

# PRATIQUE DE LA MESURE

# COMPTEURS

# ET FREQUENCEMETRES

## DEUXIEME PARTIE

Nous avons commencé, le mois dernier, l'étude des fréquencemètres numériques. Nous avons indiqué comment, à partir des compteurs d'impulsions, il était possible de mesurer la fréquence, à condition de compter pendant une unité de temps. En principe, cette unité est la seconde, ce qui donne un résultat en hertz (Hz).

Cependant, le nombre de chiffres du compteur étant limité, ne serait-ce que par le prix de revient, la fréquence maximum mesurable l'est aussi.

Ainsi, avec 6 chiffres, on « monte » à 999 999 Hz ou 1 MHz à peu près.

Pour mesurer des fréquences plus élevées sans augmenter ce nombre de

chiffres, il est possible de réduire le temps de comptage. Ainsi, la même fréquence de 999 999 Hz, déterminée pendant seulement 1/10 s, serait affichée 99 999, soit 10 fois moins. Le chiffre le moins significatif, correspondant aux dizaines de hertz, le second aux centaines et le troisième aux milliers, donc aux kilohertz. L'affichage peut alors être marqué 99.999, en ajoutant un point décimal, affichage qui sera lu facilement : 99.999 kHz.

Dans ces conditions, la limite en fréquence du compteur passe à 999 999 dizaines de hertz, soit à 999.999 kHz ou 10 MHz environ. Notons que la réso-

lution n'est plus du hertz, mais de 10 Hz.

En poursuivant dans ce sens, on monte à 100 MHz théoriques, avec une mesure en 1/100 s. Hélas, le compteur classique est réalisé en technologie TTL : la fréquence maximale de comptage est de l'ordre de quelques dizaines de mégahertz. On peut atteindre 60 MHz mais c'est bien le maximum possible !

Heureusement, il existe des parades à cette situation. D'autres technologies beaucoup plus rapides vont nous venir en aide. On fait souvent appel à la ECL ou MECL. (Multi Emitter Coupled Logic) (voir fig. 1).

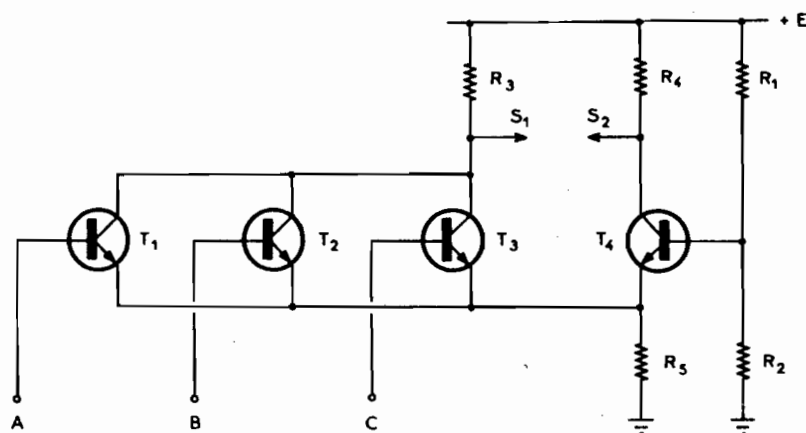


FIGURE 1. – Structure d'une porte NOR de technologie ECL.

