

## BOBINAGES ET CONDENSATEURS EN COURANT ALTERNATIF

(Suite voir N° 1548, N° 1553, N° 1557 et N° 1561)

### LE « Q MÈTRE »

Ce facteur de qualité  $Q$  des bobinages est extrêmement important : il traduit, en quelque sorte, la fidélité avec laquelle le bobinage réel se comporte comme un bobinage théorique.

On mesure ce facteur avec un appareil de mesure, appelé, sans grand souci d'originalité, le « Q-mètre ».

Son schéma simplifié est celui de la figure 17.

Il utilise un générateur de tension alternative, couvrant une grande gamme de fréquence,  $G$ . Ce générateur est essentiellement prévu pour fournir son énergie de sortie sous forme d'un courant de forte intensité sous faible tension.

Ce courant efficace est mesuré par un ampèremètre haute fréquence  $A$ .

On envoie le courant dans un résistor  $r$ , de très petite résistance, aux bornes duquel

on trouve donc une tension  $e$  bien connue, quand on a amené le courant à une valeur déterminée (lue sur l'ampèremètre  $A$ ).

La petite tension  $e$  aux bornes de  $r$  est appliquée à un circuit oscillant comportant une bobine  $L$  et un condensateur variable  $C$ .

Un voltmètre électronique  $VE$  permet de lire la valeur  $u$  de la tension efficace aux bornes de  $C$ . Comme on connaît  $e$ , en lisant  $u$ , on peut calculer le rapport  $u/e = Q$ .

Le condensateur  $C$  permet d'accorder le circuit  $L-C$  à la fréquence injectée par le générateur  $G$ .

Le voltmètre  $VE$  est direc-

tement gradué en coefficient de surtension  $Q$ .

Le Q-mètre est principalement destiné à l'étude des bobinages : on branche le bobinage à étudier entre les bornes  $B_1$  et  $B_2$  : c'est lui qui constitue l'élément  $L$  du circuit oscillant.

On cherche alors la fréquence du générateur qui permet de réaliser l'accord, avec la gamme de capacité dont le condensateur  $C$  permet de disposer, et on lit, sur le voltmètre, la surtension  $Q$  à cette fréquence.

Evidemment, on peut choisir des fréquences différentes, à condition de modifier en conséquence la capacité de  $C$ .

En général, on choisit une fréquence donnée, parmi quelques-unes indiquées sur le cadran des fréquences du générateur. Cette fréquence est choisie avec une valeur telle que l'on peut, en utilisant une graduation adéquate du condensateur variable, déterminer directement le coefficient de self-induction.

Le condensateur variable, en effet, porte deux graduations : une en capacité, une autre en coefficient de self-induction.

Prenons un exemple : supposons que la fréquence du générateur soit : 1,5916 MHz (cette fréquence n'est pas choisie au hasard, elle corres-

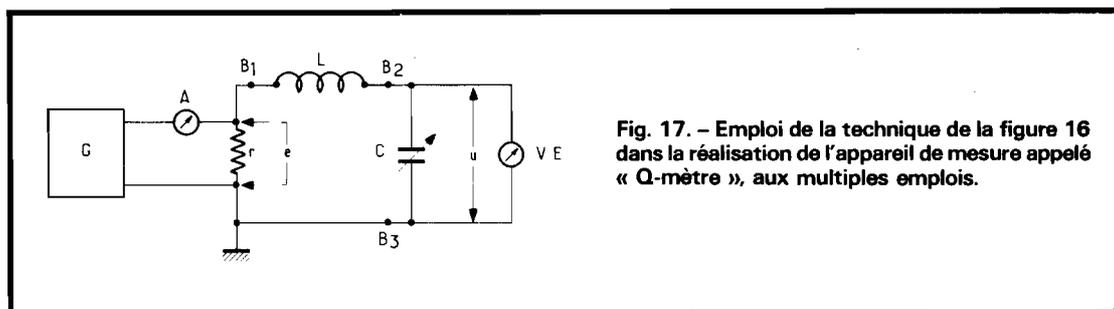


Fig. 17. - Emploi de la technique de la figure 16 dans la réalisation de l'appareil de mesure appelé « Q-mètre », aux multiples emplois.

pond à une pulsation  $\omega$  de  $10^7$  radian/s, pour laquelle l'impédance d'un condensateur de 100 pF, par exemple, est exactement de  $1\ 000\ \Omega$ .

