

Série : INSTRUMENTS SCIENTIFIQUES: UNE AVENTURE CAPTIVANTE !

Des clepsydres aux horloges :

le temps qui passe

12

La mesure du temps s'est perfectionnée sans cesse. Le cadran solaire, la clepsydre et le sablier ont eu leur période de gloire. Horloges et montres mécaniques sont restées longtemps des objets rares. De nos jours, montres et horloges à quartz, très précises, sont à la portée de tous. Et que dire de la stabilité des horloges atomiques ? Bref aperçu de cette quête de la précision, définitions à l'appui...

Rien n'est plus banal que de consulter sa montre. L'heure règle nos activités quotidiennes. Pourtant, la mesure du temps a mobilisé astronomes, mathématiciens, artisans, horlogers, ingénieurs et physiciens pendant des millénaires, avant d'arriver aux instruments modernes (à quartz, radioguidés puis atomiques, voire optiques) d'une fiabilité remarquable.

Le Soleil, l'eau et le sable

L'instrument scientifique le plus simple qui soit concerne la mesure du temps: c'est le **gnomon**, un bâton planté dans le sol au soleil. Pas étonnant qu'on le trouve partout: chez les Babyloniens, dès le 2^e millénaire avant J.C.; chez les Égyptiens, en Chine, en Grèce, à Rome, en Amérique précolombienne. Si l'on ajoute une graduation rayonnante, on a un **cadran solaire**. Ce qui est à souligner, c'est sa longévité, jusqu'au 19^e siècle, à cause du coût et du manque de précision des montres et horloges, mais aussi de la disparition de nombreux clochers et horloges de villages pendant la

Révolution française. Parmi les cadrans, l'**équinoxial** ou **équatorial** amène un progrès important: la division du jour en 24 heures égales. Un autre instrument apparaît pendant la Haute Antiquité: la **clepsydre** ou **horloge à eau**. D'abord simple cône gradué avec un trou pour laisser l'eau s'écouler selon un débit dosé, la clepsydre peut devenir une horloge avec engrenages, personnages, sonneries et même régulateur pour de petites rotations identiques, comme celles des Chinois Yi-Xing au 8^e siècle et Su Song au 11^e siècle. En Occident, dès le 6^e siècle, la vie quotidienne est rythmée au son des cloches des monastères, grâce aux clepsydres et cadrans solaires. Mais l'eau peut geler ou changer de volume en fonction de la température et rendre la clepsydre inutilisable ou très imprécise. En l'absence de soleil et la nuit, le cadran

Texte: Christiane DE CRAECKER-DUSSART • c.decraecker@skynet.be

Photos: **PhotoAlto/REPORTERS** (p.12), **Pirkheimer** (p.13), **J. ENNIS/Flick'r** (p.13), **E. DÍAZ I PUIG/Flick'r** (p.13), **SSPL/REPORTERS** (p.14), **P. SELIM** (p.14)

solaire est également inutile. Il faut attendre le 14^e siècle pour qu'apparaisse le sablier, les remplaçant avantageusement. De plus, il est facile à transporter: Christophe Colomb en aurait embarqués lors de ses voyages. Mais tous ces procédés ne sont pas fiables et ne répondent plus à l'intérêt grandissant, surtout dans les villes, pour la mesure du temps qui fuit. L'invention de l'**horloge mécanique** n'est pas loin et l'une de ses conséquences sera la généralisation de la division du jour en 24 parties égales.

Horloges, montres et... imprécisions

L'horloge mécanique apparaît vers 1300, quand on découvre le rôle du poids moteur et qu'on l'accompagne du mécanisme essentiel empêchant le poids de descendre trop vite: l'**échappement**. Le mouvement continu est transformé en mouvement discontinu à unités distinctes. L'horloge monumentale apparaît sur les églises et bâtiments publics: à Milan en 1335, Padoue en 1344, Courtrai, Mons et Malines à partir de 1362, Paris en 1372, Rouen en 1389, etc. Certaines sont sans cadran, mais avec sonneries et automates: on écoute le temps. D'autres ont un cadran avec 1 aiguille. Défauts de fabrication des engrenages, frictions et usure sont tels que l'horloge dérive souvent d'au moins 1 h/j (heure par jour) et doit être remise à l'heure avec... un cadran solaire !