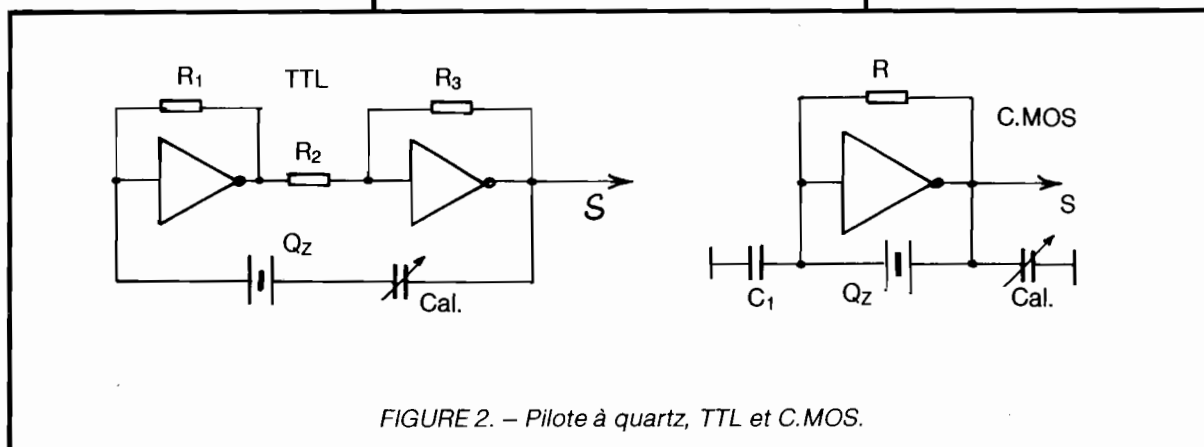


FIGURE 2. – Pilote à quartz, TTL et C.MOS.

Il s'agit d'une porte NOR. Bien entendu, les portes peuvent être associées en basculeurs et les basculeurs en diviseurs. On fabrique ainsi couramment des décades ECL : les 95H90 et 11C90 plus récentes sont bien connues. La 95H90 compte jusque 200 MHz environ, tandis que la 11C90 monte à plus de 600 MHz. Dans ces conditions, il suffit de faire précéder le compteur TTL du fréquencemètre par une décade ECL. Si la première décade TTL monte elle-même à 60 MHz, ce qui est le cas de la 74LS196 par exemple, un prédiviseur à 11C90 permettra d'obtenir un ensemble mesurant les fréquences jusqu'à plus de 600 MHz, ce qui est bien suffisant pour de nombreux utilisateurs.

Bien sûr, l'affichage est de 600 000 points si le système est à 6 digits. La résolution est de 1 kHz. Durée de la mesure : 1/100 de seconde. Ce qui est gagné en fréquence est perdu en précision. Existe-t-il une parade ? Bien sûr !

● Un moyen tout à fait économique : garder les 6 chiffres et compter en « 2 fois » :

– 1<sup>er</sup> comptage en 1/100 s : l'affichage donne les chiffres de poids fort, comme indiqué ci-dessus, les poids faibles sont perdus.

– 2<sup>e</sup> comptage en 10 s : l'affichage donne les chiffres de poids faibles, les poids forts sont perdus.

Ex. Fréquence à mesurer : 598 236 432 Hz, soit près de 598 MHz.

La sortie du prédiviseur ECL délivre du 59 823 643, 2 Hz.

– 1<sup>er</sup> comptage : donne le 1/100 de cette valeur : 598236, ce qui correspond à un affichage direct en kHz ;

– 2<sup>e</sup> comptage : donne 10 fois la sortie du prédiviseur, avec limitation à 6 chiffres, ce qui marque.... 236432, résultat en Hz.

Notons la partie « kHz », soit 236, commune aux deux résultats.

Les lectures sont ainsi très faciles à interpréter. La première passe donne les MHz et les kHz, la seconde redonne les kHz et y ajoute les Hz. Seul petit ennui : le deuxième comptage doit durer 10 s, ce qui est un peu long ! Cela provient du fait que la sortie du prédiviseur transforme les hertz d'entrée en 1/10 de hertz !

● Un deuxième procédé peut être utilisé : il suffit de monter autant d'afficheurs que nécessaire. Ici il en faudrait neuf. Dans ce cas, l'affichage de la fréquence s'obtient en un seul comptage durant toutefois 10 secondes. Tous les chiffres significatifs sont donnés par le résultat.

