

Que ferions-nous aujourd'hui sans une montre ou sans horloge ? Le temps rythme nos vies : heures de rendez-vous, horaires de train, durées d'examen, temps de cuisson, etc.

I- LE TEMPS DES ASTRES

1. Le gnomon

Vers 2500 avant J.-C., on déterminait l'heure grâce au gnomon, simple bâton planté verticalement dans le sol. Celui-ci permettait facilement, en n'importe quel endroit, d'observer le mouvement de l'ombre du soleil ou de la lune.

Il était surtout utilisé par les Égyptiens et Babyloniens, mais on le trouve aussi en Amérique, en Afrique ou encore à Bornéo.

Principe : pour déterminer l'heure, on mesure la longueur de l'ombre du gnomon, dont l'extrémité parcourt très régulièrement un arc de cercle. Le gnomon est amélioré vers 1500 avant J.-C. La tige, appelée *style*, est fixée sur un socle, la table. L'ensemble s'appelle un cadran solaire.

2. Le cadran solaire

Les premiers cadrans ne portent pas la graduation des heures. Au Moyen Âge, on trouve sur les chantiers un cadran solaire à 4 traits, n'indiquant que les moments du début et de la fin du travail des ouvriers, et ceux de la pause.

Au XVI^e siècle, l'heure est définie comme la 24^e partie du temps séparant deux passages du soleil à son point culminant. Les cadrans vont donc traduire cette évolution et porter 24 graduations.

Il existe différents types de cadrans, verticaux, équatoriaux, portatifs... On en trouve pratiquement sur toutes les églises, avec un cadran vertical : les clercs sont les artisans de leur large diffusion.

Les Croisés, au XIV^e siècle, ont rapporté des cadrans solaires au style incliné, ce qui augmente leur précision. En effet, le style du cadran n'est pas incliné au hasard : il doit être parallèle à l'axe de rotation de la Terre, par conséquent, il doit pointer vers l'étoile polaire. Les spécialistes sont appelés *cadraniers*. Ils parcourent le pays pour satisfaire la forte demande en

cadrans. Longtemps après l'invention de l'horloge, les cadrans solaires coexisteront sur la façade des cathédrales.



1 Cadran solaire cubique, XVIII^e s.
Inv. 10534-0000- C'est un cadran de voyage : on peut incliner son style en fonction de la latitude où l'on se trouve.

1 Cadran solaire horizontal à canon, XVIII^e s.
Inv. 00911-0001- ; Cadran solaire horizontal universel de Julien Le Roy, XVIII^e s. Inv. 00925- ; Cadran solaire par Blondeau, XVII^e s. Inv. 03903- ; Cadran solaire de poche horizontal, XVII^e-XVIII^e s. Inv. 10519-

3. L'astrolabe

À la fois instrument d'observation et instrument de calcul, l'astrolabe permet de mesurer la hauteur du soleil sur l'horizon, de calculer l'heure et la place du soleil dans le zodiaque. Mis au point par les astronomes grecs dès les premiers siècles de notre ère, les astrolabes n'ont cessé de gagner en précision, mais aussi en complexité, grâce aux savants arabes. Instrument privilégié des astronomes ou astrologues, il est également utilisé, sous une forme simplifiée, pour la navigation en mer, ou comme instrument de visée pour les mesures d'angles. En outre, l'astrolabe se révèle l'outil indispensable pour expliquer le mouvement des astres.

Les astrolabes du constructeur flamand Gualterus Arsenius (vers 1530-1580) sont connus et appréciés, en leur temps, par les astronomes de l'Europe entière.