À la fin du 14^e siècle, les améliorations amènent une imprécision d'1/4 h/j. De nouveaux mécanismes apparaissent: vers 1410, Brunelleschi inventait une horloge mue par un ressort moteur comprimé et placé dans un barillet ou tambour. Zach, en 1525, introduit la **fusée** permettant de maintenir la tension du ressort plus ou moins constante. L'horloge s'améliore: dents mieux étudiées, échappement ajusté. L'imprécision passe à quelques minutes par jour. Ces progrès amènent aussi la miniaturisation avec l'horloge de table, la pendulette, puis la montre. La première montre serait due à Henlein au début du 16^e siècle, mais la petitesse des pièces rend le travail difficile et l'imprécision reste très élevée: 1 h/j ! C'est encore un bijou, l'heure juste n'étant pas encore essentielle pour vivre...

Galilée, Huygens et le pendule

Connaissant la loi de l'**isochronisme** du **pendule** décrite par Galilée en 1638, Huygens calcule la longueur nécessaire pour qu'il batte la seconde et fait construire la première horloge à pendule en 1657. Les progrès surprennent: elle ne dévie que de quelques secondes par jour et peut donc avoir 2 aiguilles ! En 1674, il améliore aussi la montre avec un système régulateur à balancier-**spiral**. L'aiguille des minutes prend son sens ici également et est introduite par Quare en 1690. Aux 18^e et 19^e siècles, la course à la précision continue: nouveaux mécanismes d'échappement pour adoucir les oscillations (Graham); réduction des frictions des engrenages avec les premières machines-outils; correction des effets liés à la dilatation grâce au balancier bimétallique dû à Harrison. N'oublions pas ses fameux chronomètres de marine: depuis le H1 en 1736 jusqu'au H4 en 1759, le plus précis jamais construit et qui permet enfin de calculer la longitude en mer (voir *Athena* n° 272, pp. 13-15).

Les horloges sont de plus en plus précises: $1/10 = 10^{-1}$ s/j (seconde par jour). Les horlogers, entre autres Sarton (1748-1828) à Liège, font preuve d'imagination et de sens artistique: cadrans multiples ou tournants, carillons d'intérieur... Les montres progressent aussi: nouveau balancier, diminution de la taille (disparition de la fusée avec le **calibre de Lépine**, vers 1770), remontage automatique (Sarton,...), remontoir (au lieu d'une clé) dû à Philippe en 1844. Une autre avancée est la découverte, en 1895, de l'invar par Guillaume (prix Nobel en 1920). Cet alliage fer-nickel, quasi insensible aux variations de températures, élimine (presque) totalement le problème de la dilatation et permet une précision d' $1/100 = 10^{-2}$ s/j. À la même époque, les montres, fabriquées de plus en plus industriellement, se démocratisent: en 1865, Roskopf conçoit une montre bon marché, au mécanisme simple mais solide. La montre-bracelet apparaît mais ne remplace la montre à gousset qu'au 20^e siècle. Aiguilles et chiffres deviennent lumineux grâce au phosphore et au radium.



Cadran solaire horizontal de Nicolas du Pineau, manoir de Montergon à Brain-sur-Longuenée (1719) (style à 47,35°, latitude locale; heure solaire = 10 h 30).

Une des premières montres, attribuée à Peter Henlein (vers 1510).



13

Big Ben, à Londres, date de 1859.

