Qu'est-ce que le courant électrique ?

(Suite voir N° 1478)

NOUS avons donc laissé des électrons prêts à partir, capables d'être renouvelés en nombre énorme par des actions chimiques. Nous savons ce qui peut les mettre en route : la répulsion mutuelle des charges de même sens et l'attraction mutuelle des charges de sens contraire. A partir de ces forces de répulsion et d'attraction nous avons pu définir ce qu'est une unité de charge (précisons que la définition « officielle » du Coulomb n'est pas basée sur une mesure de force de répulsion). Le travail à effectuer contre ces mêmes forces pour porter une charge unité d'un point A à un point B nous a servi à mesurer la « différence de potentiel » entre A et B, exprimée en volts. Un Volt représente un travail de un Joule pour amener une charge de un Coulomb.

Il est temps de laisser maintenant ces électrons prendre leur mouvement. Un simple fil reliant deux points entre lesquels il y a une différence de potentiel permettra ce mouvement.

POURQUOI UTILISER UNE PILE ?

S'il suffit que deux corps chargés présentent l'un par rapport à l'autre une différence de potentiel pour que le seul fait de les relier par un fil provoque l'apparition d'un courant électrique, on peut se demander pourquoi on n'a pas étudié plus tôt ces courants, puisqu'il y avait des « machines électriques » au dix-septième siècle.

Cela tient, rappelons-le, au fait que ces machines ne permettaient que la production, par frottement, de charges insignifiantes. On pouvait les entasser dans des conducteurs sous des différences de potentiel énormes par rapport à la Terre, mais les charges étaient si faibles que, dès l'établissement d'un circuit entre ce conducteur chargé et la Terre, le passage du courant électrique ne durait que quelques microsecondes, ne permettant pratiquement aucune étude.

C'est un peu comme si l'on avait voulu étudier le vent en logeant, sous une pression énorme, quelques dixièmes de milligrammes d'air dans un volume de quelques millimètres cubes : en ouvrant la valve, on aurait bien eu un jaillissement d'air, à la fois violent (par sa vitesse) et dérisoire.

« Mais — objecteront les lecteurs — et ces fameux condensateurs, dérivés de la Bouteille de Leyde, ne peut-on pas les utiliser plus efficacement ? » En un sens oui, mais on reste encore dans les charges très faibles, on passe des microcoulombs aux millicoulombs. Si l'on veut avoir plus de charges, la machine électrique devra travailler pendant un temps très long.

Et même, avec un condensateur de capacité assez importante (on n'ira d'ailleurs pas tellement loin dans ce domaine), il n'y aura qu'un courant électrique bien court pendant la décharge : la machine électrique est hors d'état de remplacer, à mesure de leur disparition, les charges consommées. S'il lui faut dix bonnes secondes pour produire un dixième de microcoulomb, cela ne représente qu'une intensité rigoureusement négligeable.

L'action chimique, elle, peut dégager des dizaines de coulombs à chaque seconde. Nous avons vu que, en contrepartie, elle ne peut les élever à un potentiel élevé. Mais elle continuera à agir tant qu'on en aura besoin, elle va remplacer immédiatement les charges consommées par le courant.

Donc, l'action de la pile est idéale pour l'étude du courant électrique. Bien sûr, il y a d'autres moyens de produire des charges, mais il nous semble plus rationnel d'attendre un peu avant d'en parler.

LE PREMIER « EFFET » DU COURANT

Donc, nous allons permettre aux électrons d'aller du zinc vers l'électrode peu attaquable ou inattaquable (cuivre ou charbon) de la pile. C'est à l'extérieur de la pile qu'ils vont du zinc au charbon ; dans la pile, ils vont du charbon au zinc. C'est d'ailleurs là que le passage est le plus malaisé, en général, et c'est cela qui va contrecarrer l'action chimique : si on fait passer trop d'électrons chaque seconde du zinc au charbon à l'extérieur de la pile, leur passage dans la pile se fera mal, il y aura réduction de la différence de potentiel entre le zinc et le charbon. Nous allons donc nous contenter, au début, d'un débit relativement modéré à l'extérieur de la pile. Nous offrirons aux électrons un passage relativement facile (un conducteur métallique par exemple) mais pas **trop** facile : le fil sera un peu long et d'un diamètre plutôt petit.

Nous pourrons constater (nous indiquerons plus loin comment) que la différence de potentiel entre le zinc et le charbon, un peu réduite à partir du moment où nous avons offert un passage aux électrons en dehors de la pile, se maintient à une valeur assez voisine de celle que l'on avait pu mesurer quand la pile ne débitait aucun courant.

Donc, tout se passe comme si (fig. 1) nous disposions d'un récipient contenant de l'eau, A, relié à un autre récipient, B, par un tube T relativement long et de petite section. Il y a écoulement depuis A vers B sous l'effet de la différence H de niveau entre les surfaces de l'eau dans A et dans B. Une pompe, P, représentant l'action chimique de la pile, aspire en permanence l'eau par son tube (1) pour la refouler par son tube (2). Elle maintient donc la différence de niveau H relativement constante.