Un condensateur de 100 pF (impédance  $1\ k\Omega$ ) accordera donc à cette fréquence un bobinage dont l'impédance, à la pulsation de  $10^7$ , vaut  $1\ k\Omega$ , soit un bobinage de :  $10^{-4}\ H$  (ou  $100\ \mu H$ ) puisque  $10^7 \times 10^{-4} = L\omega = 1\ 000\ \Omega$ .

En face de la graduation 100 pF du condensateur, on aura donc une graduation « 100 » pour les valeurs de self-induction. En face de la graduation 50 pF du condensateur variable, il y aura une graduation 200 pour les valeurs de coefficient de self-induction. Cette valeur sera de 25 en face de la graduation 400 pF du condensateur, et ainsi de suite.

Donc, ayant réglé la fréquence sur 1,5916 MHz (en amenant un trait défini du cadran des fréquences sous le repère fixe dans le générateur G), on agit sur le condensateur variable jusqu'à ce que le voltmètre VE indique une déviation maximale, attestant que l'on a réalisé l'accord : on lit alors la valeur de L en microhenrys sur la graduation.

On a donc d'un seul coup la valeur du coefficient de self-induction du bobinage L et le coefficient de surtension Q de ce bobinage à la fréquence 1,5916 MHz.

Cet emploi du Q-mètre pour la mesure des coefficients de self-induction est même si fréquent dans les laboratoires que les techniciens en arrivent souvent à considérer le Q-mètre comme un appareil uniquement destiné à mesurer les coefficients de self-induction.

**ON FAIT BIEN  
PLUS AVEC  
UN Q-MÈTRE**

Or, si la mesure de L est un rôle fort intéressant du Q-mètre, il serait injuste de limi-

ter l'emploi de ce merveilleux appareil à cette mesure (car il existe des « self-mètres » qui se limitent à la mesure de L et qui ont des possibilités bien plus réduites que le Q-mètre).

Evidemment, on a le coefficient Q lors de la mesure de L, comme « en prime ». Ce coefficient est fort important : il détermine les possibilités du bobinage, dont nous avons précisé que la valeur de son coefficient de self-induction ne suffisait pas du tout à le caractériser, tant un bobinage diffère de cet élément « purement inductif » des calculs et schémas.

Ensuite, on peut mesurer ce coefficient Q à différentes fréquences, dans la mesure, toutefois, où l'on peut réaliser l'accord avec le condensateur variable (éventuellement mis en parallèle avec un condensateur fixe). La variation de Q avec la fréquence renseigne fort bien sur différents paramètres du bobinage, dont sa « capacité répartie », formée par les fils des différentes spires au voisinage les unes des autres.

On ne se borne pas là : il est facile de mesurer la résistance R du bobinage étudié, en courant continu. On calcule alors, pour la fréquence donnée, la valeur de  $\omega L/R$  et on compare le résultat au coefficient Q trouvé. Si ce coefficient est nettement plus bas que la valeur calculée, on peut en déduire qu'il y a des pertes d'une autre nature (par exemple dans le noyau si le bobinage en comporte un).

Les possibilités du Q-mètre ne sont pas encore épuisées : il peut également servir à mesurer des capacités.

On utilise alors, branché entre  $B_1$  et  $B_2$ , une bobine étalonée, d'excellente qualité, fournie avec le Q-mètre, de coefficient Q connu. On choisit une fréquence telle que l'accord se fasse pour la position du condensateur variable qui correspond presque au maximum de sa capacité (environ 500 pF), et l'on note la valeur de la capacité  $C_1$  qui donne cet accord.

