

L'ELECTRONIQUE



COMMANDE

LA VIE MODERNE

RETRONIK.FR

FASCICULE N° 17

MESURE DES TEMPS

Depuis toujours les hommes ont eu la notion du temps et se sont efforcés de le mesurer. L'évolution de la technique a permis au cours des siècles de construire des appareils de plus en plus perfectionnés pour réaliser ces mesures, mais ces horloges à fonctionnement mécanique, vu les extrêmes exigences de la science, étaient arrivées à leur limite de possibilité tant au point de vue stabilité que précision. Avec l'électronique on a pu palier cet inconvénient et augmenter la précision des mesures d'une façon considérable. Dans la vie moderne tout est, en effet, basé sur les mesures de temps ou d'intervalles de temps avec des ordres de grandeurs très différents pouvant aller de milliards d'années pour les géologues et les astronomes à la seconde ou au millième de seconde pour les transports, communications et dispositifs électroniques et enfin jusqu'au millionième ou milliardième de seconde pour l'étude de nombreux phénomènes atomiques.

L'unité de temps est la seconde. Elle est encore définie légalement dans la plupart des pays comme étant $\frac{1}{86.400}$ du jour solaire moyen. Cette définition rattache donc la seconde au mouvement de rotation du globe terrestre, lequel n'est malheureusement pas uniforme et présente des variations séculaires, saisonnières et de caractère aléatoire. En sorte que la seconde ainsi définie ne permet de donner qu'une précision de $1 \cdot 10^{-7}$. Cette précision est insuffisante dans certains cas, en particulier dans le domaine de la mesure des fréquences radioélectriques.

Le Comité International des Poids et Mesures a donc décidé en octobre 1956 d'une nouvelle définition de la seconde, c'est la fraction $1/31556925,974$ de l'année tropique pour 1900 janvier 0 à 12 heures de temps des éphémérides ». (1)

L'exactitude avec laquelle la seconde ainsi définie peut être connue, dépend de l'exactitude possible de la détermination de l'année tropique ; pour atteindre une précision de 10^{-10} les observations doivent s'étendre sur une dizaine d'années. Le temps solaire moyen continue donc d'être utilisé comme intermédiaire et, lorsque la nécessité le demande, une correction complémentaire permet de passer au temps des éphémérides. Pratiquement, l'unité astronomique de temps est rendue accessible à l'aide de signaux horaires diffusés par les observatoires. Ces signaux sont obtenus à l'aide d'horloges à quartz (fig. 1), c'est-

(1) L'année tropique est l'intervalle de temps durant lequel la longitude moyenne du soleil, comptée à partir de l'équinoxe vrai, augmente de 360° . C'est, en d'autres termes, l'intervalle entre deux équinoxes de printemps consécutifs ; on a convenu de faire débiter l'année tropique au moment où la longitude du soleil est de 280° : c'est une époque voisine du 1^{er} janvier, mais qui peut s'en écarter d'un jour ou deux, on la désigne par janvier 0.

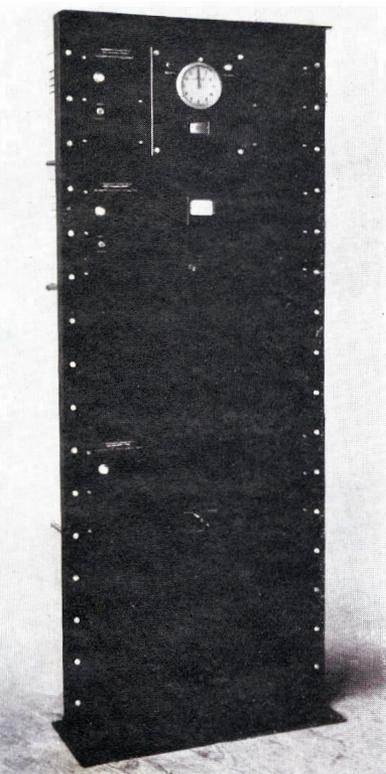


Fig. 1. Horloge à quartz de la Société Belin.

