

(XI) PRATIQUE DE LA MESURE

L'OSCILLOSCOPE

2. Mesure des déphasages

Lorsque l'on situe des signaux rectangulaires, l'un par rapport à l'autre et dans le temps, on détermine la durée séparant des points caractéristiques de l'un et de l'autre : « distance » entre fronts, par exemple. On parle alors de retard (en s, ou ms, ou μ s). Par contre, quand les signaux sont sinusoïdaux, on préfère parler de déphasage, et cette donnée est presque toujours exprimée en unités d'angle. Ceci par référence à l'interprétation vectorielle des courants sinusoïdaux et au cercle trigonométrique. Voir n° 1698 du *Haut-Parleur* !

Lorsque deux signaux sinusoïdaux ont la **même fréquence** :

- Ils sont **en phase** si leurs alternances de même sens coïncident dans le temps. Voir Photo **AC**.
- ils sont en **opposition de phase** si une alternance positive de l'un coïn-

cide exactement avec une négative de l'autre. Voir Photo **AD**.

– Dans les autres cas, on dit qu'il y a décalage de phase et on essaie d'exprimer cette situation par une mesure.

Deux méthodes sont possibles avec l'oscilloscope.

a) Méthode de la double trace

Il suffit d'appliquer les deux signaux en cause aux deux voies de notre oscilloscope à double trace et d'observer les positions relatives des sinusoïdes. Voir Photo **AF**. Voilà sur ce cliché deux sinusoïdes dont l'une est en avance sur l'autre. Au fait, laquelle ? C'est la question à 100 F !

Tout d'abord rappelons-nous que le balayage se fait de gauche à droite. Donc tout point d'un oscillogramme se trouvant *à gauche* d'un autre s'est inscrit *avant* cet autre ! Conséquence, la sinusoïde du haut (H) est en **avance** sur celle du bas (B). Compte tenu des positions exactes, nous pouvons évaluer cette avance à une division du

graticule, la période complète durant cinq divisions.

Rappelons aussi que la période d'une fonction sinusoïdale correspond à un tour du cercle trigonométrique, soit donc à 360° ou 2π radians (pour les forts en math !). D'où le calcul très simple du déphasage :

$$\begin{aligned} 1 \text{ période} &\rightarrow 5 \text{ divisions} \rightarrow 360^\circ \\ \text{déphasage} &\rightarrow 1 \text{ division} \\ &\rightarrow (360/5) \times 1 = 72^\circ \end{aligned}$$

La sinusoïde H est donc en avance de phase de 72° sur B, laquelle, *dixit...* La Pallice, est en retard de phase de 72° . Notons d'ailleurs que tout cela est relatif car, dans le monde des fonctions périodiques, il peut n'y avoir ni début ni fin... Nous avons dit que H était en avance d'une division sur B, mais on peut aussi dire qu'elle est en retard de quatre divisions, puisque la seconde crête positive de H (Photo **AF**) est à quatre divisions « à droite » de la première de B ! Dans ces conditions *une avance de phase de a°* équivaut à un *retard de phase de*

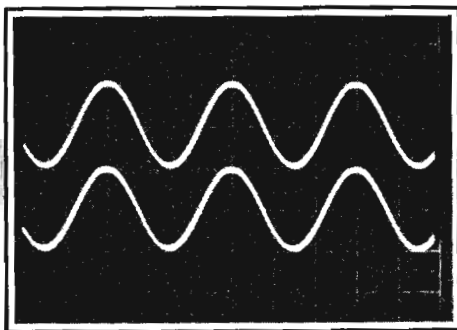


PHOTO AC
Deux sinusoïdes en phase.

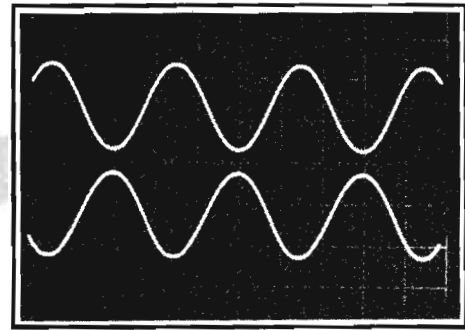


PHOTO AD
Deux sinusoïdes en opposition de phase.