On met alors le condensateur inconnu entre les bornes  $B_2$  et  $B_3$ , donc en parallèle avec le condensateur variable, et l'on diminue la capacité de ce dernier jusqu'à ce que l'on retrouve l'accord. On a alors, sur le cadran de C une indication  $C_2$ .

Le condensateur inconnu a une capacité de  $C_1 - C_2$ .

On trouve ainsi un peu plus que la simple indication de la capacité du condensateur. Comme on connaît le coefficient de surtension du bobinage étalon à la fréquence utilisée, on voit si la valeur trouvée est bien celle qui est indiquée sur le bobinage. Si l'on trouve moins, cela signifie que le condensateur mesuré n'est pas de très bonne qualité : il a des pertes (résistance série, résistance parallèle de fuite, pertes dans le diélectrique) et l'on peut en apprécier l'importance.

#### LA VARIATION D'IMPÉDANCE DU CIRCUIT SÉRIE

Toujours en se plaçant dans le cas où l'on a mis en série un condensateur et un bobinage supposés parfaits, nous avons donc vu que l'impédance de ce circuit passait par une valeur quasi-nulle pour la fréquence de résonance du circuit, celle sur laquelle il oscille si l'on se contente de charger le condensateur et de le brancher aux bornes du bobinage.

Que se passe-t-il à une autre fréquence ? C'est assez facile à prévoir : pour une fréquence plus faible que celle de la résonance, l'impédance du condensateur est plus grande qu'à la résonance, celle du bobinage est plus faible : donc l'impédance de l'ensemble est celle d'un condensateur.

A l'opposé, pour une fréquence plus élevée que celle de la résonance, l'impédance du bobinage est plus grande qu'à la résonance, celle du condensateur plus faible : le

bobinage l'emporte et le tout se comporte comme un bobinage.

Si l'on veut une formule plus précise, nous dirons que l'impédance, en module (c'est-à-dire sans tenir compte du déphasage apporté) est :

$$Z = (L\omega - \frac{1}{C\omega})$$

La variation de cette impédance en fonction de la fréquence se fait donc comme l'indique la courbe de la figure 18 (il est à noter que, sur cette figure, nous avons utilisé pour l'axe des fréquences une graduation linéaire, et non logarithmique comme on le fait pour l'étude des filtres).

On voit que, pour les fréquences inférieures à la fréquence  $F_0$  de résonance, l'impédance est du type capacitif (courant en avance sur la tension) et qu'elle part de l'infini pour les fréquences nulles, pour descendre régulièrement jusqu'à zéro pour  $F_0$ .

On devrait, en toute rigueur, parler d'impédance négative avant  $F_0$  et positive après, mais nous considérons la valeur absolue de l'impédance, le simple rapport arithmétique de la tension efficace à l'intensité efficace, aussi s'agit-il uniquement d'une valeur toujours positive.

Quand F est supérieure à  $F_0$ , l'impédance a un caractère inductif (intensité en retard de  $\pi/2$  sur la tension) et elle croît avec la fréquence.

Plus la fréquence augmente, moins le condensateur a d'importance. Pour les fréquences très élevées, la courbe se confond presque avec la droite :

$$Z = \omega L = 2 \pi F L$$

qui correspond à l'impédance du bobinage seul.

Dans la pratique, vu l'imperfection du bobinage et la présence inévitable de la résistance série, la courbe d'impédance est celle qui est tracée en pointillé sur la figure 18. Le minimum de l'impédance n'est plus zéro, mais r.

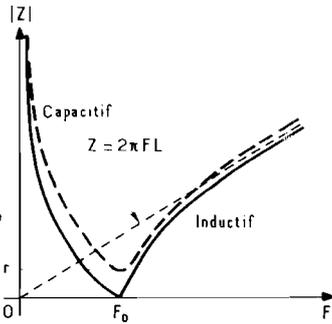


Fig. 18. - Variation en fonction de la fréquence de l'impédance (en module) d'un circuit résonnant L-C, où L et C sont montés en série. La courbe en trait plein correspond au cas d'un bobinage parfait, la courbe en pointillé au cas d'un bobinage réel, comportant un terme résistif : l'impédance ne s'annule plus totalement à la fréquence de résonance.