à-dire dont la partie essentielle est un oscillateur à quartz piezoélectrique. Ce n'est pas ici le lieu de rappeler les propriétés des cristaux de quartz, la manière de les tailler, pour obtenir les oscillations souhaitées et les coefficients de température désirés (le coefficient de température est la variation relative de fréquence donnée par le cristal pour une variation de température d'un degré centigrade.)

Remarquons d'ailleurs que ce n'est pas en fait le coefficient de température qui est important pour un cristal stabilisateur, mais bien plutôt la variation totale de fréquence dans l'intervalle total de variation de température auquel il est soumis. On réduit la variation de température en plaçant le cristal dans une enceinte thermostatique dont certains modèles permettent de maintenir la température constante au dixième et même au centième de degré centigrade. La complication apportée par la présence d'un thermostat est acceptée dans de nombreuses applications telles que les postes de radiodiffusion ou du service téléphonique ou télégraphique dont la stabilité doit être très grande. Il ne faut pas oublier que pour certains oscillateurs, tels que ceux utilisés sur les avions, les variations de température ambiante peuvent s'étendre de -55 à $+70$ degrés centigrades.

La stabilité des horloges à quartz peut atteindre $\pm 10^{-10}$ sur une durée de l'ordre d'un jour, soit 0,00001 seconde par jour. Cependant, les oscillateurs à quartz, qui ne sont d'ailleurs pas exempts d'incidents de fonctionnement, ne peuvent constituer une échelle de temps continue sur de très longues périodes. La mise au point récente d'étalons moléculaires et atomiques — communément et improprement baptisés « horloges atomiques » — a permis d'aborder avec succès le problème de la production de fréquences parfaitement stables.

Les trois types d'étalons actuellement en usage sont :

- l'étalon à absorption qui utilise une raie d'inversion du gaz ammoniac et donne une fréquence voisine de 23.870 MHz,
- le maser (initiales de « microwave amplification by stimulated emission of radiation ») à jet moléculaire de gaz ammoniac également, et l'étalon à jet atomique de césium dont le principe repose sur la séparation du césium par un champ magnétique,
- l'étalon à vapeur de césium commercialisé aux U.S.A. sous le nom de « Atomic-chrom ».

Les fréquences fournies par ces étalons sont déterminées avec une exactitude de 10^{-9} à 10^{-10} et permettent de contrôler avec précision sur de courtes durées, par l'intermédiaire de multiplicateurs et diviseurs de fréquence, les horloges à quartz utilisées pour intégrer les intervalles de temps sur de plus longues durées.



Fig. 2. Schéma d'une horloge utilisant la raie d'inversion de l'ammoniac.

HORLOGE ÉTALON UTILISANT LA RAIE D'ABSORPTION 3,3 DE L'AMMONIAC

Dans cette horloge on se sert d'une des raies spectrales de l'ammoniac pour asservir un oscillateur à quartz. Ces raies spectrales étant dues au phénomène de vibration des atomes à l'intérieur des molécules, l'horloge est donc réglée par le système moléculaire invariable du gaz ammoniac. Ainsi dès qu'un oscillateur à quartz subit une variation, si petite soit-elle, par rapport à la fréquence de la raie d'absorption de l'ammoniac, cela donne immédiatement naissance à une tension d'erreur qui rétablit la fréquence correcte du quartz.

La figure N° 2 montre le schéma de principe de l'horloge. Le signal est fourni par un oscillateur à quartz réglé sur 100 KHz. Après un système de multiplicateur et de modulateur on obtient alors du 23.870,4 MHz modulé en fréquence à $\pm 0,96$ MHz. A chaque alternance le signal passe par la fréquence d'absorption de l'ammoniac qui est de 23.870,1 MHz. A chaque coïncidence il y a absorption, donc naissance d'une impulsion négative qui est appliquée sur un discriminateur de temps qui reçoit en même temps une autre impulsion engendrée par le signal venant du quartz. A la sortie du discriminateur il y a une tension nulle si l'intervalle de temps entre les deux impulsions est correct et une tension d'erreur si cet intervalle a varié. Cette tension agit alors sur un tube de glissement qui ramène la fréquence d'oscillation du quartz à une valeur correcte.

