Qu'est-ce que le courant électrique ?

PROMENADE AUTOUR DE LA LOI D'OHM

(Suite voir N° 1482)

AYANT pris contact avec les lois d'Ohm, nous avons vu déjà comment se comportaient les « résisteurs » (rappelons que nous utilisons systématiquement ce néologisme pour éviter la confusion entre le « résisteur », composant utilisé et la « résistance », propriété qu'a le résisteur de gêner le passage du courant).

Nous avons même envisagé la notion de conductance, ce qui nous a permis de voir que la résistance d'un fil métallique était proportionnelle à sa longueur et inversement proportionnelle à sa section : nous avons extrait de ce fait la notion de « résistivité ». Nous avons également vu que, quand on place des résisteurs en **série,** leurs résistances s'ajoutent pour donner la résistance totale ; quand on les place en **parallèle,** ce sont leurs **conductances** qui s'ajoutent pour donner la conductance totale.

On pourrait penser que « **nous savons tout** » sur la loi d'Ohm... ce serait une attitude infiniment orgueilleuse : l'auteur de ces lignes, exerçant le métier d'électronicien depuis plus de trente ans est parfaitement conscient de ne pas **savoir** « tout » sur la loi d'Ohm...

Il reste à **savoir** comment on combine les résisteurs pour obtenir différentes possibilités. Cela ne sera pas trop compliqué, et la connaissance de ces quelques points nous aidera beaucoup par la suite.

L' « EFFET OHM » ET... L'AUTRE

Les physiciens aiment bien appeler « effet Chose » toute manifestation d'une loi physique. C'est l' « effet Archimède » qui les aide à se maintenir sur l'eau pendant qu'ils nagent. Donc, pour ne pas rompre la tradition, nous appellerons « effet Ohm » l'apparition d'une différence de potentiel aux deux bouts d'un résisteur quand on y fait passer un courant électrique.

Nous verrons que cet « effet » peut être fort utile, en particulier lorsque l'on souhaite, par exemple, mesurer une intensité faible, en ramenant cette mesure à celle d'une chute de tension aux bornes d'un résisteur, de forte résistance, parcouru par le courant à mesurer.

Mais, hélas, il y a bien des cas où cet « effet Ohm » est une catastrophe. Bien sûr, dans un conducteur totalement dépourvu de résistance, le courant électrique circule parfaitement, mais... ce n'est pas évident de réaliser un tel conducteur. Nous verrons plus tard que l'on peut y arriver avec du plomb amené à – 269 °C... ce qui est peu pratique. On s'en **approche** avec des fils de cuivre courts et de forte section, mais on ne fait que s'en approcher.

En quoi cela va-t-il nous gêner ? En introduisant des tensions parasites dans nos circuits.

Supposons (fig. 1) que nous disposions d'une pile P parfaite, dans laquelle l'action chimique est si totale que la différence de potentiel entre le charbon (positif) et le zinc (négatif) soit rigoureusement indépendante du courant consommé (tant que ce dernier ne dépasse pas un certain maximum).

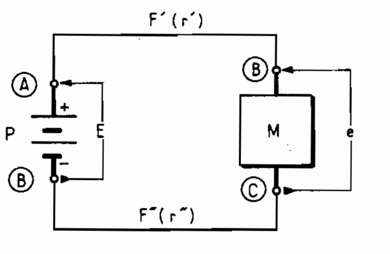

Fig. 1 Une pile « parfaite » P, reliée par des fils de résistance r' et r" au montage alimenté M fournit, aux bornes de ce dernier, une tension e inférieure à E, en raison de la chute de tension aux bornes des fils.

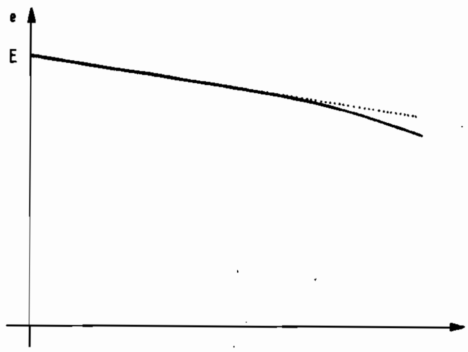

Fig. 2 – Si l'on trace la courbe donnant la variation réelle de la tension e aux bornes d'une pile en fonction du courant i débité, on voit que la loi se rapproche d'une loi linéaire (en pointillé) correspondant à une résistance parasite inhérente à la pile, placée à l'intérieur de celle-ci : c'est l'horrible « résistance interne », cause de tant de maux.

Nous serons bien obligés de relier cette pile admirable au montage M où nous souhaitons envoyer le courant par des fils F' et F". Ces fils ont donc des résistances, r' et r" respectivement.

L'intensité fournie par la pile P au montage M passe par ces fils. Il y a donc, entre les points A et B, une différence de potentiel v égale à :

$$v' = r' \times i$$

et, entre C et D, une autre différence de potentiel v" égale à :

$$v'' = r'' \times i$$

Dans ces deux fils, le point par où le courant « entre » (au sens conventionnel du mot, c'est-à-dire le point où les électrons sortent) est positif par rapport à l'autre extrémité du fil. Les polarités des tensions parasites v et v' sont celles qu'indiquent les flèches de la figure 1. Donc, même si la pile, parfaite par hypothèse, maintient entre A et D une différence de potentiel E indépendante du courant i débité, nous n'aurons plus, entre B et C, soit aux bornes de M, que la tension :

$$e = E - v' - v''$$
$$= E - r' \times i - r'' \times i$$

On peut, dans cette dernière expression mettre i en facteur :

$$e = E - (r' + r'') \times i$$

Si l'on désigne la somme r' + r" par r, il vient :

$$e = E - r \times i$$

où r est la résistance totale des fils F' et F".