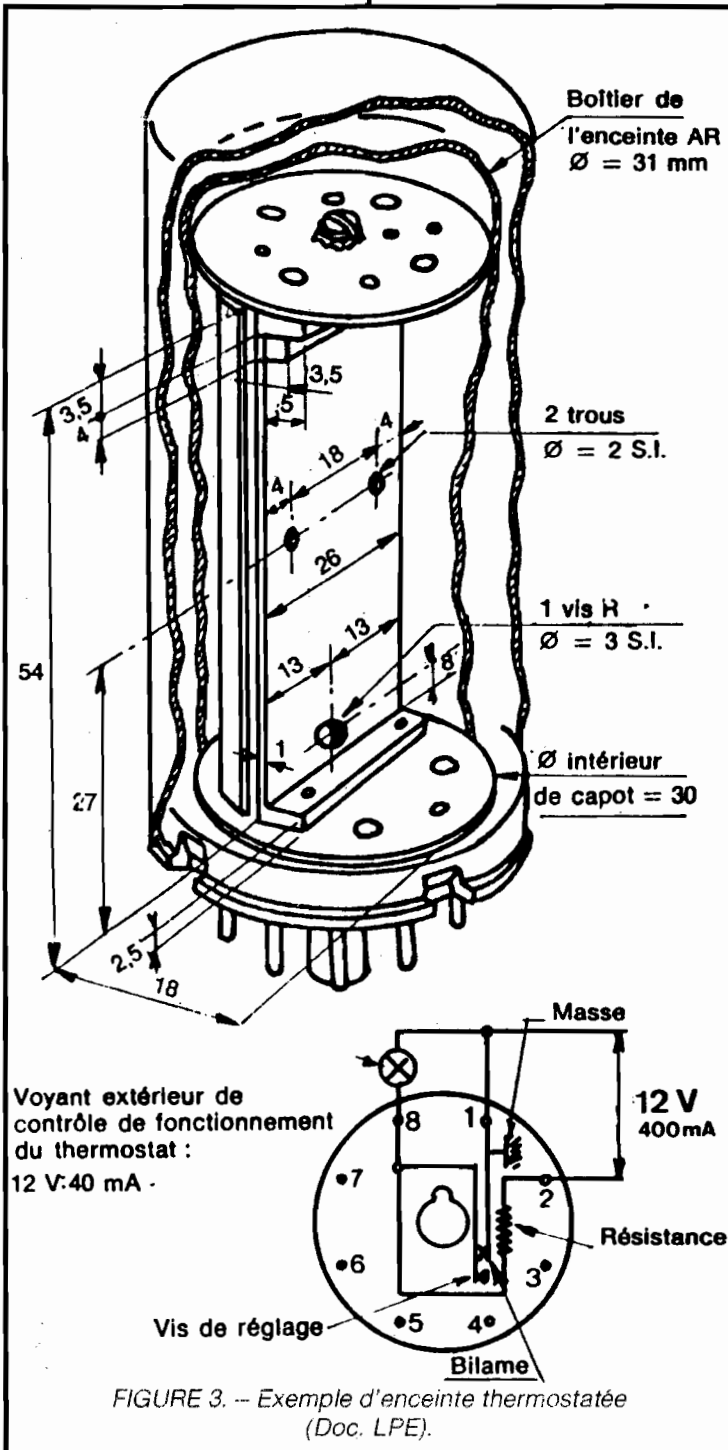
En réalité, il faut bien vite « déchanter », car quelle est la valeur réelle de ce résultat affiché avec 9 chiffres, conduisant à une précision apparente de 1 pour 600 millions, soit 1,6 pour 1 milliard :  $1,6 \times 10^{-9}$ ...

Nous avons vu que la partie essentielle d'un fréquencemètre était la « porte », s'ouvrant pendant un temps précis. C'est bien cette précision qui est en cause. Or, l'ouverture de porte est déterminée par la base de temps, celle-ci étant pilotée par un oscillateur à quartz. Toutes les performances de notre appareil reposent donc sur la stabilité et la précision de cet oscillateur. Les solutions utilisées dans les fréquencemètres usuels sont variées.

– **Quartz simple.** On fait usage d'un quartz mis en oscillation par un étage actif, sans complication particulière. Cet oscillateur peut être à transistor, à circuit TTL ou à C.MOS (voir fig. 2). La solution TTL donne une stabilité assez médiocre, de l'ordre de quelque  $10^{-5}$ . Avec un tel oscillateur, on peut compter sur 5 chiffres vraiment exacts, à condition encore que la température intérieure de l'appareil ne varie pas de plus de 5 à 10 °.

