

Jean
Jouannic.

Centre Technique de l'Industrie
Horlogère.

Historique de la mesure du temps

1. GÉNÉRALITÉS.

La succession des événements dans le temps relève de notre connaissance intuitive. Si deux événements se produisent en un même lieu sans qu'il y ait confusion, si deux individus passent en ce lieu sans qu'il y ait rencontre, il est évident que ces deux événements ou ces deux passages se placent à des instants différents. Si l'un des individus constate une trace du passage de l'autre, c'est que lui-même est passé après.

Chaque homme ayant de la sorte établi le classement dans le temps des événements qui le concernent, on constate qu'il est possible de comparer et de compléter les unes par les autres ces différentes échelles individuelles, en prenant comme points de repère certains événements d'intérêt général.

C'est ainsi que depuis les âges les plus reculés de l'humanité, la succession des jours et des nuits, ou celle des saisons, nous a donné la notion de temps.

Ainsi était assuré le rythme de la vie sociale à long terme. Pour mieux définir ce rythme à l'intérieur d'une journée, il a fallu imaginer des appareils donnant des repères temporels intermédiaires — les heures — ce sont les *horloges*. La technique de leur construction est l'*horlogerie*.

2. GNOMONS ET CADRANS SOLAIRES.

Quand le soleil passe au méridien du lieu, il est midi (*meri-dies*, milieu du jour). L'ombre portée d'un piquet fiché en terre est alors la plus courte : la pointe de cette ombre décrit du matin au soir une courbe continue sur laquelle on peut marquer les repères des heures : le *gnomon* initial devient un *cadran solaire*. Dans l'hémisphère Nord, berceau de nos civilisations, l'ombre tourne de gauche à droite autour du piquet vertical ; de là vient le sens de la rotation de nos horloges mécaniques. L'ombre d'une tige horizontale se projetant sur une façade orientée au sud tourne, elle, dans l'autre sens.

L'heure donnée par le cadran solaire a deux défauts : d'abord elle n'est pas disponible la nuit ni par temps couvert, ensuite elle est mal définie par le déplacement de l'ombre dont le trajet et l'allure varient selon les saisons. Seuls les passages du soleil à midi ont une précision notable, le délai entre deux passages étant d'un « jour solaire vrai ».



▲ Pendule G. Valle

◀ Pendule Jaz.

3. CLEPSYDRES, SABLIERES ET CHANDELLES.

Les premières horloges artificielles ont été fondées sur l'écoulement continu d'un fluide, ou une combustion progressive. Les *clepsydres* ou horloges à eau connues dans l'ancienne Egypte mesuraient des volumes définis d'eau écoulée pour marquer les heures : Haroun-al-Raschid en offrit une à Charlemagne. L'horloge chinoise (Figure 1) de Su Sung (XI^e siècle) comptait les heures grâce à une roue à aubes libérée successivement par le poids de chaque godet rempli [1].

On peut rattacher aux clepsydres les horloges à *billes roulantes* citées par l'historien spécialiste H. von Bertele [2].

Une longueur consumée de *chandelle* en suif ou un niveau d'huile, brûlé dans une lampe, servaient à mesurer le temps dans les monastères. Tout comme le *sablier*, vase de verre étranglé au milieu pour débiter le sable d'un compartiment à l'autre, ces procédés étaient courants vers 1300.

Malgré le progrès obtenu en commodité, leur précision médiocre reste de l'ordre d'une heure par jour, ce jour que l'on a pris l'habitude de diviser en deux périodes de 12 heures, 24 en tout. Alors que la durée des heures de plein jour mesurées par le cadran solaire variait selon les saisons, les heures artificielles données par les horloges devaient être en principe de durée constante, de jour comme de nuit.

4. LES HORLOGES MÉCANIQUES.

Dès le X^e siècle, les Chinois et les Arabes savaient construire des trains d'engrenage. La chute d'un poids « remonté » périodiquement, ou le déroulement d'un ressort « armé » au préalable ont constitué pour les mécaniciens à partir des XIV^e et XVI^e siècles des mouvements dont la marche autonome pouvait servir à marquer le temps. Encore fallait-il ralentir suffisamment ces mouvements d'une part, et stabiliser leur marche d'autre part. Cette quête de la précision a duré du XV^e siècle au début du XIX^e. La pratique a d'ailleurs souvent précédé la théorie, il faut attendre 1900 pour trouver une synthèse des principes mathématiques de la *chronométrie* ou science de la mesure du temps [3].

Le premier « ralentisseur » a été le *foliot* (Figure 2), sorte de tourniquet à axe vertical dont l'action alternée vient tour à tour arrêter les dents d'une roue du mouvement dite « roue de rencontre » (début du XIV^e siècle).

A la fin du XVI^e siècle, Galilée découvrit en 1633 qu'il existe des oscillations dont la cadence ou « fréquence » (nombre de cycles dans un temps donné) est quasi indépendante de leur amplitude, pour un objet donné. Au nombre de ces *oscillateurs isochrones*, on trouve le *pendule de gravité* (masse suspendue à un fil) et les corps élastiques chargés par une masse (*balancier* rotatif avec ressort *spiral* (Figure 3) *verges* ou *cordes* vibrantes musicales, *diapasons* métalliques, etc.).

L'application pratique des premiers oscillateurs — pendule puis balancier-spiral — est due à Huyghens, dès la seconde moitié du XVII^e siècle (1657 à 1675).

L'horloge mécanique, pour être précise, comportera :

- Un oscillateur ou *organe réglant* dont on a ajusté la fréquence (exprimée en *bertz* ou cycles par seconde) ou la *période* (inverse de la fréquence, s'exprime en secondes ou en fractions de seconde).
- Un ensemble de rouages mécaniques ou « mouvement » actionnant les *aiguilles* grâce à l'*énergie* fournie par la chute d'un poids ou la détente d'un ressort, etc.
- Un organe de liaison (*échappement*) entre oscillateur et rouage, assurant deux fonctions :

1. L'*entretien* (c'est-à-dire le maintien) des oscillations avec une amplitude aussi constante que possible, en dépit des frottements, ou perturbations diverses.