Donc, si nous traçons (fig. 2) la courbe donnant, pour chaque valeur de i, la tension e aux bornes de M, nous trouverons une droite descendante, ou tout au moins une portion de droite, car il se peut que des considérations diverses nous amènent à limiter le courant débité par la pile à une valeur maximale I_M.

Pour une intensité débitée I_o, nous voyons que, au lieu d'avoir la tension E, nous avons une perte, représentée sur la figure 2 par le segment AB, correspondant à la tension aux bornes des fils F' et F", soit en tout r x i_o.

Pour l'utilisateur, il y a là un fait désagréable : s'il veut faire des études pour lesquelles il souhaite alimenter son montage sous une tension donnée, il ne pourra le faire que si la consommation de ce montage est constante.

L'HORRIBLE « RÉSISTANCE INTERNE » !

Voici mise à jour une propriété souvent épouvantable (et quelquefois utile) des générateurs de courant : la tension qu'ils donnent n'est pas constante, elle dépend de l'intensité consommée.

On pourrait objecter que l'on peut améliorer les choses en prenant de très gros fils pour F' et F". C'est en partie vrai, mais... nous n'avons pas tout dit. Hélas ! La pile « admirable » envisagée plus haut n'existe pas : même à ses bornes, elle ne peut maintenir une tension E parfaitement indépendante des valeurs d'intensité débitées.

Pourquoi ? Tout d'abord parce que le zinc de la pile (et surtout le charbon) ne sont pas des conducteurs parfaits : ils ont, eux aussi, des résistances.

Ensuite (et surtout) parce que l'action chimique ne peut « reloger » les électrons immédiatement au niveau de potentiel souhaité (et constant), surtout si l'on demande à cette action un travail trop grand en un temps donné. Là aussi, l'effet se fera sentir sous forme d'une diminution de E quand on augmente l'intensité débitée i.

Comme, dans une certaine mesure, cet effet de réduction de E quand i augmente est assez proportionnel à i, on peut l'assimiler à l'effet d'une nouvelle résistance interne, qui s'ajoutera à celle des fils, du zinc et du charbon.

Il faut même préciser, quand il s'agit de piles, que la contribution (désastreuse) de l' « essoufflement de l'effet chimique » à la réduction de la tension de la pile est souvent bien plus importante que les « effets Ohm » des fils de connexion, du zinc ou du charbon de la pile.

Toute pile est donc « douée » (nous pensons que le mot « affectée » est plus exact...) d'une « résistance interne ». Puisque toutes les piles sont atteintes de cette « maladie honteuse », tout ce que nous pouvons faire, c'est de souhaiter que ladite résistance interne :

— soit aussi faible que possible,
— suive bien la loi d'Ohm ;

(ce qui serait encore meilleur serait la réunion de ces deux qualités).

Pour ce qui est d'avoir une résistance faible, on y arrive encore assez ; plus la pile est prévue pour une intensité élevée, moins sa résistance interne est grande, surtout au début de son fonctionnement. En ce qui concerne la bonne volonté que pourrait avoir ladite résistance interne à suivre correctement la loi d'Ohm... cela va moins bien.

Autrement dit, si l'on trace, pour une pile donnée, la courbe de la figure 2, donnant la tension aux bornes de la pile en fonction de l'intensité du courant consommé, on aura un tracé qui n'est qu'approximativement droit. C'est regrettable, car un terme perturbateur bien connu, proportionnel à l'intensité débitée, est un peu moins gênant à faire entrer dans les mesures et dans les calculs qu'un terme relativement fantaisiste.

Ne dramatisons pas trop. On peut tout de même, avec une approximation relativement correcte, assimiler la perte de tension aux bornes de la pile à un terme proportionnel à l'intensité du courant débité. N'oublions pas, c'est important de le noter, que ce terme parasite intervient comme une « erreur » ; ce n'est pas la tension de la pile qui suit une loi pas très linéaire, c'est la perte de tension, la réduction de cette tension à partir de sa valeur initiale : il s'agit d'un terme de correction » (qui peut, d'ailleurs, être relativement faible si l'on a bien choisi la pile).

L'AFFREUSE RÉSISTANCE INTERNE N'A PAS DIT SON DERNIER MOT !

Puisqu'il s'agit d'un terme correctif, le mieux est donc de l'écrire sur la pile : nous allons noter : « Résistance interne 2,3 Ω », et, comme cela, nous saurons que ladite pile, si elle donne 4,5 V avec une intensité débitée presque nulle, donnera, quand elle débite 0,25 A, une tension de :

$$4{,}5 - 2{,}3 \times 0{,}25 = 3{,}93 \text{ V}$$

Ce serait trop beau ! La résistance interne d'une pile **varie :** au fur et à mesure que la pile s'use, elle **augmente** (la « loi de Murphy » pouvait nous faire prévoir que la résistance interne n'avait aucune chance de diminuer !).

Autrement dit, au fur et à mesure que la pile s'use (cette usure correspond à un épuisement des produits chimiques qui assurent la production de l'électricité), on trouve une courbe tension/courant qui évolue comme l'indique la figure 3.

Au début, on trouve la courbe (1) (nous avons fait l'approximation, relativement valable, qui consiste à remplacer les courbes par des droites). La pile donne alors une tension e qui est un peu inférieure à E et qui reste relativement voisine de E même quand on lui demande l'intensité maximale I_M.

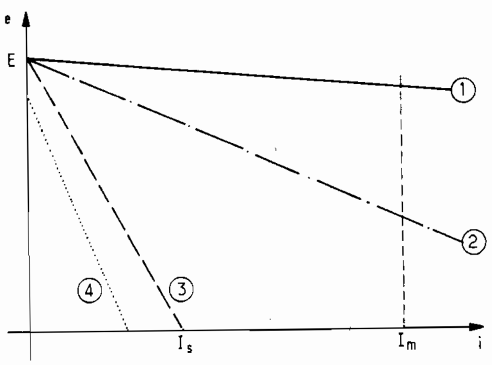

Fig. 3 – La courbe donnant, pour une pile donnée, la valeur de la tension aux bornes en fonction du courant débité, varie avec le temps. Quand la pile est neuve, on a la courbe (1), correspondant à une faible résistance interne : on peut demander à la pile l'intensité I_M sans que la tension baisse trop. Lorsque la pile se fatigue, la courbe devient celle que l'on voit en (2) : la résistance interne a augmenté. Vers la fin de la vie de la pile, on obtient la courbe (3) ou même la courbe (4) quand la force électro-motrice de la pile a également baissé.