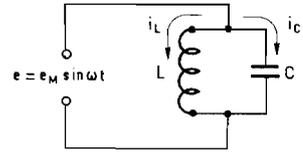


Fig. 19. - Le circuit est maintenant composé de L en parallèle avec C, on l'appelle « circuit bouchon », car il bloque le passage du courant à la fréquence qui correspond à sa résonance.

### LE CIRCUIT RÉSONNANT PARALLÈLE

Dans l'étude de l'oscillation propre du circuit, nous avons supposé que l'on branchait un condensateur C chargé aux bornes d'un bobinage L.

Pour déterminer ce qui se passait par la suite, nous avons ouvert le circuit et injecté une petite tension e aux bornes de cette ouverture (fig. 16).

Nous allons maintenant supposer que nous attaquons autrement le circuit oscillant. Nous le réalisons toujours avec un condensateur C branché aux bornes d'un bobinage L, mais nous allons appliquer une tension alternative e aux bornes du bobinage (et du condensateur), comme l'indique la figure 19.

L'étude d'un tel circuit est facile. Nous aurons bien une tension alternative aux bornes de L (celle-là même que nous appliquons), il y aura donc passage de courant  $i_L$  dans le bobinage. La même tension étant appliquée aux bornes de C, il y aura passage d'un courant  $i_C$  dans le condensateur.

Maintenant, supposons que l'on applique à l'ensemble une tension à la fréquence de résonance du circuit.

Les impédances de C et de L sont égales en valeur absolues, donc les amplitudes des courants circulant dans L et C sont égales, mais elles sont de sens opposé.

Reprenons notre tournedisque de la figure 1, sur

lequel nous allons maintenant figurer les intensités.

La tension e (fig. 2P) variera comme l'abscisse O'A' de l'ombre A' projetée sur le mur par l'objet A, lui-même situé à une distance OA =  $e_M$  du centre O du plateau.

Pour avoir une figuration de l'intensité  $i_C$ , nous placerons un objet F dans la direction OF perpendiculaire à OA, à une distance du centre égale à :

$$OF = \frac{e_M}{Z_C} = e_M / \frac{1}{C\omega} = e_M C\omega$$

et le mouvement de son ombre F' nous donnera la variation de l'intensité  $i_C$ .

En ce qui concerne le courant  $i_L$ , nous placerons un troisième objet, G dans une direction OG perpendiculaire à OA, mais dans la direction opposée à OF, puisque le courant dans un bobinage est décalé de  $\pi/2$  par rapport à la tension, comme celui qui passe dans le condensateur, mais en retard par rapport à la tension.

Comme l'intensité efficace du courant dans L est la même que celle du courant dans C, le segment OG doit être égal au segment OF : les points F et G sont symétriques par rapport à O.

L'intensité  $i_L$  sera figurée par la variation de l'abscisse O'G' de l'ombre G' de G.

On voit tout de suite que, à chaque instant, les points G' et F' seront symétriques par rapport à O'.

Or, quand nous voulons connaître l'intensité totale i débitée par la source alternative e, il faut ajouter vectoriellement les courants, c'est-à-dire les ajouter en tenant compte de leurs phases.

Qu'obtiendrons-nous ? Tout simplement zéro, à chaque instant.

Le courant débité par la source e est NUL.

Cela n'empêche pas qu'il y ait un passage d'un courant dans L, d'un autre courant dans C, mais ces courants, en réalité, circulent de l'un à l'autre (de L à C puis de C à L) sans rien emprunter au circuit extérieur : ils se compensent exactement.

De la tension, pas de courant : l'impédance de notre circuit est INFINIE !

Décidément, quand on utilise les bobines et condensateurs en courant alternatif, il faut s'attendre à des surprises !

### L'IMPÉDANCE DU « CIRCUIT BOUCHON »

Donc, à la fréquence de résonance, ce circuit constitué par L et C en parallèle s'oppose à tout passage de courant. On le désigne couramment sous le nom très explicite de « circuit bouchon ».

