

CHAPITRE VII :

Le courant électrique, la résistance et les piles

Les chapitres précédents portaient sur les charges électriques au repos. Nous allons maintenant étudier les effets liés à des charges en mouvement, c'est-à-dire à des courants électriques. Quelles sont les conditions pour qu'il y ait courant électrique ? Il faut tout d'abord qu'il y ait des charges qui soient libres de circuler, comme les électrons de conduction dans un conducteur ou les ions dans une solution électrolytique. Il ne peut s'établir un courant dans un isolant. Ensuite, il faut mettre les charges en mouvement sous l'effet d'une force. C'est ce qui se produit s'il existe un champ électrique et donc une différence de potentiel. Jusqu'en 1800, des potentiels élevés pouvaient être obtenus en accumulant des charges statiques par frottement. Ces potentiels étaient capables de créer de grosses étincelles qui déchargeaient instantanément l'appareil et ne permettaient donc pas de maintenir un courant de charges électriques stable. Pour cela, il a fallu attendre l'invention de la pile électrique par Volta.

VII.1 : La pile électrique

Volta découvrit que lorsqu'on plongeait deux conducteurs différents ou un conducteur et du carbone dans une solution d'eau acidulée ou alcaline, il apparaissait une différence de potentiel entre les deux matériaux appelés électrodes. La solution est appelée électrolyte. Lorsqu'on relie les deux électrodes par un conducteur, un courant de charges continu s'établit car la différence de potentiel se maintient pendant une période relativement longue.

La différence de potentiel entre les deux électrodes d'une pile, aussi appelées bornes, provient de l'existence de réactions chimiques entre les ions contenus dans la solution et ces dernières. Il s'agit d'un exemple de transformation d'énergie chimique en énergie électrique. Les réactions chimiques qui se produisent dans une pile sont en général assez complexes et dépendent de la nature des électrodes et de l'électrolyte. Nous nous contenterons ici d'en résumer le principe. Un acide mélangé avec de l'eau se dissocie pour donner des ions positifs et négatifs (voir figure VII.1.a). L'une des électrodes, soit l'électrode A, a une affinité pour les ions positifs qui viennent y réagir et laissent une charge positive : on l'appelle l'anode. L'autre électrode, l'électrode B, attire les ions négatifs qui lui apportent une charge négative, on l'appelle la cathode (voir figure

VII.1.b). Au fur et à mesure que les charges s'accumulent sur les électrodes, leur affinité pour les ions diminue et la réaction s'arrête lorsqu'une charge donnée est atteinte, correspondant à une certaine différence de potentiel, la différence de potentiel nominale de la pile.

Lorsqu'on relie les deux bornes de la pile par un conducteur, un courant d'électrons s'établit de la borne - vers la borne +. Ce courant tend à faire diminuer la charge négative de la cathode et vient neutraliser une partie de la charge positive de l'anode. Dès lors les électrodes attirent à nouveau les ions de l'électrolyte et un courant d'ions s'établit dans ce dernier, de sorte à maintenir constante la différence de potentiel entre les deux électrodes (voir figure VII.1.c).

Les réactions chimiques qui se produisent aux électrodes transforment celles-ci progressivement. Lorsque l'une d'elle est totalement transformée, le courant cesse de circuler.

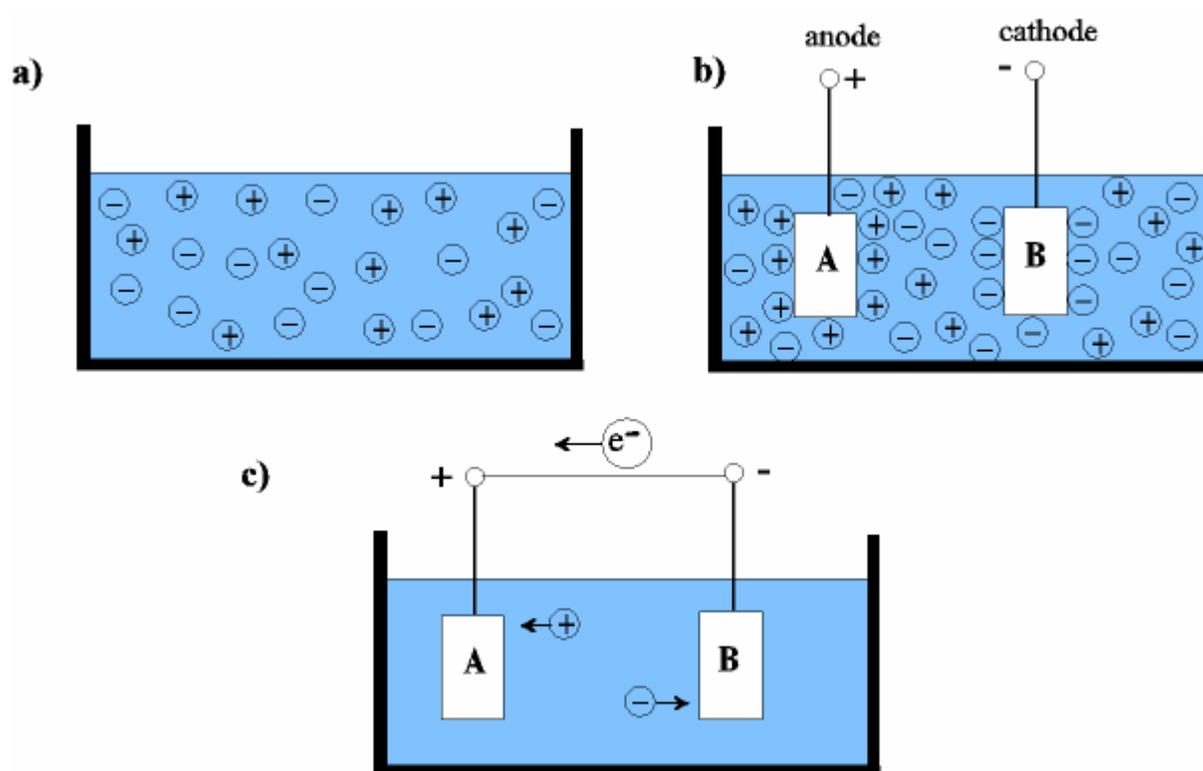


Figure VII.1.

Remarque :

Pour qu'un courant continu s'établisse, il ne suffit pas d'avoir une différence de potentiel (ex : figure VII.1.b), il faut aussi que les charges puissent circuler dans une boucle fermée (ex : figure VII.1.c). Dans le cas d'une pile, la boucle fermée est constituée du conducteur qui relie les deux bornes, des électrodes et de l'électrolyte situé entre ces dernières.

