



# La mesure du temps

### UNE MESURE IMPALPABLE



Dans ses *Confessions*, Saint Augustin écrivait : « Qu'est-ce donc le temps ? Si personne ne me le demande, je le sais ; mais si on me le demande et que je veuille l'expliquer, je ne le sais plus. » Jusqu'à présent, la nature du temps demeure l'une des questions fondamentales, à la frontière de la science et de la philosophie, qui n'a reçu aucune réponse satisfaisante.

Pourtant, la notion de temps est omniprésente dans notre vie de tous les jours : nous comptons les années, les mois, les jours, les heures, les minutes, les secondes, voire les centièmes de seconde. Il faut cependant remarquer que ce que nous mesurons sont toujours des durées, c'est-à-dire des intervalles de temps. Même si la nature du temps est toujours restée obscure, l'homme a sans cesse cherché à améliorer la précision avec laquelle il le mesurait. La construction d'horloges de plus en plus précises a démarré dès l'Antiquité. Aujourd'hui, les meilleures horloges atomiques ne dérivent que d'une microseconde (millionième de seconde) en cent ans ! Il faut comparer cela aux premières horloges qui dérivèrent d'une heure en un jour. Par rapport aux horloges à eau des Égyptiens, la précision atteinte aujourd'hui est ainsi sans commune mesure : on a gagné un facteur égal à 10 milliards de milliards !

### HORLOGES NATURELLES

Tout mouvement qui se répète périodiquement de manière régulière peut servir comme base pour mesurer le temps. Les mouvements célestes, comme celui des étoiles, du Soleil ou de la Lune, ou certains phénomènes, comme les changements de saison, sont de bons repères pour mesurer le temps. Pour des durées courtes, le mouvement apparent du Soleil autour de la Terre peut servir d'horloge : on obtient ainsi un gnomon ou un cadran solaire.

### LE GNOMON

Le principe de cette horloge, l'une des plus anciennes que l'homme ait fabriquées, est simple. Il repose sur le fait que la longueur de l'ombre d'un bâton planté dans le sol varie au

cours du jour en fonction de la position du Soleil dans le ciel. Elle est par exemple minimale à midi. Le gnomon n'est en fait rien d'autre qu'un bâton vertical, muni d'une petite boule en son sommet, dont on observe la longueur de l'ombre, celle-ci permettant de diviser le jour en secteurs. Voilà comment, du lever au coucher du Soleil, l'ombre de la boule parcourait les secteurs, donnant ainsi l'heure. Le gnomon est très simple, mais peu précis. Par ailleurs, son plus grand défaut est qu'en un même lieu, la longueur de l'ombre à un instant donné de la journée varie au cours de l'année en raison du mouvement de la Terre autour du Soleil.

### LE CADRAN SOLAIRE

Le **cadran solaire** est le successeur du gnomon. Ici, plutôt que



d'observer la longueur de l'ombre, on s'intéresse à son orientation. L'ombre d'une tige parallèle à l'axe de rotation de la Terre tombe sur une surface graduée, la table. Celle-ci peut être plane (le plus souvent) ou en demi-sphère ou demi-cylindre. Des lignes partant de la base du style (la tige) sont tracées sur la table : elles correspondent à la direction de l'ombre à une heure donnée. L'avantage du cadran solaire est que, contrairement au gnomon, il indique la bonne heure quelle que soit la position de la Terre sur son orbite. Le cadran solaire est un instrument très ancien : les Égyptiens l'employaient 13 siècles avant Jésus-Christ. Son défaut, comme le gnomon, est qu'il est nécessaire que le Soleil soit visible.

### HORLOGES ARTIFICIELLES

Très vite, les hommes ont ressenti le besoin de mesurer le temps de manière plus précise, et surtout, afin de connaître le temps y compris en absence du Soleil. On a ainsi inventé des garde-temps artificiels.

### HORLOGES À ÉCOULEMENT

La **clepsydre** Ainsi est née la clepsydre, une horloge similaire à un sablier mais où coule de l'eau au lieu du sable. Afin que la clepsydre soit fiable, il est nécessaire que le débit d'eau reste constant. Ce débit dépend lui-même d'un certain nombre de facteurs dont il faut s'assurer de la constance, ce qui n'est pas simple. Bien entendu, cela dépend également du degré de précision que l'on cherche.

