Usage du controleur universel Mesure des courants alternatifs

DANS les articles précédents, nous avons étudié très simplement les problèmes posés par la mesure des tensions et des intensités continues, mesures faites avec le banal contrôleur universel que chacun se doit de posséder s'il prétend faire de l'électronique ou simplement de l'électricité.

Nous allons maintenant passer aux mêmes mesures, mais en courant alternatif. Nous pouvons déjà supposer que ce sera plus difficile, les difficultés rencontrées risquant de s'ajouter à d'autres, nouvelles ! Et nous ne risquons pas de nous tromper.

Un peu de théorie

Un préalable indispensable est déjà de bien poser le problème en examinant attentivement ce qu'est un courant alternatif.

Contrairement au courant continu qui circule toujours dans le même sens, imposé par la polarité du générateur, le courant alternatif en change régulièrement et constamment. Le générateur d'un tel type de courant n'est pas polarisé puisque chaque pôle constitue tantôt un pôle positif, tantôt un pôle négatif.

La connaissance d'un courant alternatif consiste donc à savoir comment se fait la variation du sens de passage des électrons. Si le courant continu correspond à ce que l'on appelle une fonction constante (l'intensité est la même quel que soit l'instant considéré, dans une configuration stable) les courants alternatifs correspondent à des fonctions dites « périodiques ». De telles fonctions ont des variations qui se reproduisent... périodiquement, soit à intervalles réguliers. La durée de l'intervalle élémentaire de variation est appelé PERIODE. Pendant une période, il se produit un CYCLE de variation. Le nombre de périodes exécutées pendant l'unité de temps, c'est-à-dire la seconde, est la FREQUENCE du courant alternatif. On a évidemment les relations suivantes, après avoir posé T pour la période et N pour la fréquence :

$$T = \frac{1}{N} \text{ ou } N = \frac{1}{T}$$

La période est l'inverse de la fréquence. La fréquence est l'inverse de la période.

L'unité de fréquence est le cycle par seconde, appelé HERTZ (Hz) dont la période est de 1 seconde. C'est une valeur très basse. Il est donc nécessaire de lui adjoindre des multiples. On trouve ainsi :
- le kilohertz (kHz) 1 kHz = 10^3 Hz
- le mégahertz (MHz) 1 MHz = 10^6 Hz
- le gigahertz (GHz) 1 GHz = 10^9 Hz

Pas de sous-multiples usuels.

Nous verrons plus loin que le champ d'action du contrôleur universel ne va pas très loin dans ce domaine, limité de quelques dizaines de hertz à quelques kilohertz !

La fréquence ou vitesse de changement de sens du courant alternatif est donc un élément important à connaître pour toute tentative de mesure. Mais ce n'est pas le seul. En effet, selon le générateur utilisé, la FORME de la variation aura ses caractéristiques propres. Cette forme apparaît dès que l'on passe à la représentation graphique de la fonction correspondante.

La forme la plus répandue est la forme SINUSOIDALE. C'est la plus répandue parce que c'est la plus naturelle. Ainsi, toutes les vibrations de lames, de cordes, de colonnes d'air, qui sont à l'origine des sons, se font idéalement sous forme sinusoïdale. Les courants électriques sinusoïdaux ont donc proliféré dans tous les appareils traitant les sons. C'est le domaine de la Basse Fréquence (ou mieux de la HiFi !). Basse fréquence parce que les fréquences mises en jeu ne dépassent guère le seuil d'audibilité de nos tympans qui est de l'ordre de 15 à 20 kHz.

La plus répandue aussi parce que c'est la forme sinusoïdale qui est fournie par les alternateurs, ces grands pourvoyeurs de l'énergie électrique urbaine. Le courant électrique de nos prises de courant est sinusoïdal !