La différence de potentiel, ou tension, qui existe entre les bornes d'une pile dépend des matériaux utilisés pour fabriquer la pile et est typiquement de l'ordre du volt. Lorsqu'on monte deux ou plusieurs piles de manière à relier la borne positive de l'une à la borne négative de sa voisine, on dit qu'elles sont associées en série et leurs tensions s'additionnent. Ainsi, dans une lampe de poche, la tension entre les extrémités de deux piles de 1,5 V mises bout à bout de cette manière vaut 3,0 V.

VII.2 : Le courant électrique

Lorsque des charges sont en mouvement, que ce soient des électrons dans un conducteur ou des ions dans un électrolyte ou dans un gaz, ou encore des charges dans le vide, le flux de charges au travers d'une surface est caractérisé par une grandeur que l'on appelle l'intensité du courant électrique.

Si pendant l'intervalle de temps Δt , une charge nette ΔQ traverse la surface, l'intensité moyenne du courant électrique est définie par :

$$I_m \equiv \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (\text{VII.1})$$

Si le flux n'est pas constant, on définit l'intensité instantanée du courant par :

$$\boxed{I \equiv \frac{dQ}{dt}}, \quad (\text{VII.2})$$

obtenue en faisant tendre Δt vers zéro dans l'expression (VII.1). L'intensité du courant électrique, ou courant électrique en abrégé, est donc un débit d'écoulement des charges à travers une surface. L'unité de courant du SI est l'ampère (A), qui d'après la relation (VII.1), vaut :

$$1 \text{ A} \equiv 1 \text{ C/s} \quad (\text{VII.3})$$

Bien que l'intensité du courant électrique définie ci-dessus soit une quantité scalaire, il est d'usage, dans les circuits électriques, d'indiquer le sens du courant par une flèche. Du point de vue du courant, un flux de particules chargées positivement se déplaçant dans un sens, est équivalent à un flux de particules chargées négativement se déplaçant en sens opposé. Par convention, on a choisi pour le sens du courant, celui du mouvement des charges positives, bien que dans les conducteurs, on sache actuellement que ce sont des électrons, donc des charges

négatives, qui se déplacent en sens opposé au sens conventionnel du courant. En effet, l'adoption de cette convention remonte à deux siècles, à une époque où on croyait que le courant électrique dans les conducteurs était dû à un mouvement de charges positives.

La figure VII.2 montre le schéma d'un circuit électrique constitué d'une pile et d'un conducteur. La pile est représentée par le signe —|—|— , la ligne la plus longue représentant la borne positive.

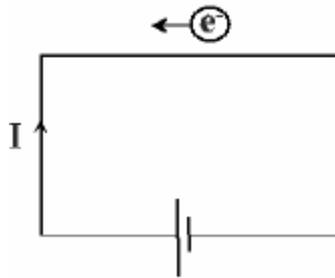


Figure VII.2.

Le courant conventionnel, celui qu'aurait des charges positives, s'écoule dans le conducteur, de la borne positive vers la borne négative, c'est-à-dire en sens contraire de celui des électrons. Par contre, à l'intérieur de la pile, dans l'électrolyte, il s'écoule de la borne négative vers la borne positive.

VII.3 : La résistance

Nous venons de voir que lorsqu'il existe une différence de potentiel V entre deux points d'un circuit fermé, il s'établit un courant I . Pour une valeur de V donnée, la valeur de I correspondante dépend de la nature des matériaux qui constituent le circuit. Dans le cas d'un conducteur, par exemple, les électrons de conduction subissent de nombreux chocs avec les atomes du milieu. Ces chocs les freinent dans leur progression, ce qui explique qu'il faille maintenir une différence de potentiel, donc une force, pour maintenir un courant constant. Dans le vide, des charges électriques soumises à une différence de potentiel constante, accélèrent et voient leur vitesse augmenter indéfiniment. Dans la matière, l'action de freinage des charges, dépend du matériau considéré et on définit une grandeur appelée résistance :

$$R \equiv \frac{V}{I} \quad (\text{VII.4})$$

En effet, ce rapport indique comment le matériau résiste au passage du courant lorsqu'on lui applique une différence de potentiel. Pour une valeur donnée de la tension V , un courant I deux fois plus intense s'établit dans un circuit qui a une résistance deux fois plus petite : $I = \frac{V}{R} \propto \frac{1}{R}$, à V fixé. L'unité de résistance du SI est l'ohm (Ω). D'après la relation (VII.4), on voit que :

$$1,0 \Omega \equiv 1 \text{ V/A.} \quad (\text{VII.5})$$

Une résistance d'1 Ω laisse passer un courant de 1 A lorsqu'on lui applique une différence de potentiel de 1 V.

Georg Simon Ohm a étudié systématiquement la résistance d'un grand nombre de matériaux. Il lui est apparu que pour un grand nombre d'entre eux, en particulier, les métaux à température ambiante, leur résistance est indépendante de la tension appliquée, et donc du courant qui y circule, pour un large domaine de valeurs. Ce fait est connu sous le nom de loi d'Ohm bien qu'il ne s'agisse pas véritablement d'une loi mais d'une observation qui n'est valable que pour certains matériaux et dans certaines conditions. Ces matériaux sont appelés conducteurs ohmiques.

Pour les conducteurs ohmiques, on a la loi d'Ohm :

$$V = RI, \text{ avec } R \text{ constant.} \quad (\text{VII.6})$$

Pour les conducteurs ohmiques, leur caractéristique, c'est-à-dire la fonction $I = f(V)$ qui donne le courant en fonction de la tension appliquée, est linéaire (voir figure VII.3).