Il n'aura cette propriété de blocage du courant que pour la fréquence de résonance. Pour une fréquence plus faible, par exemple, le courant

va augmenter dans L, diminuer dans C, en raison de la variation de leurs impédances respectives. Tout se passera donc comme si l'on avait un circuit purement inductif, avec une impédance limitée et un courant en retard sur la tension.

A l'opposé, si on considère une fréquence supérieure à la fréquence de résonance du circuit, il passera une intensité plus élevée dans le condensateur que dans le bobinage : le tout se comportera comme un condensateur pur, avec une intensité en retard sur la tension.

La courbe donnant la variation du module de l'impédance en fonction de la fréquence sera donc celle de la figure 21 (en trait plein).

La verticale d'abscisse  $F_0$  (fréquence de résonance) correspond à une sorte de « tangente à l'infini » des deux branches montantes de la courbe en trait plein. On l'appelle une « asymptote » : elle marque une discontinuité dans la valeur du module de l'impédance, cette dernière devenant infinie pour cette valeur de fréquence.

Pour les fréquences très faibles, le condensateur ne joue aucun rôle, car son impédance est très élevée et il se trouve en parallèle sur L. La variation de l'impédance aux fréquences faibles ressemble donc à celle d'un simple bobinage de coefficient de self-induction L. La tangente à l'origine à la courbe est donc la droite d'équation :

$$Z_L = \omega L = 2\pi F L$$

Dans la pratique, on n'arrive pas à une impédance infinie pour le circuit bouchon à l'accord ; elle est simplement très élevée, ainsi que le montre la courbe en pointillé de la figure 21.

### COMPLIQUONS LES CHOSES...

... Ou plutôt, ne les compliquons pas trop. Evidemment, en associant des bobinages, des condensateurs, des résisteurs, dans des réseaux de plus en plus complexes, on peut obtenir des résultats très intéressants : les filtres en sont un exemple.

Mais on arrive vite à des réseaux dont l'étude est extrêmement difficile et notre but n'est pas là.

Nous voudrions, tout simplement, pour conclure, donner un exemple d'un circuit assez curieux, dont on peut faire l'étude de façon relativement simple.

Le circuit en question est celui de la figure 22, désigné sous le nom de celui qui l'a étudié en premier : le « circuit de Boucherot ».

On voit que la tension alternative  $e$  est appliquée à un premier circuit comportant un résistor  $R$  en série avec un condensateur  $C$ , et à un

second, en parallèle avec le premier, comportant un autre résistor,  $R'$ , en série avec un bobinage  $L$ .

Le but de cette étude est le suivant : nous voudrions trouver les valeurs à donner à  $R$ ,  $R'$ ,  $L$  et  $C$  pour que ledit circuit se présente comme un résistor pur, donc avec une impédance parfaitement constante, indépendante de la fréquence. Il s'agit de voir si c'est possible, et à quelles conditions on pourrait y arriver.

Les techniciens habitués à jongler avec les « impédances complexes », quand on leur pose la question, se précipitent sur le sujet, expriment l'impédance de l'ensemble, laquelle se présente sous une forme peu amène, et se lancent dans les calculs, au demeurant très longs.

Il vaudrait mieux réfléchir un peu avant de foncer dans les expressions algébriques.

Voyons un peu comment variera l'impédance de ce circuit en fonction de la fréquence.

La courbe de la figure 23 en donne une idée : on l'établit assez facilement par le raisonnement.

En effet, aux fréquences très basses, l'impédance du bras contenant le condensateur est quasiment infinie, on n'a donc pas à tenir compte de ce bras, et l'on peut raisonner comme si nous n'avions que

$R'$  et  $L$ . Un tel circuit présentera donc une impédance qui a des chances de partir de  $R'$  et de croître un peu quand la fréquence augmentera un peu.

Aux fréquences très élevées, on n'aura pas à tenir compte de la branche qui comporte le bobinage : l'impédance de ce dernier est si grande aux fréquences élevées que c'est comme s'il n'existait pas. Le circuit se réduit à  $R$  et  $C$  : son impédance va donc tendre vers  $R$  quand, la fréquence tend vers l'infini, l'impédance de  $C$  tend vers zéro et il ne reste plus que  $R$ .