2. La *libération* dent par dent (d'où le nom d'« échappement ») d'une roue du mouvement, au rythme régulier de l'oscillateur.

Le perfectionnement de ces organes en Europe occidentale a permis au cours du XVIII^e siècle d'obtenir une précision de plus en plus fine (une minute, puis quelques secondes par jour) avec des appareils de plus en plus pratiques, méritant le nom de « garde-temps ». Aux *horloges monumentales* de clocher ou de beffroi sont venues se joindre des appareils de moins en moins encombrants et de plus en plus pratiques :

- *Horloges de parquet* (« comtoises ») à pendule et poids moteur.

- « *Pendules* » de table ou de cheminées (dites « neuchâteloises », Louis XV ou Louis XVI) avec comme leur nom l'indique un pendule animé cette fois par un ressort moteur.

Ces deux premières catégories sont généralement munies de sonneries.

- *Chronomètres de marine* (en coffret) ou *montres* portatives (*de poche* ou *de gousset*) utilisant un oscillateur à balancier et spiral, animé également par un ressort moteur.

Ces derniers instruments conservent en principe un fonctionnement correct, malgré les déplacements imposés au boîtier. Les premières montres connues sont celles de P. Heinlein (« Œufs de Nuremberg », 1512) bien antérieures au balancier-spiral de Huyghens.

Elles ont été améliorées par la suite et portées à un haut degré de perfection principalement par A.L. Breguet (1780).

Quant à nos *montres-bracelets* elles ont surtout été répandues à partir de la Première Guerre mondiale.

Le *chronographe* (ou compteur de temps) sert à mesurer les temps courts : on le déclenche ou on l'arrête à volonté, c'est devenu l'accessoire indispensable du sportif¹.

5. LES HORLOGES ASTRONOMIQUES, DE BEFFROI OU DE CATHÉDRALE.

En plus des secondes, minutes et heures, elles figurent le mouvement des astres et fournissent la date et d'autres indications telles que les phases de la lune, les heures des marées, etc., ainsi que des illustrations

animées par personnages, et sonores par carillons, des heures de la journée.

Lieu	Date de fabrication
Sens	1176
Strasbourg	Vers 1350
Cluny, Paris	1370
Salisbury, Rouen	1380
Besançon, Beauvais	1850 - 60

La plupart des horloges astronomiques encore en service ont été refondues par la suite.

6. LA PRÉCISION EN CHRONOMÉTRIE.

On exprimait traditionnellement la précision d'une horloge en comparant ses indications à un jour d'intervalle, cette durée étant fixée soit par des observations astronomiques à la lunette « méridienne », soit par une autre horloge « de référence » dont on connaît déjà la très haute précision.

La différence de lecture en secondes donne alors la *marche diurne*, positive pour une *avance*, négative pour un *retard*. Si l'horloge est parfaite, la différence est exactement de vingt-quatre heures et l'aiguille des secondes ne marque aucun décalage : on dit que la marche est nulle.

La première exigence d'une heure vraiment précise a été formulée par les marins navigant au long cours : si la latitude est connue d'après la hauteur d'un astre au-dessus de l'horizon, la longitude s'obtient par le décalage entre les passages du soleil au midi du navire et au méridien de référence (c'est-à-dire l'observatoire de Greenwich pour tous les marins qui ont suivi l'exemple des Anglais). Or, tant qu'il n'y a pas eu de radiocommunications, seule une horloge précise transportée à bord pouvait « conserver » l'heure de Greenwich. Comme le soleil fait un tour en vingt-quatre heures, soit quarante mille kilomètres à l'équateur, une erreur de une minute en temps se traduit par une erreur de position de vingt-huit kilomètres, dans les mers équatoriales d'où risque de « manquer » l'atterrissage sur une île par mauvaise visibilité. Et comme les voyages à la voile duraient plusieurs mois, une précision moyenne de une seconde par jour (soit une demi-minute par mois) était à peine acceptable pour un tel « chronomètre de marine ».

De nos jours, une montre de qualité douée de la même précision accumulerait au bout de deux mois une erreur de une minute, limite très convenable dans la vie soicale courante : si cette montre est munie d'un *calendrier*, le porteur n'interviendra qu'à la fin des mois de trente jours à la fois pour « escamoter » le chiffre 31 de ce calendrier et pour corriger la minute d'erreur.

Mais pour les usages scientifiques, il a fallu pousser la précision plus loin : les *horloges d'observatoire* ont utilisé des pendules de gravité dont les plus récents oscillaient sous vide avec entretien électrique, avant d'être remplacés par les oscillateurs à quartz (Scheibe, 1929) [4] puis par les horloges atomiques (horloge à ammoniac du National Bureau of Standards américain, 1948).

On verra même que les horloges atomiques au césium (1957) ont prouvé une régularité de marche supérieure à toutes les autres et sont maintenant à la base de la définition de la seconde, l'unité de temps. Leur stabilité est actuellement de l'ordre d'un milliardième de seconde par jour.

7. LES DÉFAUTS DES HORLOGES.

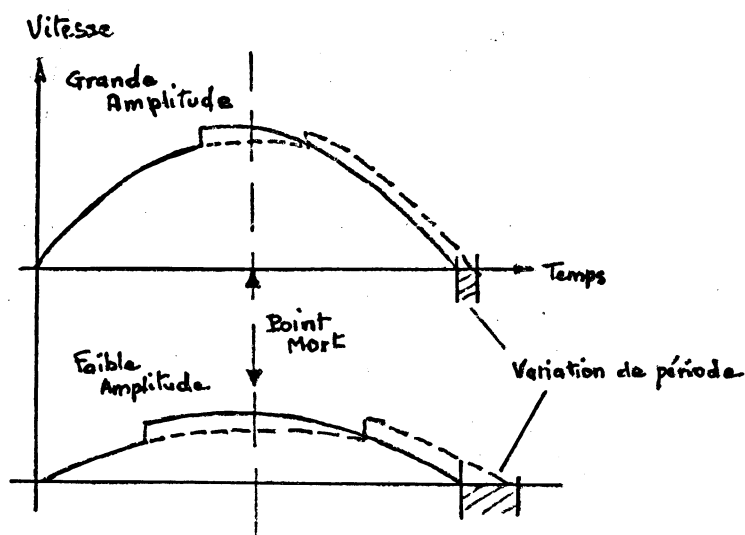
Les principaux obstacles à la précision des horloges sont les suivants :

a. Les oscillateurs ne sont en fait jamais parfaitement isochrones. Leurs variations d'amplitude, qui entraînent des variations de marche, doivent être combattues. Une force motrice constante comme celle d'un poids moteur est donc bénéfique, alors que la détente d'un ressort donne une force décroissante au cours de la journée.

