

## De l'horlogerie et des microtechniques

Gérard Normand, ingénieur-consultant, président d'honneur de Micronora

L'horlogerie et plus précisément la montre mécanique est l'archétype microtechnique.

À Besançon, berceau de l'horlogerie depuis Mégevand en 1793, on devrait être à même de faire le point sur l'évolution de la montre et sur l'invention de ce néologisme "microtechnique", qui, dans ses applications, envahit notre univers de consommateur. Par exemple, le téléviseur, le téléphone, la machine à laver et le compteur électrique intègrent tous une montre... sans cadran, sans aiguille et sans bracelet ! Est-ce tout ? Certes non ! Aussi, avant de rappeler l'histoire de cette évolution, donnons une définition de ce qui est microtechnique.

Est microtechnique tout système qui participe :

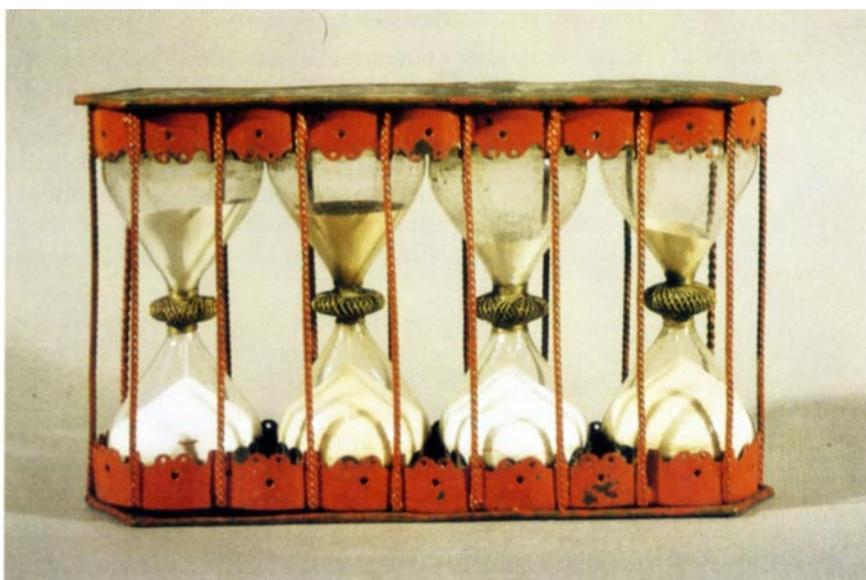
- à la capture,
- au traitement,
- au déplacement,
- à la restitution,

d'une grandeur physique, quels que soient les vecteurs de propagation du signal (mécanique, électrique, optique, acoustique, thermique, hertzien, etc.) avec une énergie de déplacement de l'ordre du microwatt, sous un diamètre de l'ordre de quelques millimètres.

Pour reconstituer cette définition, parcourons à présent l'histoire des microtechniques, à partir d'une très ancienne grandeur, à savoir le temps mesuré par l'horloge.

### L'horloge

Selon le Larousse, du grec *horologion* : qui dit l'heure. En fait, l'horloge s'est "exprimée" aux environs du XIII<sup>e</sup> siècle ; elle n'avait pas de cadran ; elle



Écoulement du sable. Collections Musée du Temps. Cliché J.P. Tupin.

sonnait les six heures canoniales, telles que laudes, matines ou vêpres. Cette heure est dite "temporelle" car variable suivant la durée de présence du soleil, ce qui donnait des heures plus courtes en hiver qu'en été et posait des problèmes de réglages mensuels du retardateur. L'horloge succède donc au soleil, lequel "donnait" essentiellement le midi, que chacun découvrait à sa porte lors du passage au zénith.

Force est de constater qu'à l'image de toutes les grandeurs, celle du temps est anthropocentrique et correspondra à chaque époque, à nos besoins ; par exemple, l'heure nationale est instituée avec l'avènement du chemin de fer, il était en effet délicat de changer d'heure à toutes les gares...

Explorons maintenant, l'aspect technique de l'horloge qui n'est pas encore microtechnique.