Les deux autres solutions permettent d'obtenir une stabilité meilleure, de l'ordre de  $10^{-6}$ , soit un affichage de 6 chiffres corrects. C'est donc une solution convenant très bien à notre fréquencemètre imaginé à 6 digits. Par contre, doter cet appareil de 9 digits serait tout simplement stupide, les 3 digits supplémentaires indiquant en réalité n'importe quoi, du côté des poids faibles. Dans l'exemple numérique ci-dessus, on pourrait donc lire les MHz et les kHz, mais certainement pas les Hz ! Il faudrait alors limiter le comptage au 1/100 s, ce qui serait d'ailleurs bien plus agréable.

– **Quartz thermostaté.** Puisque la dérive semble provenir essentiellement de la variation de température, il vient de suite à l'esprit l'idée de placer le quartz dans une enceinte maintenue à température fixe. C'est effectivement une technique très utilisée. Pour obtenir de bons résultats, il faut deux conditions :  
– utiliser un quartz taillé de manière à ce que sa courbe de température présente un point d'inflexion de pente nulle. En faisant fonctionner le quartz à cette température, son coefficient de température est donc quasi nul et sa stabilité très bonne ;



– utiliser une régulation de température très fine. En effet, il s'agit de rester au voisinage immédiat de la température d'inflexion. Deux méthodes sont à retenir :

– Le thermostat mécanique. On sait fabriquer des enceintes avec des thermostats bilames très classiques, chauffés

par fil résistant. En somme un banal four électrique ! La température est maintenue de manière très précise. Le thermostat a des seuils de basculement très rapprochés et sa cadence de commutation n'est que de quelques secondes. La température souvent choisie pour la régulation, en accord avec la

taille du quartz, est dans la plage 60 à 80°. Il faut en effet se tenir nettement au-dessus de la température ambiante.

– La régulation électronique. Le chauffage se fait, soit par résistance, soit par semi-conducteur. Le contrôle de température est confié à un capteur spécialisé (voir fig. 4). Le système ainsi constitué est bien plus séduisant, mais guère plus efficace que le banal thermostat.

Le tableau de la figure 5, extrait du catalogue KVG, précise les performances d'un quartz de précision de 1 MHz. On peut constater que la dérive thermique est de  $\pm 1 \cdot 10^{-6}$  pour  $\pm 5^\circ \text{C}$  de variation de la température nominale (60 ou 75 ° selon le modèle). On peut donc assez facilement s'approcher de la dérive dite de « vieillissement », correspondant à une sorte de « mise en place » du quartz. Le maximum possible étant de  $\pm 2 \cdot 10^{-8}$ . La dérive à très court terme est évidemment meilleure mais sans utilité, si elle n'est pas assortie d'un recalage continu, par l'opérateur.

En d'autres termes, avec une excellente enceinte et un bon quartz, on peut atteindre sans grande difficulté,  $1 \cdot 10^{-7}$ , voire  $1 \cdot 10^{-8}$  ! Ce qui permet au plus un affichage à 8 chiffres.

Si le quartz thermostaté est la solution de choix, elle a un inconvénient indéniable au niveau de l'amateur. C'est son délai de mise à température : il faut au moins 10 mn pour arriver à la température de 60 ou 75° stabilisés. L'idéal étant le chauffage permanent. Cela est valable au niveau du laboratoire si le fréquencemètre est continuellement utilisé. Mais ça ne l'est pas à celui de l'amateur qui effectue une mesure de temps en temps ! Dans ces conditions, l'enceinte n'est pas laissée sous tension permanente : il faut attendre à chaque fois et c'est désagréable... La solution de ce problème consiste à monter un TCXO, c'est ce que nous allons voir.

– Le TCXO (Temperature Compensated Xtal Oscillator). Ce qui signifie : Oscillateur à quartz compensé en température.

Le principe est le suivant : réalisons un oscillateur à quartz aussi stable que possible, calibrable par une varicap. Relevons maintenant sa courbe de dérive thermique. Réalisons un réseau compensateur à thermistances, agissant sur la varicap en donnant une correction exactement contraire à celle de