L'ensemble de la figure 1 est l'analogie hydraulique d'une pile dont les électrodes (zinc et charbon) sont reliées à l'extérieur de la pile par un fil assez fin et assez long.

Nous ferons une première constatation : le fil **chauffe.**

C'est le premier « effet » du courant, appelé effet thermique. Il résulte de la transformation en chaleur de l'énergie fournie par les charges en passant d'une électrode à une autre.

Bien sûr, il y a passage de courant par les électrons et l'on devrait parler de courant de charges allant du zinc au charbon à l'extérieur de la pile. Mais, comme nos arrière-grand-pères nous ont fait la mauvaise plaisanterie (involontaire) de choisir un signe pour les « électricités » qui a rendu négative la charge de l'électron, on parle souvent de « sens conventionnel » du courant, allant du positif (charbon) au négatif (zinc) à l'extérieur de la pile, et transporté par des « charges positives » (qui n'existent pas ici).

Donc, chaque coulomb qui « tombe » (en parlant de potentiel) du charbon vers le zinc fournit une énergie (un travail) égal à la différence de potentiel en volts entre le charbon et le zinc. Si cette différence est de 1,5 V, il y a 1,5 J fourni par Coulomb passant. Or, un Joule, cela représente environ 4,18 calories (calorie-gramme, ou micro thermie, soit la quantité de chaleur permettant d'échauffer un gramme d'eau de un degré).

Il y a donc dégagement de chaleur, la totalité de l'énergie électrique étant transformée en chaleur.

Cet effet thermique est extrêmement important. Il peut être perturbateur (on parle alors de « pertes Joules », soit de pertes par « effet Joule », puisque c'est ainsi que l'on nomme l'effet thermique). Il peut être très bénéfique si l'on veut employer le courant électrique pour produire de la chaleur.

Si l'on a choisi le fil de façon telle que le dégagement de chaleur soit suffisant pour le porter à plus de 600 °C, le fil rougit. En allant un peu plus loin, il émet de la lumière : c'est ainsi que fonctionnent les ampoules électriques.

Dans les premières années de l'électrification, on n'utilisait guère l'électricité autrement que pour s'éclairer et se chauffer, donc l'effet thermique était le plus important de tous.

CHIFFRONS LE DEBIT

On voit que, dès que l'on a commencé à laisser circuler les électrons, un phénomène nouveau est apparu. Il y en aura d'autres, mais il semble important, dès maintenant, de pouvoir repérer par un nombre l'importance du phénomène « courant électrique ».

On peut dire (ce n'est pas la définition « légale ») que l'on appelle « unité d'intensité » le débit de charges qui correspond au passage d'une unité de charge pendant une unité de temps. Dans un courant d'eau, on parle de litres/seconde, ici on parlera de Coulombs/seconde. On donne à cette unité d'intensité du courant le nom d'un de nos plus grands physiciens : **l'Ampère.**

Donc, une intensité de I Ampères signifie que, chaque seconde, il passe I Coulombs. Pendant un temps T secondes, il passera donc T fois plus, soit I x T Coulombs.

Autrement dit, une charge Q ((Coulombs) est véhiculée pendant un temps T (secondes) par un courant d'intensité I (Ampères) si l'on a :

$$Q = I \times T$$

D'autre part, nous savons que Q Coulombs, « tombant » d'une différence de potentiel de V volts fournissent une énergie Q x V. Si nous remplaçons Q par I x T, nous voyons qu'une pile aux bornes de laquelle il y a une différence de potentiel de V volts et qui débite une intensité I Ampères fournit donc, en un temps T, une énergie :

$$E = I \times T \times V$$

Nous pouvons maintenant parler d'une notion nouvelle : la **puissance.** Toute source d'énergie qui fournit une énergie E (en Joules) en un temps T (en secondes) délivre, de ce fait une puissance P qui est le quotient de l'énergie produite E par le temps T mis pour la produire. On chiffre ce quotient E/t en Watts.

Contrairement à ce que pensent beaucoup de gens, le Watt est une unité **mécanique.** On définit, en effet, le Newton (unité de force en système MKS) comme la force qui communique à l'unité de masse (le kilogramme) l'unité d'accélération (un mètre par seconde chaque seconde). On a ainsi une unité, le Newton, qui correspond approximativement au poids d'une masse de cent grammes.

A partir du Newton, on définit le Joule, unité de travail (ou d'énergie), comme étant le travail effectué par une force d'un Newton qui déplace son point d'application d'un mètre dans le sens de la force. A titre d'exemple, un homme moyen qui monte dans un escalier un étage (environ 3 m) effectue contre la pesanteur un travail voisin de 2 500 Joules.

Une source d'énergie qui fournit un Joule par seconde a donc une puissance d'un Watt. Un moteur de 2 CV Citroën fournit une puissance voisine de 10^4 W quand il marche au meilleur régime.