Mais, au fait, pourquoi ce mot ? Sinusoïdal vient de sinus ! Le sinus d'un angle est l'un de ses rapports trigonométriques. Dans un triangle rectangle, (voir fig. 1), le sinus d'un angle aigu est le rapport entre la mesure du côté opposé et celle de l'hypoténuse.

$$\sin \alpha = \frac{AB}{BC}$$

Si l'on se reporte dans le cercle trigonométrique, (voir fig. 2), c'est-à-dire un cercle de rayon unité (R = 1). convenablement orienté, le sinus apparaît en OH, dont la mesure algébrique représente le sinus de l'angle.

$$\sin \alpha = \frac{\overline{OH}}{\overline{OM}} = \frac{\overline{OH}}{1} = \overline{OH}$$

Si l'angle varie de 0 à 360° (ou de 0 à 2 radians) on voit que le sinus varie de + 1 à − 1 selon les modalités du tableau suivant :

α	0	90	180	270	360	degrés
	θ	$\frac{\pi}{2}$	π	$\frac{3\pi}{2}$	2π	radians
Sin α	0	+ 1	0	−1	0	

La représentation graphique exacte de cette variation est donnée en figure 3. On peut se limiter à un tour de cercle ($0 \leqslant \alpha \leqslant 360°$) : on a alors un seul cycle. Mais on peut aussi envisager que le rayon OM fasse de nombreux tours. Dans ce cas, on a autant de cycles que de tours et le graphique se répète identique à lui-même aussi loin qu'il est nécessaire.

La courbe obtenue est appelée SINUSOIDE. Il s'avère que les courants électriques dont nous venons de parler correspondent à ce modèle mathématique. C'est pourquoi ils sont appelés sinusoïdaux. Dans un tel cas, l'intensité instantanée est une fonction sinusoïdale du temps :

$i = I \sin \omega t$

I étant l'intensité de crête, ω étant la pulsation, ou angle de rotation du rayon OM par unité de temps (seconde). Ainsi, si nous considérons le courant alternatif du réseau, de fréquence 50 Hz, nous savons qu'il se produit 50 cycles par seconde, donc 50 tours de cercle trigonométrique par seconde. Comme un tour vaut 360° ou mieux 2π radians, cela fait $50 \times 2\pi$ radians par seconde, donc $\omega = 100\pi$ radians.

L'équation exacte de ce courant est donc :

$i = I \sin (100 \pi t)$

Sur un plan plus général, si N est la fréquence du courant, on a $\omega = 2\pi \times N$ et l'équation générale est : $i = I \sin 2\pi N t$

La forme sinusoïdale n'est pas la seule à exister. On trouve également :

– Les signaux triangulaires (fig. 4)

On pourrait dire que ce sont des sinusoïdes... tracées à la règle. Il s'agit de fonctions linéaires du temps, par intervalles (fonctions par morceaux). Leur étude mathématique

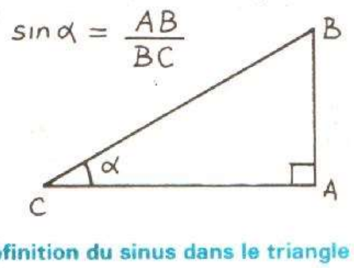

Fig. 1. – Définition du sinus dans le triangle rectangle.

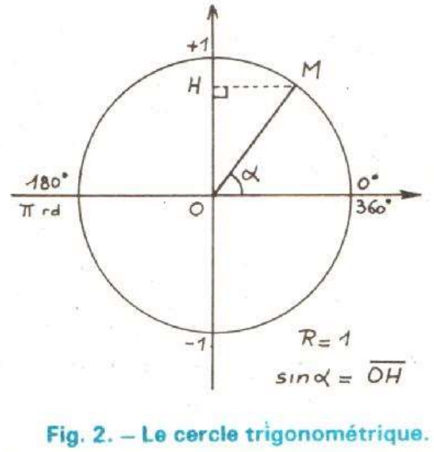

Fig. 2. – Le cercle trigonométrique.

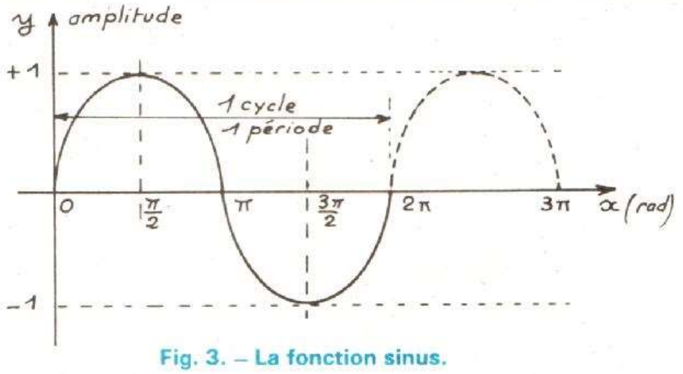

Fig. 3. – La fonction sinus.

