8}$

9. 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 ?

10. 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 ?

11. 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 ?

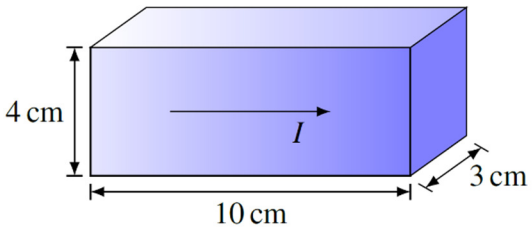
12. Un fil de 100 m de long a un diamètre de 0,1 mm et une résistance de 559 Ω. En quel matériau est fait ce fil ?

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

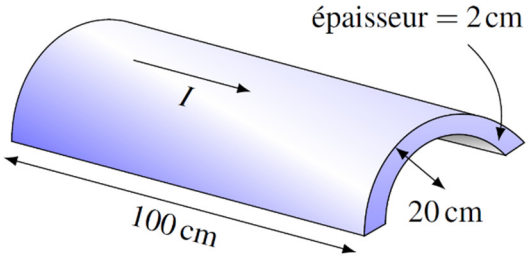
Fil 1 : Longueur = 40 m, diamètre = 1 mm et résistance = 5 Ω
Fil 2 : Longueur = 60 m et diamètre = 0,2 mm

Quelle est la résistance du fil 2 ?

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



15. 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.)



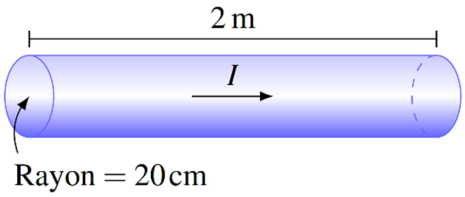
5.5 La puissance électrique

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

17. Une batterie d'automobile peut fournir une charge de 80 Ah avec une différence de potentiel de 12 V. Pendant combien de temps peut-elle faire fonctionner une ampoule de 60 W ?

18. 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 5.4.)

19. Il passe un courant de 500 mA dans cette résistance de 4000 Ω dans le vide. Quelle est la température de la résistance si la température du milieu ambiant est de 20 °C ? (Négligez la variation de résistance avec la température (section 5.5) et l'aire des bouts de la résistance.)



20. On se sert d'une résistance pour chauffer de l'eau. On plonge la résistance de 250 Ω dans 2,5 litres d'eau et on fait passer un courant de 4 A dans la résistance. 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 ?

21. La borne de recharge de niveau 1 d'une voiture électrique permet de recharger la voiture avec une différence de potentiel de 120 V et un courant de 16 A. Combien faudra-t-il de temps pour recharger la batterie de l'automobile si elle peut accumuler une énergie de 16 KWh et qu'elle est complètement vide initialement ?

5.6 La résistance en fonction de la température

Ce tableau des coefficients de résistivité thermique peut vous être utile pour certains numéros de cette section.

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

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

23. 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 ?

24. 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 ?

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

RÉPONSES

5.1 La définition du courant

1. 6A
2. 235 C
3. $6{,}242 \times 10^{19}$
4. 15 h

5.2 La vitesse de dérive

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

5.3 Le champ électrique dans le conducteur

8. 4 V/m

5.4 La résistance

9. 2000 Ω
10. A) 0,1709 Ω b) 292,5 A
11. 5,62 mm
12. En magnésium
13. 187,5 Ω
14. $1{,}733 \times 10^{-5}$ Ω
15. $8{,}795 \times 10^{-6}$ Ω

5.5 La puissance électrique

16. 6400 W
17. 16 h
18. 2696 W

19. 73 °C
20. 157,1 s
21. 8 heures 20 minutes

5.6 La résistance en fonction de la température

22. 12,34 Ω
23. 10 °C
24. 15 Ω
25. -20 °C