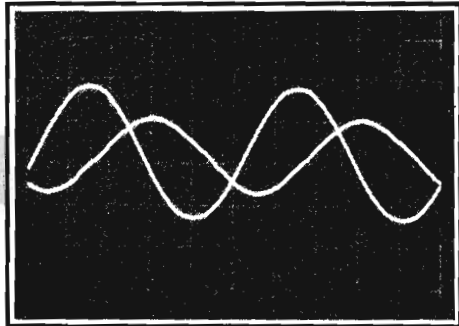


PHOTO AE
Un décalage de phase quelconque
entre nos deux sinusoïdes'

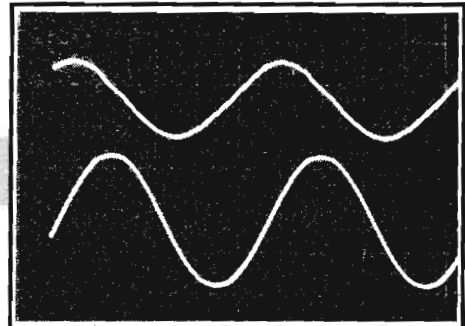


PHOTO AF. – Mesure du déphasage
entre les deux sinusoïdes. Il faut mesurer
avec précision le retard de l'une,
par rapport à la période commune.

(360 - a)°. Communément on choisit toujours par défaut la valeur la plus faible de l'angle de déphasage. Ainsi, entre 130° d'avance et (360 - 130) = 230° de retard, on préférera 130° d'avance, car 130 < 230.

b) Méthode X Y

Une autre méthode de mesure du déphasage est également possible. Elle consiste à injecter un signal sur une voie Y (en mode simple trace) et l'autre signal sur la voie X, entrée directe, c'est-à-dire déconnectée du générateur de balayage. Ce sont donc les deux signaux qui assurent les deux balayages, tant horizontal que vertical.

En procédant de cette manière, avec les deux sinusoïdes nous ayant donné la photo **AF**, nous obtenons la photo **AG**, sur laquelle nous voyons une courbe elliptique. La détermination du déphasage est assez facile :

– Régler l'amplitude verticale (en finolant avec le décalibrage) et le ca-

drage V, pour placer les points haut et bas de la courbe exactement entre deux horizontales du graticule, pourquoi pas entre le 100 % et le 0 %, ce qui correspond à 5 divisions de hauteur. On a alors H = 5 div. = 25 subdivisions. On n'a pas à se préoccuper de l'amplitude horizontale, dans la mesure où la courbe s'inscrit raisonnablement dans l'écran.

– Régler le cadrage H pour un parfait centrage de l'ellipse.

– L'ellipse recoupe l'axe vertical médian en deux points. Compter le nombre de subdivisions séparant ces deux points. Nous trouvons sur le cliché 23,5 subdivisions. On a h = 23,5.

– Le calcul du déphasage s'effectue à l'aide de la formule :

$$d = \arcsin(h/H) \text{ ou } \sin^{-1}(h/H)$$

Ce qui signifie simplement que h/H représente le sinus de l'angle d et que l'on doit rechercher d par l'intermédiaire de ce sinus.

Ex : ici h/H = 23,5/25 = 0,94

Quel est l'angle ayant un sinus de 0,94 ? Réponse dans une table de rapports trigonométriques ou à l'aide d'une calculatrice, voire d'un ordinateur (trop fort n'a jamais manqué !)

La réponse cherchée est de toute façon de 70° !

Ce n'est pas si mal, puisque la mesure précédente, pour les mêmes signaux, avait donné 72°. (La précision d'un oscillo ne peut guère dépasser 5 %.)