Entre les deux traits verticaux en pointillé, on ne peut pas savoir comment variera l'impédance sans faire de longs calculs, nous ne nous y lancerons pas. Nous ne tracerons donc pas la courbe de l'impédance dans cette zone, il n'y aura sur la figure 23 que le début de cette courbe (pour les fréquences très basses) et la fin (pour les fréquences très hautes).

Arrêtons-nous et réfléchissons. Si l'impédance doit demeurer constante, il faut bien que le point très à droite de la courbe soit au même niveau que le point très à gauche. Donc  $R$  et  $R'$  doivent avoir la même valeur, nous remplacerons  $R'$  par  $R$ . Nous continuerons cependant à désigner par  $R'$  le résistor en

série avec  $L$  et par  $R$  celui qui est en série avec  $C$ , uniquement pour éviter une confusion, mais en sachant que leurs résistances sont égales.

Cette simple remarque va déjà simplifier beaucoup la suite. Même si l'on emploie maintenant la méthode des impédances complexes, le calcul se trouve bien réduit si l'on part de l'hypothèse :

$$R' = R.$$

Mais cela n'est pas tout : continuons à réfléchir.

Si l'impédance doit rester constante, c'est qu'elle ne contient plus de terme du genre  $L\omega$  ou  $1/C\omega$ . Il ne doit pas y avoir de déphasage entre la tension et le courant.

Or, le courant qui passe dans le bras  $R - C$  est déphasé en avance sur la tension. Celui qui passe dans le bras  $R' - L$  est déphasé en retard sur la tension. Il faut donc que les deux composantes déphasées dans les bras en question se compensent, pour que la somme vectorielle des courants soit en phase avec la tension.

Reprenons notre présentation sur le tourne-disque des tensions et courants.

Nous allons raisonner sur les tensions  $e_R$  aux bornes de  $R$  et  $e_{R'}$  aux bornes de  $R'$  comme sur les courants  $i$  et  $i'$  : ces courants sont, en effet, rigoureusement proportionnels à ces tensions, puisque

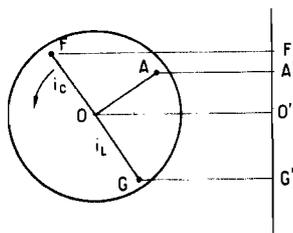


Fig. 20. - Dans la représentation sur le plateau du tourne-disque, ce sont maintenant les intensités  $i_C$  et  $i_L$  qui, étant égales et en opposition de phase, ont une somme constamment nulle.

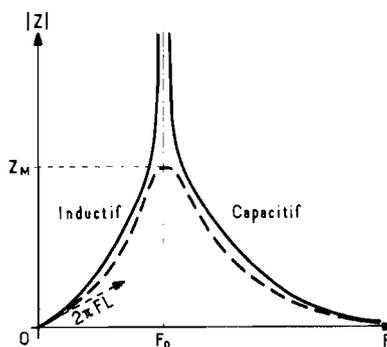


Fig. 21. - Variation en fonction de la fréquence de l'impédance du circuit de la figure 19. En trait plein, la variation théorique, l'impédance passant par l'infini à la fréquence de résonance. En trait pointillé, la courbe pratique, où l'effet « bouchon » du circuit est un peu atténué à la fréquence de résonance  $F_0$ .

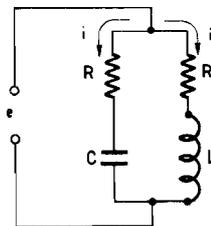


Fig. 22. - Exemple de circuit complexe, dit « de BOUCHEROT », dans lequel nous voudrions rendre l'impédance indépendante de la fréquence.