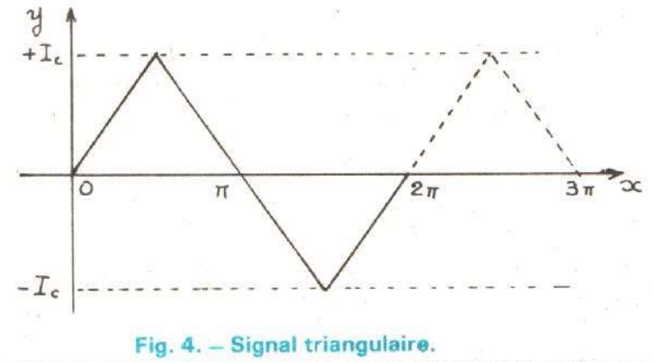

Fig. 4. – Signal triangulaire.

est donc très simple puisque chaque partie a une équation de la forme y = at + b, fonction élémentaire du premier degré.

Sur le plan pratique, les signaux triangulaires sont très utiles dans les tests d'amplificateurs BF. Il est en effet beaucoup plus facile d'apprécier de visu la déformation d'une ligne droite plutôt que celle d'une courbe.

– Les signaux rectangulaires (fig. 5)

Ils font partie des fonctions mathématiques dites « en escalier ». Finalement, il s'agit de pseudo-courants continus, passant à intensité constante un certain temps dans un sens puis un certain temps dans le sens contraire. La représentation graphique montre bien ces états stables appelés « paliers » ainsi que les passages de paliers à d'autres, appelés « fronts » (montants ou descendants). Les signaux rectangulaires ont une énorme importance en électronique. Ils sévissent outrageusement dans les circuits logiques, nerfs vitaux de l'informatique. Il est donc essentiel de bien les connaître et de savoir les mesurer.

Depuis le début de ces lignes, nous avons parlé de la fréquence d'un courant alternatif, puis de sa forme. Ce ne sont pas les deux seules caractéristiques de ces courants. Il en reste une troisième, c'est leur AMPLITUDE.

On se doute que les courants alternatifs comme les autres, sont forts ou faibles. Cette caractéristique ayant une incidence évidente sur les effets produits.

Elle pourrait d'ailleurs pour nous être l'essentiel, compte tenu du fait que le contrôleur universel, objet actuel de notre propos, ne peut apprécier que ce seul paramètre ! Encore ne le peut-il qu'à travers les deux autres et c'est bien pourquoi la connaissance des précédents est indispensable à qui veut faire des mesures valables dans le domaine de l'alternatif.

Bien entendu, l'amplitude instantanée du courant alternatif est constamment variable (sauf paliers des rectangulaires) et il est hors de question de la mesurer au contrôleur ! Or, ce type d'appareil ayant été le seul à exister pendant des décennies, il avait bien fallu trouver un moyen d'évaluer ces courants en définissant une amplitude plus ou moins arbitraire, mais constante pour un courant donné et par conséquent mesurable par un appareil à aiguille. C'est ce que nous verrons un peu plus loin.

On peut, bien sûr, parler d'amplitude de CRETE. C'est le niveau maximum atteint par la variation. Il existe une crête positive et une négative. L'écart entre les deux est appelée amplitude crête à crête.

Réaction du galvanomètre

Voyons maintenant comment adapter notre galvanomètre, sensible à des courants continus, au problème posé par la mesure des intensités alternatives. Comme nous l'avons montré dans l'étude du n° 1695, p.64, dès que le galvanomètre est traversé par un courant variable de fréquence assez élevée (> 10 Hz), l'aiguille prend une position moyenne, correspondant justement à la valeur MOYENNE du courant. S'il s'agit d'un véritable courant alternatif, les alternances positives et négatives sont symétriques par rapport au niveau 0 (absence de courant) et par conséquent la valeur moyenne est nulle (voir fig. 6). Conséquence pratique : tout courant alternatif de fréquence suffisante ne provoque aucune déviation du cadre mobile. Il est évident que la mesure s'avère alors particulièrement difficile !