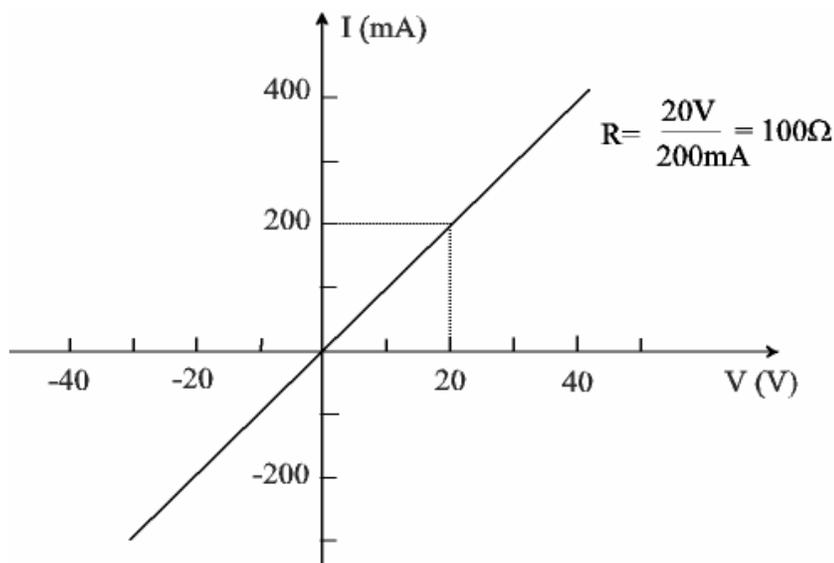


Figure VII.3 : Caractéristique d'un conducteur ohmique.

Dans un circuit un élément avec une résistance ohmique significative est représentée par: . Ces éléments sont connectés entre eux et aux autres éléments du circuit, tels qu'une pile par exemple, par des fils conducteurs dont la résistance est généralement négligeable, représentés par une simple ligne.

Il y a beaucoup de matériaux qui ne sont pas ohmiques et n'obéissent pas à la loi d'Ohm. C'est le cas notamment d'une diode. Une diode est un élément qui laisse passer facilement le courant lorsque la différence de potentiel est positive (résistance négligeable) mais empêche son passage lorsque celle-ci est négative (résistance très grande). La figure VII.4 montre la caractéristique d'une diode typique. Dans les schémas électriques, les diodes sont représentées par le signe : , le sens de la flèche indiquant le sens passant.

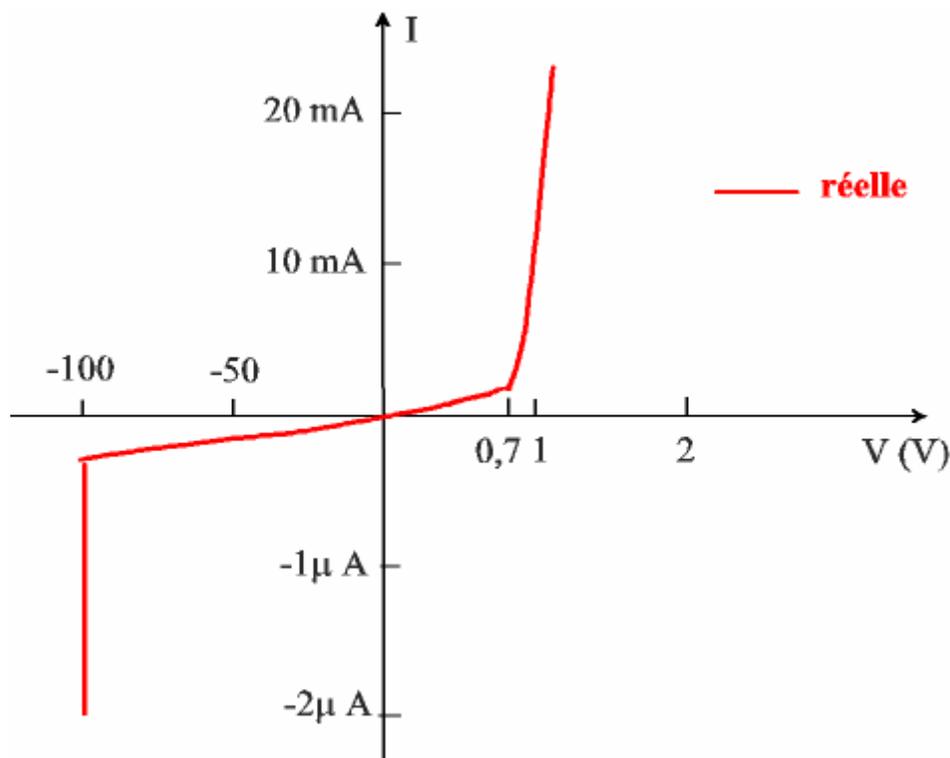


Figure VII.4 : : Caractéristique d'une diode.

Les diodes sont utilisées dans de nombreux dispositifs électriques. Elles peuvent être utilisées, par exemple, pour permettre de charger une batterie tout en l'empêchant de se décharger.

VII.4 : Résistivité et conductivité

On a constaté expérimentalement que la résistance R d'un fil homogène est directement proportionnelle à sa longueur L et inversement proportionnelle à l'aire de sa section, A . En d'autres termes :

$$\mathbf{R = \rho \frac{L}{A}}, \quad (\text{VII.7})$$

où la constante de proportionnalité ρ , appelée résistivité, dépend du matériau utilisé. Dans le SI, elle s'exprime en $\Omega.m$. L'inverse de la résistivité :

$$\mathbf{\sigma = 1/\rho}, \quad (\text{VII.8})$$

porte le nom de conductivité et s'exprime en $(\Omega.m)^{-1}$.

La relation (VII.7) s'explique si on se rappelle que la résistance trouve son origine dans les chocs des charges électriques en mouvement avec les atomes du milieu. En effet, si le fil est deux fois plus long, il y aura deux fois plus de chocs et la résistance sera deux fois plus grande. Par contre, si l'aire de la section du fil est deux fois plus grande, deux fois plus de courant pourra passer et la résistance sera deux fois moindre. Exactement comme une baignoire qui se vide deux fois plus vite si l'orifice du tuyau de vidange a une surface deux fois plus grande.

La résistivité des matériaux dépend de la température. En général, celle des métaux augmente avec la température. En effet, sous l'effet de la chaleur, les atomes accélèrent leurs mouvements d'agitation thermique aléatoires, ce qui tend à freiner plus la progression des électrons de conduction. En première approximation, la résistivité des métaux s'accroît linéairement avec la température :

$$\mathbf{\rho_T = \rho_0 [1 + \alpha (T - T_0)]} \quad (\text{VII.9})$$

où ρ_T désigne la résistivité à une température T , ρ_0 , la résistivité à une température de référence, T_0 et α , le coefficient thermique de résistivité. Dans le tableau VII.1 on trouve les valeurs de la résistivité et du coefficient thermique, valables à une température de 20°C , pour quelques matériaux usuels.