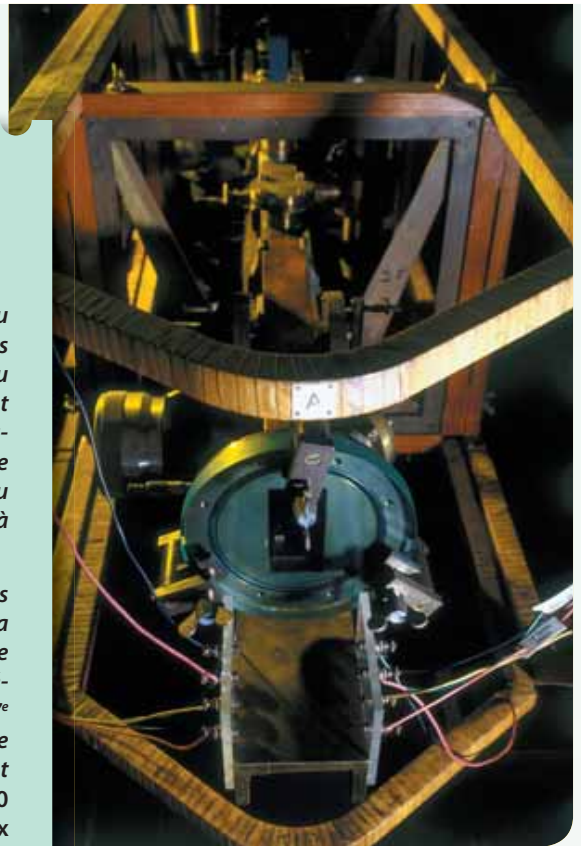


1^{re} horloge atomique au césium de Essen et Parry (1955).

Le temps et la seconde : définitions et métrologie

La précision des horloges ne fait que s'accroître. La notion même du temps a dès lors dû évoluer. Jusqu'au 19^e siècle, on règle horloges et montres sur le soleil de midi, donc localement. L'apparition du chemin de fer impose de disposer d'une heure identique dans un pays et au-delà. En 1884, on découpe le monde en 24 fuseaux horaires de 15° chacun, le méridien de Greenwich étant choisi pour la longitude 0 et l'heure du fuseau de Greenwich étant l'heure GMT (Greenwich Mean Time) ou Temps universel (TU) ou Temps civil de Greenwich (qui se compte de 0 à 24 h à partir de minuit).

On sait, depuis les années 1930, que la rotation axiale de la Terre n'est pas régulière. D'où les variations du jour en cours d'année. La seconde valant la 86 400^e partie du jour solaire moyen n'est plus exacte. En 1960, on la calcule sur la durée de la révolution de la Terre autour du Soleil (temps des éphémérides), 1900 étant l'année de référence: elle en est la 31 556 925,9747^e partie. Mais dès 1967, avec la diffusion des horloges atomiques, une nouvelle définition s'impose: la seconde SI (Système International) est désormais basée sur l'atome de césium: c'est la «durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux (énergétiques) hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133» (voir Athena n° 282, pp. 38-40). Les astres et astronomes ne définissent plus le temps et la seconde, mais bien les atomes et physiciens.



Parry en 1955. Sa précision passe à 10^{-7} , puis 10^{-9} s/j vers 1970. En 1995, avec la **fontaine d'atomes froids** ($t^\circ = 10^{-4}$ K) de césium, c'est 10^{-10} s/j (voir Athena n° 285, pp. 12-15). À l'ULg, on met au point une horloge atomique du type maser à hydrogène (voir Athena n° 280, p. 42-43). Le projet PHARAO (Projet d'Horloge Atomique par Refroidissement d'Atomes en Orbite), de l'ESA et du CNES, vise à embarquer en 2016 une horloge à atomes froids de césium dans l'ISS (International Space Station), en micropesanteur. Cette horloge PHARAO aurait une précision de 10^{-11} s/j: on perdrait 1 seconde tous les 300 millions d'années ! Ce n'est pas fini. Des **horloges atomiques optiques** devraient arriver à une précision 100 fois supérieure: 10^{-13} s/j, une erreur d'1 seconde sur 15 milliards d'années, plus que l'âge de l'univers !