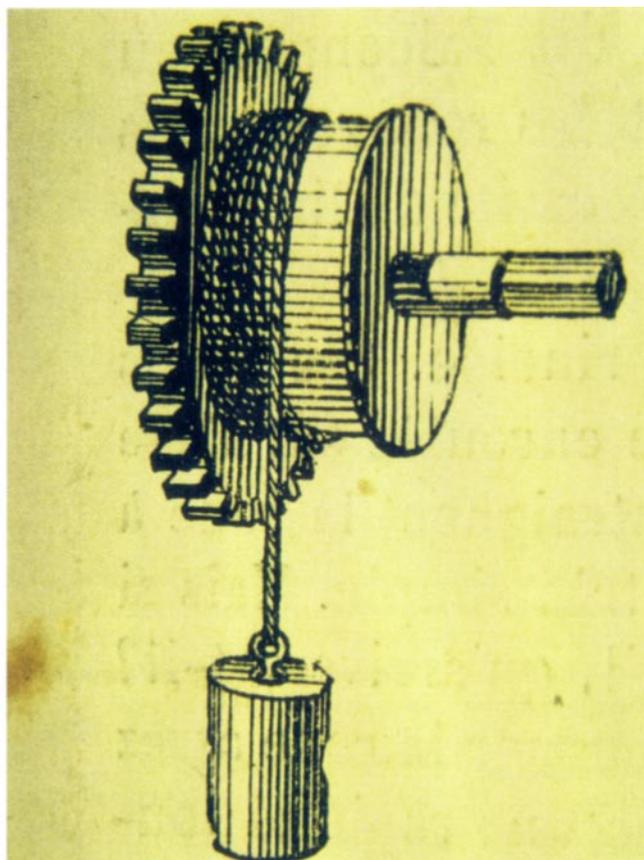
### Le temps technique

Sous l'angle technique, on peut dire que la fonction de l'horloge sera de reproduire un écoulement, lequel se rapprochera de celui du soleil. Par exemple, un bouchon en liège jeté dans la rivière pourrait mesurer cet écoulement s'il était raisonnable de graduer les rives.

Cette "rivière" a donc été ramenée à l'intérieur des habitations ; elle est devenue le sablier équipé d'un trou suffisamment petit pour que l'écoulement soit lent. La clepsydre lui a succédé avec également un trou, le sable ayant été remplacé par de l'eau.

Enfin, est arrivée l'horloge dans laquelle la chute du sable ou de l'eau est remplacée par la chute d'un poids.

Le trou est toujours présent si ce n'est que ce trou est un "trou énergétique". Comme pour le sable ou l'eau, l'indica-



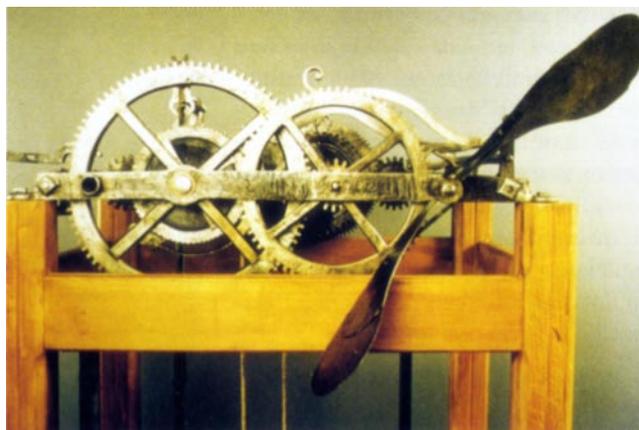
“Écoulement” d’un poids. Collections Musée du Temps. Cliché J.P. Tupin.

tion horaire pourrait être donnée par la position du poids par rapport à son point d’accrochage. On a choisi une solution plus élégante, à savoir le cadran qui indique 12 heures.

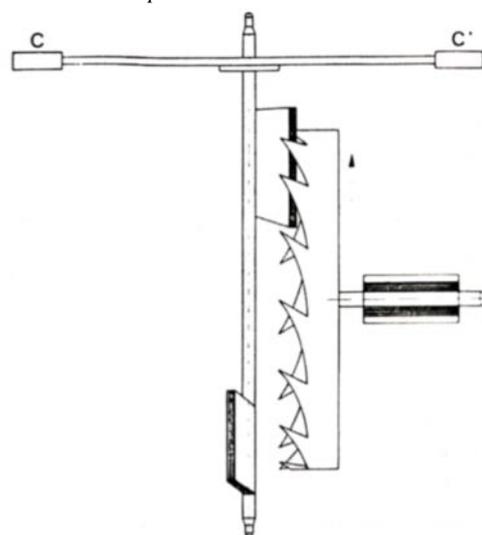
Le trou énergétique a pris différentes formes :