<u>Matériau</u>	<u>ρ ($\Omega \cdot m$)</u>	<u>α ($^{\circ}C$)⁻¹</u>
Conducteurs		
Aluminium	$2,8 \times 10^{-8}$	$4,29 \times 10^{-3}$
Argent	$1,6 \times 10^{-8}$	$6,1 \times 10^{-3}$
Cuivre	$1,7 \times 10^{-8}$	$6,8 \times 10^{-3}$
Fer	$9,7 \times 10^{-8}$	$6,51 \times 10^{-3}$
Mercure	98×10^{-8}	$0,9 \times 10^{-3}$
Nichrome	100×10^{-8}	$0,4 \times 10^{-3}$
Platine	$10,6 \times 10^{-8}$	$3,9 \times 10^{-3}$
Tungstène	$5,6 \times 10^{-8}$	$4,5 \times 10^{-3}$
Semi-conducteurs^(*)		
Carbone	$(3 - 60) \times 10^{-5}$	$- 0,5 \times 10^{-3}$
Germanium	$(1 - 500) \times 10^{-3}$	$- 50 \times 10^{-3}$
Silicium	0,1 - 60	$- 70 \times 10^{-3}$
Isolants		
Caoutchouc rigide	$10^{13} - 10^{15}$	
Mica	2×10^{15}	
Teflon	10^{14}	
Verre	$10^9 - 10^{13}$	

(*) Ces valeurs varient fortement en présence de quantités insignifiantes d'impuretés.

Tableau VII.1.

On remarque dans le tableau VII.1, qu'effectivement, le coefficient de température des métaux est positif et très faible, inférieur au pourcent. Ceci explique que l'élévation de température des conducteurs due au passage d'un courant a une influence négligeable sur leur résistivité et conduit à la loi d'Ohm pour cette classe de conducteurs : leur résistance est constante ; elle ne dépend pas de I.

Les valeurs de la résistivité et du coefficient thermique du tableau VII.1, montrent que les propriétés de conduction de l'électricité varient fortement d'un matériau à l'autre. Un bon conducteur a une résistivité de l'ordre de $10^{-8} \Omega \cdot m$ tandis que pour un bon isolant elle est de l'ordre de $10^{14} \Omega \cdot m$. Les semi-conducteurs ont des valeurs intermédiaires. Le coefficient

thermique est positif et inférieur au pourcent pour les métaux, il est négatif et dix fois plus grand pour les semi-conducteurs. D'où proviennent ces différences ? Pour le comprendre, il faut faire appel à la structure atomique de la matière ce qui implique quelques notions de mécanique quantique.

En physique classique, l'énergie de liaison d'un électron dans un atome peut prendre n'importe quelle valeur. Il n'en va pas de même en mécanique quantique : les valeurs de l'énergie que peut avoir un électron sont "quantifiées", ce qui veut dire que seules un certain nombre de valeurs discrètes sont possibles. On a l'habitude de représenter ces niveaux d'énergie accessibles aux électrons par des lignes horizontales le long d'un axe vertical portant la variable d'énergie E (voir figure VII.5).

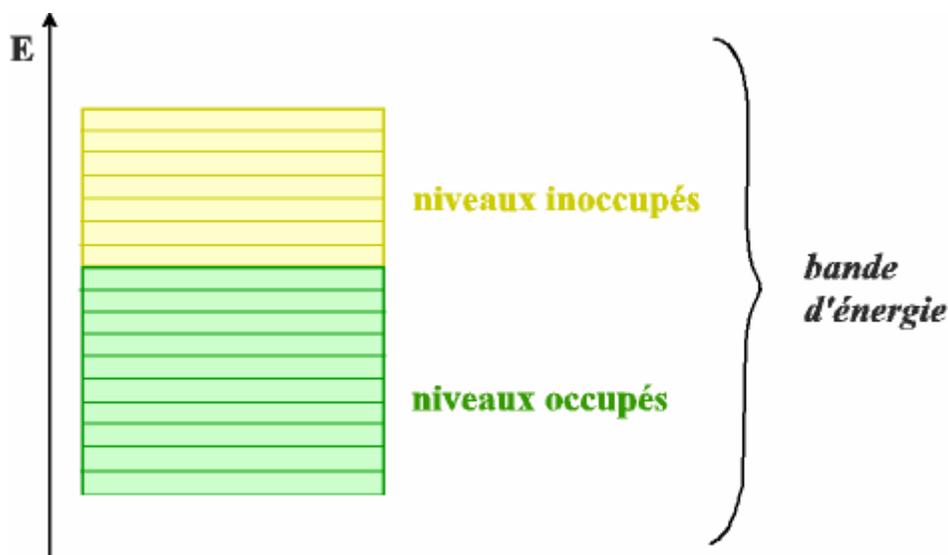


Figure VII.5 : cas d'un atome isolé.

En général les niveaux d'énergie accessibles aux électrons atomiques forment ce qu'on appelle une bande d'énergie. Tous les niveaux d'une bande ne sont pas nécessairement occupés. C'est le cas notamment s'il n'y a pas assez d'électrons atomiques pour tous les niveaux. A l'équilibre, si la température est suffisamment basse, les électrons remplissent les niveaux d'énergie moindres à raison de deux électrons par niveau. Ce dernier point résulte d'une autre particularité de la mécanique quantique, le principe d'exclusion de Pauli, d'après lequel il ne peut pas y avoir plus de deux électrons par niveau d'énergie.

Dans la matière, les différents atomes s'agencent pour former un réseau et s'influencent mutuellement. Il en résulte que les niveaux d'énergie accessibles aux électrons sont modifiés et qu'on s'écarte de la situation simple de la figure VII.5, valable pour un atome isolé. Les niveaux

d'énergie ne sont plus régulièrement espacés et toujours proches ; il se forme de larges zones d'énergie dans laquelle aucune valeur de l'énergie n'est accessible aux électrons (voir figure VII.6).