Dans la pratique, en fait, on réglait les clepsydres et on les recalait tous les jours avec l'heure donnée par les cadrans solaires. Mais les clepsydres présentaient l'avantage de donner l'heure la nuit. Elles étaient très répandues jusqu'au Moyen-Âge en Occident et le couple clepsydre-doche permettait de donner un top horaire grâce auquel toute la communauté pouvait connaître l'heure des prières. Plusieurs modèles plus ou moins précis de clepsydres ont vu le jour au cours de l'histoire. Nous allons décrire ici la forme de base la plus simple. Si l'on remplit un récipient cylindrique avec de l'eau et si l'on perce le fond, l'eau coulera hors du récipient, mais le niveau d'eau baissera de manière non régulière, car les fuites sont plus importantes lorsque le niveau d'eau dans le récipient est élevé : au début, le niveau baissera vite, alors qu'à la fin, dans le même temps, il baissera bien moins. Afin de compenser cela, il existe deux moyens très simples : soit graduer verticalement la clepsydre, mais en prenant soin d'espacer les graduations en haut et les resserrer en bas ; soit ne pas utiliser un récipient cylindrique, mais en forme de cône, large en haut, mais de plus faible section en bas.

### Le sablier



Après la clepsydre, c'est le **sablier** qui voit le jour. La légende attribue son invention à un moine de

Chartres, au **vi<sup>e</sup>** siècle. Mais comme c'est surtout au **xv<sup>e</sup>** siècle que le sablier est partout employé, on pense que son invention a dû précéder de peu ce siècle. Contrairement à l'eau, le sable ne gèle ni ne s'évapore si bien que le sablier fut vite adopté. Mais le sablier, même précis, est en fait davantage une minuterie qu'une horloge.

### La chandelle



Si l'on possède une **chandelle** qui se consume de manière régulière dans le temps, on peut l'employer comme horloge : il suffit de graduer la lanterne qui la protège pour pouvoir lire l'heure. La chandelle était très employée au Moyen-Âge. Comme le sablier et la clepsydre, la chandelle présente un défaut : elle ne permet pas de mesurer le temps sur une longue durée. Elle s'apparente davantage à un chronomètre qu'à une horloge.

### HORLOGES MÉCANIQUES

Une horloge mécanique est un ensemble de pièces animées d'un mouvement discontinu, mais périodique. Elle est essentiellement constituée de quatre parties : un régulateur, un moteur, un échappement, un système de rouages. Contrairement aux horloges à écoulement où le fluide s'écoule de manière continue, avec les horloges mécaniques, le temps est haché, divisé en unités identiques de courte durée. Le rôle du régulateur consiste à assurer une

marche constante : c'est une pièce animée d'un mouvement de va-et-vient qui donne la période. Mais comme les frottements l'amortissent, il est nécessaire de recourir à un « moteur » qui compense les pertes en fournissant de l'énergie. La transmission de cette énergie depuis le moteur vers le régulateur est le rôle de l'échappement. Quant aux rouages, leur rôle consiste à transmettre le mouvement d'une pièce à l'autre. C'est au **xv<sup>e</sup>** siècle, grâce au Hollandais Christian Huygens (1692-1695) notamment, que les horloges acquièrent une précision suffisante pour les besoins journaliers.

### Horloge mécanique à pendule



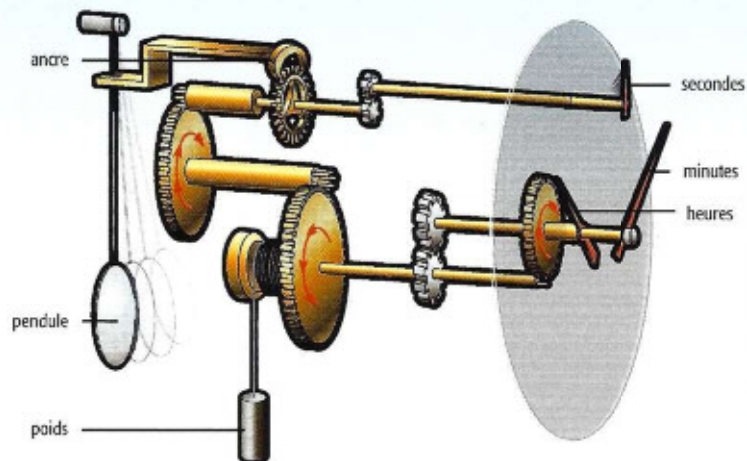
Le régulateur donne une fréquence que l'horloge doit conserver de manière stable. Or, on sait que la période (le temps d'un aller-retour)

d'oscillation d'un pendule ne dépend que de sa longueur si l'amplitude des oscillations est faible. Il semblerait que Léonard de Vinci ait été le premier à proposer l'emploi d'un pendule, appelé aussi



parfois balancier. Galilée l'a adopté, mais c'est avec **Huygens** que cette idée prend véritablement forme lorsqu'il montre que la période est rigoureusement constante si la

