BOBINAGES ET CONDENSATEURS EN COURANT ALTERNATIF

UN PETIT RAPPEL

NOUS avons vu qu'un bobinage, en raison du phénomène de « self-induction », tend à s'opposer à toute variation du courant qui le parcourt. Si l'on cherche à diminuer l'intensité de ce courant, il développe à ses bornes une force électromotrice qui aide le passage du courant (et s'oppose donc à sa diminution). Si, au contraire, on cherche à faire croître la valeur du courant, le phénomène de self-induction provoque l'apparition, aux bornes du bobinage, d'une tension qui est maintenant une force **contre**-électro-motrice, gênant donc l'augmentation du courant.

La self-induction joue le même rôle que la masse, génératrice d'inertie en mécanique : quand on veut augmenter la vitesse d'un corps doué de masse, il apparaît une « force d'inertie », dans le sens opposé à la marche, pour gêner l'augmentation de vitesse. Si l'on veut diminuer la vitesse, la force d'inertie est alors l'« élan », soit une force dans le sens de la marche, qui s'oppose à la réduction de la vitesse.

Le nombre qui caractérise ce phénomène est le « coefficient de self-induction », désigné par L, lié à la tension de self-induction e par la formule :

$$e = -L\frac{di}{dt}$$

Dans cette formule, le signe – exprime le caractère « contradictoire » du phénomène. La fraction di/dt est la « dérivée » de i par rapport à t, de l'intensité passant dans le bobinage par rapport au temps, en d'autres termes la vitesse de variation de cette intensité. Que ce terme de « dérivée » n'affole pas ceux qui sont brouillés avec les mathématiques, c'est une notion toute simple qui conduit à des calculs pas méchants (dont on n'a pas absolument besoin de suivre le déroulement, pourvu que l'on en comprenne le résultat).

LE CONDENSATEUR

Nous n'en avions plus parlé depuis assez longtemps. Rappelons brièvement que c'est un ensemble de deux conducteurs séparés par un isolant. On peut y stocker des charges électriques. Si l'on y stocke une charge Q, il apparaît entre les « armatures » (les deux parties conductrices) une tension V, proportionnelle à la charge stockée Q. Le rapport constant Q/V s'appelle la « capacité » du condensateur : Q/V = C soit :

$$Q = C\ V$$

Un condensateur de capacité unité (un Farad) présente entre ses armatures une tension de 1 V si on y a stocké une charge de un Coulomb. Précisons que un Farad est une capacité énorme, ce n'est que tout récemment que l'on a pu réaliser des condensateurs dont la capacité atteint le Farad. On compte plus généralement la capacité en millionièmes de Farad (microfarads, notés μF) ou en milliardièmes de Farad (nanofarad, noté nF) ou même en millionièmes de millionième de Farad (picofarad $= 10^{-12}$ F, noté pF).

Si la tension V que l'on applique à un condensateur de capacité C varie en fonction du temps, la charge contenue dans ce condensateur varie aussi. Il faut donc fournir à ce condensateur un courant pour faire varier cette charge. Ce courant est le quotient de la charge fournie par le temps mis pour la fournir. Si l'on met le temps Δt pour fournir la charge ΔQ (la lettre grecque Δ, dite « delta », est une notation un peu prétentieuse, mais courante, pour désigner un accroissement, Δt signifie « accroissement de temps » et ΔQ signifie « accroissement de charge »), nous aurons un courant :

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

Or, à l'accroissement ΔQ de la charge correspond l'accroissement ΔV de la tension aux bornes, lié à ΔQ par :

$$\Delta Q = C\ \Delta V$$

Le courant de charge est donc :

$$i = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = C \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

Par exemple, si nous prenons un condensateur de capacité C = 0,1 μF soit C = 10^{-7} F et que nous faisons varier la tension aux bornes de 10 V (Δ V = 10 V) en 2 μs (Δt = 2.10^{-6} s), cela correspondra à un courant de charge de :

$$i = 10^{-7} \frac{10}{2.10^{-6}} = 0{,}5 \text{ A}$$

C'est à partir de cette formule que l'on passe à celle qui donne le courant i de charge d'un condensateur de capacité C, ayant à ses bornes une tension V fonction du temps t :

$$i = C \frac{dV}{dt}$$

Ici, le terme dV/dt est encore une « dérivée », c'est-à-dire la vitesse de variation de V en fonction de t (en volts par seconde). On commence à voir ici l'analogie du condensateur et du bobinage.