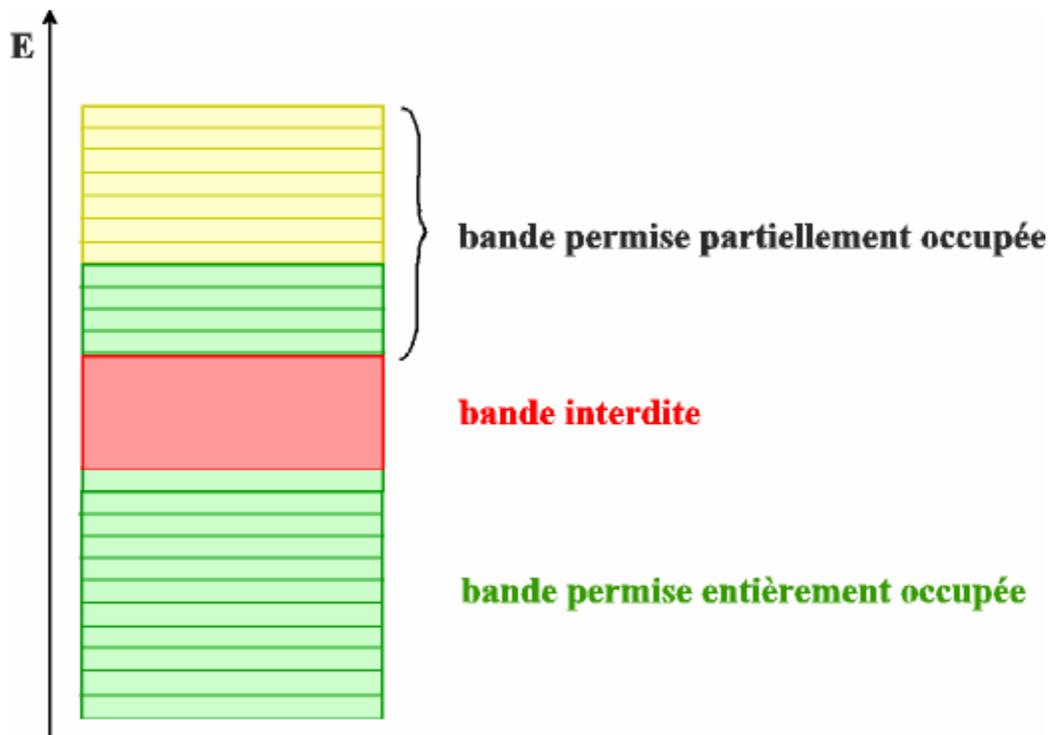


Figure VII.6 : cas d'un conducteur.

Les différents comportements des matériaux vis-à-vis de la conduction de l'électricité proviennent de la largeur des bandes interdites éventuelles et de la manière plus ou moins complète dont les bandes permises sont remplies.

Supposons que l'on fournisse de l'énergie aux électrons, par exemple en leur appliquant un champ électrique capable de réaliser un travail. Les électrons des niveaux d'énergie les plus bas ne peuvent accepter cette énergie car elle est insuffisante pour leur permettre d'atteindre le premier niveau inoccupé. En effet les niveaux les plus proches sont déjà occupés par deux électrons. Par contre, les électrons des niveaux d'énergie les plus hauts peuvent accepter cette énergie fournie par le champ électrique, à condition que le 1^{er} niveau vide soit proche. Par conséquent, ce sont les matériaux avec une bande d'énergie partiellement inoccupée, comme à la figure VII.6, qui sont conducteurs : une faible énergie permet de sauter au niveau supérieur, ils sont alors moins liés et peuvent circuler librement ; un courant s'établit.

Si les électrons d'un milieu ayant la plus haute énergie de liaison occupent les derniers niveaux d'une bande d'énergie permise, que celle-ci est complètement occupée, alors un champ

électrique faible, comme celui exercé par une pile, ne va pas fournir assez d'énergie à ces électrons pour leur permettre d'atteindre la bande d'énergie suivante, séparée par une large bande d'énergies interdites, typiquement d'une petite dizaine d'électronvolts. On se trouve alors en présence d'un isolant ; ce cas est illustré par la figure VII.7.

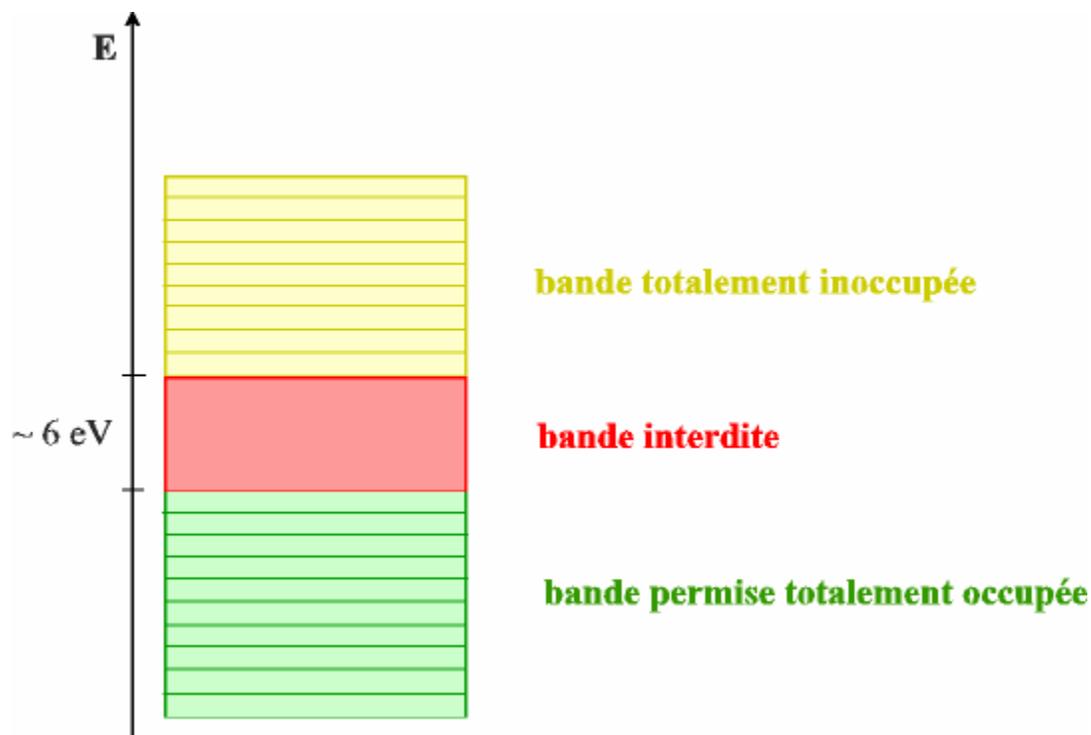


Figure VII.7 : cas d'un isolant.

Dans les semi-conducteurs, à température nulle, les électrons d'énergie la plus élevée remplissent aussi complètement une bande d'énergie permise, appelée bande de valence, comme dans le cas des isolants. Ce qui les différencie des isolants, c'est la largeur de la bande d'énergie interdite qui les sépare de la bande permise inoccupée, la bande de conduction. Dans le cas des semi-conducteurs, cette bande interdite est beaucoup plus étroite, 1,1 eV pour le silicium et 0,7 eV pour le germanium. Pour une différence de potentiel inférieure à une certaine valeur, le semi-conducteur se comporte comme un isolant : les électrons ne peuvent sauter dans la bande de conduction. Pour une différence de potentiel supérieure à cette valeur seuil, l'électron peut sauter dans la bande de conduction et le semi-conducteur devient conducteur, mais avec une conductivité moindre. Pour les semi-conducteurs, une augmentation de la température va donner à une fraction des électrons une énergie thermique suffisante pour sauter de la bande de valence à la bande de conduction. Il y aura donc plus d'électrons pour participer au courant électrique. Dans

un semi-conducteur, la résistivité diminue avec la température, contrairement aux métaux, ce qui conduit à un coefficient thermique négatif (voir tableau VII.1).

