

15. — LA MESURE DES FREQUENCES

La fréquence d'un signal est un paramètre essentiel qui doit être connu, souvent avec précision, pour réaliser des mesures significatives, opérer des réglages corrects, effectuer un dépannage sérieux ou étalonner un appareil de mesure.

C'est à l'occasion de manipulations sur des montages tels que : amplificateurs BF ou HF, à large bande ou sélectifs, oscillateurs BF ou HF, filtres correcteurs, atténuateurs, etc. que l'amateur éprouvera le besoin de connaître la fréquence du signal correspondant, dans une plage qui pourra s'étendre de quelques Hertz à plusieurs dizaines ou centaines de MHz, soit dans un rapport qui peut dépasser 100 millions.

Il n'est guère, en effet, de circuit qui soit linéaire en fréquence sur une large plage : la présence inévitable d'éléments réactifs parasites dans chaque branche résistive d'un conducteur ou d'un semi-conducteur, par exemple, fait apparaître des variations de niveau allant de la simple atténuation régulière à la sur-oscillation ou à la résonance plus ou moins prononcée. La réalisation d'oscillateurs ou de montages sélectifs implique aussi que l'on connaisse avec le plus de précision possible la réponse du ou des circuits intéressés.

Il existe un grand nombre de méthodes de mesure de la fréquence qui diffèrent essentiellement suivant la gamme concernée, la précision recherchée, la rapidité et la facilité de la mesure. Nous rappellerons les méthodes les plus connues et nous décrirons la construction d'un fréquence-mètre digital aux performances poussées dont la réalisation nous paraît être à la portée de l'amateur moyen.

LA MÉTHODE DE COMPARAISON (figure 1)

C'est la méthode la plus simple qui consiste à comparer la fréquence à mesurer F_x à une fréquence de référence F_{ref} , stable et précise.

Le niveau de chaque signal est élevé au moyen d'amplificateurs séparateurs. Les deux signaux sont mélangés par un dispositif non linéaire (diode ou transistor). On sait que le résultat d'un tel

mélange donne 4 signaux aux fréquences différentes : F_x , F_{ref} , $(F_x + F_{ref})$ et $(F_x - F_{ref})$.

C'est ce dernier signal qui est sélectionné au moyen d'un filtre passe-bas, amplifié et détecté. La présence du signal différence est révélée par un galvanomètre ou mieux un écouteur ou un oscilloscope.

Lorsque les deux fréquences sont voisines, il se produit un battement dont la fréquence se réduit à zéro au battement nul ($F_x = F_{ref}$).

L'amplitude du battement et, donc, la sensibilité du montage sont fonction du niveau relatif des deux signaux : c'est pourquoi il est recommandé d'ajuster l'un d'eux à une valeur optimale.

De tels dispositifs de comparaison ont été décrits dans le chapitre 11 consacré à l'étalonnage des appareils de mesure (figures 6 et 7).

Cette méthode est évidemment très précise mais elle

suppose que l'on ait une idée de la valeur de F_x pour éviter d'obtenir des battements parasites sur une combinaison harmonique non désirée.

La source de référence à la fréquence F_x sera un oscillateur fixe (RC, à quartz, ...) ou un générateur étalonné.

On peut utiliser cette méthode dans une large plage allant de quelques Hz à plusieurs dizaines de MHz, si les oscillateurs ne dérivent pas. La difficulté réside dans l'interprétation d'un battement entre fréquences élevées.

L'ONDEMÈTRE À ABSORPTION (figure 2)

On désigne sous ce vocable un peu vieillot un dispositif qui comprend un circuit LC couplé inductivement au circuit à mesurer.

Lorsque le circuit LC se trouve accordé sur la fréquence du circuit extérieur, c'est-à-dire lorsque :

$$F_x = F_{ref} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{0,16}{\sqrt{LC}}$$

il se produit un maximum de transfert entre les deux circuits, ce que l'on peut mettre en évidence en disposant un amplificateur-détecteur aux bornes du circuit résonnant.