Nous donnons d'autres photos correspondant à des déphasages particuliers :

– **Photo AH.** Le déphasage est nul (signaux en phase). L'ellipse est réduite à une droite. On a h = 0, donc h/H = 0, donnant d = 0° ou 360°.

– **Photo AI.** Un déphasage de 90° (signaux en *quadrature*). L'ellipse tend à devenir un cercle si les amplitudes H et V sont égales. On a h = H, d'où : h/H = 1 et d = 90° ou 270°

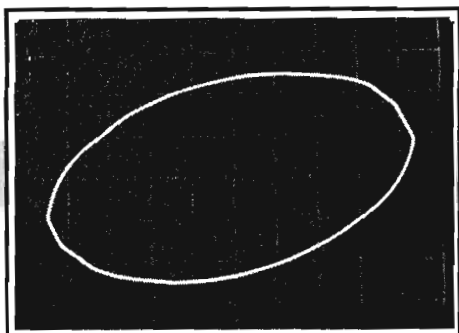


PHOTO AG
Mesure du déphasage
par la méthode de l'ellipse.

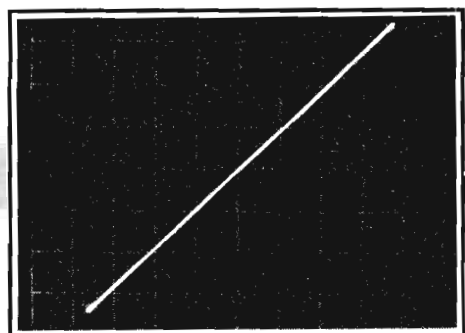


PHOTO AH. – Déphasage nul, par la
méthode de l'ellipse. La pente de la
droite ne dépend que des amplitudes
respectives des signaux.

– **Photo AJ.** Déphasage de 180° (signaux en opposition de phase).

N.B. :

L'interprétation des photos **AH** et **AJ** suppose que les voies X et Y ont des sens de déviation corrects : vers le haut ou vers la droite si les attaques sont de sens positif. Dans ces conditions, si la pente du grand axe de l'ellipse est positive (ellipse dans les quadrants I et III), le déphasage est compris entre 0 et 90°. Par contre, si cette pente est négative (ellipse dans les quadrants II et IV), le déphasage est entre 90° et 180°.

– Pour que la méthode X Y soit valable, il faut évidemment que l'oscilloscope n'apporte pas lui-même de déphasage parasite entre les voies X et Y. Or, dans la quasi-totalité des cas, ces voies sont de technologies différentes, la voie Y étant plus performante que la voie X. Dans ces conditions, il y a forcément déphasage à certaines fréquences (soit très basses, soit élevées).

Pour appliquer la méthode X Y, il faut donc lever le doute. C'est très simple : appliquer le même signal sur les deux voies en cause, en ajustant les amplitudes pour ne pas déborder l'écran. On doit obtenir la droite de pente positive illustrée en photo **AH** et caractérisant le déphasage nul ! Ceci à la fréquence d'essai. En actionnant la commande Inversion de la voie Y, on passe à la droite de pente négative, caractérisant l'opposition de phase.

3. Les figures de Lissajous

Ce sont de bien jolies courbes que l'on peut observer sur l'écran d'un oscilloscope, courbes fort utiles à l'époque où les fréquencemètres numériques n'existaient pas ! En effet, les figures de Lissajous permettent d'établir le rapport des fréquences entre les signaux appliqués d'une part sur l'entrée X et, d'autre part, sur l'entrée Y, de l'oscilloscope.