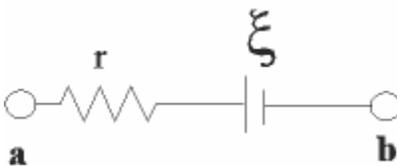
Lorsqu'un électron de valence d'un semi-conducteur passe dans la bande de conduction, il laisse derrière lui, dans la bande de valence, un trou. Un électron de valence d'énergie voisine d'un atome voisin peut venir combler ce trou laissant derrière lui un nouveau trou. Ce trou dû à l'absence d'un électron négatif, est équivalent à une charge positive et se déplace dans le semi-conducteur. Alors que dans les métaux, le courant est toujours dû à un mouvement de charges négatives, les électrons, dans les semi-conducteurs, le courant électrique est tantôt dû à un mouvement d'électrons, tantôt à un mouvement de "trous" de charge positive.

VII.5 : La f.é.m. et la tension aux bornes

Un instrument qui, comme une pile ou un générateur d'électricité, transforme un type d'énergie quelconque, chimique, mécanique, nucléaire ou autre, en énergie électrique porte le nom de source de force électromotrice. On appelle force électromotrice la différence de potentiel entre les bornes d'une telle source lorsqu' aucun courant ne s'écoule vers un circuit extérieur et on représente généralement cette grandeur par ξ . En fait le terme de "force" électromotrice est inapproprié puisqu'il ne s'agit pas d'une force mais d'une différence de potentiel. C'est pourquoi, pour éviter toute confusion nous nous servirons surtout de l'abréviation pour force électromotrice : f.é.m.

On observe couramment que lorsqu'une pile débite du courant, la tension entre ses bornes devient inférieure à la valeur nominale de sa f.é.m. Cela résulte de ce que le courant débité par la pile doit aussi circuler dans l'électrolyte : des ions doivent atteindre l'une ou l'autre des électrodes. Ceux-ci ont des collisions avec les atomes du milieu et sont freinés dans leur progression, tout comme les électrons de conduction dans un métal. La pile exerce donc elle aussi une certaine résistance au passage du courant, appelée résistance interne et symbolisée par r . Dans une pile, comme dans toute source de f.é.m., tout se passe comme si on avait en série avec une source de f.é.m. parfaite qui aurait toujours une différence de potentiel égale à la f.é.m., soit ξ , une résistance r (voir figure VII.8a).

a)



b)

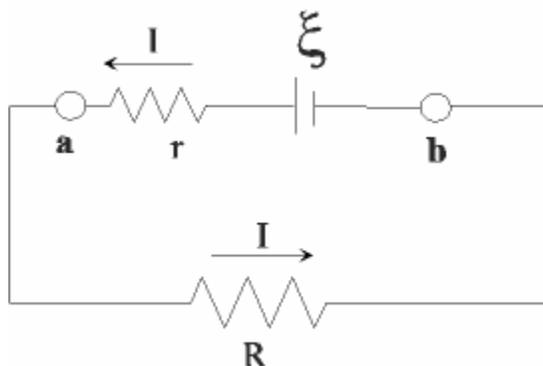


Figure VII.8.

La résistance interne d'une f.é.m. se trouve à l'intérieur de la source de f.é.m. et on ne peut jamais l'en dissocier. La tension que l'on peut mesurer est celle présentée aux bornes de l'appareil, soit a et b.

Lorsque la source de f.é.m. ne débite aucun courant (voir figure VII.8a), la différence de potentiel aux extrémités de r vaut : $\Delta V = r I = r \times 0 = 0$ et la borne positive (longue barre) de la f.é.m. est au même potentiel que a : $V_{ab} = V_a - V_b = \xi$.

Lorsque la source de f.é.m. débite un courant I (voir figure VII.8b), la différence de potentiel aux extrémités de r vaut $\Delta V = rI \neq 0$ et on a :

$$\boxed{V_{ab} = \xi - r I}$$

(VII. 10)

VII.6 : La puissance électrique

L'énergie électrique peut se convertir aisément en d'autres formes d'énergie : les moteurs servent à transformer de l'énergie électrique en travail mécanique. Des appareils comme les radiateurs, les poêles, les grille-pain et les sèche-cheveux transforment l'énergie électrique en énergie thermique dans une résistance appelée "élément chauffant".

Cette conversion de l'énergie électrique en énergie thermique est due au courant qui passe dans la résistance : les électrons de conduction entrent en collision avec les atomes de la résistance. Lors de ces collisions, chaque électron cède une partie de son énergie cinétique à l'atome avec lequel il se heurte. Par conséquent, l'énergie cinétique moyenne des atomes augmente, ce qui fait monter la température de la résistance. En effet, la température d'un corps est associée à l'énergie cinétique d'agitation thermique des molécules qui le composent. L'énergie thermique accrue de la résistance se transmet, par conduction et par convection, à l'air d'un radiateur ou aux aliments dans une poêle ; elle se propage par rayonnement au pain dans un grille-pain.

Pour déterminer la puissance d'un appareil électrique, on utilise le fait que l'énergie transformée lorsqu'une charge infinitésimale dq se déplace sous l'effet d'une différence de potentiel V , correspond à $dU = dq V$ (équation (VI.9)). Si dt désigne le temps pendant lequel la charge dq se déplace sous l'effet de V , la puissance P , qui représente le taux de transformation de l'énergie, (voir III.18) s'exprime par :

$$P = \frac{dU}{dt} = \frac{dq}{dt} V$$

Or la charge qui s'écoule par unité de temps, dq/dt , n'est autre que le courant électrique I (voir (VII.2)). On obtient donc :

$$\boxed{P = I V}, \quad (\text{VII.11})$$

où I désigne le courant qui passe dans l'appareil et V , la différence de potentiel qui est appliquée à ses bornes. Dans le SI, la puissance électrique s'exprime par la même unité que n'importe quel autre type de puissance, soit le watt (voir section III.7).