### Fonctionnement d'une horloge mécanique



### Au fil du temps

**1500 av. J.-C.**  
Invention de la clepsydre par les Égyptiens.

**viii<sup>e</sup> siècle**



Invention du sablier. Son utilisation ne s'est généralisée qu'au **v<sup>e</sup>** siècle.

**1656**

Huygens construit la première horloge à pendule.

**1671**



L'ajout de roues dentées permet au mouvement de compter les secondes les unes après les autres.

**1880**

Découverte de la piezoélectricité par Pierre et Jacques Curie.

**Vers 1930**

Apparition de l'horloge à quartz.

**Années 1950**

Mise au point de l'horloge atomique.

L'horloge atomique

**1** seconde d'écart en un million d'années

L'horloge la plus précise

masse pesante décrit non un arc de cercle mais un arc de cycloïde. Le pendule cycloïde bat ainsi avec une période constante. Cependant, comme indiqué plus haut, il s'amortit. Il faut donc l'entretenir à l'aide d'une force motrice si l'on ne veut pas qu'il finisse par s'arrêter. La force motrice, le moteur, est la gravité : c'est la chute d'un poids qui fournit l'énergie au pendule et assure l'entretien du mouvement. Mais pour des raisons évidentes, il faut éviter que le poids chute brutalement : il faut donc l'arrêter dans sa chute et transmettre l'énergie petit à petit, un peu à chaque oscillation. C'est le rôle de « l'échappement ». Il existe différents modèles d'échappement. L'un des plus répandus est l'échappement dit « à ancre » inventé vers 1670. Ancre, car l'organe qui assure cette fonction rappelle, par sa forme, une ancre. Les oscillations du pendule agissent sur l'ancre qui vient bloquer la chute du poids. Parallèlement, l'ancre transmet au pendule de l'énergie et entretient ses oscillations.

### Horloge à balancier spiral

Huygens fait une autre découverte, cette fois intéressante pour les petites horloges : celle du **balancier-spiral** réglant. Il s'agit d'un ressort en acier enroulé en spirale qui joue le rôle de moteur, à la place de la gravité. Son invention permet la réalisation de la première montre à spirale en 1675 par Isaac Thuret, maître-horloger.



### HORLOGES ÉLECTRIQUES

Par horloge électrique, on entend une horloge dans laquelle l'énergie nécessaire à l'entretien du fonctionnement est d'origine électrique.

### Horloge à diapason

On sait qu'un **diapason** vibre à fréquence constante. On peut donc l'employer comme régulateur. Et pour entretenir ses vibrations on peut employer l'électricité, plus précisément

l'action d'un électroaimant. Plus concrètement, le mouvement vibratoire du diapason engendre, par induction électromagnétique, un courant alternatif. Une fois amplifiée, l'intensité de ce courant permet l'entretien des vibrations par le biais du champ magnétique qui accompagne le courant et qui attire alternativement les branches du diapason. En résumé, le diapason est excité par un courant alternatif dont il pilote lui-même la fréquence.

### Horloge à quartz

La première horloge « à quartz » est apparue vers 1930. Le principe est similaire à celui de l'horloge à diapason, au sens où une vibration mécanique est entretenue par un

phénomène électrique. Si l'on comprime un **crystal de quartz** convenablement taillé, il développe sur