Bien entendu, dans cette configuration, la voie horizontale est déconnectée du balayage interne et reliée à l'entrée « signal externe », exactement comme nous venons de le faire pour

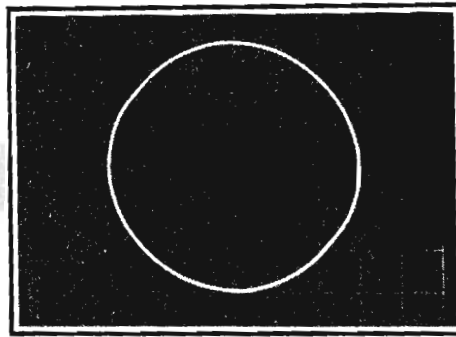


PHOTO AI. – Pour un déphasage de 90° et des amplitudes égales, l'ellipse est devenue un cercle.

les mesures de déphasage, en méthode X Y.

D'ailleurs, les quatre oscillogrammes que nous avons obtenus à cette occasion, **AG, AH, AI** et **AJ** sont déjà des courbes de Lissajous ! Elles caractérisent un rapport de fréquence égal à 1.

Mais observons maintenant la photo **AK**, illustrant déjà mieux ce à quoi correspondent ces fameuses figures. Les deux signaux provoquant les déplacements du spot sont des sinusoides. C'est dans ce cas que les courbes sont les plus jolies ! Admettons un point de départ en A et suivons les déviations :

– **Sens vertical.** Départ en A, point haut du signal, passage en B, point bas puis arrivée en C, de nouveau point haut. Le trajet ABC correspond donc à une période du signal Y, assurant la déviation verticale.

De C, le mouvement continue jusqu'en D, deuxième point bas, puis re-

tour en A. Une deuxième période de Y s'est donc accomplie :

Conclusion : la courbe **AK** correspond à deux périodes du signal Y.

– **Sens horizontal.** Départ en D, point situé à l'extrême gauche, passage en A pour arriver en B, à l'extrême droite (il n'y a aucune allusion politique là-dessous, soyez-en persuadés !), retour en D après passage intermédiaire en C. Le spot ayant fait un seul aller et retour horizontal, le signal X ayant provoqué le déplacement n'a développé qu'**une seule période**.

- En définitive :
- 2 périodes en Y.
- 1 période en X.

Le rapport des fréquences Y et X est égal à 2.

Essayons de tirer les mêmes conclusions de la courbe, photo **AL**.

– **Sens vertical.** Départ en A (haut), passage en B (bas), en C (haut) – fin

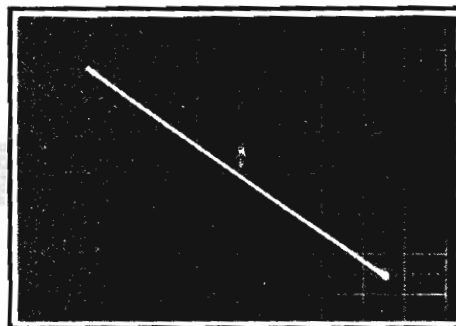


PHOTO AJ. – Signaux en déphasage de 180°, donc en opposition de phase. La pente de la droite est négative.

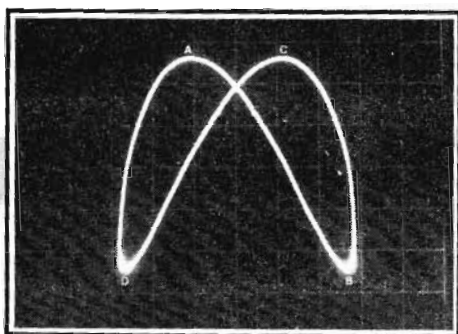


PHOTO AK
Courbes de Lissajous Rapport 2/1.

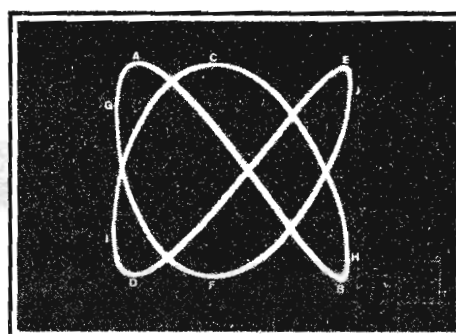


PHOTO AL
Courbes de Lissajous Rapport 3/2.

de la première période Y – De C (haut), passage en D (bas) puis en E (haut) – Fin de la deuxième période – De E (haut), passage en F (bas) et retour en A (haut) – Fin de la troisième période.