La mesure précise des temps permise par l'électronique trouve son application dans :

- les problèmes de l'horlogerie,
- l'étude des phénomènes récurrents et des phénomènes transitoires,
- la mesure des vitesses,
- la mesure des fréquences,
- la mesure des débits.

PROBLÈMES DE L'HORLOGERIE

Depuis longtemps, l'industrie horlogère a produit des horloges de précision sous les diverses formes connues ; mais on peut dire qu'il a fallu attendre les dispositifs électroniques pour obtenir la très grande précision, nécessaire pour de nombreux problèmes. Nous verrons que cette application à la mesure pure et simple du temps rejoint dans le principe les appareils conçus pour les mesures de vitesse ou de fréquence et l'étude des phénomènes récurrents et transitoires.

Il paraît intéressant de dire quelques mots des méthodes appliquées par l'industrie horlogère pour étudier et régler les mouvements des montres usuelles à commande par ressort. On se contentait autrefois de les comparer à une horloge bien réglée servant d'étalon de temps. Cette méthode, si elle présente l'avantage de la simplicité et si elle est suffisante pour terminer le réglage des montres et des pendules, présente cependant des inconvénients :

1° Elle est très longue, puisque après chaque retouche faite au réglage de l'échappement, il faut attendre 24 heures avant de se rendre compte de son effet et par suite d'effectuer la nouvelle retouche qui se révélerait nécessaire ;

2° Elle permet d'observer la marche moyenne de la montre, mais ne donne aucune indication sur la marche instantanée ; or ces deux marches ne sont que très rarement, sinon jamais, identiques en raison des imperfections des engrenages et des irrégularités dans le déroulement du ressort moteur. La connaissance de ces irrégularités est cependant intéressante, car ce sont elles qui déterminent la qualité de la montre.

Par l'observation de la marche instantanée, il est, par contre, possible d'étudier, par exemple, le fonctionnement des divers rouages des montres ou des horloges prototypes avant d'en lancer la fabrication en série, et, ensuite, de vérifier la constance de cette fabrication. L'idée est donc venue, il y a quelques années, en fait dès 1935, d'utiliser un procédé électronique pour observer la marche instantanée des montres et en accélérer le réglage (Fig. 3).

A l'origine, le dispositif électronique servait uniquement à amplifier le bruit de la montre à observer, ainsi que celui du mouvement étalon. Les deux courants amplifiés attaquaient des relais commandant, l'un par un moteur asynchrone un disque à fente, l'autre les éclats d'un tube au néon placé derrière cette fente. Par effet stroboscopique, la fente du disque semble immobile, ou au contraire semble tourner lentement dans un sens ou dans l'autre. La vitesse apparente de rotation de la fente permet de déterminer la marche de la montre par rapport au mouvement étalon.

Cet appareil a depuis été perfectionné et les mouvements ont pu être inscrits, ce qui laisse une trace des observations et facilite l'application. Les appareils à coïncidence qui ont suivi présentaient, en dehors du fait qu'ils sont purement indicateurs comme les précédents, des défauts inhérents au principe même.

Le VIBROGRAF LEPAUTE (figure n° 4) a pour base un principe tout différent qui est le suivant :

Une horloge à quartz fournit un courant alternatif stable qui, après amplification et démultiplication de fréquence, alimente un moteur synchrone. Celui-ci entraîne une bande de papier ainsi qu'un disque portant des pointes à sa périphérie. Le papier se déroule entre une électrode fixe