- une sorte de ventilateur qui retarde le poids et qui commande la sonnerie ;
- un foliot constitué d’un bras articulé horizontal sur lequel deux petites masses présentent une inertie de mise en route et d’arrêt, permettant un mouvement alternatif assez régulier avec des possibilités de réglages matérialisées par des encoches sur lesquelles sont positionnées les petites masses. Ces masses étaient changées de position tous les mois pour s’adapter à l’heure temporelle ;
- le pendule inventé par Huygens au XVII<sup>e</sup> siècle ; le pendule constitué d’une masse pivotante et d’une force de rappel (dans le cas présent, la pesanteur) qui constituera le trou énergétique le mieux calibré jusqu’au début du XX<sup>e</sup> siècle.

Pour mieux comprendre le rôle de ce trou destiné à réduire une vitesse d’écoulement, il est nécessaire de revenir à des



“Écoulement” d’un poids ralenti par l’air. Collections Musée du Temps. Cliché J.P. Tupin.



Échappement à foliot (dessin Joseph Flores - Horlogerie Ancienne AFAHA n° 1).

### **Le trou énergétique**

Pour simplifier, nous avons parlé d’un trou d’énergie pour illustrer la notion d’écoulement. Cet écoulement est un peu plus compliqué dans la mesure où la source d’énergie s’exprime par l’intermédiaire d’une force et d’un déplacement.

Cette force est variable au cours du déplacement : par exemple, le couple du ressort varie au cours de son déroulement, la tension de la pile change au cours de son usage...

Le génie de Huygens a été de découvrir l’isochronisme du pendule, c’est-à-dire que la fréquence d’oscillation d’un pendule libre est indépendante de l’amplitude.

En effet, si le couple du ressort augmente légèrement, le pendule accélère son mouvement, l’amplitude augmente, mais le temps d’une oscillation reste constant.

Cette propriété physique du pendule permet dans la montre, avec le balancier, à l’aide d’une mécanique relativement peu précise de  $10^{-2}$  -  $10^{-3}$ , d’obtenir un temps relatif très précis de  $10^{-5}$ .

principes mécaniques, à savoir que le sable, l'eau, le poids sont élevés d'une certaine hauteur et constituent ainsi une réserve d'énergie dite "potentielle". Ensuite, il est réalisé un écoulement par transformation de l'énergie potentielle en énergie cinétique, qui maintient l'amplitude du balancier, lequel dégrade cette énergie en chaleur du fait des frottements qui sont à l'origine de la perte d'amplitude.

À partir de cette analyse, on constate que tous les systèmes "horlogers" fonctionnent sur le même principe, y compris la bougie graduée qui transforme directement l'énergie potentielle en chaleur.

Sur cette base, il devient possible de raisonner sur des écoulements plus abstraits, tels que celui de l'énergie d'un ressort armé ou d'une pile, le tout prenant le terme générique de source d'énergie.

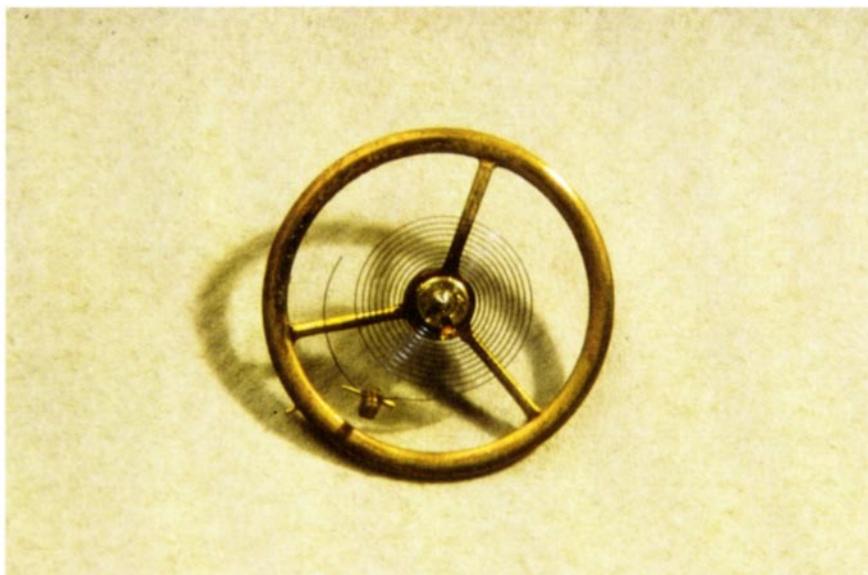
## La montre

L'horloge sera miniaturisée et deviendra montre de carrosse, montre de gousset, puis montre de poignet grâce à trois innovations importantes :

- le poids qui tombe lentement devient un ressort qui se détend lentement ;
- le balancier devient un objet de révolution indifférent au champ de pesanteur ;
- la force de rappel due à la pesanteur, est remplacée par un ressort spiral, sorte de petit cheveu enroulé autour de l'axe du balancier. La montre peut donc prendre n'importe quelle position vis-à-vis du champ de pesanteur.