La mesure d'une fréquence inconnue se fait en recher-

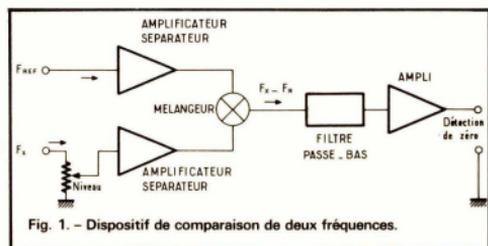


Fig. 1. — Dispositif de comparaison de deux fréquences.

chant la résonance par la manœuvre du condensateur variable gradué en fréquence. Pour couvrir une plage importante, on utilise un assortiment de self-inductances enfilables.

En transformant l'amplificateur-détecteur en oscillateur on réalise un grid-dip ou un base-dip bien connus. Ce type d'appareil, fort utile, sera plutôt acheté monté et réglé dans le commerce, pour éviter un étalonnage laborieux. Son utilisation se fera dans les cas suivants :

- recherche de fréquence dans un circuit actif,
- recherche de la fréquence propre d'un circuit passif LC,
- génération d'un signal à fréquence déterminée,
- recherche d'une présence d'oscillation.

Il y a intérêt, pour cet appareil fonctionne dans de bonnes conditions, que le couplage entre les circuits soit aussi faible, ou lâche, que possible, ce qui est une contrainte qui peut apparaître gênante puisqu'un couplage trop serré fausse la mesure, alors qu'un couplage très lâche diminue la sensibilité.

Cet appareil est d'une précision très moyenne. Tout dépend du soin apporté à son étalonnage. Il permettra cependant de faire une détermination très rapide de la fréquence inconnue dans une plage allant de quelques centaines de kHz à plusieurs centaines de MHz. Il est particulièrement appréciable pour la mise au point de circuits VHF.

LE FRÉQUENCÈMÈTRE À RÉSONANCE LC (figure 3)

Cet appareil fonctionne suivant le même principe que le précédent. On recherche une résonance de tension au moyen d'un circuit LC parallèle à un condensateur variable. Les inconvénients de l'ondemètre à absorption (obligation de créer un couplage magnétique, sensibilité faible et variant avec le couplage, réaction mutuelle des

circuits couplés, relative imprécision de la mesure) sont évités par l'utilisation d'un amplificateur à large bande qui augmente la sensibilité et permet ainsi de diminuer considérablement l'énergie prélevée sur le circuit à mesurer.

Le niveau d'entrée doit être ajusté pour une amplitude de lecture convenable ou pour éviter la saturation de l'amplificateur. Ce dernier devra couvrir une bande aussi large que possible en utilisant un ou plusieurs transistors VHF ou UHF si nécessaire. La sortie sera prélevée à travers un condensateur de faible valeur (quelques pF) afin d'isoler, le plus possible, le circuit accordé.

La résistance de détection, symbolisée par (r) sur le schéma sera la plus élevée possible tout en restant compatible avec la sensibilité. L'amplificateur séparateur sera à haute impédance d'entrée (FET) et à faible impédance de sortie : il alimentera un galvanomètre dont la déviation permettra de repérer la résonance.

La précision obtenue peut être assez bonne avec beaucoup de soin et du matériel de première qualité. La stabilité sera bien supérieure à

celle d'un grid-dip. Les self commutables permettront de couvrir une plage comprise facilement entre 150 kHz et 100 MHz. On pourra dilater certaines gammes comme celles qui entourent les valeurs des fréquences intermédiaires (455/480 kHz et 10,7 MHz) au moyen de condensateurs fixes en parallèle ou en série avec les inductances appropriées.

Avec un peu de soin et un amplificateur à très haute fréquence on pourra obtenir jusqu'à 200 MHz de résonance.