 **2** Grand astrolabe de Gualterus Arsenius, XVI^e s. Inv. 03902-0000

 **2** Astrolabe nautique par Sancho Guttierrez, XVI^e s. Inv. 03864-0001 ; Deux plaques gravées pour l'impression d'astrolabes (Construites par Arsenius), XVII^e s. Inv. 00913-0000 et 00914-0000

II- L'ÉCOULEMENT DU TEMPS

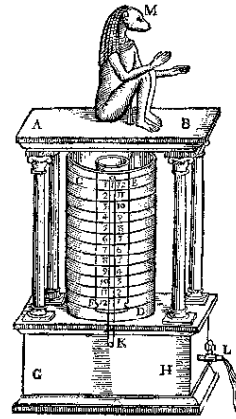
1. La clepsydre

Connue des Egyptiens, des Amérindiens et des Grecs, la clepsydre est une horloge à eau, une sorte de vase percé d'un trou qui laisse couler de l'eau. Des graduations situées à l'intérieur permettent de mesurer des intervalles de temps. Certaines clepsydras ont une forme évasée, plus large en haut, car plus la dénivellation est grande et plus le débit de l'eau l'est aussi. Si le cadran solaire donne l'heure pendant le jour, la clepsydre la donne la nuit, et elle mesure en plus des durées plus brèves avec une meilleure précision.

Les Grecs perfectionnent l'instrument : un récipient laisse couler de l'eau dans le vase du haut par le tuyau du haut. Ce vase laisse écouler vers le bas un débit d'eau inférieur à celui qu'il reçoit. L'eau en excès s'écoule par le tuyau de gauche. Ainsi, le vase est toujours plein, la chute d'eau vers le vase du bas a toujours la même hauteur, et le débit reste constant.

L'eau monte régulièrement dans le vase du bas, le flotteur pousse la tige crantée vers le haut, laquelle fait tourner l'aiguille par

l'intermédiaire d'une roue dentée. Cette clepsydre ressemble aux horloges actuelles. Malgré cette amélioration, mettre deux clepsydras à la même heure n'est pas simple, et il est nécessaire tous les jours de réaliser des réglages en utilisant un cadran solaire.



Clepsydre en forme de cynocéphale accroupi

La clepsydre tient une grande importance dans la vie des cités. Elle sert notamment à limiter la durée des discours ou des plaidoiries en politique. De l'Antiquité au Moyen-Âge, de nombreuses machineries sont inventées qui utilisent l'écoulement de l'eau comme principe de la mesure du temps. Au XVII^e et au XVIII^e siècles, les clepsydras à tambour indiquent l'heure de manière rudimentaire, mais économique et efficace.



Le tambour est constitué d'alvéoles qui contiennent de l'eau. Il descend lentement en affichant les heures dans le déroulement de sa course.

 **1** Clepsydre à tambour à réveil, XVIII^e s. Inv. 20290-

2. Le sablier

Dans un pays où l'eau est rare, la clepsydre est remplacée par le sablier. Il faut souvent le retourner pour mesurer des intervalles de temps relativement longs, mais il indique avec une bonne précision la durée d'une tâche à accomplir. Autre avantage : il est adapté aux conditions difficiles de la navigation en mer, et peut être utilisé par les marins pour évaluer leur déplacement.

Au XV^e siècle, les grands navigateurs, comme Christophe Colomb, ont besoin de connaître l'heure de leur point de départ pour établir leur position en mer. En effet, si déterminer la latitude du navire est facile à estimer grâce à la position du soleil à midi ou de l'étoile polaire la nuit, l'estimation de la longitude nécessite le calcul de la distance parcourue entre deux points. Il y a 360 degrés de longitude et une journée dure 24 heures. Donc une heure correspond à 15° de longitude ! Par exemple, s'il est midi heure locale et que l'horloge présente sur le navire indique qu'il est 13 h à son port de départ, il sait qu'il se trouve à 15° à l'ouest de ce dernier. Seulement, les horloges à poids du XV^e siècle, lourdes et encombrantes, sont alors incapables de fonctionner sur un navire. Le roulis, le tangage, les variations de température et la poussière dérèglent leur fonctionnement. D'où l'idée d'utiliser un sablier ! Une fois par heure, un matelot lance à la mer une planche attachée à un cordage, retourne le sablier, et laisse filer le cordage le long du flanc du bateau. À la fin de la coulée de sable, il récupère et mesure la longueur de cordage déroulé pendant cette durée.

Pour mesurer plus facilement ces longueurs, on fait un nœud tous les 47 pieds 1/2 (soit 15,435 m), et l'on compte ces nœuds. Le terme de "nœud", qui désigne la vitesse d'un navire, vient de cette habitude. Aujourd'hui, 1 nœud vaut 1,852 km/h.