Cette analogie va encore plus loin. On peut facilement montrer qu'un condensateur de capacité C, chargé sous la tension V, contient une énergie (en Joules) :

$$E = \frac{1}{2} CV^2$$

et nous avons vu qu'un bobinage de coefficient de self-induction L, parcouru par une intensité i, contient une énergie :

$$E = \frac{1}{2} L\ i^2$$

LE COURANT ALTERNATIF

Un dernier petit rappel. On nomme « courant alternatif », un courant qui change périodiquement de sens, sa variation se répétant identiquement chaque fois que le temps augmente de T (on nomme ce temps la « période » du courant) et qui transporte autant de charges pendant l'alternance positive (quand il va dans un sens) que pendant l'alternance négative (quand il va dans l'autre sens).

Dans la quasi-totalité des cas, on envisage seulement le courant alternatif dit « sinusoïdal », dont la variation au cours du temps est celle que représente la figure 1.

On voit que le courant varie entre la valeur maximale + i_M et la valeur maximale en sens inverse − i_M, suivant une loi dite « sinusoïdale », qui s'exprime par :

$$i = i_M \sin(\omega t)$$

Le ω qui multiplie t s'appelle la « pulsation » du courant. Il s'exprime en « radians par seconde ». C'est le multiple de la fréquence par 6,28 (2 π) et il est là pour que le terme dont on prend le sinus soit un angle. On ne peut prendre le sinus que d'un angle. Cela n'a pas de sens de parler du sinus de 10 cm, du sinus de 14 s, ou du sinus de 3 kg : on ne peut parler que du sinus de 1,27 radians (ou, à la rigueur, du sinus de 72,76 degrés).

Quand un tel courant passe dans un résisteur R, il n'y dissipe pas, en moyenne, autant de puissance qu'un courant continu qui serait constamment égal à i_M. C'est bien normal ; le courant alternatif n'est égal à i_M qu'en valeur de crête, il est presque constamment inférieur à i_M en valeur absolue.

On peut démontrer que la puissance moyenne dissipée par ce courant dans un résisteur R est la même que celle que ferait dissiper dans ce même résisteur un courant continu d'intensité :

$$i_e = i_M/\sqrt{2} = i_M/1{,}41 = 0{,}707\ i_M$$

Cette valeur est appelée « intensité **efficace** » du courant. C'est la valeur que l'on donne sans commentaires quand on dit que l'intensité de tel courant alternatif est de 3 A, par exemple, on sous-entend toujours qu'il s'agit de 3 A efficaces. Si l'on est mieux élevé, on dit : 3 $A_{eff.}$ ou 3 A_{RMS}, cette dernière abréviation venant de l'anglais (Root Mean Square = racine carrée de la valeur moyenne du carré).

La tension alternative développée aux bornes d'un résisteur R parcouru par le courant étudié est donc égale, à chaque instant, au produit de la valeur du courant par R :

$$u = R\ i_M \sin(\omega t)$$

On définit donc de même la tension « efficace » comme le

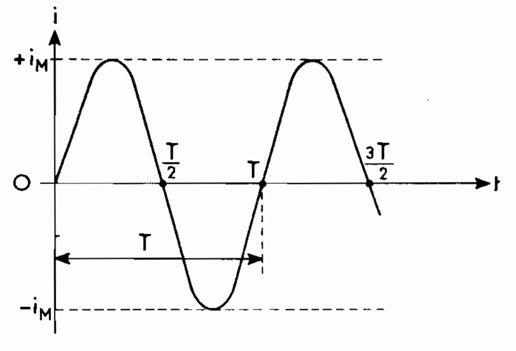

Fig. 1. – Un courant alternatif sinusoïdal oscille entre une valeur + i_M (valeur crête ou maximale) et une valeur − i_M. Le phénomène se reproduit identiquement après un temps T appelé sa « période ». L'inverse de T est la « fréquence ».