Durée du signal Y : 3 périodes.

– **Sens horizontal.** De G (gauche), passage en H (droite), puis en I (gauche) – Fin de la première période – De I, passage en J (droite) et retour en G – Fin de la deuxième période.

Durée du signal X : 2 périodes.

Le rapport entre les fréquences Y et X est de 3/2, soit 1,5.

Si nous connaissons la fréquence de l'un des signaux, il est aisé d'en déduire l'autre. Par exemple si Y = 1 500 Hz, alors $1\ 500/X = 3/2$ d'où $X = 1\ 500 \times 3/2 = 1\ 000$ Hz.

Le procédé de détermination du rapport Y/X que nous venons d'étudier est pédagogique, puisqu'il permet de comprendre et d'interpréter la courbe obtenue sur l'écran. En revanche, il est peut-être un peu long à l'usage. Un « truc » permet d'aller plus vite : il suffit de déterminer le rapport entre le nombre des points de tangence de la courbe avec une horizontale et le nombre des points de tangence avec une verticale. Ainsi, avec la courbe **AK** :
– deux points de contact horizontaux : A et C ;
– un point de contact vertical : D (ou B).

Rapport Y/X = 2/1 = 2

Avec la courbe **AL** :

- trois points de contact horizontaux : A, C et E ;
- deux points de contact verticaux : G et I.

Rapport Y/X = 3/2 = 1,5.

Les photos **AK** et **AL** ont, sur le papier, une immobilité exemplaire. Et pour cause ! Dans la réalité des choses, il en est tout autrement. Pour que les figures soient stables, il faut que d'une part les fréquences des deux signaux le soient parfaitement et, d'autre part, que le rapport des fréquences soit un nombre arithmétique simple. Faute de quoi, le spot entame sur l'écran un joyeux gymkhana... Bien difficile alors de compter quoi que ce soit ! C'est donc dire l'intérêt quelque peu académique du procédé.

Pourtant, nous avons souvenir d'avoir étalonné de cette manière l'un de nos premiers générateurs BF. Nous procédions ainsi, à une époque où le fréquencemètre numérique n'existait même pas dans le vocabulaire !

La référence de base, pour une telle opération, peut être le secteur, 50 Hz, assez stable pour établir la graduation.

Départ : la courbe **AI** caractérisant l'égalité des fréquences et permettant de marquer le 50 Hz du générateur. Puis montée progressive en fréquence de ce générateur, avec passage par la courbe **AK**, du rapport 2, donnant le

point 100 Hz. Et ainsi de suite de 50 en 50 Hz ! Bien sûr, au-delà de quelques unités, le rapport Y/X correspond à des courbes très compliquées et difficilement lisibles. On peut cependant monter à 500 Hz sans trop de mal, ce qui permet de couvrir une décade de fréquence, correspondant le plus souvent à la première gamme de l'appareil.

Pour continuer l'étalonnage des autres gammes, il faut faire appel à un oscillateur auxiliaire stable, calé sur 500 Hz (par référence aux résultats précédents). On a alors la possibilité de repartir de 500 Hz, avec un rapport de 1, et de monter ainsi de 500 en 500 Hz, jusqu'à 5 000 Hz. La méthode se reconduit sans difficulté soit vers les fréquences plus élevées, soit même vers les plus basses. On obtient 11 points de calage par décade, ce qui est parfaitement suffisant pour dessiner une graduation précise.

De toute façon, même si vous n'utilisez jamais la méthode d'étalonnage ci-dessus, les figures de Lissajous sont toujours très agréables à observer et nous vous suggérons de ne pas vous en priver, si l'occasion s'en présente. Un seul générateur variable suffit, puisque le secteur fait le deuxième fixe ! Bonne occasion de vérifier l'étalonnage de ce générateur BF, lequel a probablement dérivé avec le temps !