Cet appareil sera particulièrement précieux pour la recherche d'une fréquence très mal connue ou de ses harmoniques. Il permettra de bien « suivre » une dérive en fréquence.

Il est recommandé de disposer les circuits dans un blindage (coffret métallique) de dimensions suffisantes pour ne pas trop diminuer le coefficient de surtension du circuit accordé. Le condensateur variable sera démultiplié pour permettre l'exécution de mesures précises. L'alimentation se fera de préférence sur piles afin d'éviter une élévation de température ou un couplage parasite avec le secteur néfastes à la précision de la mesure.

L'étalonnage de ce fréquencesmètre sera réalisé au moyen d'un générateur et d'un fréquencesmètre bien calibré. On pourra utiliser une série de courbes (degrés = f (fréquence)) pour éviter d'avoir à réaliser une gravure complexe sur un cadran qui devra cependant porter des graduations en degrés.

LE FRÉQUENCÈMÈTRE À FILTRES RC (figure 4)

Le fréquencesmètre LC ne permet pas de descendre très bas en fréquence. Pour atteindre ce résultat tout en conservant une bonne sensibilité, il est préconisé d'utiliser un circuit RC, comme celui de la figure, qui est un double T classique dont la sélectivité est bien connue.

Contrairement au cas précédent, puisque ce filtre « coupe-fréquence » est placé en transmission, on observera un minimum de déviation du galvanomètre lorsque l'on passera sur la fréquence de résonance du filtre.

Le circuit d'attaque comporte un amplificateur passant au moins de 10 Hz à 200 kHz à ± 1 dB à faible impédance de sortie. De même, le circuit de détection

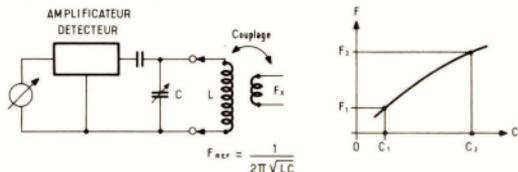


Fig. 2. — Fréquencesmètre du type « ondemètre à absorption ».

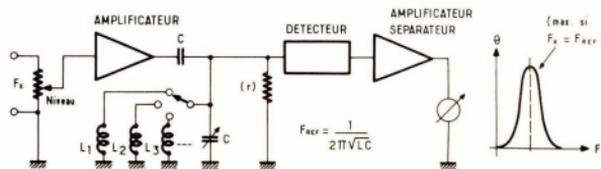


Fig. 3. — Fréquencesmètre à résonance à circuit LC.

comprendra un amplificateur de même bande à très haute impédance d'entrée et à faible impédance de sortie pour alimenter un détecteur à diodes.

Le problème de la réalisation du circuit pourra effrayer certains amateurs : la variation de fréquence se fait au moyen de trois résistances variables linéaires dont deux sont égales à R et la troisième à R/2. Il suffira de prendre deux potentiomètres doubles couplés mécaniquement par engrenages à rattrapage de jeu ou par poulies et câble. L'un des potentiomètres aura ses deux pistes montées en parallèle et ses curseurs réunis de façon à obtenir R/2. Les deux pistes de l'autre potentiomètre seront utilisées séparément. Le rapport F_{max}/F_{min} dans chaque gamme ne sera pas supérieur à 10. On utilisera des condensateurs fixes commutables dans un rapport de 10, par exemple, pour le changement de gamme.

Avec $R \text{ max} = 10 \text{ k}\Omega$ et $C = 1 \mu\text{F}$ (non polarisé), $0,1 \mu\text{F}$, 10 nF et 1 nF , on pourra obtenir quatre gammes de 20 Hz à 200 kHz. On utilisera, pour l'étalonnage l'une des méthodes préconisées dans le chapitre consacré à ce sujet.