On a introduit d'abord entre ressort-moteur et roue d'échappement une transmission à rapport variable selon le degré de « désarmage » de ce ressort, c'était la *fusée* (Figure 4). J. Harrison (1735) a ajouté entre rouage et échappement un petit ressort intermédiaire qui s'arme et se désarme d'une quantité fixe à cadence élevée et forme ainsi « tampon » entre ressort principal et oscillateur (*remontoire d'égalité*). A la limite ce petit ressort peut être incorporé au dispositif d'échappement (échappement à *détente* (Figure 5) de P. Leroy, 1765) [5].

Sur les montres modernes, on fait plutôt appel soit au remontage automatique (Breguet, 1820) avec masse d'inertie (qui maintient le ressort toujours armé) soit à l'entraînement électromagnétique avec une pile à tension constante.

b. Le dispositif d'échappement fournit à l'oscillateur des impulsions périodiques qui doivent être, on vient de le voir, d'une énergie bien dosée. Mais le moment où cette impulsion agit a aussi son importance comme on le remarque sur le diagramme.



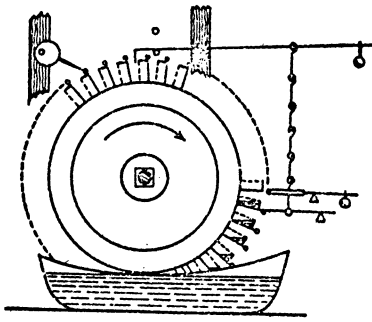


Fig. 1

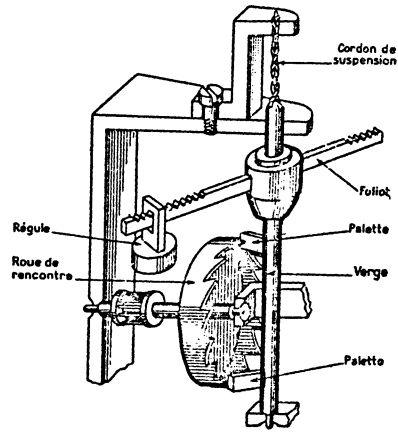


Fig. 2

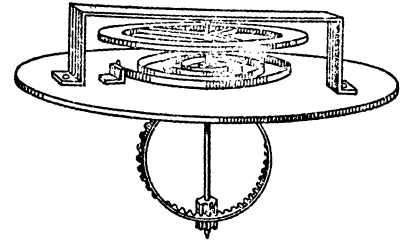


Fig. 3

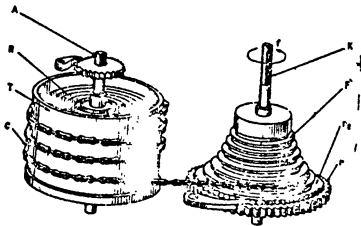


Fig. 4

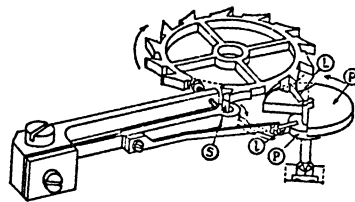


Fig. 5

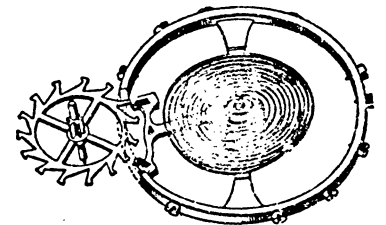


Fig. 6

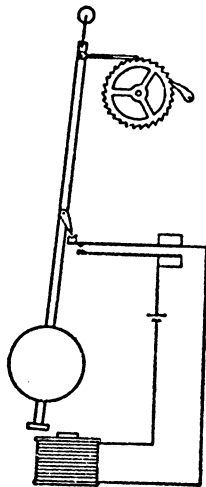


Fig. 7

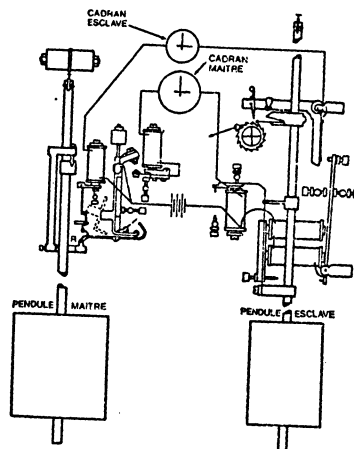


Fig. 8

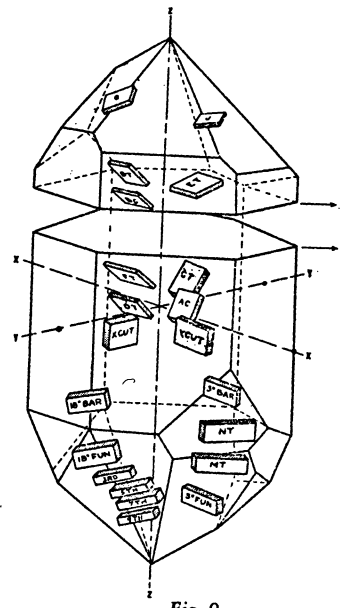


Fig. 9

remontage automatique

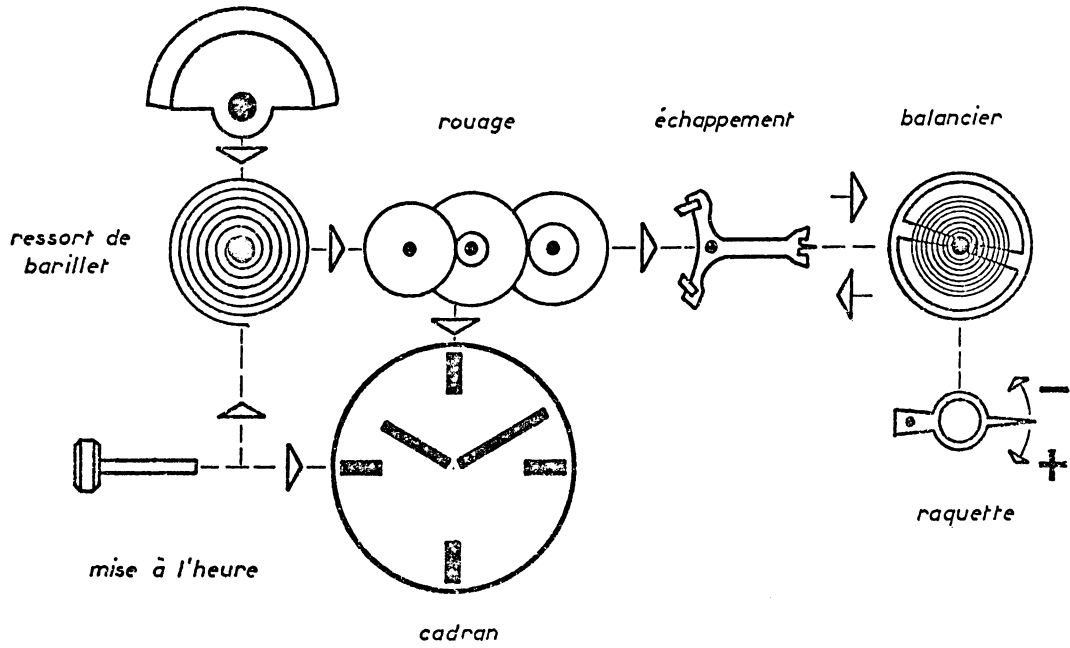


Fig. 10

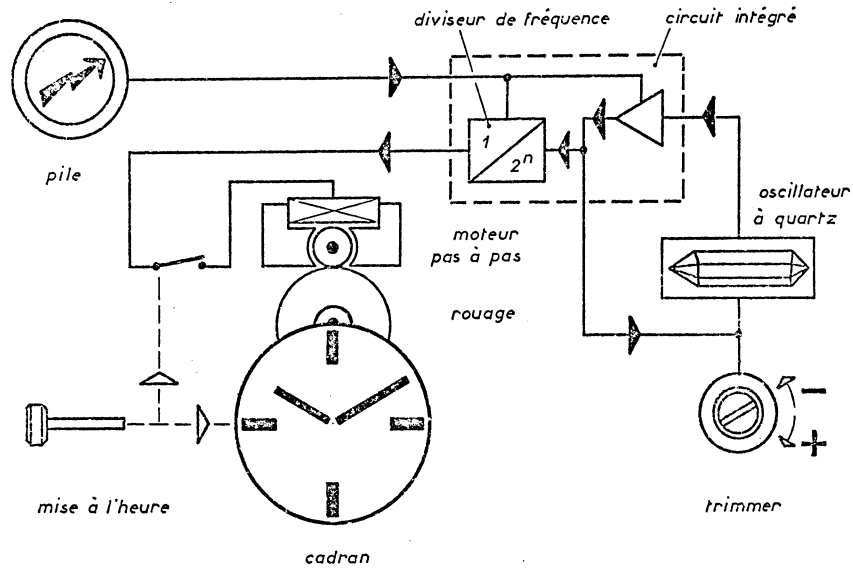


Fig. 11

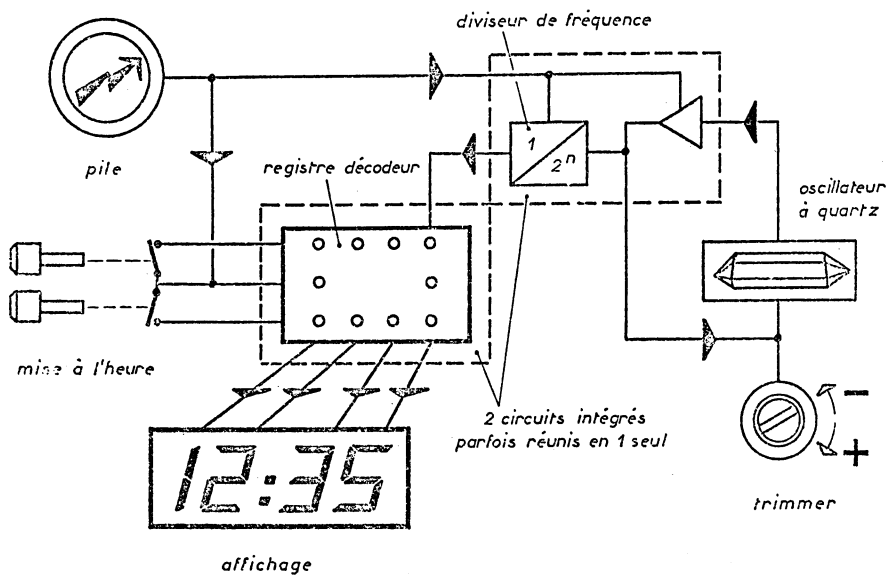


Fig. 12

Le choc qui donne un saut de vitesse en un temps court, tend à raccourcir la période s'il arrive avant la mi-course (*point mort*) et à l'allonger s'il arrive après ; et comme ce choc se produit en point donné du trajet, un point fixé par le dessin géométrique des pièces, l'effet indésirable (avance ou retard) s'accroît quand l'amplitude d'oscillation diminue.