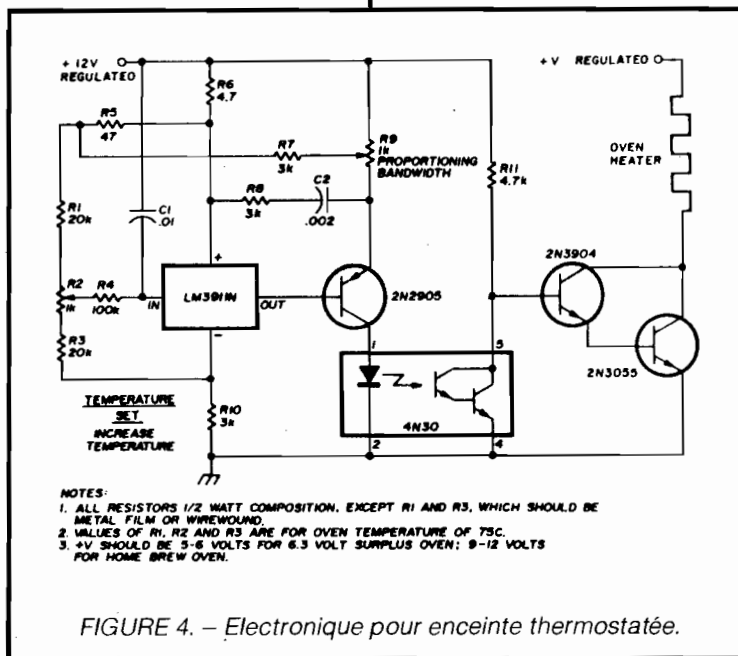


FIGURE 4. - Electronique pour enceinte thermostatée.

la dérive thermique. Et le tour est joué ! En effet, à chaque température de la plage de fonctionnement prévue, le réseau corrige exactement la dérive, ce qui stabilise parfaitement la fréquence du système (voir fig. 6).

C'est en fait plus facile à dire qu'à faire ! La compensation se fait en un certain nombre de points de la plage. Chaque TCXO est corrigé individuellement. Ceci explique le prix assez élevé de ces petites bêtes !

Le tableau de la figure 7 donne les performances de quelques TCXO de la large gamme distribuée par KVG. On peut constater que les performances sont un peu inférieures à celles d'un bon quartz bien thermostaté. On peut raisonnablement compter sur une précision de  $1 \cdot 10^{-7}$ . Toutefois, l'énorme avantage du TCXO vient du fait que cette précision est disponible à tout moment, que ce soit à l'allumage de l'appareil ou après plusieurs heures de fonctionnement.

Il reste cependant un gros problème, quelle que soit la solution quartz adoptée : il ne suffit pas d'avoir une base de temps très stable, il faut encore être certain qu'elle délivre une référence de temps exacte ! Il est donc indispensable de procéder à un calibrage initial... et renouvelé régulièrement. Certains laboratoires, très bien équipés, disposent de sources de fréquences étalons, à très haute précision. Dans cette hypothèse, il n'y a pas de problème pour calibrer le fréquencemètre ! En revanche, l'amateur ou le petit professionnel ne disposent pas de telles sources. Ils doivent alors se « débrouiller ». Heureusement, quelques émetteurs radio émettent sur des fréquences très précises. Ils peuvent servir de référence. C'est évidemment le cas des émissions WWV, sur 5 ou 10 MHz, difficiles à capter sans récepteur de trafic. C'est aussi le cas de certains émetteurs de radio-diffusion grand public !

En premier lieu, Droitwich (GB) émettant sur 200 kHz, très exactement, avec une précision de quelque  $10^{-12}$ , assurée par une horloge atomique. La précision de cet émetteur est ainsi très supérieure à ce que nous exigeons :  $10^{-8}$  ! Elle convient parfaitement. Droitwich est aisément capté dans toute la partie nord de la France. Il l'est sans doute moins bien dans le Sud (on ne peut pas tout avoir !).

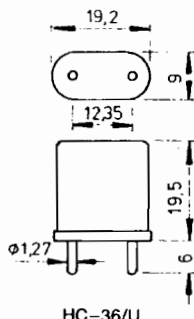
Quartz de précision

1 MHz

mode fondamental  
pour fonctionnement thermostaté

Désignation:

|                   |           |
|-------------------|-----------|
| Température 60° C | XA 111-60 |
| Température 75° C | XA 111-75 |



Résonance: parallèle  $C_L = 30$  pF

Tolérance:

|                    |                       |  |
|--------------------|-----------------------|--|
| Calage:            | $\pm 5 \cdot 10^{-6}$ | à la température nominale                      |
| Dérive thermique:  | $\pm 1 \cdot 10^{-6}$ | sur $\pm 5^\circ$ C de la température nominale |
| Point d'inversion: | $\pm 5^\circ$ C       | de la température nominale                     |

|                 |                             |
|-----------------|-----------------------------|
| Vieillessement: | $\pm 1 \cdot 10^{-6}$ /an   |
|                 | $\pm 5 \cdot 10^{-7}$ /mois |
|                 | $\pm 2 \cdot 10^{-8}$ /jour |

FIGURE 5. - Caractéristiques d'un quartz de précision.