Un peu plus tard (courbe 2), la situation est bien moins bonne : la tension de la pile peut tomber très en dessous de E si l'on a besoin d'une intensité notable.

Vers la fin de la vie de la pile, on arrive à la courbe (3). On voit apparaître ici l'intensité I_S qui correspond à la mise en court-circuit de la pile : c'est l'intensité maximale que ladite pile peut débiter, même si l'on relie ses deux pôles par une résistance presque nulle. Une telle « intensité de court-circuit » était bien définie vers le début de la période d'utilisation de la pile, mais elle correspondait à une valeur d'intensité supérieure à I_M, donc à un régime de fonctionnement relativement dangereux pour notre source de courant.

On voit une chose sur ces trois courbes (1), (2) et (3) : elles se correspondant à une intensité débitée nulle et à une tension E. Cela indique que ce que l'on appelle la « force électromotrice » de la pile (F.E.M.) n'a pas varié quand la pile s'usait. C'est assez exact pour la grande majorité des piles, mais il y a tout de même vers la fin de la vie de la pile, une diminution de ladite F.E.M. : la courbe, en fin de vie, peut alors avoir l'aspect de la droite en petits points (4). Ce fait intervient franchement quand la pile commence à s'ouvrir et à faire couler des liquides désagréables et corrosifs (nous avons supposé que la pile en question était un modèle dit « sec », plus classiquement utilisé que les piles à liquides).

UN PETIT MOT (tout de même) POUR LA DÉFENSE DE LA RÉSISTANCE INTERNE

Ne soyons pas trop injustes : il y a un petit intérêt, dans certains cas, à l'existence de la résistance interne. Nous avons vu qu'il y a, dans le cas où une pile électromotrice E a une résistance interne r, un courant limite débité (courant de court-circuit) d'intensité :

$$I_M = \frac{E}{r}$$

Si cette limite est peu importante (ce qui risque, par ailleurs, d'être bien gênant), nous avons tout de même un petit avantage : il est possible de mettre la pile en court-circuit sans risques. On ne détériorera ni la pile ni les fils de connexion.

Si nous considérons, par exemple, un accumulateur au plomb, du genre de ceux qui sont couramment utilisés dans les automobiles, il est classique d'avoir une source qui a une F.E.M. (Force électromotrice) de 12 V et une résistance interne de 0,05 Ω. Bien entendu, c'est une bonne chose que la résistance interne de l'accumulateur soit aussi basse : il reste encore 8,5 V de tension quand nous consommons 70 A, valeur bien normale pour faire tourner le démarreur par temps froid. Mais, cette fois, l'intensité de court-circuit serait :

$$I_M = \frac{12}{0.05} = 240 \text{ A}$$

Une telle intensité provoquerait une détérioration très rapide, presque instantanée, de l'accumulateur. Les lecteurs de la Revue savent bien que, si l'on pose une clef (accidentellement, bien sûr) bien à plat sur les bornes de sortie d'un accumalateur de voiture, cela se passe très mal, et il y a fort à parier que le dit accumulateur a fonctionné pour la dernière fois.

UN RÉSISTEUR QUI SUIT BIEN LA LOI (D'OHM, BIEN ÉVIDEMMENT !)

Si l'on veut qu'un résisteur maintienne sagement une proportionnalité rigoureuse entre la tension appliquée à ses bornes et l'intensité du courant qui le parcourt, il faut d'abord que ce soit, si possible, un fil métallique d'un métal unique. Cette condition n'est tout de même pas absolue ; il y a des composés fort divers, tel que le graphite et de nombreux agglomérés, même certains semi-conducteurs dopés, qui suivent à peu près la loi d'Ohm.

Mais, même avec un fil métallique constitué d'un seul métal, il y a encore, nous l'avons vu, une condition fondamentale à respecter pour que la proportionnalité rassurante entre l'intensité et la tension se maintienne : il faut que la température du résisteur ne varie que fort peu.

Nous avons vu plus haut l'exemple du filament d'une ampoule à incandescence, passant d'une résistance R, à froid, à une valeur de 8 R, 10 R ou même 12 R à sa température normale de fonctionnement. Sans aller jusque-là, les résisteurs auxquels on demande simplement de suivre la loi d'Ohm avec une bonne précision seront automatiquement affectés d'un échauffement sous l'influence du courant qui les parcourt. Plus la proportionnalité entre l'intensité et la tension doit être rigoureuse, moins cet échauffement doit être important.

Evidemment, on peut aussi jouer, dans une certaine mesure, sur le « coefficient de température » du résisteur, exprimant la variation relative de résistance par degré Celsius de variation de température. Pour un métal simple, comme le cuivre, ce coefficient est de l'ordre de 0,003/°C (ou 0,3 %/°C) autour de la température ambiante normale. Mais, pour des alliages, on arrive à réduire énormément ce coefficient. Il sera possible de maintenir une bonne proportionnalité tension/intensité, même avec une assez forte variation de température du résisteur.