 **1** Sablier, fin XVIII^e s, Inv. 04326-

3. Bougie, encens et lampe à huile

Utilisée pour s'éclairer la nuit, la bougie était également utile pour connaître l'heure, grâce à des graduations. Sans être précise sur de longues durées, la bougie est précieuse pour des durées plus courtes.

En Chine, on trouve de magnifiques horloges à combustion de bâtons d'encens. La lampe à huile joue le même rôle. Les graduations de temps sont peintes ou gravées sur le réservoir.

III- TEMPS ET RYTHMES MÉCANIQUES

1. Les horloges à eau

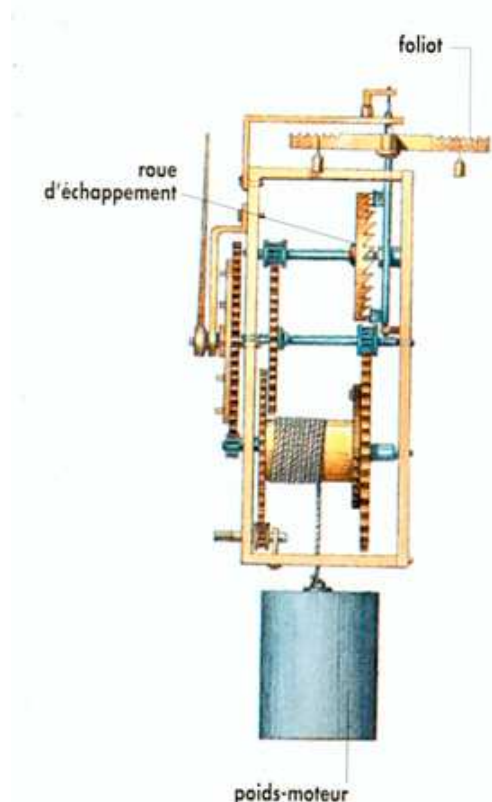
Les premières horloges apparaissent au XIII^e siècle. Ce sont des horloges à eau. L'énergie est transmise par un jeu de roues dentées. Elles n'ont pas toujours de cadran, et ne possèdent qu'une aiguille, celle des heures.



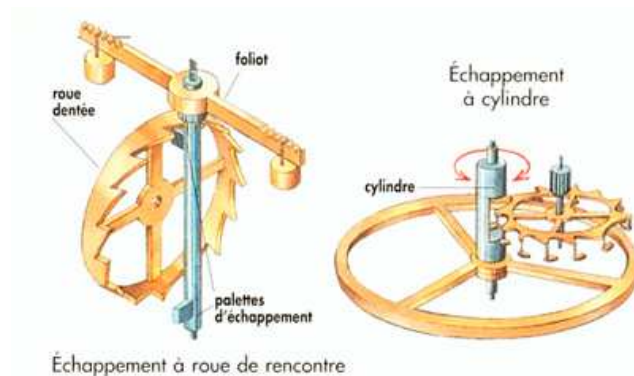
 **1** Horloge à eau de Perrault, XVII^es. Inv. 00299-

2. Les horloges à foliot

Deux siècles plus tard, toutes les horloges mécaniques possèdent trois pièces essentielles : le poids, l'échappement et le foliot.



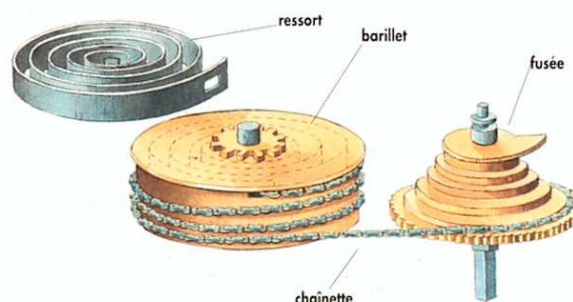
Principe : le poids, accroché à une corde enroulée autour d'un axe horizontal, entraîne l'aiguille dans un mouvement de rotation. Pour remonter l'horloge, il suffit de remonter le poids en enroulant à nouveau la corde autour du cylindre. L'échappement communique au rouage la force motrice du poids. Jusqu'à la fin du XVII^e siècle, il n'en existe qu'un seul type - l'échappement à roue de rencontre – qui se compose d'une roue dentée en couronne qui engrène alternativement avec l'une des deux palettes fixées sur l'axe qui porte le foliot. Grâce aux impulsions qu'il reçoit, le foliot oscille. Ses battements sont les unités qui s'additionnent pour obtenir les fractions de temps.