LE FRÉQUENCÈMÈTRE BF À LECTURE DIRECTE (figure 5)

Si une précision extrême n'est pas recherchée, on peut construire un fréquencesmètre à lecture directe de la fréquence sur les graduations d'un micro-ampèremètre. Voici comment ce résultat peut être obtenu.

Le signal BF (max. 100 kHz) est appliqué à l'entrée d'un amplificateur à grand gain passant au moins la fréquence maximale. Le niveau sera tel que la sortie de l'amplificateur sera largement saturée et se présentera donc sous la forme d'un signal rectangulaire.

Le reste du montage com-

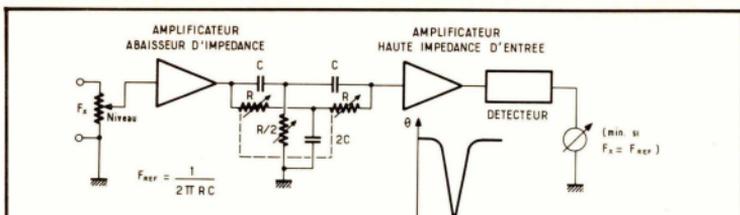


Fig. 4. - Fréquencesmètre à circuit RC.

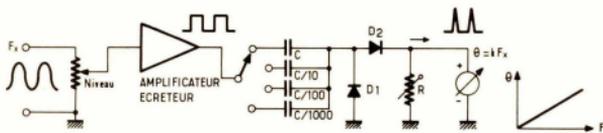


Fig. 5. - Fréquencesmètre à intégration d'impulsions à lecture directe.

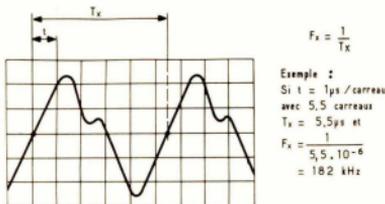


Fig. 6. - Utilisation de la base de temps d'un oscilloscope déclenché pour mesurer la fréquence d'un signal.

prendra un différentiateur (condensateur en série avec une résistance) dont la constante de temps est telle que seules les courtes impulsions de charge du condensateur interviennent. Un groupe de deux diodes dont l'une élimine la partie négative (D1) et dont l'autre (D2) transmet le courant de charge positif vers l'appareil de mesure (avec R en parallèle) constituant la résistance du différentiateur.

La déviation du microampèremètre est rigoureusement proportionnelle à la fréquence des impulsions positives ainsi intégrées par l'inertie mécanique de l'aiguille.

L'amplificateur d'attaque aura une faible impédance de sortie. Avec un galvanomètre de $100 \mu\text{A}$, une série de 4

condensateurs commutables de $0,1 \mu\text{F}$ à 100 pF , une résistance ajustable R de $4,7 \text{ k}\Omega$ et deux diodes germanium genre OA 85 on pourra obtenir 4 gammes de 50 Hz à 50 kHz à pleine déviation. L'étalonnage sera facilement réalisé sur la première gamme à 50 Hz en réglant la résistance en shunt sur le galvanomètre.

Cet appareil est particulièrement simple et facile à réaliser et à étalonner. Nous ne saurions trop en recommander la réalisation aux lecteurs qui pourront ainsi obtenir un auxiliaire très apprécié dans la mesure des fréquences basses. Il ne faut pas cependant lui demander une précision meilleure que 2 à 3 %, ni dépasser une fréquence maximale de 150 ou 200 kHz.

MÉTHODES FAISANT APPEL À UN OSCILLOSCOPE

Les heureux possesseurs d'un bon oscilloscope déclenché à base de temps bien étalonnée ne se poseront guère de problèmes pour mesurer une période donc une fréquence (qui est son inverse). La figure 6 démontre le principe élémentaire de cette méthode.

Sur une présentation très stable du signal on fera coïncider un des points de la trace avec une intersection de carreaux sur l'axe horizontal. La lecture du nombre de carreaux correspondant à une période se fera comme indiqué sur la figure. On multipliera ce nombre par l'unité

de la base de temps exprimée en temps/carré pour obtenir la durée de la période. L'inverse de cette valeur donnera la fréquence.