Que s'est-il passé entre cette horloge et cette montre ?

Le kilo du poids qui tombe est devenu le gramme du ressort qui se détend, le mètre de l'horloge est devenu le millimètre de la montre et le millimètre est devenu un centième de millimètre. Sommes-nous dans l'univers micro-technique ? Oui, car l'énergie dépensée est de l'ordre du milliwatt mais nous n'y sommes pas encore sensibles car nous



*Balancier de la montre, trou énergétique de Huygens. Collections Musée du Temps. Cliché J.P. Tupin.*

sommes dans un univers monovecteur pour ce qui concerne le déplacement et pour le transport de l'information, ce vecteur est mécanique.

Toutefois, tous les éléments d'un micro-système sont présents :

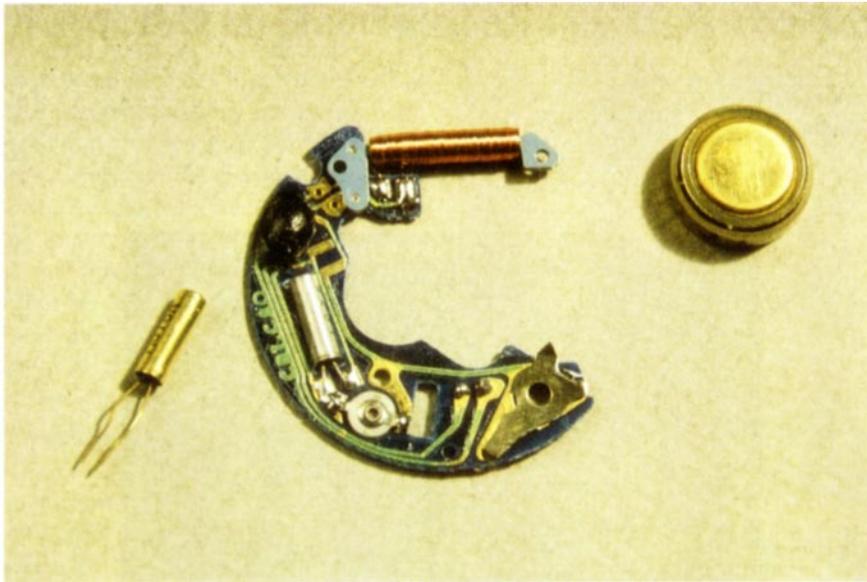
- un "actuateur" qui s'appelle le balancier et qui génère une dépense d'énergie parfaitement calibrée ;
- un "capteur" qui, à un endroit de la chaîne cinématique qu'anime le balancier, prélève une information sur le nombre d'oscillations réalisées par le balancier ;
- un traitement du signal, constitué également par des engrenages qui divisent les informations captées. Sachant que le balancier oscille à une fréquence de 3 à 5 oscillations par seconde, cet engrenage devient une mémoire qui enregistre  $3\ 600 \times 3 = 10\ 800$  oscillations pour une heure ;
- un transport, fonction assurée également par les engrenages, entre le ressort et le balancier d'une part, et entre le ressort et l'affichage d'autre part ;
- des "transducteurs", qui sont constitués par des afficheurs plus couramment appelés les aiguilles de la montre, lesquelles affichent et mémorisent

l'écoulement de l'énergie, pardon !... l'écoulement du temps.

Et aujourd'hui, la montre est dite "à quartz", alors qu'extérieurement, elle semble ne pas avoir changé ! Néanmoins...

Le ressort de 1 gramme est devenu une pile de 1 gramme et la durée de son écoulement est de 2 ans au lieu de 2 jours. Le balancier est devenu un petit diapason en quartz dont les vibrations sont si élevées qu'aucun engrenage ne dispose de dents assez petites pour le suivre. Les dents s'appellent à présent des électrons, petits et rapides. Ce quartz est un balancier dans la mesure où il comprend un diapason avec une masse et une force de rappel constituée par l'élasticité du quartz lui-même. Enfin ce quartz est dit "piézo-électrique", à savoir que pour le faire vibrer, lui est envoyée un peu d'énergie de la pile. Ce balancier devient un "oscillateur électromécanique".