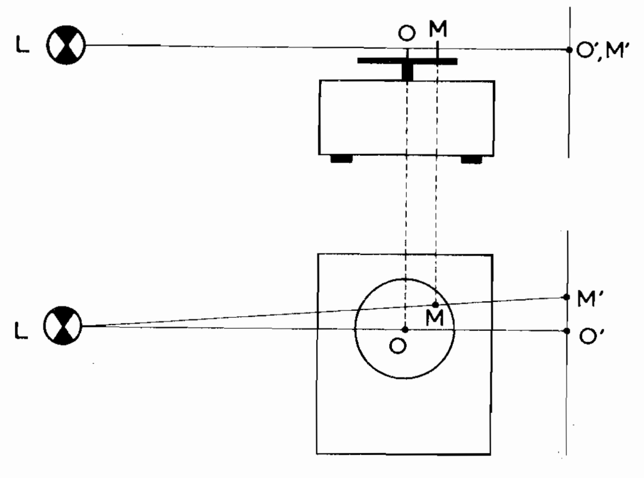

Fig. 2. – Pour matérialiser un mouvement sinusoïdal, un bon moyen est de projeter sur un mur l'ombre M' d'un objet M posé sur le plateau d'un tourne-disque. L'expérience est représentée ici en plan et en élévation.

quotient de $R\,i_M$ (tension crête) par 1,41. Ainsi, quand on dit que la tension (efficace) du secteur est de 220 V, cela signifie que la valeur crête est 1,4 x 220, soit 311 V environ : la tension varie donc entre + 311 V et - 311 V.

Un bon moyen de se représenter la loi de variation de la tension (ou de l'intensité) en fonction du temps est d'évoquer l'ombre portée sur le mur par un objet qui tourne autour d'un axe. On peut, par exemple, envisager un tourne-disque situé près d'un mur (fig. 2) et éclairé par une lampe L, très loin de ce mur, dont les rayons arrivent sur le mur presque perpendiculairement à ce dernier dans la région du tourne-disque.

Le centre 0 du plateau donne une ombre 0' sur le mur. Un objet M sur le plateau donne une ombre M'. Dans la mesure où L est assez loin du mur, on peut dire que les rayons lumineux LO et LM sont tous deux perpendiculaires au mur. Quand le plateau tourne, l'ombre M' se déplace d'un mouvement sinusoïdal autour de l'ombre O'. Plus l'objet M est loin de l'axe O (près du bord du plateau), plus l'amplitude du mouvement est grande.

Nous conseillons beaucoup aux lecteurs de faire l'expérience indiquée sur la figure 2 : on se fait ainsi une bonne idée de ce qu'est un mouvement sinusoïdal, surtout quand on commence à envisager plusieurs mouvements qui ne sont pas en phase : cela « parle » mieux à l'esprit de voir ces mouvements « matérialisés » (si nous osons nous exprimer ainsi, une ombre n'ayant pas un caractère très matériel !).