Les avantages de cette méthode sont les suivants :
 — rapidité de mise en œuvre,
 — forme d'onde indifférente,
 — variation d'amplitude sans action sur la mesure,
 — connaissance de la période (très intéressant pour les fréquences basses),
 — mise en évidence d'une variation rapide ou lente de la fréquence.

Cependant, la précision de la mesure dépend essentiellement de celle de la base de temps. Elle n'est pas toujours rigoureuse sur les appareils courants : il sera donc préférable de la contrôler ou de la faire contrôler à partir de références stables.

La gamme de mesure correspond à la bande passante de l'amplificateur vertical qui peut aller de quelques MHz à quelques dizaines de MHz suivant la classe de l'appareil. Dans le cas où l'amplificateur vertical passe le continu on pourra faire des mesures assez précises en très basse fréquence.

Une autre façon d'utiliser un oscilloscope pour une mesure de fréquence est la formation de figures de Lissajous. Pour cela, on doit disposer d'un signal de référence dont on connaît parfaitement la fréquence, que l'on enverra sur l'amplificateur horizontal de l'oscilloscope (base de temps hors circuit).

Le signal à mesurer sera envoyé sur l'amplificateur vertical.

On réglera le gain des deux amplificateurs de façon à obtenir une présentation qui ne déborde pas des limites de la partie visible de l'écran.

Lorsque les fréquences F_x et F_{ref} sont égales on obtiendra un oscillogramme correspondant à un cercle ou une ellipse. S'il existe un rapport harmonique de nombres entiers entre les deux fréquences, on observera d'autres présentations telles

que celles de la figure 7. On évitera d'interpréter, sous peine de confusion, des rapports de fréquences au-delà de 3 ou en deçà de 1/3.

S'agissant de comparer deux fréquences, cette méthode est l'une des plus précises qui existent puisqu'elle donne une valeur absolue de la différence des fréquences, bien inférieures au Hz. Elle ne peut guère s'appliquer qu'à des signaux à basse fréquence, inférieure à 100 kHz, surtout si la stabilité des fréquences comparées n'est pas exemplaire. Cette méthode permettra d'apprécier la dérive d'un oscillateur en comparant sa fréquence à celle d'un oscillateur à quartz, par exemple.

AUTRES METHODES

Il existe encore des méthodes de mesure auxquelles l'amateur pourra éventuellement se référer.

L'utilisation d'un récepteur pourra permettre de dégrossir la calibration d'un générateur. Il existe des récepteurs de trafic très stables et précis mais rares et chers : ce n'est pas à cette catégorie d'appareils que nous songeons mais plutôt aux braves récepteurs domestiques dont chaque famille a au moins un exemplaire.

On pourra utiliser cet appa-

reil sur l'étalonnage de son cadran s'il est précis, ce qui est rarement le cas, ou mieux en faisant un battement audible entre la source à étalonner et la fréquence connue d'un émetteur reçu simultanément. Il suffit, en général, de disposer le récepteur à proximité de l'oscillateur.

On se méfiera de l'erreur que peut introduire l'interprétation du mauvais battement du récepteur superhétérodyne situé à deux fois la valeur de la fréquence intermédiaire, surtout sur la ou les gammes OC où il est difficile de différencier les deux battements.

Cette méthode donne une précision généralement suffisante si l'on se borne à recevoir simplement la fréquence inconnue modulée en AM. La précision peut être très bonne si l'on réalise un battement nul avec une source étalon comme l'émetteur de Droitwich en GO sur 200 kHz.

La plage couverte est limitée par les gammes de radiodiffusion. Elle peut s'étendre à plus de 100 MHz (en FM).