Au début de l'horlogerie, la précision n'est pas extraordinaire. Il peut y avoir jusqu'à une heure de décalage par jour ! Aussi ne faut-il pas s'étonner de la présence d'un cadran solaire situé au-dessus de chaque horloge.

Les progrès techniques apportent rapidement une bonne précision, et dans toute l'Europe de magnifiques horloges sont construites, associant souvent sur plusieurs cadrans l'heure, les signes du zodiaque, les saisons, les planètes, et les dates des fêtes religieuses.

À la Renaissance, le remplacement du poids par un ressort comme source d'énergie potentielle permet de réduire la taille des horloges – les premières montres font leur apparition – et de les transporter n'importe où. En effet, le poids était sensible au déplacement de l'horloge, mais le ressort, lui, fonctionne dans toutes les positions.



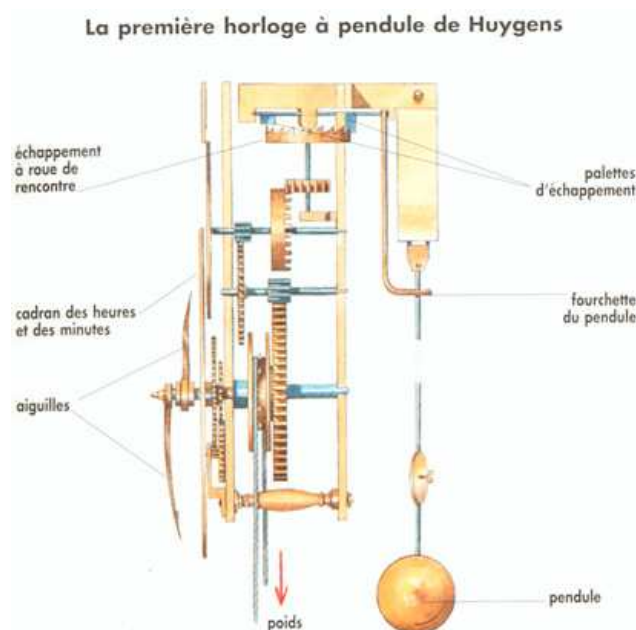
Malgré tout, l'horloge à foliot présente un énorme inconvénient : le foliot ne permet pas de fournir l'isochronisme¹ nécessaire à la précision d'une horloge.

¹ Qui implique des intervalles de temps égaux.

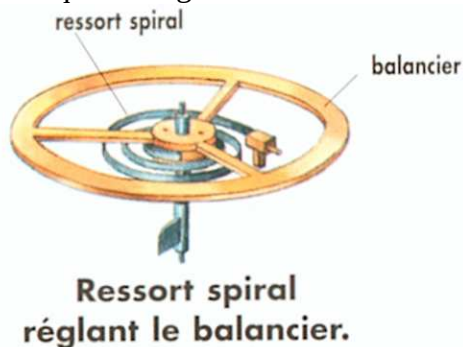
3. Les horloges à balancier

En 1657, le physicien hollandais Christiaan Huygens, en collaboration avec l'horloger Coster, met au point la première horloge à balancier, appelée "pendule", qui remplace le foliot des horloges primitives. Le pendule avec l'ancre² et une roue d'échappement constituent le système régulateur de l'horloge. C'est un système qui consomme peu d'énergie et la période d'oscillation reste quasiment constante : l'isochronisme est donc respecté.

 **3** Échappement à ancre, 1833. Inv. 04206-0001-



Ensuite, un ressort, enroulé en spirale, règle les oscillations du balancier des montres. La précision est encore meilleure et chaque horloger utilise ce mécanisme.



² Pièce appelée ainsi car sa forme rappelle celle d'une ancre de marine.

Au cours de la Révolution française de 1789, les montres plates de poche font rage auprès des riches à la suite des travaux de l'horloger suisse Breguet, installé en France. On assiste alors à un véritable travail d'art sur chaque modèle, combinant les formes délicates, les gravures sur or et argent, les insertions de pierres précieuses.