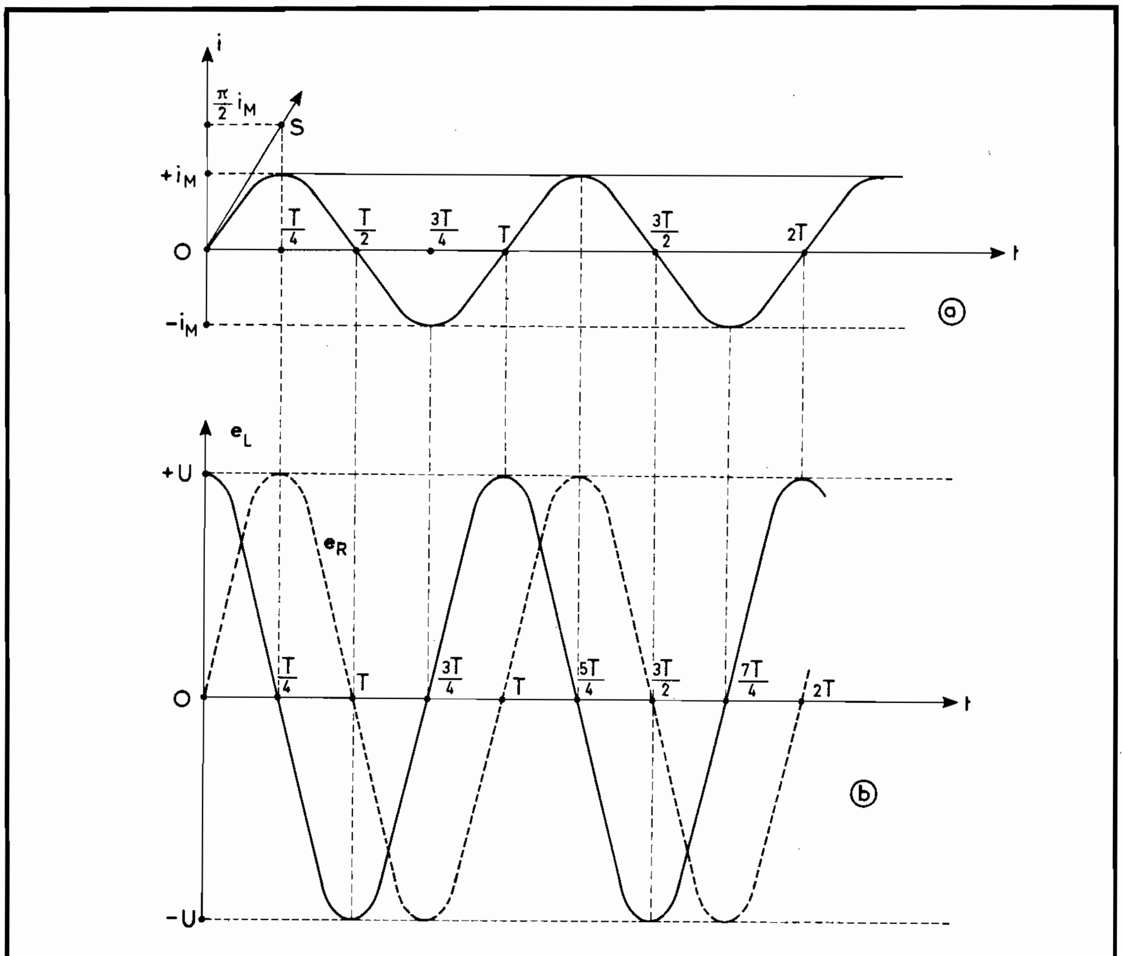

Fig. 3. – En (a), la variation du courant en fonction du temps. En (b), la variation au cours du temps de la tension aux bornes d'un bobinage L parcouru par le courant en question. En trait pointillé, la variation de la tension aux bornes d'une résistance de valeur R = Lω.

LE COURANT ALTERNATIF DANS UN BOBINAGE

On conçoit bien que, si un bobinage tend à s'opposer à toute variation de courant, il va réagir avec vigueur contre le passage du courant alternatif, qui varie tout le temps.

Etudions le phénomène graphiquement, ce sera encore la façon d'y voir le plus clair.

Nous tracerons (fig. 3 a) la courbe de variation de i dans le bobinage en fonction du temps. Cette intensité varie de $+ i_M$ à $- i_M$ suivant une loi sinusoïdale :

$$i = i_M \sin(\omega t)$$

La valeur de ω est telle que, quand le temps arrive à la valeur T (une période de sinusoïde), l'angle sur lequel porte le sinus a augmenté d'un « tour » complet, soit 2π en radians :

$$\omega T = 2\pi$$

soit $T = \dfrac{2\pi}{\omega}$

ou $\omega = \dfrac{2\pi}{T}$

Comme 1/T, inverse de la période T, est la fréquence F (si la période est de 0,02 s, il y a 1/0,02 = 50 périodes en une seconde), on peut écrire :

$$\omega = 2\pi F$$

Par exemple, pour le courant du secteur à 50 Hz (F = 50, T = 0,02 s), on a :

$$\omega = 2\pi \times 50 = 100\pi$$

$$= 314 \text{ radians/s}$$

Ce qui nous importe maintenant est de savoir comment va varier la tension e_L aux bornes du bobinage de coefficient de self-induction L dans lequel passe le courant alternatif i.

Il nous faut donc connaître, à chaque instant, la valeur de la vitesse de variation de i en fonction du temps.

Cette vitesse s'exprime par la « pente » de la tangente à la courbe donnant la variation de i en fonction du temps.

Donc, nous savons déjà une chose : au temps T/4, comme au temps 3T/4, comme i passe par une valeur extrême (maximale pour T/4, minimale pour 3T/4), la tangente à la courbe en ces points est parallèle à l'axe du temps : sa pente est nulle. Il en va de même de la tension de self-induction e_L, qui sera donc nulle pour t = T/4 et pour t = 3T/4.