Parmi les autres méthodes citons en une qui fera sans doute sourire certains et pourtant... Il s'agit, en fait, de celle qui fait appel à un simple chronomètre ou à la trotteuse d'une montre-bracelet.

Cette méthode ne peut guère s'appliquer directement qu'aux fréquences inférieures à 5 Hz. Elle sera très précise

si on effectue un comptage à partir d'un oscillogramme, du clignotement d'une diode LED, etc. alimentée par le signal pendant un temps assez long.

Mais si l'on utilise un diviseur de fréquence, la méthode peut s'appliquer à des fréquences très supérieures, jusqu'à plusieurs MHz. Or, on sait très facilement réaliser de tels diviseurs par 10, 100, 1000, etc. au moyen de circuits intégrés logiques comme le SFC 490 par exemple.

LE FRÉQUENCEMÈTRE DIGITAL

La méthode de mesure de fréquence la plus moderne, la plus précise, la plus simple à mettre en œuvre et la plus facile à interpréter fait appel au fréquencemètre digital. Ce n'est pas, cependant la moins onéreuse, bien que certaines réalisations commerciales soient devenues abordables.

Le principe est identique à celui du chronomètre que nous citons au paragraphe précédent : il consiste à compter le nombre de périodes dans une unité de temps, c'est pourquoi l'appareil est souvent appelé compteur. L'électronique aidant, on pourra mesurer une fréquence par cette méthode en un temps très court jusqu'à des fréquences très élevées.

Le fréquencemètre-comp-

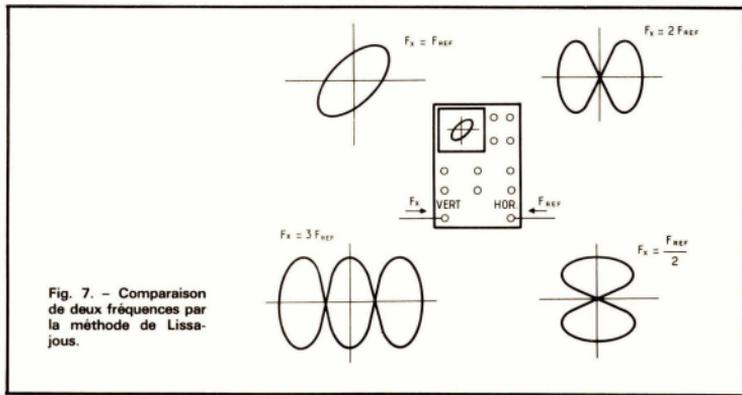


Fig. 7. - Comparaison de deux fréquences par la méthode de Lissajous.

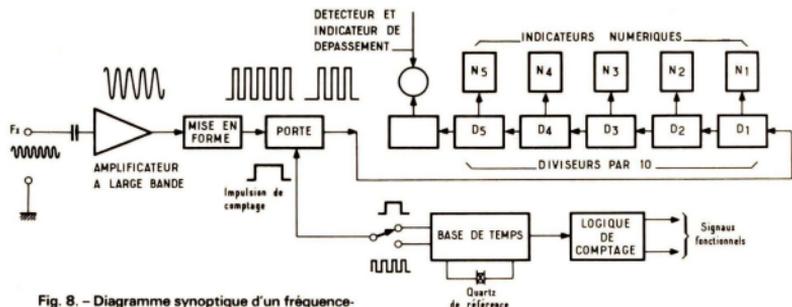


Fig. 8. - Diagramme synoptique d'un fréquence-compteur digital.

teur présente également l'avantage de visualiser la valeur numérique de la fréquence sur des indicateurs à tubes ionisés, à diodes électroluminescentes ou à cristaux liquides, de sorte que toute ambiguïté d'interprétation de lecture est éliminée.

Tous ces avantages se traduisent par une complexité relative qui est pondérée par l'utilisation assez large de circuits intégrés digitaux.