L'effort de rationalisation engagé par la Révolution passe par l'application du système décimal, y compris à la mesure du temps. La journée compte dorénavant dix heures, l'heure cent minutes et la minute cent secondes. Pour une brève période d'une dizaine d'année, les horlogers réalisent de nouvelles pendules où cohabitent la graduation décimale et la graduation duo-décimale



 **4** Pendule révolutionnaire, 1795. Inv. 14568-

4. Le point en mer

En l'absence d'un instrument de mesure du temps fiable, cette mesure est pratiquement impossible. Jusqu'au XVII^e siècle, les capitaines naviguent à l'estime³. Donc, plus leur expérience est grande, mieux ils savent évaluer leur position.

Les monarques des États maritimes, comme l'Angleterre et la France, sont impatients de voir leurs navires commerciaux et leurs bateaux de guerre s'orienter, avec certitude, en pleine mer. La dérive qui résulte des changements de trajectoire incontrôlés cause de nombreux naufrages, et de lourdes pertes en vies humaines et en marchandises. Or le commerce océanique, en particulier avec l'Amérique et les Indes, constitue pour les deux pays une très importante source de richesse. Vers 1788, la flotte anglaise atteint un volume de plus d'un million de

³ Détermination de la position d'un navire, en tenant compte des courants et de la dérive.

tonnes et la flotte française est évaluée à plus de 700 000 tonnes. La rivalité commerciale des deux pays est donc permanente.

En 1714, le gouvernement anglais s'engage à offrir un prix de 20 000 livres sterling, l'équivalent de plusieurs millions des euros d'aujourd'hui, à qui trouvera la longitude à un demi-degré près : cette distance angulaire correspond à trente milles marins au niveau de l'équateur, soit environ 55 km. Deux ans plus tard, le régent de France, Philippe d'Orléans, s'engage à récompenser par 100 000 livres tournois⁴ la même invention.

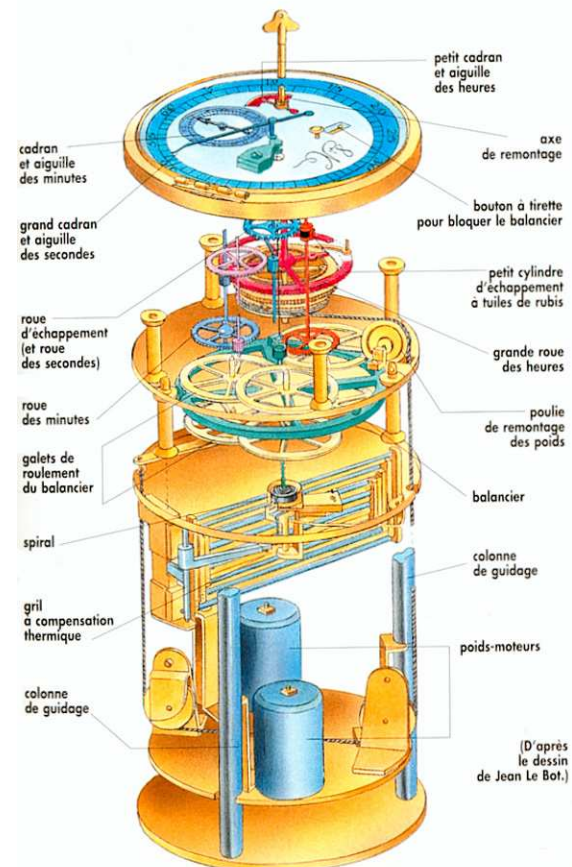
En 1734, le charpentier-horloger anglais John Harrison construit un énorme chronomètre de marine de 32,5 kg, visible aujourd'hui au National Maritime Museum de Greenwich. Les résultats en mer étant encourageants, il reçoit une forte somme d'argent et poursuit ses travaux. En 1761, William, le fils de John Harrison, emporte avec lui le prototype n°4 au cours d'un voyage de Portsmouth à la Jamaïque. C'est un modèle bien plus petit, de seulement 1,5 kg qui au cours de deux mois de voyage ne prit que cinq secondes de retard.