Attention, cependant, le cadre est bien traversé par le courant alternatif. S'il venait à l'idée de l'expérimentateur d'augmenter inconsidérément l'intensité... pour voir, il est sûr qu'il verrait... de la fumée, mais toujours sans déviation du cadre !

La solution du problème consiste à REDRESSER le courant alternatif à l'aide d'un redresseur à diodes classique. Selon les modèles de contrôleurs, le redressement est à simple alternance (Centrad 819) ou à double alternance (Métrix MX011A). Le courant traversant le cadre a alors la forme de la figure 7. Nous avons choisi la double alternance. L'aiguille n'est plus sollicitée de part et d'autre de son point d'équilibre, mais dans un seul sens : elle dévie donc en prenant une position moyenne telle que $A_1 = A_2$. Essayons de calculer cette moyenne.

Pour faire un calcul assez simple, nous allons considérer que les portions telles que OA et BC sont des droites, ce qui est proche de la vérité. Le quadrilatère OABC est alors un trapèze d'aire :

$$A_T = \frac{(B + b) \times h}{2}$$

tandis que BCD est un triangle isocèle d'aire

$$\frac{A}{t} = \frac{b \times h}{2}$$

Deux formules bien connues des écoliers, du moins de ceux de jadis !

Si les coordonnées de A sont x et y avec y = sin x (en admettant que l'amplitude de crête est 1), nous avons, compte tenu des symétries de la courbe :

$aB = \pi - 2x$
$OC = \pi$
$BD = 2x$

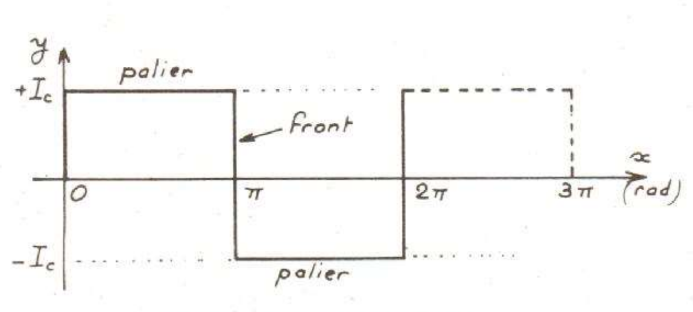

Fig. 5. – Signal rectangulaire.

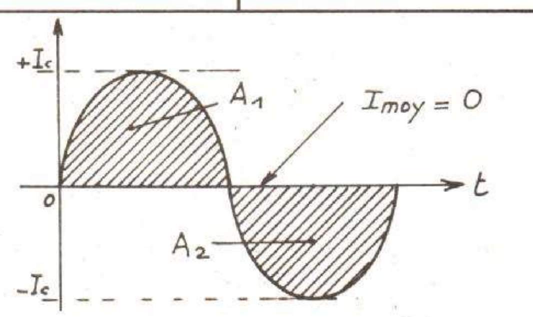

Fig. 6. – L'intensité moyenne est nulle : pas de déviation.

d'où

$$A_T = \frac{\pi + (\pi - 2x)y}{2}$$
$$= \frac{(2\pi - 2x)y}{2}$$
$$= (\pi - x)\,y = (\pi - x)\sin x$$

$$A_2 = A_t = \frac{2xy}{2} = xy = x\sin x$$

Mais $A_1 = A_S - A_T$ en posant A_S, aire entière de la demi sinusoïde.

Cette dernière est un peu difficile à calculer, obligeant à un recours aux intégrales.

$$A_S = \int_0^\pi \sin x\,dx$$
$$= [-\cos x]_0^\pi = 2$$

d'où $A_1 = 2 - (\pi - x)\sin x$

Il reste à résoudre l'équation $A_1 = A_2$

$2 - (\pi - x)\sin x = x\sin x$
$2 - \pi\sin x + x\sin x$
$= x\sin x$
$2 = \pi\sin x$
mais $\sin x = y$, donc 2
$= \pi y$ et $y = 2/\pi$,
soit $y \simeq 0{,}636$

L'aiguille de l'appareil se fixe donc dans le cas considéré à 63,6 % de la valeur de crête du courant !