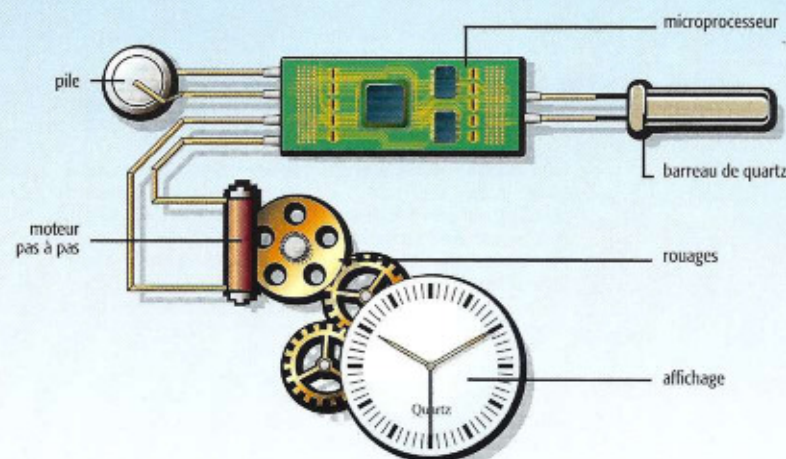
ses faces une tension électrique (un voltage). Inversement, si on y applique une tension, il se comprime. Si on inverse la polarité, au contraire, il se dilate. Ce phénomène porte le nom de piézoélectricité. L'idée de base consiste donc à faire vibrer un barreau de quartz électriquement et entretenir cette vibration grâce à la tension électrique qu'il développe. On le fait ainsi entrer en résonance en compensant les pertes énergétiques inévitables par l'énergie fournie par une pile. Les fréquences étant très élevées (de l'ordre de 10 kHz), il est nécessaire qu'un système électronique compte le nombre d'oscillations afin de donner la seconde. C'est le rôle du microprocesseur. Comme électroniquement il est très simple de diviser par deux, on a intérêt à choisir une fréquence égale à une puissance de deux : on choisit souvent 32 768 Hz (2<sup>15</sup>). Ensuite, le temps peut être affiché numériquement ou en faisant tourner une trottelle, cela est un détail. Grâce aux progrès de l'électronique, la fabrication d'une montre à quartz aujourd'hui ne coûte presque rien pour une très bonne précision (de l'ordre de la seconde par jour), si bien que le rapport qualité-prix est très bon, sans parler de l'encombrement et du poids qui sont ridiculement faibles. On peut difficilement imaginer pouvoir faire mieux. Une variante de la montre à quartz a pourtant vu le jour il y a quelques années seulement. Il s'agit de l'horloge et de la montre radio-pilotées qui sont remises à l'heure une fois par jour par onde radio, l'heure exacte étant donnée par une horloge atomique, évitant ainsi la dérive journalière d'une seconde.

Laquelle la fréquence du quartz est pilotée par le **césium**. L'idée consiste à « éclairer » dans un premier temps une vapeur d'atomes de césium

### HORLOGES ATOMIQUES

Les horloges atomiques ont été mises au point dès le milieu des années 1950, bien que le principe théorique fût déjà connu bien avant. Ce sont les étalons de temps par excellence. En effet, la Conférence générale des poids et mesures de 1967 a défini la seconde comme la durée égale à « 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133 ». Par définition donc, la seconde est « atomique ». Peu importe ce qu'est un niveau hyperfin. Ce qui est important à savoir est qu'un atome peut exister dans des états d'énergie différents, ces états étant séparés non pas de façon continue, mais discontinue, à la manière des marches d'escaliers (quantique). Le passage d'un état vers un autre de moindre énergie s'accompagne de l'émission d'une onde électromagnétique de fréquence  $f$  bien précise de sorte que la différence d'énergie  $E$  soit telle que  $E = hf$ ,  $h$  étant une constante (la constante de Planck).

## Fonctionnement d'une horloge à quartz



Inversement, le passage vers un état de niveau supérieur peut se faire par absorption de l'onde de fréquence  $f$ . Les deux niveaux d'énergie choisis pour définir la seconde sont tels qu'une oscillation de l'onde, soit une période, dure 1/9 192 631 770 de seconde. Par conséquent 9 192 631 770 périodes durent une seconde. D'où la définition. La précision de ces horloges est de l'ordre de la seconde d'écart en un million d'années !