Nous disposons aussi d'un émetteur français situé à Allouis, au centre de l'Hexagone et dont la fréquence est également très précise. C'est notre Paris Inter, grandes ondes, de fréquence 163, 840 kHz. Valeur nettement moins intéressante que les 200 kHz des Anglais, mais utilisable tout de même, d'une certaine manière.

Deux méthodes sont possibles dans le cas de Droitwich :

**- Méthode du battement**

La base de temps du fréquencemètre utilise le plus souvent un quartz de 1 ou de 10 MHz. Il est facile de diviser ces fréquences pour arriver à 200 kHz. En fait, cette fréquence existe généralement dans la chaîne de division. Il suffit

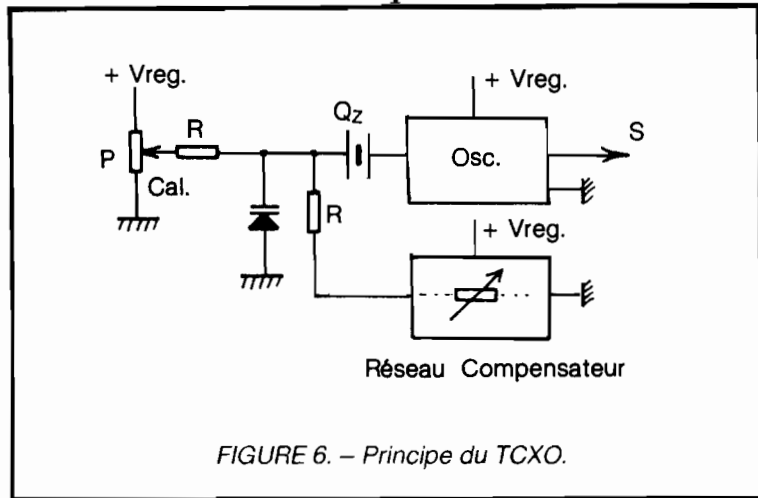
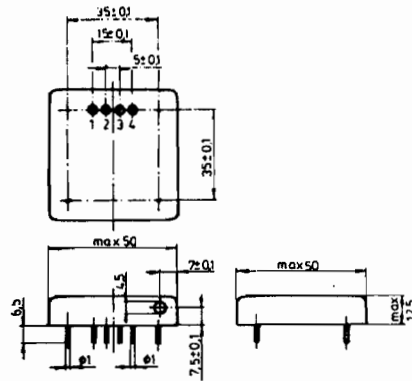


FIGURE 6. - Principe du TCXO.



Boîtier 8 C cotes en mm.