Les progrès réalisés sont importants : le quartz vibre 1000 fois plus vite, il est 1000 fois plus précis et il consomme 100 fois moins d'énergie que le balancier mécanique. Quant au millimètre, il est devenu le micron.



Montre à quartz ; à gauche, la pile ; au milieu, le circuit imprimé avec oscillateur et culasse du moteur ; à droite, oscillateur piézo-électrique sous vide. Collections Musée du Temps. Cliché J.P. Tupin.

La conscience microtechnique devient plus précise dans la mesure où nous disposons de trois vecteurs énergétiques :

- vecteur mécanique : le diapason et le moteur électrique dans le cas de l'affichage à aiguille,
- vecteur électronique : un microprocesseur de calcul,
- vecteur optique : lors d'un affichage par diodes électroluminescentes ou par cristaux liquides.

Ces progrès n'ont-ils été réalisés que pour la montre ? Non, bien évidemment.

### **L'omniprésence des produits microtechniques**

Tout d'abord, cette montre, pardon ! cet oscillateur est présent dans tous nos produits industriels, de l'automobile à la machine à laver. Par exemple : l'arbre à came d'un programmeur est remplacé par un microprocesseur dont l'avance pas à pas est réglée par un oscillateur ; les vibrations successives de celui-ci constituent une sorte de train dont chaque oscillation, à la manière d'un wagon, peut contenir un message. De même les autres disciplines tech-

niques ont bénéficié du même type de progrès :

- en électronique, le tube à vide (triode ou pentode) est devenu transistor, puis ce transistor est devenu 1 million de transistors sur un circuit intégré ;
- en optique, le tube à vide (photorécepteur) est devenu phototransistor ;
- en acoustique, la ligne téléphonique est devenue fibre optique avec la possibilité de transmettre 25 000 à 1 million de messages.

En fait que s'est-il passé ?

Au départ, tout est mécanique :

- une montre est mécanique,
- une lentille pour appareil photographique ou un microscope, est mécanique,
- un tube à vide ou un transistor, est mécanique,
- une vague de pression, en acoustique, est mécanique, etc.

La technique permet aujourd'hui, de passer d'un vecteur à l'autre grâce à des "transducteurs".

Par exemple : dans la montre, le vecteur électrique de la pile est transformé en vecteur mécanique grâce au diapason "piézo-électrique". L'oscillateur est

également un transducteur qui oscillera 32 768 fois par seconde et pilotera l'électronique de traitement qui restituera un signal par seconde. Ce signal sera envoyé à un moteur électrique, lequel, de nouveau, transformera le vecteur électrique en vecteur mécanique qui animera les aiguilles.

Ce qui a été décrit précédemment pour le temps, considéré en fait comme grandeur physique, est aujourd'hui appliqué à la plupart des grandeurs physiques prises comme information destinée à des automatismes, telles que température, pression, longueur, fréquence, etc. Les microtechniques, présentes dans tous nos bien d'équipements actuels, participent à la gestion d'informations représentées par des grandeurs physiques. Par exemple, le moteur d'automobile est garni de capteurs microtechniques qui informent un ordinateur, lequel gère l'allumage, ce qui permet de réduire considérablement la consommation de carburant et de supprimer le "delco", les "vis platinées" et l'"avance à l'allumage". Mais aussi dans le domaine de la communication : pour transmettre une page de texte par fax, le procédé consiste à la découper en 1 million de points ou pixels (vecteur optique), transmis par téléphone (vecteur électrique) à un autre fax, lequel reproduira l'image sur un papier thermo-sensible (vecteur thermique). Il n'est pas nécessaire d'imaginer que le fax reproduise les couleurs et découpe une page en 2 millions de points, cela existe déjà et cela s'appelle une imprimante "à jet d'encre" ou une imprimante "laser".

La révolution microtechnique, en marche depuis une vingtaine d'années, a permis et permettra encore de très nombreux nouveaux développements. Toutefois, l'abondance de possibilités d'applications des microtechniques, nécessitera un important travail de synthèse et de rangement, pour éviter que les microtechniques ne deviennent une sorte de Tour de Babel ■