Les horlogers ont découvert, souvent de façon empirique, les remèdes suivants :

- Réduire les variations d'amplitude, comme ci-dessus.
 - Soigner le dessin et la finition des pièces de l'échappement dont le plus répandu est l'échappement libre à « ancre » (Figure 6) de Thomas Mudge (1754).
 - Adopter un oscillateur dont les pertes d'énergie par cycle W (frottement, échauffement) sont faibles devant l'énergie élastique W_0 accumulée en fin de course à ses positions extrêmes.
- Dans ce dernier cas, on cherche à augmenter le « facteur de qualité ».

$$Q = \pi W_0/W \text{ de l'oscillateur.}$$

Celui-ci devient alors moins sensible au décalage entre impulsion motrice et point mort, l'erreur relative en période étant inversement proportionnelle au facteur de qualité Q . Ce dernier facteur vaut 100 à 300 pour un balancier spiral, 1 000 à 3 000 pour un pendule ou un diapason, 100 000 à 1 million pour un quartz (voir plus bas).

c. Toujours dans le souci de maintenir la période constante, les *modifications des frottements* sont néfastes. Pour un balancier-spiral de montre, le frottement des paliers est plus grand quand l'axe est horizontal (les deux paliers frottent par des parties cylindriques) que s'il est vertical (seul ce palier inférieur a un frottement notable, par son extrémité). C'est une cause principale de la différence de marche qui se manifeste sous le nom d'« effet de position » ou de différence entre marches à *plat* et *au pendu*, une autre cause étant un défaut éventuel d'équilibre du balancier.

Ce sont les Anglais qui ont utilisé les premiers au XVIII^e siècle dans leurs mouvements des axes fins et des paliers en pierre dure (*rubis synthétique*) convenablement huilés aux points précis où se fait le frottement. On lutte contre l'étalement de l'huile par une préparation spéciale des surfaces par dépôt d'*épilame*.

d. Il faut ajouter les influences de l'environnement ambiant sur l'oscillateur : champ magnétique, pression atmosphérique et *surtout température*. Les variations de celle-ci modifient la longueur des tiges du pendule, le diamètre des balanciers et la raideur des parties élastiques (ressort spiral ou branches de diapason). La *compensation thermique* a été le premier souci des fabricants de chronomètres : ils combinaient des pièces de métaux différents pour les diverses parties de l'oscillateur de façon que les effets dus aux variations de température s'annulent entre eux.

Dès la fin du XIX^e siècle et au début de XX^e les progrès de la métallurgie — auxquels les physiciens-horlogers tels Ch.-Ed. Guillaume (1861-1938) ont beaucoup contribué — ont mis à leur disposition des alliages à faible dilatation pour les pendules (INVAR) ou à

faible coefficient thermoélastique pour les spiraux (ELINVAR, NI-SPAN-C) qui simplifient cette compensation.

8. MONTRES ET HORLOGES ÉLECTRONIQUES.

L'électricité a permis au XIX^e siècle (Bain, 1843 puis Fery, 1908) d'améliorer l'entretien des horloges et aussi de distribuer l'heure par fils depuis une *horloge mère* jusqu'à plusieurs *horloges réceptrices*, simples cadrans répéteurs dont les aiguilles sont commandées par *moteurs électriques pas à pas* et avançant d'un coup par minute ou d'un coup par seconde.

La généralisation au XX^e siècle du courant électrique alternatif à de grands réseaux synchronisés sur une fréquence unique (50 Hz en Europe, 60 Hz aux États-Unis) a permis d'alimenter les *horloges synchrones* auxquels il fournit simultanément l'énergie et le réglage.

La souplesse et la vitesse de réponse des moyens électriques en horlogerie ont joué un rôle de plus en plus grand dans la *généralité de leurs applications* et dans la *course à la précision*.

a. Les applications se sont généralisées grâce à la miniaturisation des organes électriques, à leur consommation d'énergie de plus en plus faible, et au perfectionnement des piles. Les systèmes d'entretien électrique se sont ainsi étendus des pendules (Figures 7 et 8), aux pendulettes et réveils, aux montres de bord des véhicules puis aux montres-bracelets.

Dans ces appareils, on a d'abord conservé le balancier classique généralement entretenu par un système électromagnétique à bobine et aimant selon la loi de Laplace. Le système d'affichage (rouage et aiguilles) est actionné soit directement par l'oscillateur grâce à un *échappement inverse* soit par un moteur pas à pas recevant les impulsions électriques de l'entretien. Ces impulsions sont elles-mêmes déclenchées par l'oscillateur lors de son passage au point mort, soit par un contact, soit par une bobine détectant le passage d'un aimant et excitant un *relais électronique à transistor* (M. Lavet, 1953).

b. Pour améliorer le facteur de qualité (voir plus haut) on est conduit à utiliser des oscillateurs dont la fréquence est de plus en plus grande (diapasons métalliques, quartz). Cette fréquence élevée les rend en outre de moins en moins sensibles aux accélérations parasites (chocs, changements de position vis-à-vis de la pesanteur). Or, à partir de quelques hertz ou dizaines de hertz (cycles par seconde) les dispositifs mécaniques de transmission de force n'obéissent plus à cause de leur inertie excessive. L'entretien et le comptage des oscillations ne peuvent se faire alors que par voie électronique par *circuit à transistor* (déjà utilisé dans la montre « ACCUTRON BULOVA » à diapason métallique 300 Hz étudiée par Max Hetzel (1961), ou mieux par *circuit intégré* (montres à quartz). Avec des montres bracelets de ce dernier type, on tient couramment une précision moyenne meilleure que une seconde par jour (soit quelques minutes par an, ou quelque 10^{-6} en valeur relative).

L'horloge (ou la montre) à quartz utilise comme organe réglant un barreau (simple, ou fendu en diapason) taillé dans un monocristal de quartz Si O₂ (naturel ou synthétique) selon une orientation déterminée et muni d'électrodes en or, déposées par évaporation sous vide. Selon l'orientation vis-à-vis du réseau cristallin (Figure 9) et la disposition des électrodes, une vibration mécanique se développe et peut s'entretenir dans le quartz par *couplage piézoélectrique* (liaison réversible entre déformation et charges électriques découverte par les frères P. et J. Curie en 1880).

Cet entretien se fait grâce à un amplificateur électronique extérieur qui joue le rôle d'échappement, l'énergie motrice venant d'une source telle qu'une pile. La montre-bracelet à quartz est née simultanément en 1967 en Suisse et au Japon.