Donc, le Watt, unité **mécanique** de puissance s'applique **aussi** à la puissance fournie par un générateur électrique, mais ce n'est qu'un **cas particulier** de l'utilisation de cette unité.

Revenons à notre pile : nous avons vu qu'elle fournit une énergie E = V x i x t (en Joules) en un temps t (en secondes). En divisant cette énergie par le temps mis pour la fournir, soit t, on obtient la puissance P. En faisant la division de E (soit V x i x t) par t, il ne reste que V x i et on en déduit donc une première loi :

Le produit de la différence de potentiel (en volts) aux bornes de la pile par l'intensité débitée (en Ampères) donne la puissance fournie (en Watts), soit :

$$P = V \times i$$

DIVISONS LA DIFFERENCE DE POTENTIEL PAR L'INTENSITE

Donc, la différence de potentiel aux bornes d'une pile (pour simplifier, maintenant, nous dirons la « tension aux bornes » ou « la tension » tout court), quand on la multiplie par l'intensité du courant donne la puissance.

Il vient logiquement à l'esprit qu'il doit être intéressant de connaître le **quotient** de la tension par l'intensité.

A quoi cela doit-il correspondre ? La tension correspond, dans l'analogie hydraulique de la figure 1, à une différence de niveaux, donc à une « envie de passer » de l'eau. L'intensité correspond à un nombre de litres par seconde, donc à un « résultat ».

On voit que, pour une différence de niveau h donnée, le débit sera d'autant plus élevé que le tuyau T laisse mieux passer l'eau. En revanche, pour un tuyau défini, le débit augmentera si l'on augmente h. On voit qu'en divisant h par le débit, on caractérise le degré de « gène » apporté par le tuyau T au passage de l'eau. En effet, pour une valeur h donnée (fig. 2), le débit se réduit si cette « gène » augmente, donc, pour caractériser le degré de « gène » apporté par le tuyau, il faut mettre le débit au **dénominateur** (une **réduction de débit** correspond à une **augmentation de « gène »**).

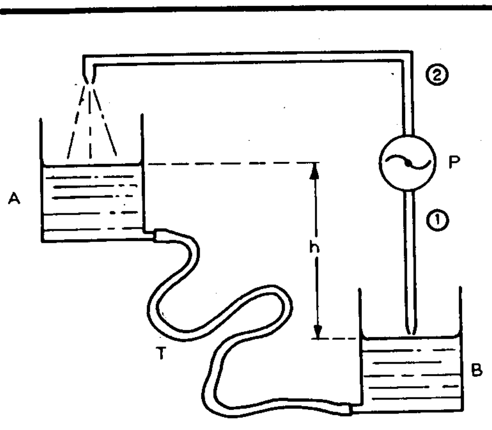

Fig. 1 – L'action d'une pile, élevant le potentiel des charges électriques, peut être comparée à celle d'une pompe P, aspirant par son tube (1) l'eau du récipient inférieur B pour la refouler dans le récipient supérieur A, maintenant entre les niveaux de l'eau dans ces deux récipients une différence quasi-constante h, malgré l'écoulement de l'eau de A vers B dans le tube T.

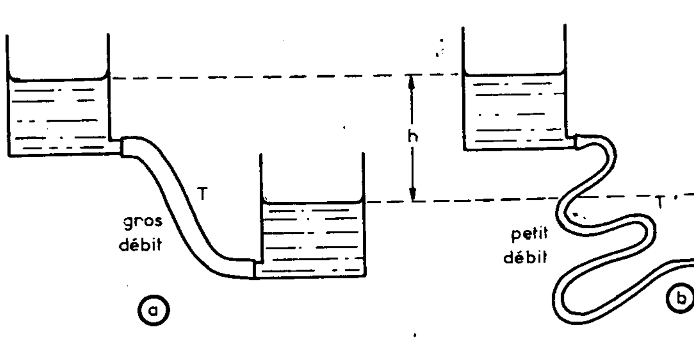

Fig. 2 – A différence de niveau h égale, il passe un gros débit d'eau (a) dans un tube T gros et court et un débit plus petit (b) dans un tube T' fin et long.

Pour cette même caractérisation, il faut mettre la différence de niveau h au **numérateur.** Si, pour deux tubes différents, T et T' (fig. 3), on a le même débit, mais avec une différence de niveau h' plus grande avec le tuyau T' que celle h, qui est nécessaire pour le tuyau T, on en déduit que T « gène » moins le passage de l'eau que T'. A une **augmentation** de h à débit égal correspond une **augmentation de « gène ».**

En électricité, on chiffrera donc la « gène » apportée au passage des électrons par un fil en divisant la tension aux bornes de ce fil (la différence de potentiel entre ses deux extrémités), exprimée en Volts, par l'intensité du courant qui passe dans ce fil, exprimée en Ampères.

Encore faut-il, pour que l'on puisse définir quelque chose de précis, que ce quotient caractérise bien le fil en question.