Double Triode
E CC 82

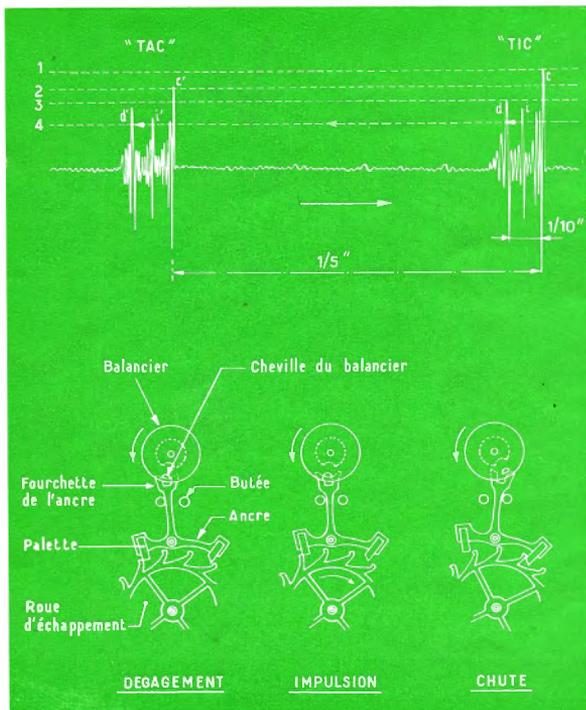


Fig. 3. Analyse du « tic-tac » d'une montre.

Fig. 4. Vibrograf Lepaute.

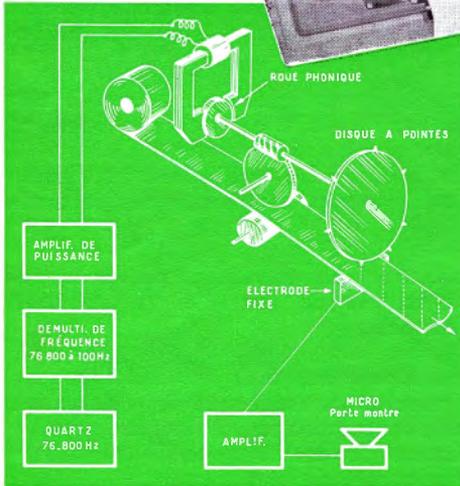
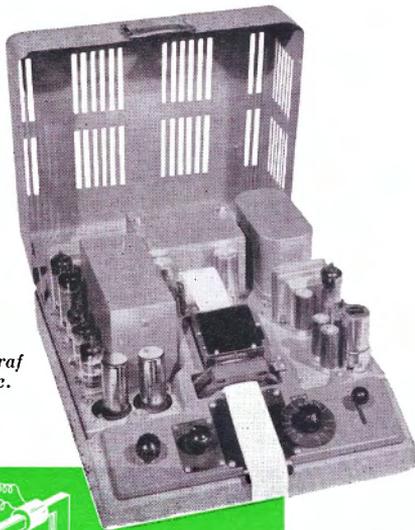


Fig. 5. Schéma de principe du Vibrograf.

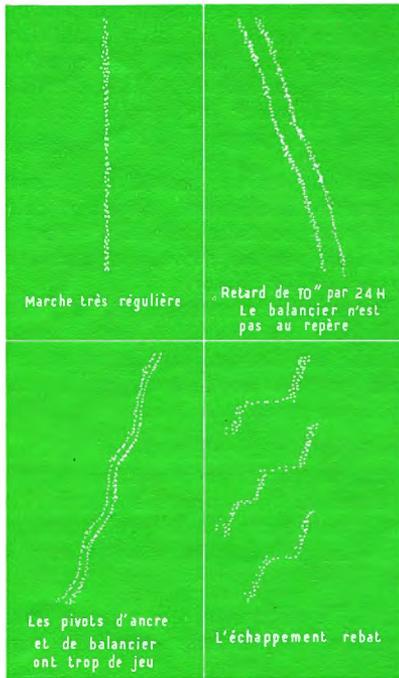


Fig. 6. Courbes relevées avec le Vibrograf Lepaute montrant une montre marchant d'une façon régulière et d'autres ayant des anomalies.

et le disque portant les pointes qui forment les électrodes mobiles. La tension alternative fournie par le microphone recueillant le bruit de la montre ou du mouvement à observer est amplifiée et déclenche une décharge à haute tension entre une pointe du disque et l'électrode fixe (fig. n° 5). A chaque « tic » ou « tac » de l'échappement, cette décharge crée une étincelle qui perce et brûle le papier dans des conditions de netteté très bonne. La succession de ces perforations produit une ligne sur le papier. L'inclinaison de cette ligne par rapport à la bande de papier permet de mesurer les écarts des deux mouvements.