Un second voyage est cependant nécessaire pour obtenir l'attribution du prix. Au cours des 47 jours de navigation, la montre prit environ 40 secondes de retard, ce qui correspond à une erreur angulaire de dix minutes. C'est trois fois mieux que la précision demandée par le concours pour un parcours de la Grande Bretagne jusqu'au Antilles, et l'épreuve permet à Harrison de remporter la récompense.

En France, deux horlogers se disputent le prix proposé, Ferdinand Berthoud, nommé horloger du roi et Pierre Le Roy.

En 1754, moins d'un an après avoir reçu le titre de maître horloger, Ferdinand Berthoud se lance dans la construction d'horloges spécialement construites pour

aller en mer. La diversité de ses horloges révèle qu'il n'a jamais cessé d'imaginer de nouveaux modèles. Pendant un demi-siècle, il s'obstine à résoudre le problème qui est au centre des ses préoccupations : construire une horloge facile à transporter et à réparer et qui conserve l'heure avec précision malgré les mouvements de la mer et les variations de températures.



 **5** Horloges marines de Berthoud n°8, 1768. Inv. 01389-0002-

 **5** Horloge n°2, 1763. Inv. 1387 ; n°6 en 1767. Inv. 01389-0001-

L'horloge n°8 était la préférée de Berthoud.

Principe :

- La force qui entraîne le mouvement est produite par la descente d'un plateau lesté de deux poids en plomb. Pour neutraliser les effets du roulis et du tangage, le plateau est guidé entre des colonnes. Il accomplit sa descente en 32 heures. Trois tours de clef suffisent à le remonter pour que l'horloge continue à fonctionner.

⁴ 1 livre tournois valait 0,38 g d'or fin sous Louis XIV. Aujourd'hui, 1 g d'or fin vaut environ 10 €.

- La pièce qui permet de compter les fractions de temps est un anneau d'environ 12 cm de diamètre, le balancier. Il effectue une oscillation par seconde. Pour rendre la durée des oscillations égale, il est muni d'un spiral formé d'une lame de ressort. Un châssis constitué de tringles d'acier et de laiton agit, par l'intermédiaire de leviers, sur la longueur du spiral pour annuler l'action du chaud et du froid sur les oscillations du balancier. Lorsque la température baisse, le spiral est allongé pour ralentir le balancier. Quand la chaleur augmente, le spiral est raccourci pour accélérer son mouvement (gril de compensation thermique).

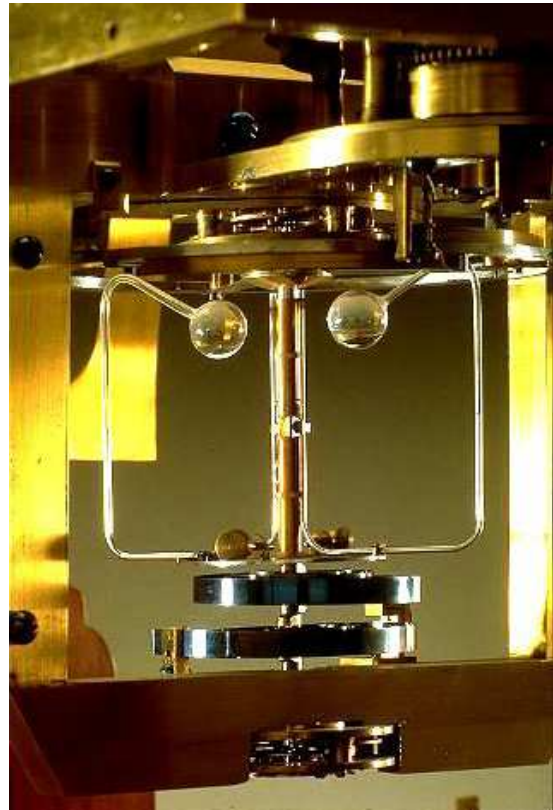
- Entre la force motrice et le balancier, l'élément principal est l'échappement qui distribue régulièrement au balancier l'énergie qui lui permet d'osciller. Il se compose d'une roue dentée qui transmet des impulsions au balancier.