Bien évidemment, le calcul ci-dessus tient compte de la forme sinusoïdale du courant, les sinus sont là pour nous le rappeler ! Voyons donc le résultat que nous obtiendrions en travaillant sur un courant de forme triangulaire (voir fig. 8). Là encore, il faut résoudre l'équation amenant l'égalité des aires A_1 et A_2. Mais, dans ce cas, le problème est si simple qu'il n'est pas besoin de le poser vraiment. Pour avoir cette égalité, il est visible qu'il suffit de se placer à mi-valeur de crête !. On a donc y = 0,5, soit 50 % de la valeur de crête.

Si nous raisonnons maintenant dans le cas d'un courant rectangulaire redressé, c'est encore plus simple, puisque le redressement aligne les paliers AB et BD' pour aboutir à un véritable courant... continu ! D'où y = 1, soit 100 % de la valeur de crête.

Trois résultats très différents, 0,636 ; 0,5 ; et 1, montrant bien que la déviation du galvanomètre est essentiellement dépendante de la forme du courant et que toute graduation établie pour l'une, sera fausse pour l'autre !

Intensité efficace d'un courant alternatif

Il y a des appareils qui fonctionnent aussi bien en courant alternatif qu'en courant continu ! Parmi ceux-là, nous trouvons tous les appareils chauffants. On a donc décidé d'utiliser l'effet calorifique, ou effet JOULE, pour établir une équivalence entre les deux sortes de courants. Ainsi, si un courant alternatif produit dans une résistance le même dégagement de chaleur qu'un courant continu, on dira que l'intensité EFFICACE du courant alternatif est égale à l'intensité continue de comparaison. En somme, cette intensité alternative a la même... efficacité !

Bien sûr, comme le courant alternatif est nul à certains instants, il faut se douter que l'intensité efficace est très inférieure à l'intensité de crête.

Appelons encore une fois le calcul mathématique, pour nous venir en aide. On sait que la puissance calorifique d'un courant continu est donnée par la formule :
$P = R\,I^2$

En alternatif sinusoïdal, la puissance instantanée est :
$P_i = R\,I_c^2 \sin^2 x$
(I_c étant l'intensité de crête).

Pour trouver l'énergie W produite pendant une période entière, intégrons sur cette période T.

$$W = \int_0^T R\,I_c^2 \sin^2 x \,.\, dx$$

ce qui donne finalement

$$W = \frac{1}{2} R\,I_c^2\,T$$

soit une puissance P

$$P = \frac{W}{T} = \frac{1}{2} R\,I_c^2$$

L'intensité efficace étant l'intensité du courant continu de même puissance :

$$R\,I^2 = \frac{1}{2} R\,I_c^2$$

d'où

$$I_2 = \frac{1}{2} I_c^2$$

$$I_{eff} = I = \frac{I_c}{\sqrt{2}} \simeq 0{,}707\,I_c$$

L'intensité efficace du courant sinusoïdal est ainsi les 70,7 % de son intensité de crête. Or, nous savons que l'intensité moyenne du courant redressé est les 63,6 % de la même intensité de crête. Il y a donc proportionnalité entre les deux grandeurs avec le coefficient :

$$\frac{I_{eff}}{I_{moy}} = \frac{0{,}707}{0{,}636} \simeq 1{,}111$$

Il est donc parfaitement possible d'étalonner un galvanomètre en intensité EFFICACE tout en lisant en réalité les intensités MOYENNES. C'est une simple question de graduation.

Indiquons pour complément d'information que l'intensité efficace d'un courant alternatif triangulaire est donnée par :

$$I_{eff} = \frac{I_c}{\sqrt{3}}$$

tandis que si le courant est rectangulaire

$$I_{eff} = \frac{1}{2} I_c$$

ce qui, si l'on se rapporte aux intensités moyennes calculées plus haut, amène des coefficients de proportionnalité de 1,15 dans le premier cas et de 0,5 dans le second.