Si, par exemple, un fil donné laissait passer 0,2 A sous une tension de 3 V et 0,8 A sous une tension de 8 V, on pourrait dire que le « coefficient de gène » est, dans le premier cas, de 3/0,2 = 15 V/A (Volts par Ampère), alors que, dans le second, ce coefficient est de 8/0,8 = 10 V/A.

Pour caractériser la gène apportée par ce conducteur au passage du courant, il faudra donner toutes les valeurs utiles des intensités relevées correspondant à toutes les valeurs de tensions appliquées. On ne pourra savoir comment ce conducteur se comporte qu'en l'accompagnant d'une vraie « table des valeurs ».

LA LOI FONDAMENTALE !

Fort heureusement, un conducteur comme celui que nous venons d'évoquer, s'il existe, n'est pas le cas le plus fréquent. Les conducteurs faits d'un seul métal, suffisamment gros pour ne chauffer qu'à peine sous l'effet du dégagement de chaleur, ont une propriété **fondamentale :**

Le quotient de la tension aux bornes par l'intensité qui les parcourt est **constant,** indépendant de la tension et de l'intensité. Un tel « bon » conducteur se laisse, par exemple, traverser par 0,2 A sous 3 V, et par 0,6 A sous 9 V. Dans les deux cas, le quotient de la tension par l'intensité donne 15 V/A.

Donc, ce nombre 15 est bien caractéristique du degré de « gène » apporté par le conducteur ; il est indépendant des conditions de l'essai, il suffit à lui tout seul pour caractériser la « gène » au passage, pour dire comment le fil « résiste » au cheminement des électrons.

C'est la première fois, intentionnellement, que nous employons ce terme « résister ». Car, dans le cas d'un conducteur qui a le bon goût de maintenir un rapport constant entre la tension qu'il y a à ses extrémités et l'intensité du courant qui le parcourt du fait de cette tension, on peut caractériser ce conducteur par sa « résistance », qui se comptera en Volts par Ampère, ou, pour donner un nom nouveau, en Ohms.

Un conducteur dont la résistance est de un Ohm se laissera traverser par autant d'Ampères qu'il y a de Volts à ses bornes. Quand un conducteur a une résistance de quinze Ohms (on note 15 Ω), il y aura toujours un quotient de 15 quand on divisera la tension à ses bornes (en Volts) par l'intensité qui le parcourt (en Ampères).

Quand un conducteur suit cette loi (qui est de nature expérimentale, on a **constaté** que les fils métallique la suivaient), on dit qu'il « suit la loi d'Ohms ».

Quand un conducteur **ne suit pas** la loi d'Ohm, **on ne peut parler de sa résistance,** cette notion n'a plus de sens. On peut, tout au plus, parler de sa résistance apparente », quotient de la tension aux bornes par l'intensité, mais cette notion (d'ailleurs dangereuse, parce qu'assez trompeuse) ne vaut que si l'on précise dans quelles conditions on la mesure.

TOUTES LES LOIS D'OHM !

Nous avons parlé jusqu'ici de **la** loi d'Ohm. En réalité, il faudrait presque dire qu'il y en a plusieurs.

En effet, sous la forme que nous lui avons donnée plus haut, elle s'énonce :

Pour un conducteur métallique donné, maintenu à une température donnée, le quotient de la tension aux bornes par l'intensité qui passe est constant ; on l'appelle la résistance du conducteur en question.

Une telle façon de l'énoncer montre que nous avons imposé une certaine valeur de la tension aux bornes, et que nous avons mesuré l'intensité.

Mais on pourrait très bien faire en sorte que l'on impose, par un moyen adéquat que nous verrons plus loin, la valeur de **l'intensité** dans un conducteur donné ; que se passera-t-il ?

Comme le conducteur « gène » le passage des électrons, il y aura accumulation des charges à l'extrémité où elles « entrent » et apauvrissement de charges là où elles « sortent », tout à fait comme dans le cas d'une route où il y a des travaux qui gènent le passage des voitures : il y a un encombrement en amont de cette route, et un espace très dégagé en aval.

Pour en revenir à l'exemple hydraulique, nous supposons (fig. 4) une section du tuyau T dans laquelle on envoie un débit imposé, réglé par des vannes dont nous ne nous occuperons pas. Il y aura une pression P_1 en amont (mesurée par un manomètre M_1) et une pression P_2, plus petite, en aval comme l'indique le manomètre M_2.

Donc, aux bornes de notre conducteur, nous aurons une certaine différence de potentiel, causée par le passage des charges et par la résistance du conducteur.

La « seconde loi d'Ohm » nous dit que la différence de potentiel aux bornes de notre conducteur est proportionnelle à l'intensité du courant que nous y faisons passer. Pour rendre cela plus quantitatif, nous dirons que :

La différence de potentiel aux bornes d'un conducteur est égale au produit de l'intensité qu'on y envoie par une constante, caractéristique du conducteur, que l'on appelle la **résistance** de ce dernier.