- Le cadran : le grand cercle indique les secondes, le plus petit marque les minutes et une ouverture laisse apparaître l'heure en chiffres romains.

Enfin, un bouton à tirette permet de bloquer le balancier pendant les transports.

Malgré toute l'ingéniosité de Berthoud, c'est son concurrent, Pierre Le Roy, qui remporte le prix de l'Académie des sciences en 1769 avec son chronomètre de marine.

Principe : l'isochronisme est recherché au moyen de deux spiraux (petits ressorts qui règlent le mouvement du balancier) enroulés en sens inverse et à points d'attache fixes. Le Roy associe deux thermomètres au balancier qui contiennent de l'alcool et du mercure. La compensation thermique du balancier est obtenue par le déplacement du mercure.



 **6** Chronomètre de marine de Pierre Le Roy, 1766. Inv. 01395-

Autres horloges...

 **7** Pendule à remontoir d'égalité par Bourdier, 1800-1815. Inv. 01398-

 **8** Horloge à calendrier de Janvier, vers 1800. Inv. 10621-0001-

IV. TEMPS ET RYTHMES ÉLECTRONIQUES

1. L'horloge à quartz

En frappant sur un verre en cristal, on entend un son car il vibre avec une fréquence qui lui est propre. C'est pareil pour le quartz. Et si vers 1920 on choisit le quartz comme oscillateur, c'est à cause des charges électriques qui apparaissent et disparaissent en permanence à sa surface, au rythme des vibrations. C'est l'effet *piézo-électrique*.

Ces vibrations, par l'intermédiaire d'un circuit électronique, sont à l'origine du déplacement des aiguilles d'une montre. La précision obtenue est dix fois plus grande

que celle de la meilleure des montres mécaniques : 1 seconde en 6 ans.

En 1970, la miniaturisation est telle qu'apparaît la première montre-bracelet à quartz.

Dans une montre à quartz, le cœur de la montre est constitué par un circuit intégré formé d'un grand nombre de composants électroniques réunis sur quelques millimètres carrés. La source d'énergie est constituée d'une pile miniaturisée, dont la durée de vie peut atteindre plusieurs années. La division du temps est opérée par un oscillateur à quartz, que fait vibrer l'énergie fournie par la pile.

Les montres à quartz sont d'une extrême précision grâce à une fréquence élevée de vibrations (32 kHz), leur variation annuelle n'étant que de l'ordre d'une minute par année, soit moins d'une seconde par jour. On peut différencier deux principaux types de montre à quartz :

- La montre à affichage analogique (à aiguilles)
- La montre à affichage numérique, munie de cristaux liquides qui reçoivent directement du circuit intégré les impulsions nécessaires à l'affichage de l'heure.

Il n'y a donc plus aucune transmission mécanique, ces deux types d'affichages pouvant être combinés dans un même produit (double affichage, pour l'indication de l'heure et de la mesure des temps courts par exemple).

2. L'horloge atomique

Toujours à la recherche de la meilleure précision, pour répondre aux besoins des télécommunications ou de la navigation, les savants poursuivent leurs recherches. En 1958, ils mettent au point l'horloge atomique, dont la précision est d'une seconde pour 3000 ans. Le principe est basé sur un aspect fondamental de la physique quantique : un atome peut exister sous différents niveaux d'énergie qui sont quantifiés, c'est-à-dire que l'énergie d'un atome ne peut prendre que des valeurs bien

précises, caractéristiques de la nature de l'atome (hydrogène, césium, etc.).

Pour faire passer un atome d'un niveau d'énergie à un autre plus élevé (on parle de transition atomique), il doit recevoir un photon⁵ dont l'énergie correspond exactement à la différence d'énergie entre le niveau final et le niveau initial. À l'inverse, pour revenir au niveau d'énergie initial, il doit lui-même émettre un photon de même énergie.

Or, l'énergie transportée par un photon est directement proportionnelle à la fréquence de l'onde électromagnétique associée (à la couleur de la lumière). Par exemple, un photon de lumière violette transporte deux fois plus d'énergie qu'un photon de lumière rouge, qui en transporte plus qu'un photon infrarouge, etc.