**OSCILLATEURS A QUARTZ COMPENSES EN TEMPERATURE Série A**

Fréquence: de 5 MHz à 20 MHz, standard 5 MHz et 10 MHz

| Type  | TCXO-A 12                  | TCXO-A 22                  | TCXO-A 32                  | TCXO-A 11                  | TCXO-A 21                  | TCXO-A 31   |
|---|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|---|
| Dérive de fréquence sur la plage de température   | $\leq \pm 3 \cdot 10^{-6}$ | $\leq \pm 2 \cdot 10^{-6}$ | $\leq \pm 1 \cdot 10^{-6}$ | $\leq \pm 2 \cdot 10^{-6}$ | $\leq \pm 1 \cdot 10^{-6}$ | $\leq \pm 0.5 \cdot 10^{-6}$                                |
|   | -40° ... + 80° C           | -20° ... + 70° C           | 0° ... + 50° C             | -40° ... + 80° C           | -20° ... + 70° C           | 0° ... + 50° C  |
| Vieillessement                                    |                            |                            |                            |                            |                            |   |
|   | $\leq \pm 2 \cdot 10^{-6}$ |                            |                            | $\leq \pm 1 \cdot 10^{-6}$ |                            |   |
|   | $\leq \pm 1 \cdot 10^{-6}$ |                            |                            | $\leq \pm 5 \cdot 10^{-7}$ |                            |   |
|   | $\leq \pm 1 \cdot 10^{-7}$ |                            |                            | $\leq \pm 5 \cdot 10^{-8}$ |                            |   |
| Dérive de fréquence pour tension alim. $\pm 10\%$ |                            |                            |                            |                            |                            | $\leq \pm 5 \cdot 10^{-6}$                                  |
| charge $R_L \pm 10\%$                             |                            |                            |                            |                            |                            | $\leq \pm 5 \cdot 10^{-6}$                                  |
| Rattrapage de fréquence                           |                            |                            |                            |                            |                            | $\geq \pm 5 \cdot 10^{-6}$                                  |
| Tension d'alim. $U_a$                             |                            |                            |                            |                            |                            | 12 V $\pm 20\%$   |
| Consommation                                      |                            |                            |                            |                            |                            | < 9 mA  |
| Tension de sortie                                 |                            |                            |                            |                            |                            | $\geq 3$ V crête-crête sinusoïdal (distorsion non garantie) |
| Charge nominale                                   |                            |                            |                            |                            |                            | 500 $\Omega$  |

FIGURE 7. - Caractéristiques du TCXO de KVG.

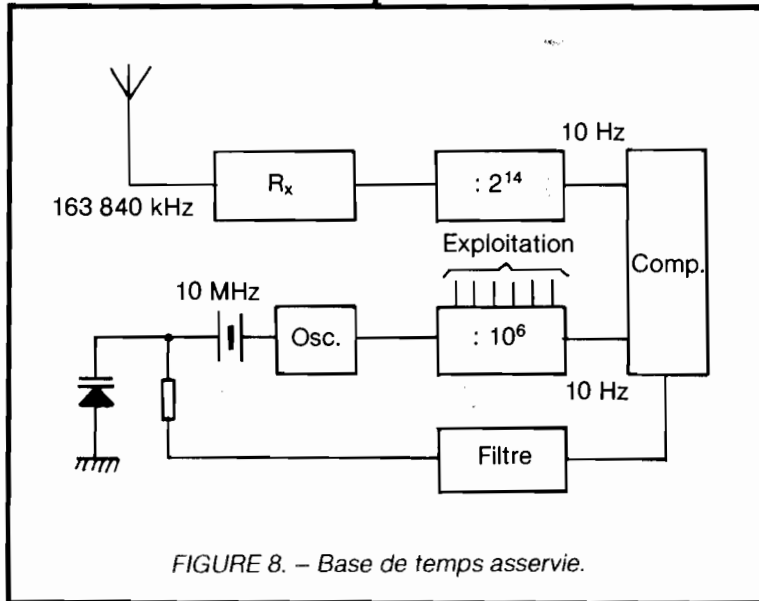


FIGURE 8. - Base de temps asservie.

de connecter quelques décimètres de fil sur le point 200 kHz, pour obtenir un faible rayonnement sur cette fréquence. Plaçons maintenant un récepteur G.O., calé sur Droitwich, au voisinage du fréquencemètre équipé de son antenne. Nous constatons que Droitwich est fortement brouillé :

- si les 200 kHz du fréquencemètre sont parfaits, Droitwich est bloqué, on n'entend plus rien en permanence ;
- si les 200 kHz en question sont « approchés », il va s'établir un régime de battements entre les deux porteuses. Si, par exemple, l'antenne rayonne du 200,1 kHz, il va se fabriquer dans le récepteur un signal à la différence des 200,1 et 200 kHz, soit à 0,1 kHz ou 100 Hz. Ce signal différence est audible. Il correspond à un son très grave, plutôt à une sorte de ronflement. En réduisant l'écart des fréquences, ce son va devenir plus grave encore. En dessous de 20 Hz, l'oreille ne le perçoit plus comme un son, mais entend un « motor-boating » lent : il s'agit d'une alternance blocage-déblocage de l'émission reçue. Plus le motor-boating est lent et mieux le 200 kHz est calé. Dans l'idéal, l'intervalle de temps entre blocage et déblocage doit durer... très longtemps ! Si vous arrivez à plusieurs minutes, c'est très bien !