Pourquoi une telle précision ? Diverses expériences scientifiques deviennent possibles: tests de la relativité; niveau d'énergie des atomes; mesure de la gravité terrestre; nouvelle définition du mètre (voir Athena n° 214, pp. 84-88), d'où mesure de la distance exacte Terre-Lune, de la hauteur des vagues et donc prévision des tsunamis; observation du déplacement des plaques tectoniques; cartographie des fonds marins, etc. Autre application omniprésente: le positionnement **GPS** grâce aux horloges atomiques embarquées dans les satellites, dont bientôt PHARAO et l'ISS. ■

14

Électricité, quartz et atomes

Vers 1840, les horloges électriques apparaissent: simple remontage électrique ou électroaimant apportant une impulsion régulière au pendule ou quand l'amplitude des oscillations diminue. À l'ère du télégraphe et du chemin de fer, on imagine l'intérêt de telles horloges: en les reliant, on peut les synchroniser pour avoir la même heure en divers endroits. Les recherches sur les possibilités du **quartz** et de la **piézo-électricité**, pour des horloges plus précises, aboutissent en 1927 à la 1^{re} **horloge à quartz** fabriquée par Marrison, avec une précision de 2 ms (millisecondes) = $2 \cdot 10^{-3}$ s/j. Ceci permet de mesurer les variations de la vitesse de rotation axiale de la Terre en 1930 ! À la fin des années 1960, les montres sont aussi régulées par quartz. Leur précision: 1 microseconde = 10^{-6} s/j, d'où leur succès: 90% des montres actuelles seraient à quartz. Arrivent ensuite les instruments radioguidés par satellite, encore plus stables. Une nouvelle étape est franchie avec la première **horloge atomique** ou **moléculaire** fiable au césium, mise au point par Essen et

+

Pour en savoir plus:

- *Histoire de l'heure en France*, par J. Gapaillard, Vuibert, Paris, 2011.
- *Une histoire illustrée de la mesure du temps*, par J. Jandaly, Vuibert, 2009.
- *Les instruments des sciences*, par H. Michel, de Visscher, 1980.
- *Instruments scientifiques à travers l'histoire*, par É. Hébert, Ellipses, Paris, 2004.
- *L'invention du temps*, Les Cahiers de Science & Vie, janvier 2013.
- *La mesure du temps à travers les âges*, par A.M. Berryer, MRAH, Bruxelles, 1974.
- *La mesure du temps dans les collections belges*, SGB, Bruxelles, 1984.
- *Le patrimoine campanaire de Wallonie*, Institut du patrimoine wallon, Namur, 2010.
- <http://www.astro.oma.be>
- <http://smc.cnes.fr>

GLOSSAIRE

(Bastin, 2004; Berryer, 1974; Berthon, 2004; Biémont, 2000; Gapillard, 2011; Jandaly, 2009; Larousse, 2013; Rival, 2005)