Au départ, au point 0, correspondant au temps t = 0, la pente de la tangente à la courbe (a) est maximale. C'est donc au temps t = 0 que la tension e_L sera maximale.

Allons plus loin. Quelle sera la valeur de crête de e_L ? Pour le savoir, il faut connaître un résultat (que nous demanderons aux lecteurs d'admettre), à savoir que la tangente à l'origine à la sinusoïde (cette tangente est la demi-droite OS) passe par le point d'abscisse T/4 et d'ordonnée $\pi/2\ i_M$ (soit environ $1,57\ i_M$).

La pente de cette tangente est donc le quotient de l'ordonnée $\pi/2\ i_M$ de ce point W par son abscisse T/4, soit une pente :

$$p = \frac{(\pi/2)\ i_M}{T/4} = 2\frac{\pi}{T} i_M$$

Nous avons donc la valeur du di/dt (vitesse de variation de i) au temps zéro, c'est :

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_0 = 2\frac{\pi}{T} i_M$$

Or, nous avons vu plus haut que $\frac{2\pi}{T}$ (ou $2\frac{\pi}{T}$) vaut : ω.

La pente à l'origine est donc $\omega\ i_M$.

Comme la tension e_L à chaque instant est le produit de la dérivée di/dt par le coefficient de self-induction L, la tension aux bornes de L au temps zéro sera :

$$U = L\omega\ i_M$$

Maintenant, nous en savons assez pour tracer point par point la courbe (b) de la figure 3, donnant la variation de e_L en fonction du temps. Elle va nous montrer une variation de e_L entre + U (au temps 0 et au temps T) à - U (au temps T/2 et au temps 3T/2).

La loi de variation de e_L « ressemble » furieusement à une sinusoïde, elle aussi. En fait, on peut démontrer que c'en est une. Les quatre lignes ci-après sont interdites aux « mathophobes » :

$$\text{si } i = i_M \sin(\omega t),$$

$$\frac{di}{dt} = i_M \cos(\omega t)$$

et :

$$e_L = L\frac{di}{dt} i_M\ L\ \omega \cos(\omega t)$$

$$= i_M\ L\ \omega \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

et la loi de e_L en fonction du temps est bien une sinusoïde, en avance de phase de $\pi/2$ par rapport à i, dont l'amplitude est égale à i_M multiplié par le terme $L\omega$.

ASSEZ DE CALCULS... RÉFLÉCHISSONS !

Imaginons maintenant que le courant i ait été envoyé dans un résisteur R, nous aurions eu, aux bornes de ce dernier, une tension e_R qui serait :

$$e_R = R\ i = i_M\ R \sin(\omega t)$$

Si nous donnions à R la valeur $L\omega$, la tension e_R suivrait la loi de variation indiquée par la courbe en tirets sur la figure 3 b. La tension aurait exactement la même amplitude que e_L, elle serait donc très semblable à celle-ci à cette différence près que la courbe de e_R est décalée d'un quart de période en retard par rapport à celle de e_L.

Donnons à quelqu'un une « boîte noire » dans laquelle il y a un élément électrique et d'où sortent deux bornes et que cette boîte noire contienne un résisteur R, ce quelqu'un pourra y faire passer un courant alternatif, qu'il mesure avec un ampère-mètre, et lire la tension aux bornes avec un voltmètre (fig. 4).

S'il constate que le quotient de la tension U_{eff} qu'il lit sur le voltmètre V par l'intensité i_{eff} qu'il lit sur l'ampère-mètre A reste constant quand le courant varie, il pourra en conclure que, dans la boîte noire, il y a un résisteur de valeur U_{eff}/i_{eff}.

Tant que notre expérimentateur se borne à lire des valeurs sur un ampère-mètre et un voltmètre, il ne pourra pas faire la différence entre une première boîte noire contenant un résisteur de valeur $L\omega$ et une autre boîte noire contenant un bobinage de coefficient de self-induction L.

Nous sommes donc conduits à dire que le bobinage se comporte un peu comme un résisteur de valeur $L\omega$. Nous savons toutefois que ce n'est pas entièrement vrai : dans le cas du résisteur, le courant et la tension passent ensemble par la valeur zéro, de même qu'ils passent ensemble par leur maximum, alors que, dans le cas du bobinage, le courant est maximal quand la tension est nulle et réciproquement. Mais ce décalage dans le temps ne se voit pas sur un voltmètre et sur un ampère-mètre.