La relation (VII.11), peut s'écrire de deux autres manières, en utilisant la relation qui définit la résistance, $R = V / I$ (VII.4) :

$$P = I (RI) = RI^2 \quad (\text{VII.12})$$

$$P = \frac{V}{R} \cdot V = \frac{V^2}{R} \quad (\text{VII.13})$$

Si la résistance est ohmique, c'est-à-dire constante, les deux relations ci-dessus montrent que P est proportionnel à I^2 et à V^2 .

VII.7 : Le courant alternatif

Lorsqu'on relie une pile à un circuit, le courant se déplace de façon régulière dans une direction. On parle alors de courant continu ou DC (pour "Direct Current" en anglais) (voir figure VII.9.a). Par contre les génératrices de courant des centrales électriques produisent un courant qui change de direction plusieurs fois par seconde, qu'on appelle courant alternatif ou AC (pour "Alternative Current" en anglais). La variation dans le temps de l'intensité de ce courant a généralement une forme sinusoïdale (voir figure VII.9.b). C'est le cas du courant fourni à nos installations domestiques et industrielles.

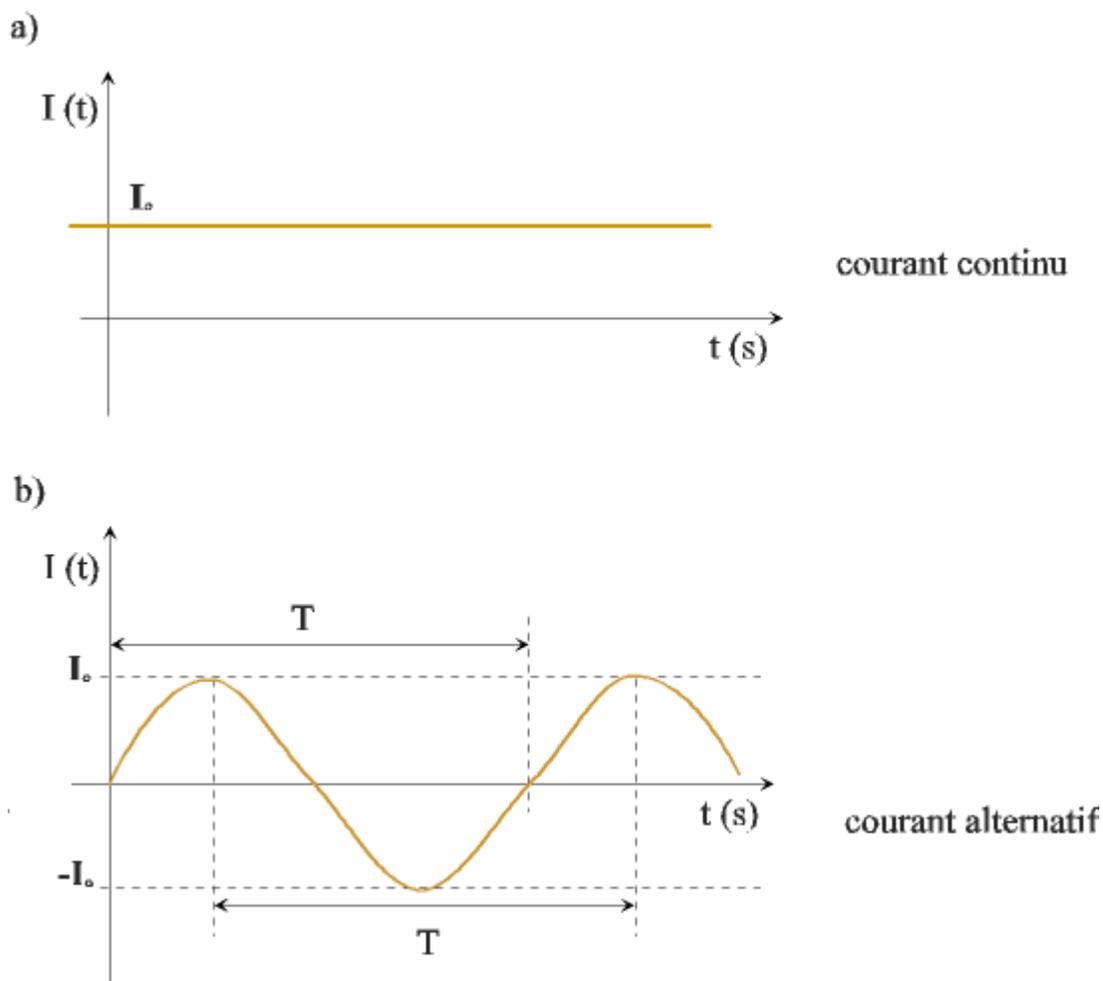


Figure VII.9.

Lorsque le courant alternatif a une forme sinusoïdale, il prend une valeur maximum, I_0 , que l'on appelle l'amplitude du courant. Il varie alors entre $+ I_0$ et $- I_0$ (voir figure VII.9 b) et on peut écrire :

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_0 \sin (2 \pi f t), \quad (\text{VII.14})$$

où f est la fréquence du courant, c'est-à-dire le nombre de fois par seconde que le courant effectue une période T complète, c'est-à-dire le nombre de fois par seconde qu'il passe par I_0 . En Belgique la fréquence du courant fourni dans les installations domestiques est de 50 Hz. On écrit aussi :

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_0 \sin (\omega t), \quad (\text{VII.15})$$

où on a posé :

$$\omega = 2 \pi f. \quad (\text{VII.16})$$

Nous verrons que si le courant fourni par une génératrice a une forme sinusoïdale c'est parce que la tension qu'elle fournit est sinusoïdale. En effet, dans le cas d'un circuit qui a une résistance ohmique R , on a :

$$\mathbf{V} = \mathbf{R I} = \mathbf{R I}_0 \sin (2 \pi f t) = \mathbf{V}_0 \sin (2 \pi f t)$$

où la tension maximale vaut :

$$\mathbf{V}_0 = \mathbf{R I}_0 \quad (\text{VII.17})$$

La figure VII.9.b permet d'observer que le courant sinusoïdal est aussi souvent positif que négatif : le courant moyen est nul, ce qui ne veut pas dire que le courant alternatif ne dissipe pas de puissance, ni qu'aucune chaleur n'est produite dans un fil électrique dans lequel passe un courant alternatif. En effet, dire que le courant est aussi souvent positif que négatif veut dire que la moitié du temps les électrons circulent dans une direction, l'autre moitié du temps dans l'autre direction. Dans les deux cas les électrons subissent des chocs avec les atomes du conducteur et il y a échauffement. En effet, la puissance instantanée, vaut dans le cas d'un courant alternatif sinusoïdal :

$$\mathbf{P} (t) = \mathbf{R I}^2 (t) = \mathbf{R I}_0^2 \sin^2 (2 \pi f t).$$

Faisant intervenir le carré du sinus, la puissance instantanée n'est jamais négative : elle est positive la plupart du temps et ne s'annule que lorsque la fonction sinus s'annule, c'est-à-dire, chaque demi période (voir figure VII.10).