Pour certains, la « seconde loi d'Ohm » résulte simplement d'une transformation mathématique de la première. En effet, la première s'écrivait :

$$\frac{V}{i} = R$$

et la seconde V = R x i, ce que l'on peut facilement déduire de la première formule. Oui, « mathématiquement », c'est vrai, mais, en fait, la « seconde loi » résulte d'une expérience différente de la première. Il n'est pas du tout équivalent d'imposer une valeur de tension puis de voir l'intensité qui en résulte, ou d'imposer une valeur d'intensité pour voir la tension qui en résulte. Cela vaut la peine d'y réfléchir un peu.

Il y aurait même une « troisième loi d'Ohm » : pour une tension donnée, l'intensité qui passe est inversement proportionnelle à la résistance du conducteur où on la fait passer.

Précisons bien que ces lois d'Ohm ne sont valables que pour des conducteurs métalliques, constitués **d'un seul** métal depuis un pôle de la pile vers l'autre. Si l'on a une jonction de deux métaux différents dans le circuit qui va d'un pôle à l'autre, il peut y avoir un effet supplémentaire, dit « effet Peltier » (dégagement ou absorbtion de chaleur à la jonction en fonction du sens et de la valeur du courant), qui est capable de fausser les proportionalités indiquées, surtout pour les faibles intensités.

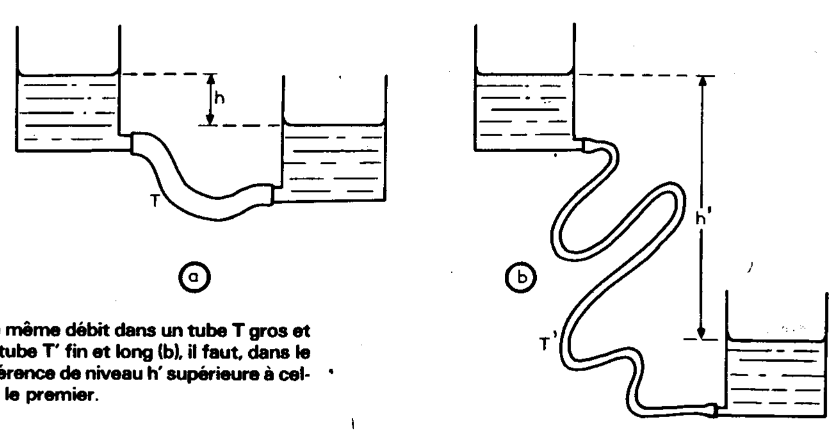

Fig. 3 – Pour avoir le même débit dans un tube T gros et court (a) et dans un tube T' fin et long (b), il faut, dans le second cas, une différence de niveau h' supérieure à celle qui suffisait dans le premier.

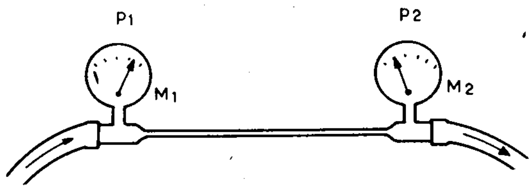

Fig. 4 – Si on impose un certain débit dans un tube T, il y aura une différence de pression p_1 p_2 (mise en évidence par les manomètres M_1 et M_2) entre le point où l'eau arrive dans T et le point par où elle en sort.

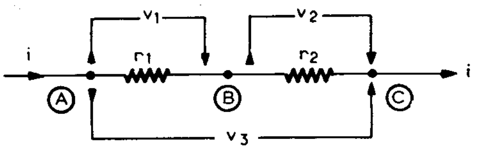

Fig. 5 - Si la même intensité i traverse le conducteur résistant AB et le conducteur résistant BC, il y aura, aux bornes de chacun d'entre eux, des tensions v_1 et v_2, proportionnelles aux valeurs de leurs résistances r_1 et r_2, qui vont s'ajouter pour donner la tension v_3 aux bornes de l'ensemble.

Pour des conducteurs non métalliques, la proportionalité n'est pas forcément vraie.

Enfin, pour un conducteur parfaitement métallique, de même nature sur tout le circuit, il peut intervenir un phénomène qui fait disparaître la proportionalité de la tension et de l'intensité : la variation de température du conducteur sous l'influence de la chaleur dégagée par le passage du courant lui-même.

Par exemple, si l'on considère une ampoule d'éclairage, on trouve, par exemple, que l'intensité qui la traverse sous une tension de 220 V est de 0,5 A, ce qui correspond à une résistance de 200/0,5 = 440 Ω, alors que, sous une tension de 2 V, le courant passant dans l'ampoule est de 0,05 A, soit une résistance de 2/0,05 = 40 Ω. Il ne faut pas en conclure que l'ampoule ne suit pas la loi d'Ohm, mais il n'y a qu'à regarder le filament pour voir qu'il est très chaud quand on lui applique 220 V, alors qu'il est tout à fait froid si la tension à ses bornes est de 2 V seulement. En se limitant à des tensions inférieures à 2 V, pour lesquelles l'échauffement du filament est négligeable, on trouverait bien un rapport constant, et égal à 40, entre la tension aux bornes et l'intensité qui passe.