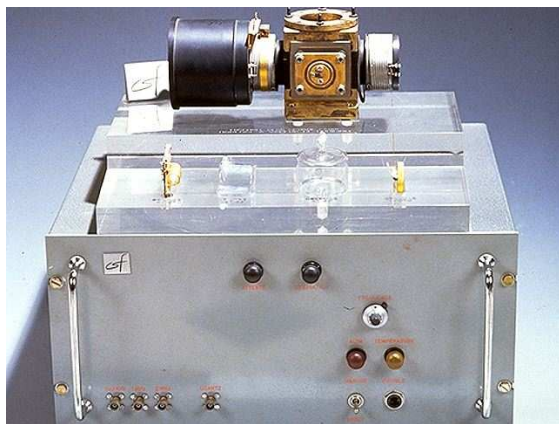
Puisque les différences d'énergie entre les états d'un atome ont des valeurs parfaitement définies, il en est de même de la fréquence de l'onde électromagnétique pouvant changer leur état, ou pouvant être générée par leur changement d'état. Pour construire une horloge, il suffit donc d'utiliser la fréquence de cette onde électromagnétique et de compter ses périodes. Ainsi, de la même façon qu'une horloge comtoise comptabilise les oscillations de son balancier (en faisant avancer les aiguilles de son cadran à chaque période), ou qu'une horloge à quartz comptabilise les périodes des vibrations de son oscillateur à quartz, une horloge atomique comptabilise les périodes de l'onde électromagnétique ayant provoqué le changement d'état d'atomes (étalons passifs) ou ayant été générée par ce changement d'état (étalons actifs).

L'horloge atomique la plus stable et la plus exacte est actuellement l'horloge atomique à jet de césium.

Il existe d'autres types d'horloges atomiques : les horloges à rubidium dont les performances sont moindres, les masers à hydrogène passifs et les masers à hydrogène actifs, dont la stabilité à court

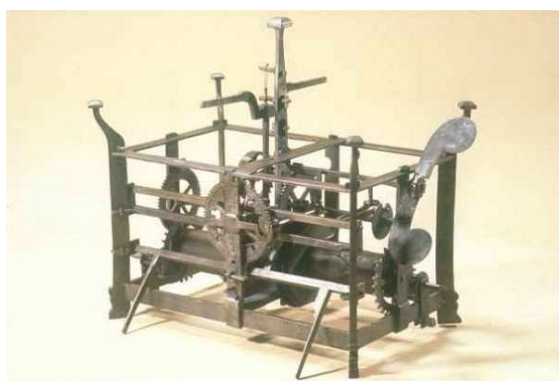
⁵ « grain élémentaire » de lumière

terme (durées inférieures à un jour) est meilleure que les étalons à césium, mais qui présentent une stabilité à long terme (et une exactitude) moins bonne.



Horloge atomique à vapeur de rubidium, 1964. Inv. 22333- (Réserves de Saint-Denis)

Dans la suite du parcours...



 **10** Horloge en fer forgé à foliot, 1575-1625. Inv. 19590- (domaine de la Mécanique)



 **11** Horloge monumentale, 1863. Inv. 07179- (domaine des Transports, au niveau de l'escalier d'honneur)

Photos :

© Musée des arts et métiers/Cnam, S. Pelly, P. Faligot

Illustrations :

Marie-Marthe Collin, *Les horloges marines de Berthoud*, Paris, Nathan, Musée des arts et métiers, 1994, 77 p.

Sources :

Catherine Cardinal et Marie-Marthe Colin, *Les horloges marines de M. Berthoud*, Paris, Nathan, Musée des arts et métiers, 1994, 77 p.

René Rohr, *Les cadrans solaires : histoire, théorie, pratique - Traité de Gnomonique*, Oberlin, 1986, 215 p.

Jean Rosmorduc, *Chronologie des sciences et des techniques*, Paris, CDRP, 1997, 46 p.

Dava Sobel, *Longitude : l'histoire vraie [...]*. Paris : J.-C. Lattès, 1996, 195 p.

Encyclopaedia Universalis en ligne

<http://www.universalis-edu.com/>

« John Harrison and the Longitude problem » sur le site du National Maritime Museum de Greenwich

<http://www.nmm.ac.uk/>

L'album du Musée des arts et métiers, cédérom, CNAM, 1994