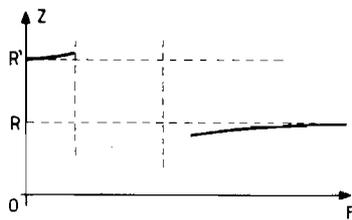


Fig. 23. - Dans le circuit de BOUCHEROT, si l'on considère la valeur de l'impédance à fréquence très basse, on trouve  $R'$ ; à fréquence très élevée, on trouve  $R$ ; si l'on veut que cette impédance soit constante, la première condition est que  $R = R'$ .

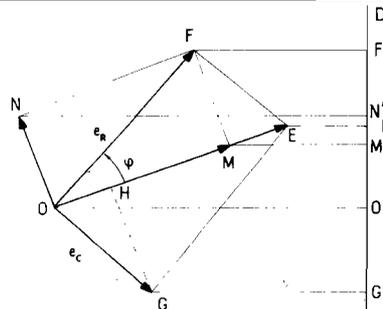


Fig. 24. - Construction des tensions et courants dans la branche R - C du circuit de la figure 22.

les résistances  $R$  et  $R'$  sont égales entre elles.

Examinons d'abord (fig. 24) ce qui se passe dans le bras R - C.

Nous traçons un vecteur  $\vec{OE}$  qui représente la tension  $e$  (rappelons que le terme de « vecteur » indique qu'il s'agit d'un segment dont la longueur et la direction comptent également : nous allons faire tourner toute la figure autour de  $O$  et en envisager la projection -  $L$ '« ombre » - sur une droite  $D$ ). La variation de l'« ombre »  $O'E$  de  $\vec{OE}$ , qui tourne, donne l'image de la variation de  $e$  en fonction du temps.

L'intensité  $i$  qui passe dans le bras R - C est en phase avec la tension  $e_R$  aux bornes de  $R$ . Nous figurerons cette tension  $e_R$  par le vecteur  $\vec{OF}$ , autrement dit, c'est la variation au cours du temps de l'ombre  $O'F'$  de  $\vec{OF}$  (tournant avec le reste de la figure indéformable) qui nous donne la loi de variation de  $e_R$  au cours du temps.

L'intensité  $i$ , donc la tension  $e_R$ , est déphasée en avance de  $\varphi$  par rapport à la tension. Cet angle  $\varphi$ , nous l'avons déjà trouvé, et nous savons que sa tangente est :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{R.C \omega}$$

Maintenant, envisageons la tension  $e_C$  aux bornes de  $C$ . Elle doit être en retard de  $\pi/2$  ( $90^\circ$  ou un quart de période) par rapport à l'intensité  $i$ , donc par rapport à  $e_R$ . Nous la représenterons par le vecteur  $\vec{OG}$ , c'est-à-dire que ce sera la variation de l'ombre  $O'G'$  en

fonction du temps qui représentera la variation de  $e_C$ .

Encore un petit effort de réflexion : la somme (vectorielle) de  $\vec{OF}$  et de  $\vec{OG}$  doit être  $\vec{OE}$ , puisque la tension totale, aux bornes de l'ensemble  $C$  et  $R$ , est  $e$ .

Si l'on trace, au bout  $F$  du vecteur  $\vec{OF}$  un vecteur égal et parallèle à  $\vec{OG}$ , ce doit être  $\vec{FE}$  pour que l'on arrive en  $E$ .

Le triangle  $OFE$  est rectangle en  $F$ , puisque  $OG$  est perpendiculaire à  $OF$ , donc  $FE$  l'est aussi.

### DÉCOMPOSITION D'UNE INTENSITÉ EN DEUX COMPOSANTES

La tension  $e_R$ , toujours proportionnelle à l'intensité  $i$  et en phase avec cette dernière, peut être considérée comme la somme de deux composantes :

- la première,  $\vec{OM}$ , est en phase avec la tension  $e$  ;
- la seconde,  $\vec{ON}$ , en avance de phase de  $\pi/2$  ( $90^\circ$  ou un quart de période) par rapport à  $e$ .

Cette « décomposition » revient à dire que la projection  $O'F'$  de  $\vec{OF}$  sur la droite  $D$  est constamment la somme des projections  $O'M'$  de  $\vec{OM}$  et  $O'N'$  de  $\vec{ON}$ .