Donc, une fois que l'on connaît le coefficient de température du matériau dont est constitué le résisteur, on peut en déduire la variation de température maximale que l'on pourra tolérer pour le dit résisteur, compte tenu de la précision avec laquelle on veut lui voir suivre la loi d'Ohm. Si par exemple, la valeur de la résistance de ce résisteur est définie à ± 10 % près, il est inutile de maintenir la variation de résistance due à la température en dessous de ± 1 %. Mais, si le résisteur est un modèle de précision, dont la résistance est définie à 0,1 %, il faudra se montrer bien plus sévère sur le maximum admis pour la variation de résistance en fonction de la température. D'ailleurs, même en l'absence d'échauffement par effet Joule, il faut, avec un résisteur de précision, utiliser un alliage dont le coefficient de température soit très petit : il serait gênant d'être obligé d'utiliser le résisteur dans un thermostat pour éliminer les effets de la variation de la température ambiante.

Toutes ces considérations nous amènent donc à limiter la variation maximale de température d'un résisteur donné en fonction de la puissance qui pourra se dissiper dedans en régime normal. D'ailleurs, indépendemment de la modification possible de la résistance dudit résisteur, il y a aussi une possibilité de destruction du résisteur s'il chauffe trop.

C'est la raison pour laquelle les résisteurs sont fournis avec une indication presque aussi importante que la valeur de leur résistance : la puissance maximale qu'ils peuvent dissiper.

Cette indication n'est d'ailleurs valable que pour une ambiance donnée. Tel résisteur, qui peut dissiper une puissance de 2 W quand il est dans une ambiance à +25 °C, ne supportera qu'une dissipation de 1,2 W par exemple si la température ambiante est de + 55 °C. On doit donc indiquer, pour chaque résisteur, la dissipation de puissance maximale à 20 °C par exemple, et la réduction de cette dissipation en fonction de l'augmentation de température ambiante (cette longue périphrase étant la seule traduction possible du mot anglais « derating », dont nous aimerions bien qu'il ait un équivalent français. On dira, par exemple :

« Résisteur dissipant, à 20 °C, 0,5 W avec réduction de 3 mV/ °C d'augmentation de la température au-dessus de 20 °C ».

Tous les lecteurs connaissent bien les résisteurs de 1/4 W, 1/2 W, 1 W et 2 W couramment utilisés en électronique. On voit ici combien l'emploi du mot « résisteur » est utile : un professeur d'électronique montrait un jour, pendant un cours de technologie, un résisteur de 0,5 W en disant : « Voici une résistance de 0,5 W » et l'un des élèves lui dit : « Mais, une résistance, cela se mesure en Ohms et pas en Watts... ! »

Donc, chaque fois que, dans un schéma, on trouve un résisteur dont la résistance seule est indiquée, il faut toujours supposer, sauf indication express du contraire, que l'on doit choisir, pour la réalisation, un résisteur prévu pour une dissipation maximale au moins égale (et même, si possible, assez supérieure) à celle qu'il provoquera du fait de l'intensité qui le parcourt dans le montage.

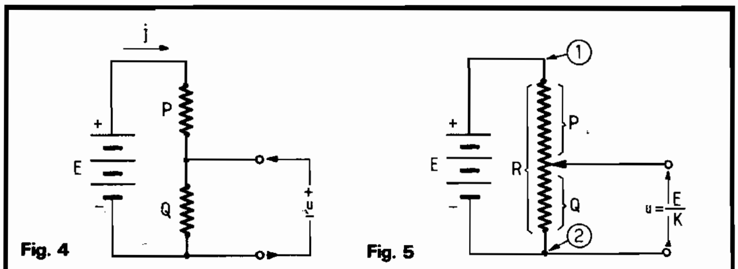

Fig. 4 – Deux résisteurs P et Q en série, alimentés par une pile E, constituent un « diviseur de tension » si l'on utilise la tension aux bornes du résisteur Q.

Fig. 5 – Si l'on prend un curseur glissant sur un résisteur R, la portion P étant au-dessus de la portion Q en-dessous, on a réalisé un diviseur de tension de rapport variable : c'est ce que l'on appelle un « potentiomètre ».

LE DIVISEUR DE TENSION

Maintenant que nous connaissons mieux les résisteurs, nous allons commencer à les utiliser.

Un montage très simple et extrêmement employé est celui de la figure 4, appelé «diviseur de tension ». On voit qu'il consiste en deux résisteurs, de valeurs respectives P et Q, montées en série, alimentés par une pile (ou toute autre source de tension) donnant une tension E. On veut connaître la tension u aux bornes de Q, en supposant que l'on ne consomme aucun courant sur le fil qui part du point commun de P et Q.

Il s'agit là d'un calcul qui ne fera peur à personne. L'intensité I que débite la pile dans P et Q est égale au quotient de E par la résistance totale du circuit. Les résisteurs P et Q étant en série, leurs résistances s'ajoutent, et l'on a donc :

$$I = \frac{E}{P + Q}$$

Une telle intensité I, passant dans une résistance Q, détermine à ses bornes une tension Q x I soit :

$$u = Q \times I = Q \times \frac{E}{P + Q}$$

$$= E \times \frac{Q}{P + Q}$$

On voit donc que la tension u est toujours égale au produit de la tension E par un facteur constant :

$$u = k\,E \text{ avec : } k = \frac{Q}{P + Q}$$

Ce facteur est toujours inférieur à l'unité. Aussi, plutôt que de dire que le montage **multiplie** E par une constante, préfère-t-on dire qu'il **divise** E par une constante (supérieure à l'unité cette fois). C'est de là que vient le nom de « diviseur de tension » donné au montage.

Cette constante K est l'inverse de k, soit :

$$K = \frac{P + Q}{Q}$$

Elle ne dépend que du rapport des valeurs de P et de Q. Par exemple, si P = Q, il s'agit d'un diviseur de tension de rapport 2, la constante K vaut 2 et la tension u sera toujours la tension E divisée par 2, quelle que soit E. Si, maintenant, P vaut cinq fois Q, on peut voir que le rapport K est égal à six : il s'agit d'un diviseur de tension de rapport 6, soit u = E/6.