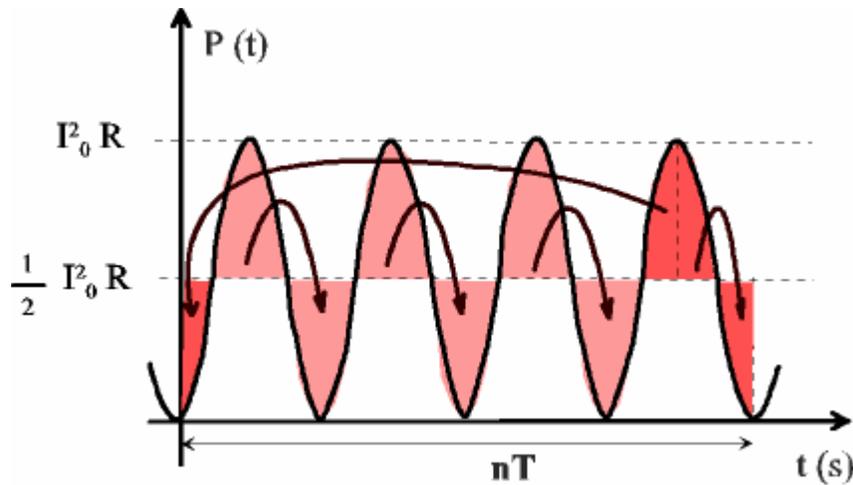


Figure VII.10.

La valeur moyenne de la puissance se calcule sur un nombre entier de période, soit nT . Pour l'estimer, on fait la somme de toutes les valeurs prises par la puissance durant cet intervalle de temps, c'est-à-dire :

$\int_0^{nT} P(t) dt$ et on divise par l'intervalle de temps, ce qui donne :

$$P_m = \int_0^T R I_0^2 \sin^2(2\pi ft) dt / T,$$

en choisissant $n = 1$. Cette intégrale peut être estimée de manière graphique si on se souvient que l'intégrale définie représente l'aire de la surface délimitée par la fonction intégrée et les bornes d'intégration. En effet, cette surface a la même aire que le rectangle de hauteur $\frac{1}{2} I_0^2 R$ et de base nT : les bosses viennent remplir les creux. Dès lors :

$$P_m = \frac{\frac{1}{2} I_0^2 R \times nT}{nT}$$

Et la puissance moyenne est donnée par :

$$\boxed{P_m = \frac{1}{2} I_0^2 R} \quad (\text{VII.18})$$

En tenant compte de relation (VII.17), elle peut aussi s'écrire :

$$\boxed{P_m = \frac{1}{2} I_0 V_0} \quad (\text{VII.19})$$

$$\boxed{P_m = \frac{1}{2} \frac{V_0^2}{R}} \quad (\text{VII.20})$$

Les relations VII.18, VII.19 et VII.20 montrent que la puissance moyenne dissipée par un courant alternatif de forme sinusoïdale d'amplitude I_0 dans une résistance R , fourni par une tension d'amplitude V_0 , est la même que la puissance instantanée dissipée par un courant continu qui aurait une intensité constante :

$$I_{\text{eff}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} \quad (\text{VII.21})$$

fournie par une tension continue :

$$V_{\text{eff}} = \frac{V_0}{\sqrt{2}} \quad (\text{VII.22})$$

C'est pourquoi I_{eff} et V_{eff} sont appelés courant efficace et tension efficace.

VII.8 : Exercices

1. Un courant de 1 A circule dans un fil. Combien d'électrons passent par seconde en un point du fil ? (R : $6,25 \cdot 10^{18}$).
2. Un oiseau est posé sur une ligne de transmission électrique transportant un courant de 1800 A et ayant une résistance de $2,0 \times 10^{-5} \Omega$ par mètre. Si ses pattes se trouvent à 3,0 cm l'une de l'autre, quelle tension ressent-il ? (R : $1,1 \cdot 10^{-3}$ V).
3. Une ampoule de 100 W oppose au courant une résistance d'environ 12Ω lorsqu'elle est à température ambiante (20°) et de 140Ω lorsqu'elle est allumée et chauffée. Évaluez la température du filament lorsque l'ampoule est allumée en supposant que son coefficient thermique de résistivité α vaut en moyenne $0,0060^\circ\text{C}^{-1}$ pour cet écart de température. (R : 1798°C).

4. Une pile produit 49,9 V lorsqu'elle débite un courant de 5,5 A et 58,0 V lorsqu'il s'en écoule 1,8 A. Calculez sa f.é.m. et sa résistance interne (R : 62 V et 2,2 Ω).
5. Une centrale électrique fournit 560 kW à une usine au moyen d'une ligne de tension ayant une résistance de 3,2 Ω . Déterminez la quantité de puissance économisée si l'électricité est transportée sous une tension de 40 000 V plutôt que de 12 000 V. (R : 6342 W).
6. A l'intérieur d'une maison, l'installation électrique doit comporter des fils assez épais pour qu'ils ne chauffent pas au point de déclencher un incendie. Quel diamètre doit avoir un fil de cuivre destiné à transporter un courant maximal de 40 A sans produire plus de 1,6 W de chaleur par mètre de longueur ? (Résistivité du cuivre : $1,7 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$; R : 4,7 mm).
7. On relie la bobine d'un radiateur d'une résistance de 20 Ω à une ligne de tension alternative de 240 V (valeur efficace). Déterminez la quantité de puissance moyenne utilisée. Quelles sont les valeurs maximale et minimale de la puissance instantanée ? (R : 2880 W ; 5760 W ; 0 W).
8. L'intensité d'un courant se traduit par l'équation suivante : $I = 2,8 \sin 220 t$, où I est exprimé en ampères et t en secondes. Déterminez a) la fréquence et b) la valeur efficace du courant. c) S'il s'agissait du courant qui traverse une résistance de 60 Ω , par quelle équation pourrait-on exprimer la tension en fonction du temps ? (R : 35 Hz ; 1,98 A ; $168 \sin 220 t$).