Les figures 10, 11 et 12 illustrent l'évolution des différents organes selon leur rôle quand on passe du mouvement mécanique aux mouvements à quartz.

On utilise le plus souvent sur les montres un barreau ou diapason vibrant en flexion sur 32768 (2¹⁵) Hertz, et sur les pendulettes et réveils une plaque vibrant en cisaillement d'épaisseur sur 4194304 (ou 2²²) Hertz. Le quartz-diapason moderne dérive des travaux de Karolus (1954) Lip S.A. (1967) et Staudte (1971).

Le choix de l'orientation ou « taille » du quartz permet de réduire au minimum l'influence de la température sur la marche de l'appareil.

Pour perturber le moins possible l'oscillateur, on prélève le signal électrique oscillant à la cadence du quartz sur l'amplificateur, pour compter les oscillations.

Comme, d'autre part, la fréquence du quartz est liée à ses dimensions géométriques selon le mode de vibration utilisé, il n'est pas possible de choisir arbitrairement la gamme de ces fréquences sans tenir compte des facteurs d'exécution mécanique, de prix ou de consommation en énergie d'entretien. Les fréquences d'oscillation usuelles s'étagent de 10 kilohertz à plusieurs mégahertz², compte tenu de la rapidité et des très faibles amplitudes du mouvement, il est exclu de procéder au *comptage* par voie mécanique. Il faut le faire par voie électronique dans un *diviseur de fréquence* excité par le signal électrique d'entretien, en profitant par surcroît de l'effet séparateur ci-dessus. Cette division se fait en plusieurs étapes grâce à des étages en cascade : quand on arrive à une fréquence F/K de l'ordre du hertz (un coup par seconde) les moyens électromécaniques classiques en technique de distribution d'heure (*moteur et aiguilles*, par exemple) s'appliquent et l'on obtient un mouvement à quartz « analogique ».

Le principe et les premières réalisations des horloges à quartz datent de la fin des années 1920 (Scheibe et Adelsberger en Allemagne dès 1930, Lack et Marrison aux USA dès 1929) [4]. Mais elles avaient beaucoup à gagner en fiabilité et beaucoup à perdre en dimensions et en voracité pour devenir des garde-temps portatifs vraiment pratiques.

Or, on savait depuis 1962 que la firme américaine Texas Instruments produisait des circuits électroniques complets, assurant une ou plusieurs fonctions par traitement collectif d'une plaquette de silicium. Le procédé de photogravure et de traitement chimique localisé dérivait

de celui que Fairchild avait mis au point pour fabriquer en série les transistors à jonction à structure plane : croissance de cristaux par épitaxie, isolement par oxyde, métallisation des contacts, etc., le tout à travers les fenêtres de pochoirs ou « masques » successifs. L'ensemble pouvait comporter des diodes, des transistors, des résistances ou des capacités fixes ainsi que leurs interconnexions.

Une race concurrente de circuits intégrés apparut toujours aux Etats-Unis chez R.C.A. vers 1967, qui permettait une densité encore plus grande de composants sur la même surface, une consommation plus faible et une insensibilité remarquable aux signaux parasites extérieurs : ce sont les circuits métal-oxyde-semi-conducteur « complémentaires » (dits C.MOS). Mais au départ la tension d'alimentation nécessaire (10 à 15 volts) interdisait encore leur emploi en horlogerie.

C'est pourtant dès le début de 1968 que les premières montres à circuit intégré se signalaient au concours chronométrique de l'observatoire de Neuchâtel à la suite des travaux du Centre électronique horloger (C.E.H.) suisse. Un prototype japonais Seiko leur donnait d'ailleurs la réplique...

C'est cette montre suisse à moteur vibrant, utilisant un unique circuit intégré pour l'entretien, la division 2⁵ = 32 et l'attaque du vibreur, qui fut présentée au Congrès international de chronométrie à Paris en 1969 sous le nom de code « Bêta 2 », puis commercialisée jusqu'en 1973 sous diverses marques suisses en tant que « calibre Bêta 21 » [6].

Malgré la performance que représente le premier circuit horloger consommant 21 microwatts sous 1,35 volt, le produit final obtenu était plus encombrant et plus fragile que les montres traditionnelles et son impact commercial ne pouvait être que limité : il fallait persévérer encore dans la voie tracée.

A partir de 1971, les choses allèrent très vite, quelques firmes de semi-conducteurs ayant pris en main le problème des circuits intégrés à très faible consommation sous une tension de l'ordre du volt (Motorola en Amérique et I.T.T. en Allemagne, visant tous deux le marché européen, puis Intersil qui a travaillé avec les Japonais [7]).

Mais il est apparu dès cette époque que les firmes américaines d'électronique, fortes de ces succès techniques et de leur réussite sur le marché nouveau de la calculatrice de poche, ne se borneraient pas au rôle de fournisseurs en composants. Deux pionniers (OPTEL et Hamilton-Watch) s'attaquèrent à la *montre numérique tout électronique* dite « Solid-State ». Dans cette montre le comptage des secondes se poursuit dans des compteurs électroniques à cadence lente avec registre et décodeur qui accumulent les minutes, les heures, les jours, les semaines et les mois. Le circuit intégré comporte alors en son sein plusieurs milliers de transistors et il est équipé de connexions de sortie qui permettent d'afficher à volonté l'heure et la date, sur un tableau de chiffres à sept segments chacun, similaire à celui des calculatrices électroniques contemporaines de ces montres.

L'affichage peut être lumineux (diodes photoémisives dites LED, « light emitting diodes ») ou lisible par réflexion sous la lumière naturelle (cristaux liquides dits

LCD, « liquid crystal display »). Le premier système, dépendant en énergie, n'est visible que sur appel par un bouton-poussoir : très répandu vers 1975, il a été peu à peu abandonné depuis.