LES ANNEES DE 1800 A 1820

Tout ce dont nous venons de parler constitue l'essentiel des connaissances des physiciens entre 1800 (découverte de la pile) et 1820 (expérience d'Oerstedt). Il s'agissait donc du premier effet du courant électrique, l'effet thermique, et de ses conséquences.

Il y avait déjà beaucoup à faire, avec ces notions de tension, d'intensité, de résistance.

Par exemple, on peut combiner entre elles des formules que nous avons déjà vues séparément.

La puissance fournie par une pile de tension V débitant une intensité i est, nous l'avons vu plus haut :

$$P = V \times i$$

Or, quand il passe i dans une résistance R, la tension V à ses bornes est :

$$V = R \times i$$

Si l'on remplace V par R x i dans la loi donnant la puissance, on trouve donc : $P = (R \times i) \times i$, ce qu'on écrit :

$$P = R \times i^2$$

Donc, la puissance débitée dans un conducteur est égale au produit de la résistance de ce conducteur par le carré de l'intensité qui y passe. C'est ce que l'on appelle la « loi de Joule ». On peut la considérer comme une conséquence de la loi d'Ohm, celle-ci étant de nature expérimentale, ou admettre la loi de Joule, trouvée par expérience, et en déduire la loi d'Ohm.

La loi $P = R \times i^2$ peut encore s'exprimer autrement, en remplaçant i par V/R et cela donne :

$$P = \frac{V^2}{R}$$

LE SECOND « EFFET » DU COURANT

Dès le début du dix-neuvième siècle, quelques années après la découverte de la pile, on découvrit **l'effet chimique** du courant. C'était assez normal, puisque l'on avait utilisé la production d'effets électriques par les actions chimiques, de voir s'il n'y avait pas réciprocité, autrement dit de chercher si le courant électrique ne produisait pas d'effet chimiques. Le résultat fut positif : le passage de courant électrique dans une solution la décompose. C'est ainsi que Davy découvrit les métaux alacalins, en décomposant la soude et la potasse par le courant électrique.

Cet effet chimique eut une conséquence assez importante. En effet, Faraday vit que la quantité de corps chimique produite par décomposition était proportionnelle à la quantité d'électricité ayant produit cette décomposition. Comme on peut facilement peser le produit dégagé, s'il s'agit d'un métal, par exemple, on en tira une manière de mesurer les quantités d'électricité.

Pendant longtemps, la définition du Coulomb fut la suivante : c'est la quantité d'électricité qui, traversant une solution de nitrate d'argent, provoque le dépôt d'une masse de 1,118 mg d'argent sur le fil par où le courant « sort » (au sens conventionnel, donc celui par où les électrons « entrent » dans la solution).

Un autre fait devait donner de l'importance à cet effet chimique du courant : il offrait la possibilité de déposer une couche mince et régulière de métal sur un autre métal : c'est la galvanoplastie (nickelage, dorure, argenture, etc.).

PARLONS UN PEU DES « CONDUCTEURS RESISTANTS »

Dès que l'on a eu l'idée de la proportionalité de la tension et du courant, le quotient de la première par l'intensité du second donnant la « résistance » d'un conducteur, on se mit à étudier cette résistance.

La première déduction faite fut que, en plaçant bout à bout deux conducteurs résistants, dont les résistances respectives sont r_1 et r_2, en faisant passer du courant dans le tout, on avait l'équivalent (fig. 5) d'un conducteur dont la résistance vaut $r_1 + r_2$.

En effet, faisons passer une intensité i dans les deux conducteurs. Aux bornes du premier, il apparaît une différence de potentiel $v_1 = r_1 \times i$, autrement dit, le potentiel du point (A) est supérieur de $r_1 \times i$ à celui du point (B).

De même, aux bornes du second conducteur, parcouru par le même courant i, il apparaît une différence de potentiel $v_2 = r_2 \times i$, autrement dit, le potentiel du point (B) est supérieur de $r_2 \times i$ à celui du point (C).

Or, le point (A) est à un potentiel supérieur de $r_1 \times i$ à celui du point (B), lui-même supérieur de $r_2 \times i$ à celui du point (C) : on en conclut que le potentiel du point (A) est supérieur de $r_1 \times i + r_2 \times i$ à celui du point (C).

Dans cette dernière expression, on peut mettre i en facteur. La différence de potentiel entre les points (A) et (C) peut donc s'écrire :

$$v_3 = (r_1 + r_2) \times i$$

Donc, tout se passe exactement comme si l'on avait, entre (A) et (B) un conducteur unique dont la résistance serait :

$$r_1 + r_2$$

On en tire une autre conclusion. Quand on considère un fil homogène, de section constante, parcouru par un courant, il y a évidemment la même tension aux bornes de chaque mètre de ce fil. Il y en aurait six fois plus aux bornes de six mètres de ce fil, donc :

La résistance est proportionnelle à la longueur.