LE DIVISEUR DE TENSION À RAPPORT VARIABLE

On peut faire varier le rapport K de division en modifiant la résistance d'un des résisteurs. Le plus souvent, on modifie simultanément les valeurs de P et de Q.

La méthode la plus simple consiste à garder P + Q constant. Les deux résisteurs P et Q sont donc les parties situées d'un côté et de l'autre d'une prise intermédiaire d'un résisteur. Si cette prise intermédiaire est un curseur qui peut glisser le long du résisteur (fig. 5), il est alors possible de faire varier K d'une façon continue de l'unité (curseur en (1) à l'infini (curseur en (2)).

L'instrument de la figure 5 est déjà bien connu des lecteurs qui lui auront donné depuis longtemps son véritable nom : un **potentiomètre.**

On sait qu'il représente pratiquement le seul moyen de faire varier d'une façon continue le facteur de réduction appliqué à la tension d'une tête de lecture de disque, par exemple, pour que la tension réduite soit exactement celle qui donne, en sortie d'un amplificateur, le volume sonore souhaité (peut-être pas forcément celui que souhaiterait le voisin de celui qui possède un amplificateur bien « musclé », mais, çà c'est une autre histoire !).

La résistance totale entre les points (1) et (2) est constante, elle vaut R. Les résistances P et Q sont celles que l'on trouve de part et d'autre du curseur. On désigne souvent le résisteur R sous le nom de « piste » du potentiomètre, puisque c'est sur cette « piste » que le curseur effectue sa « course » (ce que l'on peut être sportif dans l'électronique, tout de même !).

OUI MAIS... SI L'ON CONSOMMAIT DU COURANT...

... sur le curseur de ce potentiomètre, ou au point commun de P et de Q dans le cas de la figure 4, que deviendrait u ? Question pertinente, car, si nous souhaitons disposer d'une tension u ce n'est évidemment pas pour le plaisir de savoir qu'elle est là : nous désirons l'utiliser. Or « utiliser » une tension, c'est lui faire débiter une certaine intensité.

Allons, impossible d'y couper, il va falloir faire un petit calcul (que les « algébrophobes » se rassurent et sautent à la conclusion : ils la comprendront sans avoir eu formellement besoin de suivre le calcul).

Supposons (fig. 6) que nous consommions dans un certain circuit (en pointillé) un courant i, en désignant toujours par I le courant total débité par la pile.

Au point commun de P et Q, il arrive une intensité I par P, il part une intensité i par le fil allant au circuit qui consomme i, et il part aussi un certain courant par le résisteur Q. Que vaut ce dernier courant ? Nous le trouverons facilement en pensant que nous étudions un phénomène en courant continu ; il ne peut y avoir accumulation d'électrons en un point du circuit (on ne risque donc pas de voir un « nœud » du montage gonfler et éclater...). Donc, dans le résisteur Q, il ne peut passer que I – i (nous venons de voir ici un cas d'une loi, dite loi de Kirchhoff qui dit que, dans un nœud d'un montage, la somme des intensités des courants qui « sortent » de ce nœud est égale à celle des intensités qui y « entrent »).

Maintenant tout est prêt, cramponnez-vous, nous démarrons le calcul !

La tension aux bornes de P est évidemment E – e, puisqu'il y a e aux bornes de Q et E aux bornes de P + Q, donc, en appliquant la loi d'Ohm au résisteur P, il vient :

(1) $E - e = P I$

Cette même loi d'Ohm (que ferait-on sans elle ?), appliquée au résisteur Q donne :

(2) $e = Q (I - i)$

Le reste n'est plus que « tripotage algébrique ».

Nous allons tirer la valeur I de la relation (1), tout simplement en divisant ses deux membres par P, ce qui donnera :

(3) $\frac{E - e}{P} = I$

Modifions un peu l'expression de (2) en écrivant cette dernière :

(4) $e = Q I - Q i$

Nous allons remplacer dans (4) la valeur I par celle que nous donne (3) et nous arrivons à :

(5) $e = Q\frac{E - e}{P} - Q i$

Pour chasser le dénominateur P, multiplions les deux membres de (5) par P et nous obtenons :

(6) $P e = Q (E - e) - P Q i$

que nous transformons en :

(7) $P e = Q E - Q e - P Q i$

Allons, ce n'est pas tout à fait fini, mais il s'en faut de peu. Nous allons ajouter aux deux membres de l'égalité (7) la valeur Q e (on peut dire aussi que l'on fait passer – Q e du second membre dans le premier en changeant son signe) :

(8) $P e + Q e = Q E - Q e + Q e - P Q i = Q E - P Q i$

Au premier membre de (8), nous mettrons e en facteur :

(9) $(P + Q) e = Q E - P Q i$

Selon l'expression consacrée des mathématiciens, il « n'y a plus qu'à » diviser les deux membres par P + Q et l'on obtient (enfin !) :

(10) $e = \frac{Q}{P + Q} E - \frac{P Q}{P + Q} i$

Ça y est ! Nous avons mis e sous la forme :

(11) $e = E' - R i$

Autrement dit, tout se passe comme si la tension e était celle que l'on aurait aux bornes d'une pile de force électromotrice E' et de résistance interne R, à condition de poser, bien entendu, leurs valeurs :

(12) $E' = E\frac{Q}{P + Q}$

(13) $R = \frac{P Q}{P + Q}$

QU'AVONS-NOUS OBTENU ?

Ce résultat nous montre que l'on peut rigoureusement remplacer tout le montage de la figure 6, aux points (A) et (B), par une pile de force électromotrice E' et de résistance interne R, branchée entre (A) et (B), comme le montre la figure 7, à condition de respecter les valeurs trouvées :

$$E' = E\frac{Q}{P + Q} \text{ et } R = \frac{P Q}{P + Q}$$

Insistons un peu sur ce fait. Si le

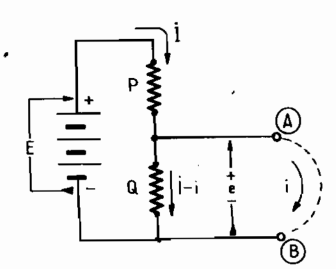

Fig. 6 – Nous supposons que, dans le diviseur de tension de la figure 4, nous consommons un courant d'intensité i à la tension de sortie. La tension e est fonction de i suivant une loi à établir.