Donc, celui qui essaie la boîte noire comme sur la figure 4 a parfaitement le droit de dire : « Tout se passe comme si la boîte noire contenait un résisteur de valeur donnée ».

Evidemment, il y a un premier point qui va un peu surprendre notre expérimentateur : malgré la présence du courant et de la tension, la boîte noire ne chauffe absolument pas si c'est celle qui contient le bobinage. La surprise ira en croissant si l'expérimentateur a l'idée de faire un nouvel essai avec un courant alternatif à une fréquence différente : il trouve alors une autre valeur de « résistance ».

Un bobinage présente donc une propriété assez analogue à celle d'un résisteur, mais il n'est pas un résisteur.

On traduit ce fait en donnant à sa « pseudo-résistance » un nom : on dit qu'il s'agit de l'« impédance » du bobinage.

Nous voyons que, par exemple, si nous utilisons un bobinage de L = 4 H (H =

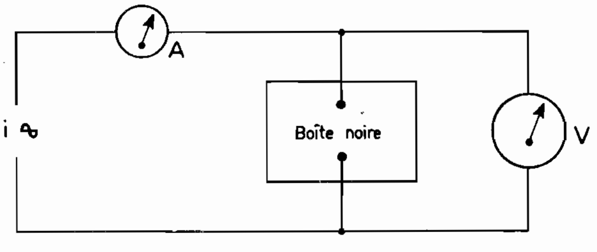

Fig. 4. – Si, dans une « boîte noire », il y a un élément électrique tel que le rapport de la tension alternative efficace aux bornes de cet élément et du courant efficace qui le traverse demeure constant et égal à la valeur Z, on peut dire que tout se passe comme si la boîte noire contenait un résisteur de valeur Z.

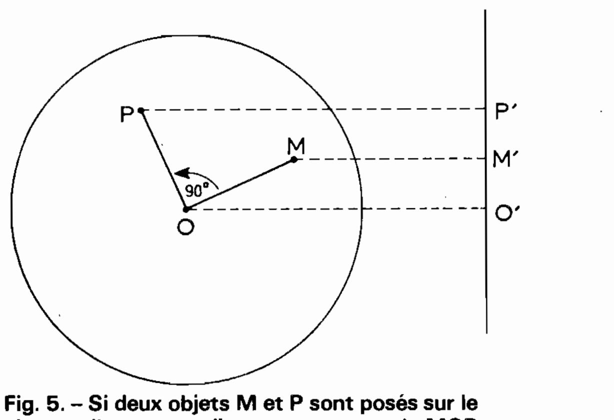

Fig. 5. – Si deux objets M et P sont posés sur le plateau d'un tourne-disque, avec un angle MOP de 90°, les ombres M′ et P′ exécutent deux mouvements sinusoïdaux déphasés d'un quart de période.

Henry, unité de self-induction) sur le secteur alternatif, où F = 50 Hz donc $\omega = 2\pi F \approx 314$ radians/seconde, nous trouverons une impédance de :

$$4 \times 314 = 1256\ \Omega$$

Si ce bobinage est alimenté par une tension de 220 V eff. nous aurons donc une intensité de 220/1256 = 0,175 A eff.

Mais rappelons bien que le bobinage **n'est pas** un résisteur dont la résistance, invariable, serait 1256 Ω. Si nous l'utilisons maintenant sur le réseau de bord d'un avion, où la fréquence est de 400 Hz, ce qui correspond à un ω de :
$2\pi \times 400 = 2\,513$ radians/seconde, l'impédance du même bobinage devient :
$4 \times 2513 = 10\,052\ \Omega$

Il y a d'ailleurs une autre différence entre le bobinage et un résisteur : si nous appliquons le secteur 220 V eff à un résisteur de valeur ohmique 1256 Ω, cela correspond à une dissipation de puissance de 38,5 W, environ. Le résisteur va chauffer. Pour le bobinage présentant l'impédance de 1256 Ω, malgré que le courant passant dans le bobinage soit de 0,175 A (comme dans le résisteur de 1256 Ω), il n'y a aucun dégagement de chaleur.

Ce dernier point mérite qu'on y revienne. Comment se fait-il qu'il n'y ait pas de production de chaleur alors qu'il y a de la tension et du courant ?