LA « CONDUCTANCE »

Il y a une autre façon d'exprimer comment un conducteur « gêne » le passage du courant, plus exactement comment il le « facilite ». C'est la « conductance » de ce conducteur, qui est tout simplement l'inverse de la résistance, soit le quotient de 1 (un) par la résistance exprimée en Ohms.

On a longtemps employé, pour la conductance, l'unité « Mho » (que l'on rencontre souvent dans les ouvrages étrangers) parce que c'est le nom de Ohm renversé ; on le notait même avec un oméga majuscule retourné : ℧. On chiffre maintenant la conductance en unités appelées « Siemens » (S).

Un fil dont la résistance est de 4 Ω a donc une conductance de 0,25 S (0,25 = 1/4). Si sa résistance est de 0,02 Ω, il a donc une conductance de 50 S.

Comme l'intensité s'obtient en **divisant** la tension par la **résistance** R, elle s'obtiendra aussi en **multipliant** cette même tension par la **conductance** C (il revient au même de diviser par 5 que de multiplier par 1/5).

Pourquoi introduit-on cette notion de conductance ? Tout simplement parce qu'elle simplifie beaucoup certaines explications, en particulier celle qui montre par quoi l'on peut remplacer plusieurs conducteurs résistants mis en parallèle.

Supposons (fig. 6) que nous ayons branché sur une pile P (nous en voyons pour la première fois le symbole), entre ses pôles A et B, trois conducteurs résistants, dont les résistances sont respectivement r_1 (conductance $c_1 = 1/r_1$), r_2 (conductance $c_2 = 1/r_2$) et r_3 (conductance $c_3 = 1/r_3$).

La tension de la pile, différence de potentiel entre A et B, est V. Les courants qui passent dans les trois conducteurs sont donc :

$$i_1 = V/r_1 = V \times c_1$$
$$i_2 = V/r_2 = V \times c_2$$
$$i_3 = V/r_3 = V \times c_3$$

Il faut faire ici une remarque importante : puisque les électrons ne peuvent s'accumuler en un point, dans un endroit comme A, il y a forcément autant d'électrons à chaque seconde qui en partent que d'électrons qui y arrivent. Autrement dit, le courant total I débité par la pile ne peut qu'être égal à la somme des courants i_1, i_2 et i_3. On a donc : $I = i_1 + i_2 + i_3 = V \times c_1 + V \times c_2 + V \times c_3$

Dans la dernière expression, on peut mettre V en facteur, soit : $I = V \times (c_1 + c_2 + c_3)$.

Tout se passe donc comme si l'on avait mis, entre A et B, un conducteur unique, dont la conductance serait :

$$C = c_1 + c_2 + c_3$$

En effet, dans un tel conducteur, soumis à la tension V, le courant aurait bien l'intensité $I = V \times C$.

Comme beaucoup de gens sont plus habitués à manipuler les résistances que les conductances, on dit aussi que l'inverse de la résistance globale est égal à la somme des inverses des résistantes des conducteurs mis en parallèle :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}$$

Comme la conductance globale est la somme des conductances, on déduit qu'elle est plus grande que la plus grande des conductances des conducteurs mis en parallèle. On peut en conclure que la résistance globale est plus petite que la plus petite des résistances des différents conducteurs mis en parallèle.

Si l'on place en parallèle deux conducteurs qui ont la même résistance r (donc la même conductance $c = 1/r$), la conductance de l'ensemble est la somme des conductances, soit 2 c. La résistance globale est donc $1/2\,c = r/2$, soit la moitié de la résistance de chaque conducteur.

Donc, si nous prenons deux fils de même nature, de même longueur et de même section (même diamètre, par exemple), donc de même résistance r, quand nous les mettons en parallèle, nous obtenons une résistance globale r/2.

Avec n fils identiques en parallèle, la résistance globale serait r/n. Or, mettre n fils identiques en parallèle revient exactement, si on les place côte à côte, à multiplier la section du fil par n.

Donc : la résistance d'un fil est inversement proportionnelle à sa section.

Précisons bien qu'il s'agit de la **surface** de cette section ; si on double le diamètre d'un fil, on multiplie la surface de sa section par 4. En divisant le diamètre par 3, on divise la section par 9 (donc on multiplie la résistance par 9), si la longueur et la nature du fil restent les mêmes.

LA RESISTIVITE

Nous pouvons déduire de ce que nous venons de voir que, pour un métal donné, la résistance d'un fil constitué par ce métal s'exprime par une formule qui comporte la longueur du fil du numérateur (la résistance augmente proportionnellement à la longueur) et la section au dénominateur (la résistance diminue en raison inverse de la section). On a donc :

$$R = \rho \frac{L}{s}$$

Le coefficient est caractéristique du métal dont le fil est constitué. On l'appelle la « résistivité » de ce métal. On peut dire que c'est la résistance d'un « fil » dont la longueur est égale à l'unité, sa section étant aussi égale à l'unité. Ce serait donc la résistance, prise entre deux faces parallèles, d'un cube dont l'arête serait égale à l'unité de longueur. Une telle mesure serait extrêmement difficile, d'abord parce que cette résistance est très petite (pour un cube de cuivre de 1 m d'arête, on arrive à un soixante-millionième d'Ohm !), ensuite parce que l'on aurait de la peine à garantir la bonne répartition du courant dans le cube.