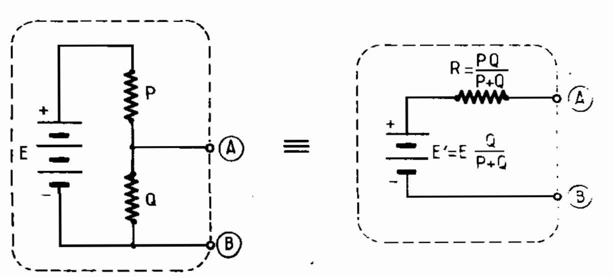

Fig. 7 – L'étude du cas du montage de la figure 6 conduit à la « transformation de Thevenin » : le montage, entre les points (A) et (B) est équivalent à une pile de force électro-motrice E' et de résistance interne R, cette dernière correspondant à la mise en parallèle de P et de Q.

montage de la figure 6, comportant la pile et le diviseur de tension était enfermé dans une boîte, les connexions (A) et (B) sortant seules de ladite boîte, nous serions absolument incapables de discerner la différence entre les effets de ce montage et ceux d'un autre qui ne comporterait, dans la boîte, qu'une simple pile de force électromotrice (F.E.M.) réduite E' et de résistance interne R.

Or, le second montage est beaucoup plus simple que le premier, puisqu'il ne comporte plus qu'un résisteur au lieu de deux.

Revenons un peu sur les valeurs de ces deux termes.

D'abord, la F.E.M. E', nous l'avons calculée, vaut :

$$E' = E \frac{Q}{P + Q}$$

soit exactement la valeur u que nous avions trouvée pour la tension de sortie du diviseur de tension de la figure 4 quand on ne consomme aucun courant en sortie. C'est encore heureux ! En effet, dans la relation (10), nous trouvons bien cette valeur E' pour e quand on donne à i la valeur zéro. On a donc bien E' comme F.E.M. de la « pile équivalente », ce qui était à prévoir.

Et la résistance interne R ? Vu son expression, les lecteurs vont sûrement se rappeler quelque chose : c'est exactement la valeur équivalente à ce que l'on obtient en mettant les résisteurs P et Q en parallèle.

PARLONS UN PEU CHIFFRES

Nous allons envisager un exemple numérique. La pile E de la figure 6 est un modèle de 4,5 V (fig. 8) avec P = 30 Ω et Q = 60 Ω ; le tout comme en 8 (a).

Nous allons transformer le tout comme en 8 (b), la F.E.M. réduite E' valant :

$$E' = 4{,}5 \frac{60}{60 + 30}$$

$$= 4{,}5 \frac{60}{90} = 4{,}5 \frac{6}{9} = 3$$

La résistance interne vaut :

$$R = \frac{60 \times 30}{60 + 30} = \frac{1800}{90} = 20$$

Donc, le tout est équivalent, comme en 8 (c), à une pile de F.E.M. 3 V et de résistance interne 20 Ω.

Cette transformation que nous venons d'expliquer s'appelle la « transformation de Thevenin ». C'est un outil des plus puissants pour étudier des montages et faire des calculs simplifiés en supprimant un résisteur sur deux. Nous sommes toujours très surpris de voir, étant donné la simplicité de ladite transformation, qu'elle soit si peu connue et surtout si peu utilisée.

Elle nous montre, entre autres, que, quand on utilise un diviseur de tension formé de deux résisteurs P et Q, on a l'équivalent d'une source de tension réduite, ayant une résistance interne égale à ce que l'on obtient en mettant P et Q en parallèle.

Il fallait bien s'y attendre, ce « fléau » de résistance interne s'est empressé de revenir dès qu'on a fait mine de lui entre-ouvrir la porte !

Seulement, maintenant, nous en connaissons la valeur exacte. C'est déjà très efficace de bien connaître l'ennemi.

Par exemple, dans le cas du potentiomètre de la figure 5, comment varie cette résistance interne quand on fait glisser le curseur ?

On voit bien que, quand le curseur est tout en haut de la piste, au point (1), la résistance P étant réduite à zéro, la résistance interne de l'ensemble est nulle (nous avons supposé que celle de la pile l'était, si ce n'est pas le cas, on incorpore la résistance interne de la pile dans P, mais alors on ne peut plus faire aller le curseur tout à fait jusqu'au bout).

Quand nous descendons lentement le curseur de (1) vers (2), la valeur de P commence par augmenter, celle de Q diminuant peu (et restant très supérieure à celle de P). Par exemple, si R vaut 1 000 Ω, quand P = 10 Ω, Q = 990 Ω, alors, en mettant 990 Ω en parallèle sur 10 Ω, on ne change presque pas les 10 Ω (on les amène à 9,9 Ω).

On pourrait démontrer que c'est lorsque le curseur passe au milieu de R que la résistance interne est maximale. Elle vaut alors l'équivalent de la moitié supérieure de la piste (R/2) en parallèle avec l'autre moitié (R/2) : en mettant R/2 en parallèle avec R/2, on obtient R/4.

Quand le curseur va vers le point (2), la résistance interne équivalente diminue jusqu'à zéro.

Autrement dit, quand une tête de lecture de disque, branchée aux bornes de la piste R (100 000 Ω) d'un potentiomètre donne une tension que l'on veut atténuer par le potentiomètre, on obtient une tension atténuée correspondant à un générateur dont la résistance interne, nulle ou presque pour un rapport de division K égal à l'unité (ou très grand), passe par un maximum égal à 25 000 Ω pour un rapport de division de 2 (curseur au milieu de la piste). Si l'on souhaite diviser cette tension par cent, par exemple, en mettant le curseur à 1 000 Ω du bas et à 99 000 Ω du haut, la résistance interne est de 1 000 en parallèle avec 99 000, ce qui fait 990 Ω.