Le principe d'un tel appareil est présenté sur la figure 8. On peut distinguer trois parties principales :

- les circuits d'entrée et de sélection,
- les circuits de comptage et d'affichage,
- la base de temps et les circuits associés.

Pour la simplicité, nous n'avons pas représenté les commutations de gammes, de modes de fonctionnement, d'alimentation, etc.

Le signal d'entrée peut avoir une forme quelconque. Il devra avoir un niveau minimum (seuil de fonctionnement) et une fréquence compatible avec les possibilités de l'appareil.

Le circuit d'entrée comporte un amplificateur à haute impédance d'attaque et à très large bande (technique des

amplis vidéo). Il importe peu que sa caractéristique d'amplitude soit linéaire, l'essentiel est que le niveau de sortie atteigne un seuil qui permette de déclencher les circuits de mise en forme. Le signal de sortie du dispositif de mise en forme a l'allure d'une tension rectangulaire dont l'amplitude est constante et dont la fréquence correspond, naturellement, à celle du signal d'entrée.

Le signal ainsi rectangulaire est envoyé sur un dispositif appelé porte qui est tel que sa tension de sortie n'est présente qu'à la condition que la tension de commande soit appliquée en même temps que la tension d'entrée. Ce fonctionnement est familier aux lecteurs qui connaissent la principe des circuits NAND, par exemple.

Ainsi, comme on peut le voir sur la figure 8, les impulsions de signal sont sélectionnées pendant la durée bien connue d'une impulsion plus large, appelée créneau de comptage, en provenance de la base de temps. C'est ainsi que si trois impulsions sont sélectionnées par un créneau de comptage durant une seconde, cela signifie que la fréquence du signal d'entrée est de 3 périodes par seconde ou 3 Hz.

Les impulsions issues du

circuit de sélection sont envoyées sur le **dispositif de comptage et d'affichage**.

Ces derniers circuits comportent un certain nombre de diviseurs de fréquence par 10 montés en cascade. Chaque diviseur sort une information indiquant le nombre d'impulsions reçues sur son entrée et, de plus, une impulsion de sortie toutes les 10 impulsions d'entrée.

L'information nombre d'impulsions d'entrée est envoyée, après transformation, sur un indicateur numérique. Ainsi, par exemple, s'il existe trois impulsions sélectionnées, le chiffre 3 apparaîtra sur l'indicateur N1. Un système à mémoire non représenté, conservera cet affichage jusqu'au comptage suivant.

Bien sûr, le nombre d'impulsions sélectionnées peut être plus important. Par exemple, 12 345 par seconde soit 12 345 Hz ou 12,345 kHz. Dans ce cas, par le jeu des divisions successives, on obtiendra un affichage de 5 sur N1, 4 sur N2, 3 sur N3, 2 sur N4 et 1 sur N5.

Si le nombre de périodes par unité de temps excède la capacité de comptage (par exemple 5 décimales), l'impulsion sortant de D5 après que ce dernier circuit aura compté 10 fois, sera détectée par un

circuit spécial qui allumera un voyant indiquant que l'appareil est saturé (indicateur de dépassement). Les décimales visualisées seront cependant valables à l'exception du ou des nombres les plus significatifs (excédant 99 999 dans notre exemple).

La base de temps est l'âme de cet appareil. De sa précision dépend celle de la fréquence mesurée. Elle sera donc d'autant plus grande que le nombre de décimales affichées sera plus important.

On utilise un générateur de référence à quartz dont la fréquence stable et bien connue (par exemple 1 MHz ou 100 kHz) sera divisée autant de fois qu'il sera nécessaire pour obtenir le créneau de comptage de durée déterminée et des signaux fonctionnels depuis une « logique » de comptage. Ces signaux servent à remettre à zéro les diviseurs du circuit de comptage, à transférer les valeurs numériques sur les indicateurs, etc.

Il est essentiel que ces signaux soient en parfait synchronisme de phase avec l'oscillateur de référence.