Nous allons maintenant recommencer le raisonnement, d'une façon très analogue, pour le bras  $R' - L$  (fig. 25).

Nous ne détaillerons plus autant les représentations

vectorielles et les notions de « variations de longueurs d'ombres » (attention, nous n'avons pas dit « longueurs d'ondes »!!!) que la première fois : les lecteurs sont maintenant habitués à notre tourne-disque qui emmène dans sa rotation une figure indéformable.

La tension  $e$  est toujours représentée par le même vecteur  $\vec{OE}$  (nous aurions pu, et peut-être dû, faire la figure sur le même graphique que la précédente, mais le tout aurait été trop embrouillé).

La tension  $e_R$  aux bornes de  $R'$  (en phase avec le courant  $i'$  et proportionnelle à ce dernier) est en retard de phase d'un angle  $\varphi'$  par rapport à  $e$ .

Nous connaissons cet angle, sa tangente vaut :

$$\operatorname{tg} \varphi' = \frac{\omega L}{R}$$

Nous représenterons donc la tension  $e_{R'}$  par le vecteur  $\vec{OS}$ .

La tension aux bornes de  $L$  doit être en avance de phase de  $\pi/2$  par rapport à l'intensité, donc par rapport à  $e_R$ . Cette tension,  $e_L$ , variera comme l'ombre  $O'T'$  du vecteur  $\vec{OT}$ , perpendiculaire en  $O$  à  $\vec{OS}$ .

Comme la somme de  $e_{R'}$  et de  $e_L$  doit donner  $e$  à chaque instant, nous aurons donc un vecteur  $\vec{OT}$  qui, ajouté vectoriellement à  $\vec{OS}$ , doit donner  $\vec{OE}$ . Autrement dit, le vecteur  $\vec{OT}$  doit être égal et parallèle au vecteur  $\vec{SE}$ . La figure  $OTES$  est donc un parallélogramme. C'est même un rectangle, puisque  $OT$  et  $OS$  sont perpendiculaires.

Nous pouvons maintenant

décomposer la tension  $e_{R'}$  en deux composantes comme nous l'avons fait pour  $e_R$ . Il y aura la composante  $OJ$  en phase avec  $e$ , donc correspondant à un vecteur  $\vec{OJ}$  porté par  $OE$ , et la composante  $OK$ , le vecteur  $\vec{OK}$  étant perpendiculaire en  $O$  à  $OE$ .

### NOUS SOMMES (ENFIN !) AU BOUT DE NOS PEINES

Allez, un petit effort, c'est presque fini !

Nous souhaitons, nous l'avons dit, que l'intensité totale  $i$  soit en phase avec la tension  $e$ .

Comme nous l'avons dit,  $R$  étant égal à  $R'$  et les tensions  $e_R$  et  $e_{R'}$  étant proportionnelles à  $i$  et  $i'$ , en phase avec elles, on peut raisonner sur les tensions  $e_R$  et  $e_{R'}$  comme sur les intensités  $i$  et  $i'$ .

Nous souhaitons donc que les composantes déphasées des tensions  $e_R$  et  $e_{R'}$  soient égales entre elles, mais opposées.

Il faut, par conséquent, que les vecteurs  $\vec{ON}$  et  $\vec{OK}$  aient la même longueur.

Sur la figure 24, nous abaissons de  $G$  la perpendiculaire  $GH$  sur  $OE$  ; sur la figure 25, abaissons de  $T$  la perpendiculaire  $TW$  sur  $OE$ .

En examinant la figure 24, on voit facilement (faites appel à vos souvenirs de géométrie de 4<sup>e</sup>), que :

$$ON = MF = GH$$

De même, en examinant la figure 25, on voit que :

$$OK = JS = TW$$

Nous voulons, d'autre part, comme on l'a vu que :

$$OK = ON$$

On en déduit donc que :  $ON = MF = GH = KO = JS = WT$

(nous avons orienté les segments  $SJ$ ,  $KO$  et  $WT$  dans le même sens que  $ON$  pour faciliter la compréhension).

La seule solution possible