La microélectronique a permis de résoudre avec aisance les problèmes de comptage, décomptage ou programmation complexes, ce qu'en horlogerie on appelle les « complications » : calendrier, réveil, chronographe... et dont les réalisations par voie mécanique sont coûteuses, encombrantes et fragiles. Le « cœur » de ces montres multifonctions étant constitué par le circuit intégré, il semble bien qu'en ce domaine tout au moins, la maîtrise d'œuvre échappe à l'horloger.

Dans le domaine de la haute précision, où le quartz a été détrôné par l'horloge atomique, il faut néanmoins signaler les progrès accomplis avec le quartz haute fréquence dit « B.V.A. » développé en France dans le laboratoire du professeur Besson à Besançon [8].

9. LA SECONDE, UNITÉ FONDAMENTALE DE TEMPS, LIÉE A L'HORLOGE ATOMIQUE.

C'était initialement la fraction $1/60 \times 60 \times 60 = 1/86400$ du jour solaire supposé constant (de midi à midi).

Les progrès de l'horlogerie ont permis dès le début du XIX^e siècle de mettre en évidence les variations du « solaire vrai ». Aussi a-t-on successivement utilisé comme étalon la « seconde du jour solaire moyen » puis la « seconde du temps des éphémérides » liée au mouvement orbital de la terre autour du soleil. Ces deux étalons ont été obtenus par calcul à partir d'observations astronomiques.

Enfin, à partir de 1964, le Comité international des poids et mesures a défini la seconde comme étant égale à la valeur exacte de 9 192 631 770 périodes de la radiation « correspondant à la transition entre deux niveaux hyperfins du césium 133, ce qui lie la valeur de la seconde (avec la précision connue à cette époque) à une grandeur physique fournie par l'horloge atomique à césium, et désormais indépendante de la rotation terrestre.

Pour maintenir l'heure ainsi définie (temps atomique ou TA) en harmonie avec l'heure solaire utilisée par les navigateurs, on décide d'ajouter aux 86400 secondes TA une seconde dite « intercalaire » quand l'erreur accumulée entre les deux échelles de temps justifie cette correction. En pratique, celle-ci a lieu deux fois par an (Temps Universel Coordonné ou UTC en service depuis 1972 et légal en France depuis 1975).

Le principe des horloges atomiques repose sur l'extrême stabilité des radiations que les atomes peuvent émettre ou absorber, et qui traduisent les changements d'état quantique d'énergie qu'ils subissent. La fréquence de ces radiations est liée directement à ce « saut » d'énergie caractéristique de l'atome. Comme il s'agit de fréquences s'étendant des « hyperfréquences radioélectriques » (10^8 Hz) aux fréquences optiques, il a fallu maîtriser d'abord la production et l'amplification de ces signaux hyperfréquences par voie électrique, pour profiter enfin de ce résonateur idéal que constitue par exem-

ple l'atome de « césium 133 ».

Dans une horloge à césium, un oscillateur à quartz produit par combinaison de ses harmoniques un signal hyperfréquence. Celui-ci est maintenu synchronisé sur la résonance d'absorption atomique par un asservissement électronique (Figure 13). C'est ce quartz ainsi « assagi » qui sert en fait d'horloge mère pour les utilisateurs.

Pour gagner encore sur la stabilité actuelle (de l'ordre de 10^{-13}) on aura recours au « maser à hydrogène » dont on attend 10^{-15} . Rappelons que ces deux expressions chiffrées représentent, dans l'ordre, un milliardième et un cent milliardième de seconde par jour !

Des signaux horaires radiodiffusés, pilotés par horloge au césium, sont disponibles depuis les années 1970 dans divers pays. L'émission la plus récente (fin 1980) est celle de France Inter (Canal Ondes Longues 164 kHz) par modulation de phase superposée à la modulation musicale en amplitude du programme normal.

10. L'INDUSTRIE HORLOGÈRE.

Jusqu'à la fin du XVIII^e siècle, les horlogers travaillent en corporations (Paris, Blois, Genève, Londres) et l'accession du compagnon à la maîtrise exigeait la production d'un « chef-d'œuvre ». On a d'ailleurs conservé jusqu'à nos jours l'appellation d'« artiste » pour désigner un horloger créateur, adroit et confirmé. Depuis la première fabrique d'ébauches (Frédéric Japy, 1772) l'industrie horlogère moderne a évolué dans deux directions parallèles :

- La fabrication de la *montre* ou de pièces de « petit volume » (Suisse, France, Allemagne) a conservé en partie une division du travail entre *fabrique d'ébauches* c'est-à-dire usinage de la partie mécanique principale, et *établisseurs* qui procèdent à l'assemblage et au réglage du produit fini, après s'être approvisionnés d'une part en ébauches, d'autres part en *pièces détachées* de haute technicité (« assortiments », c'est-à-dire balanciers, spiraux, échappements) et en boîtes de montre.

- La fabrication des *horloges, pendulettes et réveils* (pièces de « gros volume ») ainsi qu'une part croissante des fabrications de montres se fait dans des manufactures hautement mécanisées et automatisées qui assurent l'intégration « verticale » des productions (Allemagne et France pour les pendules, Japon, U.R.S.S., U.S.A. pour les montres).

On note depuis 1970 l'importance prise, comme dans d'autres domaines par l'Extrême-Orient (Japon, Hong-Kong).

En matière de *montres* la production mondiale en 1980 s'est élevée à 340 millions de pièces (montres complètes ou mouvements). En tête viennent successivement :

Japon	88 millions
Hong-Kong	75 millions
Suisse	51 millions
U.R.S.S.	35 millions
Asie du Sud-Est (Hong-Kong)	23 millions
Chine	21 millions
U.S.A.	12 millions
France	10 millions

La répartition des *achats de montres* par les particuliers, en France, a été en 1980 la suivante :

Montres mécaniques	46 %
Montres analogiques à quartz	13 %
Montres numériques à quartz	41 %

En matière d'horloges, pendulettes et réveils, il est

plus difficile de cerner la production qu'on peut estimer, toujours pour 1980, à 200 millions de pièces dans le monde, avec en tête :