Si nous regardons les courbes de la figure 3, nous constatons que du temps zéro au temps T/4, e_L est positif et i aussi : le produit des deux est positif et le secteur fournit bien de la puissance.

Mais, du temps T/4 au temps T/2, i est toujours positif, mais e_L est négatif, le produit des deux est négatif : le bobinage **restitue** de la puissance au secteur, autrement dit, la puissance fournie par le secteur est **négative.**

Si on continue à examiner ce qui se passe, on voit que la puissance fournie par le secteur est tantôt positive tantôt négative : on peut calculer que, en moyenne, elle est nulle.

Il y a des volts, il y a des ampères, mais il n'y a pas de watts. On dit que l'intensité est « déwattée », ou que la puissance est uniquement « réactive ».

On peut en donner l'analogie dans le mouvement de l'eau que l'on peut observer dans une cuvette rectangulaire (cuvette de photographie), à demi-pleine d'eau, que l'on balance lentement à un rythme voisin de celui de l'oscillation propre de l'eau. On peut alors observer une oscillation de grande amplitude de l'eau (qui, souvent, sort de la cuvette !) mais sans aucune énergie : la vitesse de l'eau est maximale quand le niveau est horizontal, et la dénivellation est maximale quand la vitesse s'annulle.

UN PETIT TOUR SUR LE TOURNE-DISQUE

Les courbes de la figure 3 donnent une assez bonne idée de ce qui se passe, avec la tension en avance sur l'intensité, ou, si l'on veut, l'intensité en retard sur la tension. Mais il est encore plus frappant de voir cela réellement et on peut y arriver (au ralenti, bien sûr) grâce au système du tourne-disque de la figure 2.

Nous allons poser sur son plateau (fig. 5) deux objets M et P, à la même distance OM = OP du centre 0, dans deux directions perpendiculaires, et nous observerons les ombres M' et P' des deux objets sur le mur. Nous pourrons alors voir ce que sont deux mouvements sinusoïdaux décalés en phase de 90° (ou de $\pi/2$ si l'on parle en radians, ce qui est plus correct), ou aussi décalés en phase d'un quart de période.

Celui qui a bien compris et bien suivi doit être capable de « mimer » les deux mouvements, l'un avec sa main droite, l'autre avec sa main gauche, les mains se déplaçant horizontalement, la trajectoire de la main gauche étant un peu en dessous de celle de la main droite. Essayez : ce n'est pas si facile que cela ! Mais on peut y arriver.

UN BOBINAGE ET UN RÉSISTEUR

Maintenant, nous allons compliquer (sadiquement !) le problème en supposant que nous placions en série un bobinage et un résisteur, ainsi que le montre la figure 6.

Nous envoyons dans le tout notre potentiel courant alternatif de fréquence F, période T, pulsation $\omega = 2\pi F$, valeur crête i_M, valeur efficace $i_M/\sqrt{2} = 0{,}707\ i_M$, représenté par la loi :

$$i = i_M \sin(\omega t)$$

Aux bornes du résisteur, nous savons bien ce que nous trouverons : une tension alternative de valeur crête R i_M, en phase avec le courant.

Aux bornes du bobinage, nous trouvons la tension e_L déjà étudiée, mais, si elle est bien alternative, elle n'est pas en phase avec le courant, elle est décalée en retard d'un quart de période ($\pi/2$ en radians) par rapport à ce dernier.

La tension totale E est la somme de e_R et de e_L. Mais il ne saurait être question d'ajouter simplement les amplitudes de ces deux tensions, puisque les maxima des tensions en question ne se produisent pas au même moment.

Si nous ne voulons pas passer par une transformation trigonométrique (pas bien difficile, reconnaissons-le), il nous faudra repasser par la méthode du tourne-disque.

Supposons (fig. 7) que, sur le plateau de ce tourne-disque, nous ayons disposé deux objets destinés à donner des ombres mouvantes. Il s'agit, nous devons le préciser, d'un tourne-disque assez spécial : vu d'en haut, il tourne dans le sens opposé à celui des aiguilles d'une montre, ce qui le rend peu apte à son utilisation en vrai tourne-disque, mais tant pis. Nous devons choisir ce sens de rotation, parce que c'est le sens dit « positif » en trigonométrie.