Linéarité de l'échelle

Une difficulté pratique réside dans le fait que le redresseur utilisé dans le montage précédent n'est

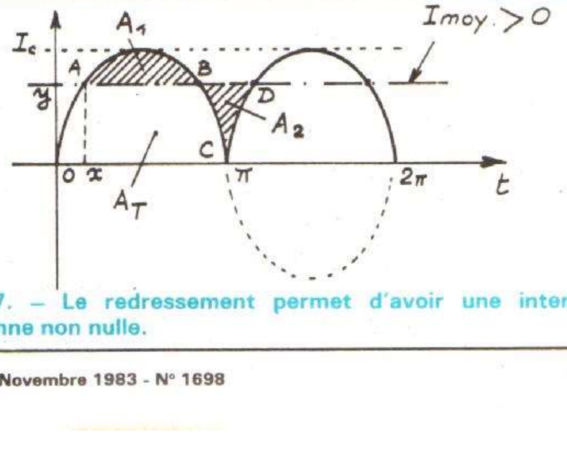

Fig. 7. – Le redressement permet d'avoir une intensité moyenne non nulle.

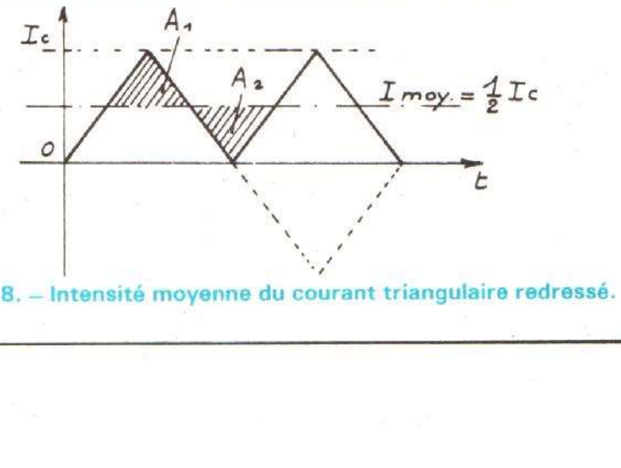

Fig. 8. – Intensité moyenne du courant triangulaire redressé.

pas parfait. Un redresseur parfait aurait une résistance nulle dans un sens et infinie dans l'autre sens. Or, les diodes utilisées sont caractérisées par leur tension de SEUIL. C'est la tension minimale à appliquer dans le sens de conduction, pour que la diode conduise effectivement. Ainsi, pour une diode au germanium, il faut au minimum 0,1 V et pour une diode au silicium, au moins 0,6 V. La courbe de transfert de ces diodes n'est donc pas linéaire. Voir figure 10. Employées avec le galvanomètre, elles vont donner une graduation non régulière, avec reserrement au début de l'échelle. La difficulté est d'ailleurs d'autant plus grande que le courant à mesurer est faible. C'est pourquoi les calibres de mesure sont moins sensibles en alternatif qu'en continu. Par exemple, la première gamme continue du Centrad 819 est 50 μA/100 mV alors qu'en alternatif elle est 250 μA/2 V. Souvent, une échelle spéciale est gravée pour les faibles courants (intensités ou tensions). Certains constructeurs tournent la difficulté en montant un redressement simple alternance sur les gammes peu sensibles et un double alternance sur les gammes sensibles.

Quoi qu'il en soit, les échelles de lecture ne sont jamais linéaires. Il n'y a pas correspondance entre les échelles continu et alternatif. Sur certains appareils à cadran chargé, cela ne facilite pas la lecture !

Bande passante

Nos belles théories et nos calculs s'appliquent parfaitement tant que la fréquence du courant alternatif est assez faible pour ne pas créer d'effets secondaires. Mais, dès que la fréquence augmente, il n'en est plus de même. Que se passe-t-il ?

Tout d'abord, des effets de CAPACITE parasite, dans le câblage, dans les commutateurs, aux bornes des composants, qui viennent modifier les valeurs essentielles.