Ex. : Temps séparant deux déblocages : 5 mn. C'est la période du battement. Sa fréquence est  $1/5 \times 60 \approx 0,03$  Hz. Le calage est de  $200\ 000 \pm 0,03$  Hz.

La précision est de :

$$0,03/200\ 000 \times 1\ 000\ 000 = 0,15 \cdot 10^{-6} \text{ ou } 1,5 \cdot 10^{-7}$$

N.-B. : Pour bien entendre ce fameux battement, il faut placer le récepteur ni trop loin, ni trop près du fréquencemètre muni de son antenne 200 kHz. La distance doit être juste assez faible pour un blocage net. Si le récepteur est trop près, les déblocages sont inaudibles.

Hélas, avec Paris Inter, on ne peut pas utiliser la méthode des battements, la fréquence 163,840 kHz n'existant pas dans la chaîne de division possible. C'est bien dommage et il faut faire appel à une autre méthode.

- **Méthode de la mesure directe.**

Théoriquement c'est simple ! Captons Droitwich ou Paris Inter ! Disposant de la porteuse de ces émetteurs, mesurons sa fréquence. Il suffit alors de corriger la base de temps du fréquencemètre jusqu'à lire la valeur exacte à obtenir.

En fait, ce n'est pas tout à fait aussi simple. La porteuse en question est très faible : une amplification est nécessaire. De plus, et c'est plus grave, la porteuse est modulée en amplitude, ce que le fréquencemètre n'apprécie pas du tout. Il faut donc réaliser un récepteur spécial, amplifier la porteuse et en éliminant toute trace de modulation. Le reste est simple : il faut régler la base de temps pour lire exactement

200 000 Hz ou 163,840 Hz. Notons que cette mesure ne donne qu'une précision relative de  $5 \cdot 10^{-6}$ . Pour faire mieux, on comptera pendant 10 secondes en essayant d'afficher, soit 200000.0, soit 163840.0. Dans ce cas, la précision est de l'ordre de  $10^{-7}$ , ce qui est tout à fait suffisant !

- **Base de temps asservie**

On peut imaginer un contrôle direct de l'un des deux émetteurs en question sur la base de temps du fréquencemètre, en effectuant une correction automatique (voir fig. 6).

Le récepteur spécial Paris Inter (par exemple) ramène la fréquence étalon à 10 Hz, sans résidu de modulation. La base de temps interne fournit également du 10 Hz. Les deux sorties sont comparées. Le résultat de cette comparaison, dûment filtré, corrige en conséquence la fréquence de la base de temps.

Cette solution, bien plus complexe que le banal montage d'un TCXO, est par contre bien plus performante (si la PLL de contrôle de phase est bien réglée). Elle est aussi beaucoup plus économique.

Notons que certaines réalisations utilisent directement les signaux radio correctement divisés. Hélas, cette méthode présente un très gros inconvénient.

Avec Paris Inter, il faut diviser 14 fois la fréquence par 2, pour obtenir enfin une puissance de 10 : en l'occurrence  $10^1$  ou 10 Hz. On peut donc en tirer le 1/10 s, la seconde, 10 s..., mais rien en dessous de ces valeurs !

Avec Droitwich, c'est nettement mieux, car :

$$200\ 000/2 = 100\ 000 = 10^5$$

On a cette fois les temps nécessaires à partir de  $1 \cdot 10^{-5}$  s, soit 10  $\mu$ s. Pour un fréquencemètre, c'est parfait, le temps minimum d'ouverture de porte ne descendant jamais en dessous de la milli seconde. Par contre, pour un appareil combinant d'autres fonctions : périodemètre et impulsiomètre, il est nécessaire de disposer de la micro seconde, voire du 1/10 de  $\mu$ s ! C'est donc très gênant, dans ce cas.

La solution initiale, pour plus compliquée qu'elle soit, présente le gros avantage de s'adapter aux deux émetteurs de référence qui nous intéressent et de fournir toutes les références de temps, sans aucune restriction !

F. THOBOIS