Sur le plateau, nous avons placé un premier objet M, donnant une ombre M' sur le mur. Nous l'avons mis à une distance du centre 0 qui est proportionnelle à la distance R.

L'ombre M' décrit donc sur le mur un mouvement qui représente fort bien la variation au cours du temps de la tension e_R.

Dans une direction OP, perpendiculaire à OM, nous avons placé un objet P, à une distance OP de 0 proportionnelle à $L\omega$ (la valeur de $L\omega$, comme la valeur R, se mesure en ohms, nous pouvons choisir, par exemple, une échelle pour OM et OP de un millimètre par ohm).

L'ombre P' de P décrit sur le mur un mouvement qui représente la variation au cours du temps de e_L. En raison du choix des positions de M et P, les variations des positions de M' et P' représentent bien, à l'échelle, les variations simultanées de e_R et e_L.

Nous devons maintenant considérer que les positions de M' et P' sont repérées **algébriquement,** le sens positif étant celui qui est indiqué par la flèche sur le mur. L'origine des mesures des abscisses de M' et P' est le point O', ombre de 0. Dans le cas de figure, les abscisses de M' et P' sont positives toutes les deux.

Comment devrions-nous placer un objet pour que le mouvement de son ombre représente, à la même échelle, la variation au cours du temps

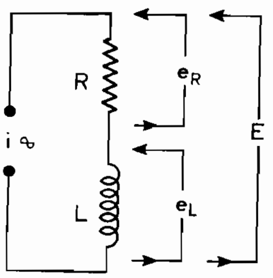

Fig. 6. – Le même courant alternatif passe dans le résisteur R et dans le bobinage L. On trouve une tension efficace e_R aux bornes de R, e_L aux bornes de L mais la tension efficace E aux bornes de l'ensemble n'est pas égale à la somme arithmétique de e_L et e_R : il faut tenir compte de leur déphasage.

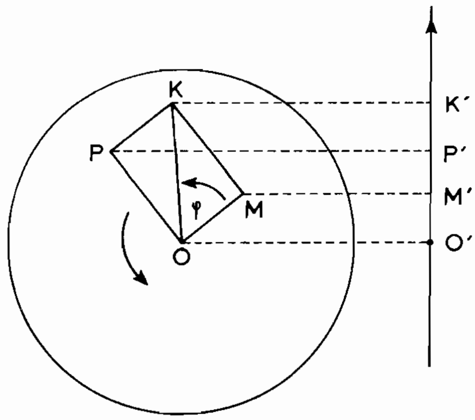

Fig. 7. – Pour montrer l'addition des tensions e_R et e_L de la figure 6, on va les figurer par des mouvements d'ombres sur le tourne-disque. La somme des projections de OM et de OP est égale à la projection de la diagonale OK du rectangle.

de E, en admettant que ce soit possible ?

Nous allons le trouver facilement. A chaque instant, la valeur de E est la somme de e_L et de e_R (des valeurs **instantanées** de e_R et de e_L). Il nous faut donc, à chaque instant, faire la somme de O'M' (représentation à l'échelle de la valeur instantanée de e_R) et de O'P' (représentation à la même échelle de la valeur instantanée de e_L).

Un tout petit peu de géométrie. Il s'agit d'ajouter les projections des segments OM et OP (nous ne disons pas « des vecteurs OM et OP », mais c'est pour n'inquiéter personne). Si c'est dans le cas de la figure 7, il s'agit d'une simple addition arithmétique et l'on voit immédiatement que, si l'on construit le rectangle OPKM, la projection de OK est la somme des projections de OM et OP. On le voit en observant le côté PK du rectangle, égal au côté OM et parallèle à ce dernier : la projection de PK, soit P'K' est la même que la projection O'M' de OM.

On montrerait facilement que ce que nous avons établi reste vrai pour toute position du rectangle OPKM, rectangle par ailleurs indéformable, qui tourne avec le plateau du tourne-disque en gardant la même forme.

Donc, la tension E varie comme le représente le mouvement de l'ombre K' de K, soit suivant une loi sinusoïdale aussi. Le décalage entre le segment OM (qui représente la tension e_R, en phase avec le courant) et la tension E est donné par l'angle φ que fait le segment OK avec le segment OM.

(à suivre)

J.-P. OEHMICHEN
Ingénieur E.P.C.I.