Un exemple : soit une capacité parasite de 10 pF existant aux bornes d'une résistance de précision de 1 MΩ. On sait que la réactance d'un condensateur est donnée par la formule :

$Z = 1/C\omega = 1/2\,\pi\,N\,C$

à 50 Hz, Z =
$= 1/10^{-12} \times 2 \times 3,14 \times 50 \simeq 318$ MΩ

à 20 kHz, Z =
$= 1/10^{-12} \times 2 \times 3,14 \times 20\,000 \simeq 795\,800\ \Omega$

On comprend aisément que, dans le premier cas, à 50 Hz, l'effet de shunt causé par la capacité parasite est absolument négligeable. Par contre, dans le second cas, il est énorme, ramenant la résistance équivalente à 50 % environ de sa valeur nominale et causant évidemment une très forte imprécision de lecture. Pourtant, 10 pF sont peu ! On peut donc deviner que le contrôleur va être inutilisable à 20 kHz et sans doute bien avant ! Que dire alors si nous voulions l'utiliser en HF !

Mais les capacités parasites ne sont pas les seules difficultés. Il faut aussi penser aux inductances. Ne serait-ce que celle du cadre mobile, impossible à supprimer et pour cause ! Le courant alternatif y passant va modifier son comportement. On sait que la réactance d'une bobine est fonction de la fréquence :

$Z = L\omega = 2\,\pi\,N\,L$

Le cadre est ainsi de plus en plus « résistant » si la fréquence croît !

En conclusion, le contrôleur aura une BANDE PASSANTE relativement limitée. Nous avons vainement cherché, dans la notice du 819 de Centrad, une indication à ce sujet ! Par contre, dans celle du Métrix MX011A, nous avons droit aux courbes de réponse de l'appareil. Ces courbes indiquent que l'appareil est valable jusqu'à 2 ou 3 kHz. Au-delà, la précision se dégrade vite et, ce qui est plus gênant encore, dépend de la gamme utilisée.

En définitive, nous pouvons conclure que le contrôleur universel est un appareil permettant de mesurer les courants alternatifs de très basse fréquence (moins de 2 kHz) à condition qu'ils soient sinusoïdaux. Si nous voulions être un peu sévère, nous dirions que le contrôleur universel n'est bon qu'à mesurer courants et tensions du réseau 50 Hz !

Toutefois, et heureusement, en BF, les mesures normalisées font souvent référence à une fréquence de 1 kHz, fréquence que le contrôleur peut mesurer de manière correcte à condition qu'elle ait une forme sinusoïdale. Dans les strictes limites de ces impératifs, l'utilisation est possible dans d'assez bonnes conditions. Nous en reparlerons le mois prochain. Nous vous proposerons également un montage permettant de mesurer l'alternatif dans des conditions meilleures.

Exercice proposé : un galvanomètre calibré à 1 A continu est transformé en ampèremètre alternatif par l'adjonction d'un redresseur idéal. On utilise cet appareil pour mesurer des intensités sinusoïdale, triangulaire, rectangulaire, faisant dans chaque cas 1 A_c. Déterminer sur quelle graduation de l'échelle 0-100 se fixera l'aiguille dans les trois cas. Quelle intensité efficace porterons-nous sur le cadran, à ces graduations, dans ces trois cas ?

F. THOBOIS

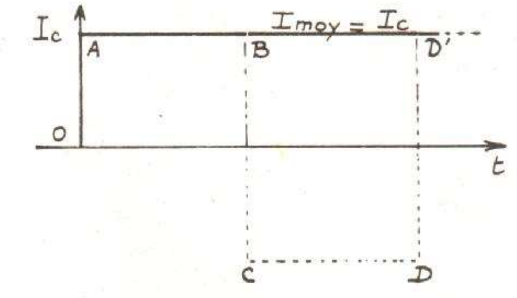

Fig. 9. – Cas du courant rectangulaire.

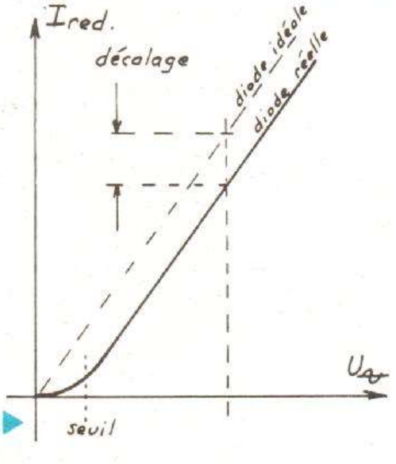

Fig. 10. – Le courant redressé n'est pas une fonction linéaire de la tension alternative appliquée.