Le fonctionnement d'un fréquence-compteur digital peut s'étendre à la mesure de Hz, de kHz ou de MHz. En conséquence, la durée de l'impul-

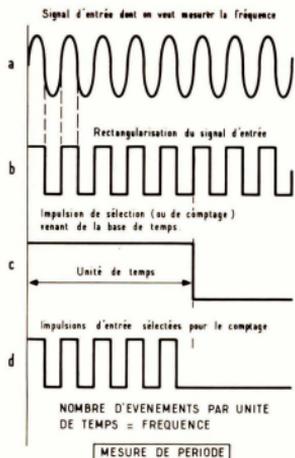


Fig. 9

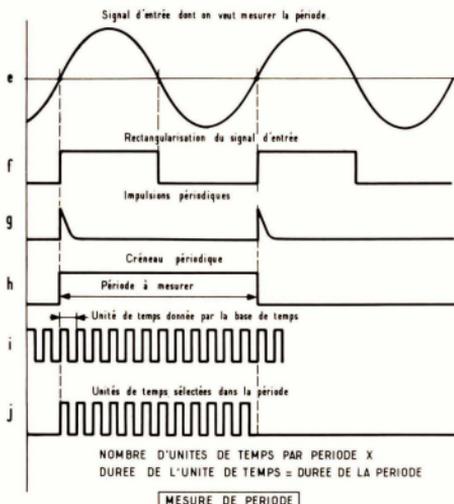


Fig. 10

sion de comptage peut être de 1 sec., 1 ms ou 1 μ s, ce qui s'obtient par divisions successives d'un même signal et commutation sur la position correspondant à la gamme de mesure désirée.

L'appareil peut être utilisé, comme on le verra ensuite, pour la mesure d'une période, auquel cas la valeur numérique affichée représentera la durée de la période en sec, ms ou μ s.

La figure 9 représente la forme des signaux dans le cas d'une mesure de fréquence.

En a) figure le signal d'entrée que nous supposons sinusoïdal.

En b) le même signal a été transformé en rectangulaire par le circuit de mise en forme.

En c), l'impulsion ou créneau de sélection issue de la base de temps qui n'est pas synchrone avec le signal b) comme pourrait le laisser supposer la figure.

En d) les impulsions d'entrée sélectionnées, soit 5 dans ce cas.

On trouvera sur la figure 10 les signaux correspondants à un fonctionnement en mesure de période.

Comme dans le cas précédent le signal d'entrée est rectangulaire (f). On extrait, par les fronts de montée ascendants des impulsions périodiques (g) qui servent à produire un créneau (h) dont la largeur correspond à la durée de la période du signal d'entrée.

On peut remarquer que le créneau de sélection est issu du signal et non, comme dans le cas précédent, de la base de temps. C'est cette dernière qui délivrera les impulsions d'horloge (i). La largeur de chaque période d'horloge correspond à l'unité de temps de référence.

Après sélection, comme le montre la figure (j), le compteur indiquera le nombre d'impulsions de référence, ou le nombre de périodes. Si, par exemple, la période de référence est de 1 ms et que l'on sélectionne 12 impulsions, la période du signal sera de

12 ms, ce qui correspond à une fréquence de 83,3 Hz.

Le montage d'un compteur fréquencemètre en compteur de périodes est un peu complexe. En fait cette fonction est surtout utilisée pour apprécier avec plus de précision une basse fréquence. En effet, on peut noter qu'au fur et à mesure que le nombre de digits diminue la précision du résultat d'une mesure de fréquence diminue également. C'est ainsi qu'avec 5 décades la mesure de 10 000 Hz à ± 1 Hz donne une précision de $\pm 10^{-4}$ alors que si l'on mesure 10 Hz on n'obtiendra que 10 % de précision. En utilisant la méthode de la période et en inversant le résultat, on retrouverait la même précision qu'avec 10 000 Hz.

(à suivre)

J.C.