D'autre part, toute irrégularité dans le fonctionnement du mouvement cause une déformation de la ligne d'enregistrement et l'examen des courbures successives de cette ligne permet de déceler les causes d'irrégularité (fig. n° 6). Le quartz de l'horloge est réglé sur la fréquence de 76.800 Hz, son coefficient de température est de $2,5 \cdot 10^{-6}$ par degré centigrade. Il est étalonné avec une précision comprise entre 10^{-5} et 10^{-6} (soit de l'ordre de quelques dixièmes de seconde par 24 heures) par comparaison avec l'heure de l'Observatoire de Paris.

Une première démultiplication de 1/6 par un tube double triode, qui sert également à l'entretien des vibrations du quartz, abaisse la fréquence à 12.800 Hz, puis 4 autres démultiplications dans deux autres tubes abaissent successivement cette fréquence à 100 Hz. Un étage de puissance comprenant 2 tubes en push-pull permet d'alimenter la roue phonique d'entraînement du papier et du disque à pointes (fig. n° 7).

L'amplificateur microphonique comprenant 2 tubes double triode présente une particularité intéressante : un circuit oscillant, réglé sur une fréquence légèrement inférieure à 1/5 de seconde (fréquence de battement normale des mon-

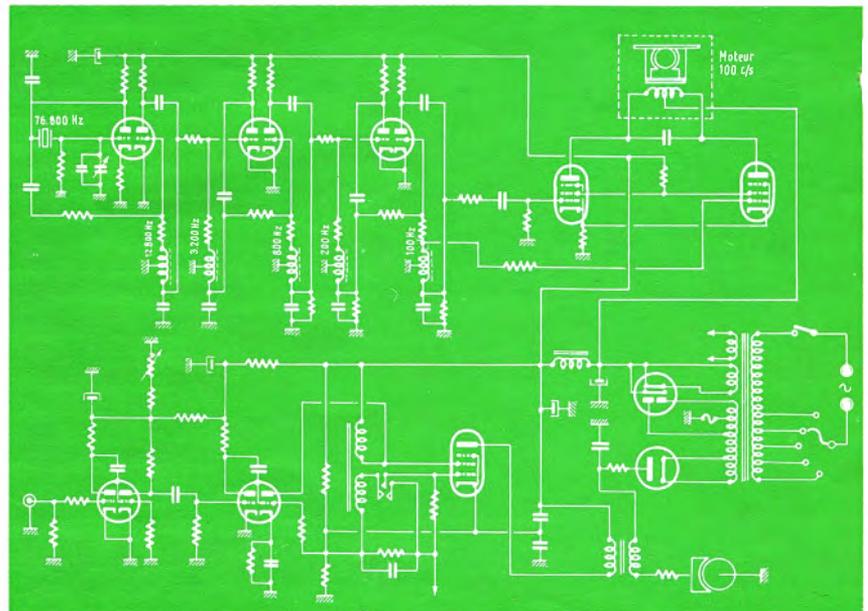


Fig. 7. Schéma du Vibrograf.



Diode à gaz
6073

tres) et monté de façon appropriée, bloque l'amplificateur pendant un peu plus de 1/5 de seconde après chaque « tic » ou « tac » de la montre observée. On élimine ainsi les bruits parasites de la montre qui se produisent entre le « tic » et le « tac » et qui enlèveraient de la netteté à l'enregistrement s'ils étaient conservés. Un jack permet de brancher un écouteur téléphonique pour l'auscultation acoustique du mouvement.