Beaucoup de gens mettront ce résultat en doute, disant que le courant fourni par la tête de lecture doit aller vers le curseur à travers 99 000 Ω et que la résistance équivalente doit être à peu près de cet ordre. Ce serait oublier que la résistance de 1 000 Ω, en parallèle avec le montage alimenté par le curseur du potentiomètre, vient tout modifier.

MAINTENANT, DEUX DIVISEURS DE TENSION

Supposons que la même pile E, de résistance interne négligeable, alimente deux diviseurs de tension. Le premier, constitué par les résisteurs P et Q, donne une tension réduite, u, entre les points (A) et (B). Le second, constitué des résisteurs R et X, donne une tension réduite, v, entre les points (D) et (F).

Les points (B) et (F) ne sont pas distincts : ils sont tous deux reliés au pôle négatif de la pile E par un fil de résistance négligeable. Les deux sources de tension u et v ont donc leurs pôles négatifs reliés : elles sont branchées, comme on dit, « en opposition », ce qui fait que leurs tensions se retranchent l'une de l'autre. Autrement dit, entre les points (A) et (D), il y a une tension :

$$V_A - V_D = u - v$$

Précisons que cette tension ne se trouve entre ces points que si l'on ne fait passer aucun courant de (A) vers (D). Ce sera le cas, à peu de choses près, si l'on relie (A) et (D) aux deux entrées d'un excellent voltmètre, ayant une résistance interne presque infinie : on lira, sur le voltmètre, la valeur de U — v.

Si maintenant, nous faisons varier R, nous agirons sur v. Nous pourrons arriver, pour une valeur

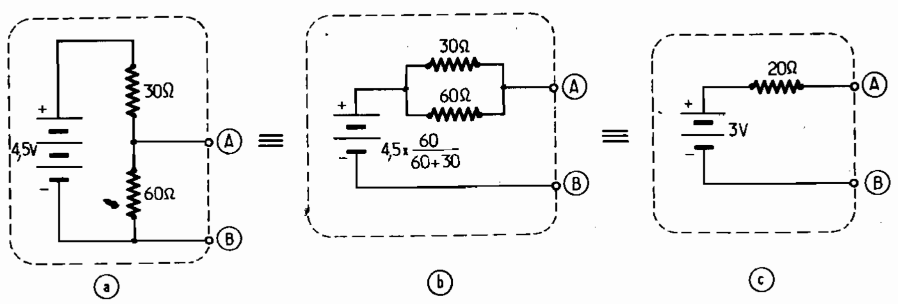

Fig. 8 - Cas pratique de la transformation de Thevenin : une pile de 4,5 V alimente un diviseur de tension 30 Ω / 60 Ω (a). On transforme le montage comme sur la figure 7 (b). Tous calculs faits, on trouve l'équivalent (c).

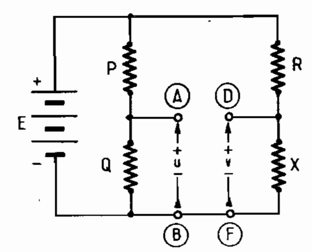

Fig. 9 – Nous alimentons maintenant deux diviseurs de tension P-Q et R-X par la même pile P. Nous allons régler ces diviseurs pour que les rapports de division soient les mêmes, rendant les tensions u et v égales, ce qui supprime la tension entre les points (A) et (D) : c'est le pont de Wheatstone.

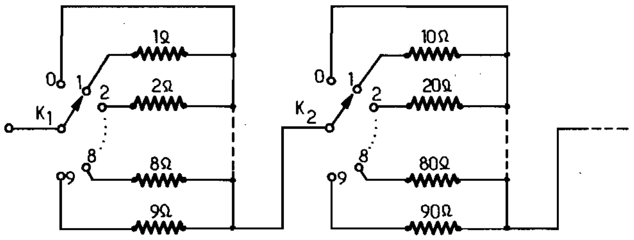

Fig. 10 – La résistance R du pont de la figure 9 est constituée par la mise en série de plusieurs boîtes à décades (ici, nous n'en avons figuré que deux). On peut ainsi, par commande de commutateurs, donner à la résistance R une valeur parfaitement connue que l'on fait varier, par exemple, d'ohm en ohm de 0 à 9 999 Ω si l'on dispose de quatre boîtes.

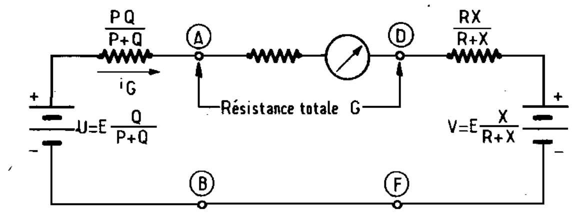

Fig. 11 – En appliquant deux fois la transformation de Thevenin au pont de Wheathstone de la figure 9, nous arrivons à un montage dans lequel on peut exprimer immédiatement sans aucun calcul le courant de déséquilibre, traversant le galvanomètre G si les rapports de division des deux diviseurs de tension ne sont pas égaux.

déterminée de R, à annuler u — V, ce que nous verrons sur le voltmètre.

Quand nous voyons que u — v est nul, autrement dit que U = v, que pouvons-nous conclure ?