Japon	46 millions
R.F.A.	40 millions

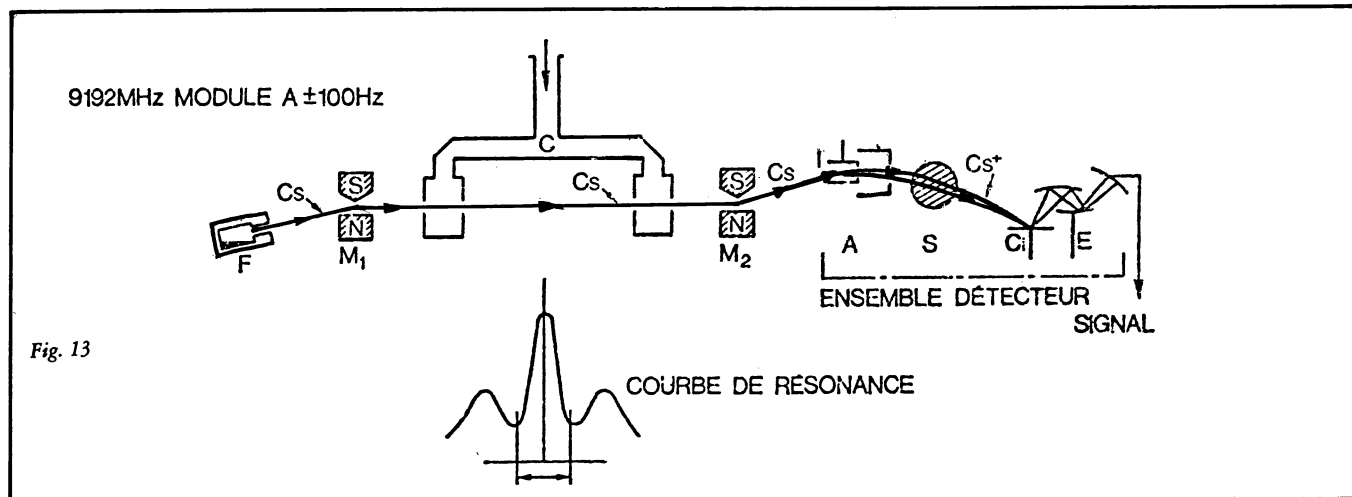


Figure 1

Principe de l'horloge du Su-Song (d'après J. Needham, W. Ling, D.-J. Price) On voit la roue à augets, et le dispositif de déclenchement et de reblocage de son mouvement

Figure 2

Détail du foliot et de l'échappement à roue de rencontre (D'après un dessin de M.R. Chaleat)

Figure 3

Balancier circulaire avec spirale (D'après le dessin original de Huyghens)

Figure 4

La fusée (réalisation moderne) (dessin de M.R. Chaleat) Le remontage se fait par le carré K dans le sens de la flèche f : la chaînette s'enroule sur la fusée F et le ressort R se tend. Pendant le désarmage, la chaînette s'enroule sur le barillet T entraînant la fusée. Le carré A n'est utilisé que pour régler la tension de la chaînette

Figure 5

Echappement à détente Le balancier, non représenté, porte sur son axe un double plateau P. Dans le sens de rotation indiqué par la flèche, la petite levée I opère le dégagement du rouage au repos sur S, suivi de l'impulsion donnée sur la grande levée L. Lorsque, à l'oscillation suivante, le plateau revient en sens opposé, la petite levée I agissant sur le ressort r ne produit pas le dégagement. (D'après un dessin de M.R. Chaleat)

Figure 6

Forme moderne de l'échappement à ancre de montre (d'après un dessin de M.R. Sonzogni)

Figure 7

Echappement Hipp à lamelle oscillante La lame entre en action quand l'amplitude du pendule tombe au-dessous d'une certaine valeur. Par arc-boutement elle ferme le circuit de l'électro-aimant dont l'attraction augmente l'énergie donc l'amplitude du pendule. Ce système a été exploité avec succès jusque vers 1925.

Figure 8

Pendule d'observatoire « Shortt » Système complexe constitué essentiellement par un pendule « maître », à gauche oscillant sans perturbation (sauf aux brefs instants d'impulsions d'entretien données par la roulette R) et un pendule « esclave » qui effectue toutes les fonctions et remis périodiquement en phase sur le pendule libre.

Figure 9

Principales « coupes » utilisables pour un résonateur taillé dans un cristal de quartz

Figure 10

La montre mécanique

Figure 11

La montre analogique à quartz

Figure 12

La montre numérique à quartz

Figure 13

Schéma d'un résonateur au césium F, four à césium ; Ci, trajet des atomes de césium ; M1M2, aimants à champ inhomogène ; C, ensemble hyperfréquence, guide d'entrée et double cavité avec une courbe de résonance ; I, ioniseur ; A, accélérateur d'ions ; S, spectromètre concentrant les seuls ions Cs+ sur la cible Ci émettant des électrons secondaires ; Cs+, trajet des ions ; E, multiplicateur des ions secondaires.

Notes.

- Il ne faut pas confondre le *chronographe-compteur* (déclenché sur demande) et le *chronomètre* (montre très précise contrôlée individuellement par un bureau officiel ou un observatoire) : l'emploi commercial de ces deux termes fait l'objet d'une normalisation internationale.
- Le kilohertz et le mégahertz valent respectivement mille et un million de cycles par seconde.

Bibliographie.

- M. Daumas, *Histoire générale des techniques*. Tomes 2, 3, 5, P.U.F. 1979.
- H. von Bertele et Basserman-Jordan, *Montres, horloges et pendules*, P.U.F. 1979.
- L. Desfossez, *Théorie générale de l'horlogerie*, La Chaux-de-Fonds, 1950.
- Annales françaises de chronométrie, Besançon, années 1936 et 1938.
- Commodore Goult, *The Marine Chronometer*, Londres 1960.
- Actes du Congrès international de chronométrie, Paris, 1969.
- Actes de la Convention européenne «EUROCON-71» organisée par l'IEEE, région 8, Lausanne 1971.
- R. Besson, - «A new piezoelectric resonator design», 30^e Symposium «Frequency Control», Atlantic City, 1976. - «A new electrodeless resonator design», 31^e Symposium «Frequency Control», Atlantic City 1977.