La perforation du papier est obtenue de la manière suivante :

Un tube de préférence monté en oscillateur bloqué, fournit dans son circuit d'anode une impulsion à front raide. Celle-ci est envoyée entre l'électrode fixe et la roue à pointes. Une petite étincelle jaillit entre les deux électrodes. Elle provoque l'ionisation de l'air et permet la décharge d'un condensateur chargé à 2.500 volts par un tube valve. La décharge de ce condensateur à travers le secondaire du transformateur est suffisamment lente pour que l'arc ait le temps de brûler la périphérie du trou, ce qui rend celui-ci parfaitement lisible.

Cet appareil répandu en de nombreux exemplaires est toujours apte à rendre les multiples services pour lesquels il a été conçu. Nous avons vu que l'organe de base est l'horloge à quartz. C'est le même élément fondamental que nous retrouverons dans les fréquencemètres.

FRÉQUENCÉMÈTRES *

Le fréquencemètre électronique à générateur d'impulsions permet la mesure des fréquences des phénomènes périodiques. Le phénomène à étudier est traduit en une tension électrique dont on enregistre les variations et, mesurer la fréquence consiste à compter les variations de cette tension pendant un temps donné. Le quotient des 2 nombres donnera le nombre de variations dans l'unité de temps, c'est précisément la fréquence.

Le fréquencemètre (fig. n° 8) comprend donc une base de temps, un compteur et un amplificateur commandé recevant les impulsions incidentes et ne les distribuant au compteur que pendant la durée imposée par la base de temps.

1° BASE DE TEMPS

C'est un oscillateur à quartz ; il permet d'obtenir les différents temps de comptage, en fréquencemètre et les différents étalons de temps en chronomètre ; il donne par exemple dans les appareils de la figure N° 9 une fréquence de 100 KHz avec une précision de 10^{-5} . De la précision de la base de temps dépend la précision finale des mesures.

Un procédé couramment employé pour obtenir une base de temps délivrant des impulsions de période égale à 1 seconde avec une précision relative de 1/20 000, consiste à utiliser un oscillateur électronique à quartz suivi d'une chaîne de diviseurs de fréquence permettant d'obtenir une fréquence finale de 1 Hz à partir d'une fréquence relativement élevée, mais la plus faible possible pour réduire l'importance de l'appareillage.

On peut ainsi comparer des diviseurs binaires dont chaque élément reçoit une fréquence f et délivre une fréquence $f/2$. Si N est le nombre de ces diviseurs la fréquence du quartz étalon sera 2^N . Comme pour des raisons de réalisation pratique des quartz, cette fréquence ne peut être inférieure à 4 000 Hz, il en résulte que la fréquence la plus basse que l'on puisse choisir est $f = 4096$ Hz avec $N = 12$. De tels quartz permettent d'obtenir sans thermostat, dans les conditions normales d'utilisation, la précision requise de 1/20.000. D'autres systèmes peuvent être employés, tels que : diapason entretenu suivi de diviseurs de fréquence, chronomètres à contact, utilisation du 1 000 Hz des P.T.T. suivi d'un diviseur par 1 000, etc... Pour les applications radio-électriques une précision minimum de 10^{-5} est généralement requise.

La base de temps peut alors être constituée de la façon suivante : un oscillateur étalon à quartz délivre une fréquence de 100 kHz. Le quartz est inclus dans une enceinte thermostatée à 50° C et sa précision est, dans ces conditions, meilleure que 10^{-5} (généralement entre 2 et 8. 10^{-6}). Les impulsions d'intervalle « 1 seconde » sont obtenues à l'aide de diviseurs de fréquence décimaux, qui peuvent être, soit des multivibrateurs du type synchronisé, soit même des diviseurs décimaux apériodiques. Un tel type de base de temps délivre donc à la sortie de chaque diviseur décimal, des impulsions électriques aux fréquences 10 kHz, 1 kHz, 100 Hz, 10 Hz, 1 Hz.

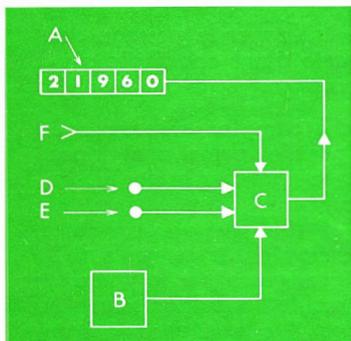


Fig. 8. Schéma de principe d'un fréquencemètre.