Types d'instruments

Cadran solaire	Surface à graduation rayonnante relative aux heures du jour. La projection de l'ombre d'une tige (style) au Soleil indique heure, date des solstices, direction nord-sud.
Cadran solaire équinoxial ou équatorial	<i>Cadran solaire</i> le plus simple, à graduations équidistantes, placé dans le plan de l'équateur et le style perpendiculairement, dans l'axe de la Terre, vers l'Étoile Polaire. L'ombre se déplace de 15°/h (360°/24 h), quels que soient l'heure et le jour de l'année.
Calibre de Lépine	Système de montre supprimant <i>fusée</i> et chaîne et les remplaçant, avec double platine et piliers, par des pièces distinctes de forme allongée (ponts). Permet de dissimuler le balancier et de le placer à côté du reste du mécanisme. Ainsi, la montre est très plate.
Clepsydre ou Horloge à eau	1 ^{er} instrument mesurant des durées ou intervalles de temps (y compris en l'absence de soleil). Basé sur l'écoulement d'eau et la vidange d'un réservoir gradué (bol, cône) goutte après goutte. Divise la nuit comme le jour en 12 fractions égales.
Échappement	Élément transmetteur, ralentisseur et régulateur d'une horloge permettant de fractionner le temps et produisant le tic-tac. Système interrompant régulièrement la chute du poids d'une <i>horloge mécanique</i> ancienne et contenant puis laissant s'échapper tour à tour la force exercée par celui-ci sur le mécanisme.
Fontaine d'atomes froids	<i>Horloge atomique</i> faisant appel à des atomes froids piégés par faisceaux laser.
Fusée	Pièce en forme de cône, creusée de bas en haut d'une rainure en spirale destinée à recevoir la corde, puis la chaînette reliée au barillet et au ressort principal. Équilibre et régularise la force de développement du ressort moteur.
Gnomon	<i>Cadran solaire</i> primitif constitué d'une tige (style) dont l'ombre se projette sur une surface plane. Longueur et direction de l'ombre servent à diviser le jour.
Horloge/montre à (cristal de) quartz	Dans un 1 ^{er} circuit électronique résonateur, le cristal de <i>quartz</i> vibre mécaniquement de façon régulière et produit un signal électrique oscillant à même fréquence. Un 2 ^e compte oscillations et secondes. Un 3 ^e compense les variations dues à la température.
Horloge atomique ou Horloge moléculaire	Horloge fonctionnant à partir de certains atomes (césium), dont les vibrations servent d'étalon de temps. Pilote l' <i>horloge à quartz</i> pour l'empêcher de dériver à long terme. Basée sur la sélectivité d'absorption de radiation par les atomes pouvant émettre une lumière cohérente par laser (voir <i>Athena n° 285</i> , pp. 12-15).
Horloge atomique optique	Projet d' <i>horloge atomique</i> utilisant d'autres éléments que le césium (ion aluminium, atome de calcium,...) sensibles aux radiations du visible/UV. D'où l'intérêt pour les satellites (<i>horloge GPS</i>), une probable nouvelle notion de la durée,...
Horloge GPS	Un récepteur GPS a 1 horloge ayant la précision d'une <i>horloge atomique</i> au césium. Chaque satellite contient plusieurs horloges atomiques de précision synchronisées par stations terrestres de contrôle des trajectoires et de fiabilité. Leur stabilité est meilleure ainsi que la précision de la mesure de distance et de position (de 1 m à 1 cm).
Horloge mécanique	Horloge ayant: organe moteur (poids ou ressort), organe de transmission ou rouage, <i>échappement</i> , organe régulateur (base de temps: <i>pendule</i> ,...), affichage et remontoir.
Isochronisme	Propriété d'un mouvement (horlogerie,...) s'effectuant en intervalles de temps égaux. La durée d'une oscillation du <i>pendule</i> ou période (T) ne dépend que de sa longueur (l ou L) et non de sa masse (m).
Pendule	N.m. Corps solide suspendu à un point fixe et oscillant sous l'action de la pesanteur par <i>isochronisme</i> . N.f. Horloge d'intérieur.
Piézo-électricité	Apparition de charges électriques à la surface de certains cristaux soumis à une contrainte (effet direct); variation des dimensions de ces cristaux quand on leur applique une tension électrique (effet inverse).
Quartz	Silice (SiO ₂) cristallisée. Peut vibrer naturellement à certaines fréquences. Composant électronique oscillant à une fréquence précise et stable, utilisant la <i>piézo-électricité</i> .
Spiral	N.m. Mince lame de ressort d'acier enroulée en spirale et fixée à la platine ou au pont du balancier (coq) et à l'axe du balancier par une virole. En se détendant, il fait tourner le barillet imprimant sa force aux rouages. Supprime les poids encombrants et permet de miniaturiser l'horloge, qui devient portable sous forme de montre.