### Principe d'une horloge atomique

Si on voulait résumer le principe d'une horloge atomique, on pourrait dire qu'il s'agit d'une horloge à quartz dans



capable d'absorber la fréquence 9 192 631 770 Hz, par une onde UHF produite par un générateur à quartz et possédant cette même fréquence ; puis, par des techniques de physique atomique, observer le nombre d'atomes ayant effectué la transition, c'est-à-dire ayant absorbé l'onde UHF. Si ce nombre est faible, cela signifie que la fréquence de l'onde UHF n'est pas rigoureusement égale à 9 192 631 770 Hz. On modifie donc légèrement cette fréquence UHF, jusqu'à ce que la proportion des atomes de césium qui effectuent la transition vers l'état d'énergie supérieure devienne maximale. À cet instant, on sait que le générateur est rigoureusement réglé sur 215 Hz : on détermine ainsi d'une manière extrêmement précise la seconde. Un moyen qui permet par exemple de déterminer la proportion d'atomes de césium excités consiste à regarder la transparence de la vapeur aux UHF. Si l'onde UHF traverse la vapeur, cela signifie que peu d'atomes de césium ont absorbé l'onde, c'est-à-dire que la fréquence UHF n'est pas

rigoureusement égale à 9 192 631 770 Hz. En revanche, la vapeur devient subitement opaque à la bonne fréquence.

Bien qu'extrêmement précise, l'horloge qui vient d'être décrite peut encore être améliorée. En effet, dans une vapeur chaude, les atomes possèdent une grande vitesse. En raison de leur vitesse, ils sont alors capables d'absorber l'onde même si la fréquence de celle-ci n'est pas rigoureusement égale à 9 192 631 770 Hz, car dans ce cas, selon que l'atome s'éloigne de l'onde ou va à sa rencontre, il « voit » une fréquence respectivement inférieure ou supérieure à celle émise. Par conséquent, en ralentissant les atomes on gagne en précision. Or, un des principaux axes de recherches en physique se situe actuellement dans le refroidissement atomique. Et c'est d'ailleurs dans ce cadre que **Claude Cohen-Tannoudji** s'est vu décerner le



prix Nobel de physique en 1997. Ce procédé est particulièrement utilisé dans les fontaines atomiques, les horloges les plus précises actuellement, environ 10 fois plus que les horloges atomiques à atomes froids, elles mêmes plus précises que les horloges atomiques à « atomes chauds ».

### Les fontaines atomiques

Quel que soit l'étalon considéré, le nombre d'atomes qui subit l'interaction avec l'onde UHF est d'autant mieux déterminé que la durée d'interaction dans la cavité est élevée. Dans les horloges atomiques, classiques ce temps de séjour est de 5 millisecondes environ. Afin d'allonger ce temps, environ un milliard (seulement) d'atomes ultrafroids sont piégés, confinés, dans six faisceaux lasers concurrents afin de réduire le plus possible leur vitesse d'agitation thermique. Une fois les atomes quasiment immobilisés à quelques millièmes de

degrés au-dessus du zéro absolu (-273 °C), ils sont lancés en direction de la cavité UHF, comme dans les étalons classiques, à cela près qu'ici la cavité est verticale. Cela s'impose en raison de la très faible vitesse des atomes qui, s'ils étaient lancés horizontalement, retomberaient vite sur le plancher de la cavité. Ils sont donc lancés vers le haut à 2 à 5 m/s, comme dans une fontaine. Les atomes montent et retombent, quittant la cavité après un séjour de 0,5 seconde, soit cent fois plus longtemps que dans une horloge atomique classique. La meilleure fontaine atomique actuellement en fonctionnement dans le monde, FO1, se trouve au Laboratoire primaire du temps et des fréquences, laboratoire du Bureau national de métrologie à l'observatoire de Paris. Une manière d'allonger encore davantage la durée de séjour des atomes dans la cavité UHF consiste à faire en sorte qu'ils ne tombent pas. Il suffit pour cela de se placer en apesanteur : c'est l'objectif du projet PHARAO ou Projet d'Horloge Atomique par Refroidissement d'Atomes en Orbite. Des tests conduits ont déjà été effectués à bord d'avions en vol parabolique où l'on obtient les conditions d'apesanteur. Une horloge à fontaine atomique devrait bientôt être installée à bord de l'**ISS**, la station spatiale internationale.



Les physiciens espèrent obtenir une stabilité de fréquence de 10<sup>-18</sup> seconde sur une journée, soit une dérive journalière d'un dix milliardième de milliardième de seconde !

### Utilité des horloges atomiques

Nous mentionnerons simplement que la précision du système GPS est étroitement liée à celle des horloges à bord des satellites : il faut en effet que toutes les horloges soient synchrones. Et ce synchronisme ne peut être obtenu qu'avec des horloges atomiques.