- A Compteur.
- B Base de temps.
- C Amplificateur électronique commandé.
- D Remise à zéro du compteur.
- E Commande.

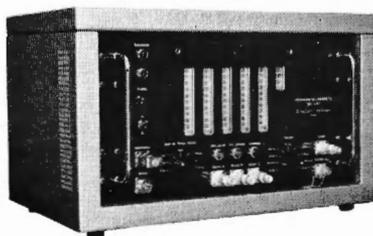


Fig. 9. Fréquencemètre Rochar.

* Réalisation d'un fréquencemètre H.F. (note de M. H. HALM, présentée par M. L. de BROGLIE à la séance de l'Académie des Sciences du 5 octobre 1959).

L'auteur décrit un étalon de fréquence qui par association à un système discriminateur permet la mesure absolue d'une faible fluctuation de fréquence dans la gamme 29.625 - 29.635 MHz. La fréquence correspondante est déterminée à 7.10^{-7} près. La largeur de la bande de discrimination est de 300 Hz avec une pente de 53 mV/Hz au voisinage du zéro.

3° CIRCUITS AUXILIAIRES

Ces circuits comportent :

- a) un amplificateur écrêteur transformant les tensions d'entrée en signaux rectangulaires, on trouve comme gamme de valeurs par exemple des tensions d'entrée dont l'amplitude varie entre 100 mV à 50 V efficaces;
- b) un basculeur électronique qui est un circuit à trois positions permettant de repérer :
 - la remise à zéro (partielle ou générale);
 - la mesure (comptage);
 - la lecture (affichage du résultat);
- c) un multiplicateur décimal alimenté par l'onde de l'oscillateur et délivrant une tension sinusoïdale de 1 MHz dans le cas de l'exemple ci-dessus, servant de base de temps périodométrique et éventuellement de base de temps chronométrique;
- d) un amplificateur asservi constitué par un relais électronique commandé par les boutons poussoirs de comptage et de remise à zéro provoquant successivement les différentes phases de mesure;
- e) des organes de commandes c'est-à-dire un combinateur de mesures fréquencesmètre, périodemètre, chronomètre ou contrôle, un combinateur de bases de temps permettant d'effectuer les mesures de temps en unités variant, par exemple, de la dizaine de millisecondes à la microseconde et les mesures de fréquence durant des bases de temps variant du 1/10 de seconde à 10 secondes.



Diode à gaz
6074

L'ensemble des dispositifs ainsi décrits permet donc un recouvrement des mesures chronométriques s'étendant de la précision de 1 microseconde à un intervalle de temps de 100.000 secondes chiffré au 1/100^e de seconde ce qui permet de couvrir un champ d'application extrêmement important (balistique, chronomètre, contrôle des temps d'ouverture et de fermeture des relais, contacteurs, disjoncteurs, etc...).

PÉRIODEMÈTRES

Dans les appareils tels que celui décrit plus haut on mesure des fréquences, c'est-à-dire le quotient d'un nombre de pulsations par un temps. Il est évident que les mêmes appareils donneront le nombre de pulsations pendant un temps donné, ce sont alors des périodemètres. Il est intéressant de noter que les P.T.T. fournissent une fréquence de 1.000 Hz qui peut servir d'étalon (1).

TACHYMÈTRES

Il s'agit de mesurer la vitesse de rotation instantanée, c'est-à-dire pendant un temps très court. Il suffira de créer un signal périodique de fréquence liée à la vitesse de rotation de l'organe contrôlé, et l'on est ainsi ramené à une mesure de fréquence pendant un temps très court, d'où l'utilisation d'un appareil comme celui décrit ci-dessus. Pour obtenir ce signal on utilisera un « Capteur » qui sera soit du type magnétique ou du type photoélectrique (Figure n° 13).

CHRONOMÈTRES

La mesure d'une fréquence revient à effectuer un comptage d'impulsions à temps constant; la mesure d'un temps peut être considérée comme un comptage d'impulsions à fréquence constante, d'où découle l'utilisation des fréquencesmètres en chronomètres (Figure n° 14).