C'est extrêmement simple. Puisque nous savons que :

$$u = E\,\frac{Q}{P+Q} \text{ et que :}$$

$$v = E\,\frac{X}{R+X}$$

l'égalité de u et de v nous permet de dire que :

$$E\,\frac{Q}{P+Q} = E\,\frac{X}{R+X}$$

soit, en divisant les deux membres par E :

$$\frac{Q}{P+Q} = \frac{X}{R+X}$$

Cette dernière égalité peut être simplifiée. Si vous vous rappelez quelques bribes des premières années d'algèbre, vous savez que, dans une proportion (égalité de deux rapports), de la forme :

$$\frac{a}{b} = \frac{c}{d}, \text{ on a :}$$

$$a\,d = b\,c$$

(ce qui se démontre facilement en réduisant les deux fractions a/b et c/d au même dénominateur).

Appliquons cette propriété à notre égalité à simplifier, il vient :

$$X\,(P + Q) = Q\,(R + X) \text{ soit :}$$
$$X\,P + X\,Q = Q\,R + Q\,X$$

On peut retrancher X Q (ou Q X) aux deux membres et il vient :

$$X\,P = Q\,R$$

que l'on peut aussi exprimer sous la forme :

$$\frac{P}{Q} = \frac{X}{R}$$

QU'AVONS-NOUS DONC TROUVÉ ?

Si le but de tout cela n'était que de faire des calculs, nous comprendrions facilement que les lecteurs protestent. En réalité, le résultat de ce qui précède est bien plus intéressant, puisqu'il nous donne le moyen de mesurer une résistance.

En effet, si nous avons choisi P et Q de telle sorte que leur rapport soit connu avec précision et simple (rapport 1, ou 0,1, ou 0,01, ou 10 ou 100), la valeur de R étant aussi connue, nous pourrons en déduire la valeur de X.

Pour R, nous utiliserons une série de « boîtes à décades » (fig. 10). Il s'agit de boîtes contenant chacune neuf résisteurs (par exemple de 1 Ω, 2 Ω, 3 Ω..., 8 Ω et 9 Ω) et un commutateur à dix positions K. Suivant la position de ce commutateur, nous disposons, entre les bornes de la boîte, d'une résistance de 0,1, ... 8 ou 9 Ω.

Une autre boîte identique, contenant des résisteurs de valeur 10 Ω, 20 Ω, ... 80 Ω et 90 Ω avec un commutateur K_2 à dix positions permet de mettre en série avec la première un résisteur de 0,10, ... 90 Ω. Une troisième boîte nous donne 0, 100, 200 ... 900 Ω. Avec une troisième, nous disposons de valeurs de 0, 1 000, 2 000, ... 9 000 Ω. Ainsi, avec les quatre boîtes en séries, nous avons la possibilité de faire varier une résistance, ohm par ohm, de 0 à 9 999 Ω.

Nous choisirons donc un rapport P/Q adéquat, puis nous agirons sur la valeur de R par les commutateurs K, en observant le voltmètre qui mesure u — V, jusqu'à ce que la lecture donne zéro. Nous pourrons alors dire que la valeur de X est :

$$X = R\,\frac{P}{Q}$$

L'instrument que nous venons de décrire, pour la mesure des résistances, porte un nom : il s'agit du « Pont de Wheathstone », qui fait très peur aux élèves de première des lycées parce que :

1) La prononciation du nom est délicate (disons qu'un vague équivalent phonétique est « Ouïtstonne ») ;

2) L'explication de son fonctionnement est généralement donnée sous une forme bien plus compliquée que celle que nous avons utilisée.

Le tout devient bien pire quand on demande (oh, raffinement de cruauté mentale !) au malheureux candidat comment il peut calculer le courant de déséquilibre de ce pont quand on connecte entre (A) et (D) un appareil de mesure de courant de résistance interne G.

Si l'on ne connaît pas la transformation de Thevenin, on s'en tire... par deux pages de calculs atroces, auprès desquels ceux que nous avons faits plus haut ne sont que des amusements de bébé.

Mais, si l'on applique deux fois cette transformation au montage de la figure 9, on arrive au branchement de la figure 11. Il n'y a plus, alors, qu'à utiliser la simple loi d'Ohm.

Le courant i_G circule de (A) vers (B) (ou en sens inverse si la valeur qu'on trouvera pour i_G est négative) sous l'influence de la différence de potentiel U — V. La résistance totale du circuit est :

$$\frac{P\,Q}{P+Q} + G + \frac{R\,X}{R+X}$$

On obtiendra donc la valeur du courant i_G en divisant l'expression de U — V par la résistance totale du circuit, ce qui nous donnera :

$$iG = \frac{E\,\frac{Q}{P+Q} - E\,\frac{X}{R+X}}{\frac{P\,Q}{P+Q} + G + \frac{R\,X}{R+X}}$$

Nous n'irons pas prétendre que la forme de cette expression soit simple, mais nous y sommes arrivés avec une peine quasi-nulle. L'auteur avait pensé, à titre de comparaison, reproduire ici le raisonnement classique par lequel on arrive à la même expression sans utiliser la transformation de Thevenin... et le rédacteur en chef de la Revue a... poliment mais fermement expliqué que le fait de noircir deux pages du Haut-Parleur par des équations ne lui semblait pas des plus utiles. Les lecteurs devront donc faire confiance quand nous affirmons que ledit calcul relève du cauchemar de matheux malade après une nuit d'orgie. Le résultat n'est, évidemment, pas plus simple dans son expression que celui que nous avons donné puisque c'est le même (à moins que l'on ne se trompe dans les deux pages de calculs horribles).

SAVONS-NOUS TOUT SUR LA LOI D'OHM ?

Non, il faudrait être vraiment perdu d'orgueil pour affirmer que l'on sait « tout » sur la loi d'Ohm et la manière de s'en servir. L'auteur n'aurait pas cette audace, n'ayant passé que trente et quelques années à utiliser cette loi et ses implications. Néanmoins, nous pensons que nous en avons assez dit sur le sujet pour le moment. Il y a maintenant intérêt à parler en détail des effets magnétiques des courants, et c'est ce que nous ferons dans un prochain article.

J.-P. OEHMICHEN
Ingénieur E.P.C.I.