On préfère donc mesurer la résistance d'un fil de plusieurs dizaines de mètres de longueur et de moins d'un millimètre carré de section, puis on fait la correction adéquate.

C'est ainsi que l'on trouvera environ 1,6 Ω en mesurant la résistance à 25 °C d'un fil de cuivre de 100 m de longueur et d'une section de 1 mm² (cela correspond environ à un diamètre de 1,2 mm). Pour ramener cela à 1 m de longueur (100 fois moins), il faut diviser par 100 ; pour le ramener à 1 m² de section, soit un million de fois plus (un mètre carré, cela fait un million de millimètres carrés, en mille rangées de mille carrés de 1 mm de côté), il faut encore diviser par un million. Il faut donc diviser la résistance de 1,6 Ω par cent millions pour avoir celle du cube de cuivre de 1 m d'arête pris entre ses deux faces parallèles. On obtient donc : 1,6/100 000 000 soit environ : 1/60 000 000.

Quelle est l'unité qui va servir à exprimer la résistivité ? Nous allons le voir facilement en modifiant un peu la formule :

$$R = \rho \times \frac{L}{s}$$

En multipliant les deux membres par la section s, il vient :

$$R \times s = \rho \times L$$

et en divisant les deux membres par la longueur L, il vient :

$$R \times \frac{s}{L} = \rho$$

Le quotient s/L, surface divisée par une longueur, est la même chose qu'une longueur. La résistivité s'exprime donc comme le produit d'une résistance par une longueur, soit en $\Omega \times m$ dans le système MKSA (légal), soit en $\Omega \times cm$, unité cent fois plus petite. La résistivité du cuivre à 25 °C est donc voisine de 1,6 en micro-ohms x centimètres ($1,6\ 10^{-6}\ \Omega \times cm$).

Nous parlons toujours de résistivité à une température donnée, car elle varie notablement avec la température. Pour les métaux usuels, elle augmente d'environ 1 % pour 3 °C d'augmentation de température au voisinage de la température normale (15 ou 20 °C). Elle double à peu près à 300 °C, elle décuple à 3 000 °C, (température des filaments des lampes à incandescence normales).

Le meilleur conducteur, celui dont la résistivité est minimale, est l'argent. Le cuivre est un tout petit peu plus résistant, l'aluminium a une résistivité environ double de celle du cuivre, le fer à peu près le triple du cuivre.

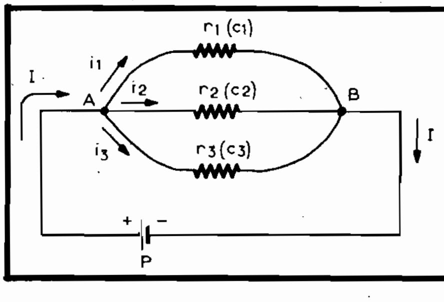

Fig. 6 – Si l'on place en parallèle les conducteurs résistants de résistances r_1, r_2 et r_3, le courant total I, égal à la somme des courants i_1, i_2 et i_3, sera proportionnel à la somme des conductances des différents conducteurs.

LES « RESISTEURS »

Nous terminerons par un problème de dénomination. Nous avons parlé, jusqu'ici, de « conducteur résistant ». On réalise, et les lecteurs de la Revue le savent bien, des conducteurs résistants ayant des résistances données, inscrites dessus, souvent sous forme de bandes de couleurs correspondant à un code. On appelle (hélas !) ces éléments des « résistances », ce qui crée une confusion regrettable entre l'élément technologique (le composant à deux fils) et une propriété, ce qui fait que l'on en arrive à parler de la « résistance ».

Cette ambiguité n'existe pas en anglais, car on y emploie le terme « résistance » pour la propriété (la valeur en Ohms) et « resistor » pour le composant doué de cette propriété.

Nous nous permettrons donc, par la suite, d'utiliser un néologisme : nous désignerons sous le nom de « résisteur » l'élément (le composant), réservant le nom de « résistance » pour la propriété de ce composant, ou pour l'expression de la valeur en ohms.

POUR ALLER PLUS LOIN...

Nous lancerons-nous maintenant dans l'étude de l'effet magnétique du courant ? Non, c'est encore trop tôt, nous avons encore bien des choses à voir sur les résistances, le sujet n'est pas épuisé. Ce n'est qu'après que l'on pourra aborder l'électromagnétisme. Que ceux qui savent tout cela depuis longtemps nous excusent (mais peut-être cette révision de ce qu'ils savent aura-t-elle permis de clarifier leurs idées ? Nous le souhaitons !).

(à suivre)

J.-P. OEHMICHEN
Ingénieur E.P.C.I.