Fig. 13. Capteur photoélectrique à obturation et son coffret d'alimentation (Rochar).

(1) La demande doit être adressée à la Direction des Services Téléphoniques.

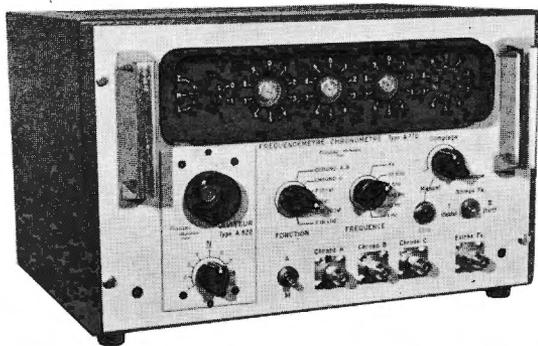


Fig. 14. Fréquence-mètre chronomètre BF (Rochar).

Le schéma de principe d'un chronomètre est en effet le même que celui d'un fréquences-mètre (Fig. 8). Mais dans ce cas, au lieu du signal incident F on envoie à l'amplificateur la tension périodique fournie par un quartz et les signaux déterminant l'intervalle de temps à mesurer sont envoyés à la place de la base de temps qui alors est déconnectée. La précision de la mesure faite avec un tel chronomètre sera fonction de la précision absolue et de la fréquence de l'oscillateur de référence ainsi que de la qualité du capteur et de l'amplificateur électronique. Les fréquences des oscillateurs sont en général comprises entre 100 Hz (mesure des temps en 1/100 s) et 10^7 Hz (mesure des temps en 1/10 μ s pour la mesure des vitesses de projectiles). Les précisions des oscillateurs à quartz pouvant pratiquement elles-mêmes être comprises entre 10^3 et 10^7 .

MESURE DES DÉBITS-VOLUMES ET DES DÉBITS-POIDS

Il suffit d'installer dans la conduite du fluide un compteur volumétrique dont on mesurera la vitesse de rotation pour obtenir en une lecture le volume débité par unité de temps. Ainsi la mesure des débits-volumes s'apparente identiquement à la mesure des vitesses par l'emploi d'un organe en rotation. La mesure des débits-poids nécessite l'utilisation d'une bascule. Les indications de pesées sont ensuite transformées en nombre d'impulsions électriques proportionnelles.

CONCLUSION

Les tubes électroniques agissant comme des relais sans inertie ayant de plus une grande sensibilité, ont ainsi permis de réaliser des appareils capables d'une grande précision pour la mesure des temps allant de milliards d'années au milliardième de seconde. C'est encore grâce à l'électronique que l'on pourra vérifier la théorie de la relativité en équipant des satellites artificiels d'horloges étalons qui donneront des valeurs expérimentales sur la dépendance mutuelle du temps, de l'espace et de la matière ainsi que sur la différence des mesures de la durée d'un événement pour deux observateurs, dont l'un est animé d'une vitesse de déplacement par rapport à l'autre.



Thyratron
2 D 21



Double Triode
12 AX 7

LISTE DES CONSTRUCTEURS CITÉS DANS LE PRÉSENT BULLETIN

ROCHAR ELECTRONIQUE

51, rue Racine, Montrouge (Seine).

ETABLISSEMENTS EDOUARD BELIN

296, avenue Napoléon-Bonaparte, Rueil-Malmaison (S.-et-O).

RENO-FRANCE

79, Champs-Élysées, Paris (8^e).

LAMPE MAZDA

COMPAGNIE DES LAMPES
SOCIÉTÉ ANONYME AU CAPITAL DE 13 680 000 N.F.
DÉPARTEMENT TUBES ÉLECTRONIQUES
29, RUE DE LISBONNE - PARIS (VIII^e)

Tél. : LAB. 72-60 à 68 • Adr. Tél. MAZDALAMP-PARIS • R.C. Seine 54 B 5088