

La métrologie du temps

Dès l'aube de l'humanité l'homme a cherché à mesurer le temps pour prévoir le retour des saisons froides ou chaudes afin, par exemple, d'assurer sa subsistance. C'est l'alternance des jours et des nuits, donc le mouvement apparent du soleil dans le ciel, qui va, entre autre, s'imposer à lui. Ce sont donc des considérations pratiques qui ont guidées les premières recherches sur le temps. Mais le concept de temps est aussi une question scientifique et philosophique de la plus haute importance. Cette quête fondamentale de connaissances conduit aujourd'hui les scientifiques à des recherches en physique de très haut niveau.

Historiquement on peut dire que la mesure du temps est essentiellement de nature astronomique. Elle ne deviendra l'affaire des physiciens que beaucoup plus tard, dans le courant du vingtième siècle.

La mesure du temps au cours des âges

La maîtrise de la mesure du temps passe par des développements techniques importants qui ont conduit à des mesures de plus en plus précises.

Il semble que le comptage des lunaisons, durée entre deux nouvelles lunes, soit à la base de la majorité des calendriers préhistoriques. Ces calendriers étaient transcrits sur des os gravés, des galets aziliens (découverts en 1887 par E. Piette au Mas d'Azil en Ariège) ou des mégalithes ([Carnac en Bretagne](#), Stonehenge en Grande Bretagne et Knowth en Irlande).



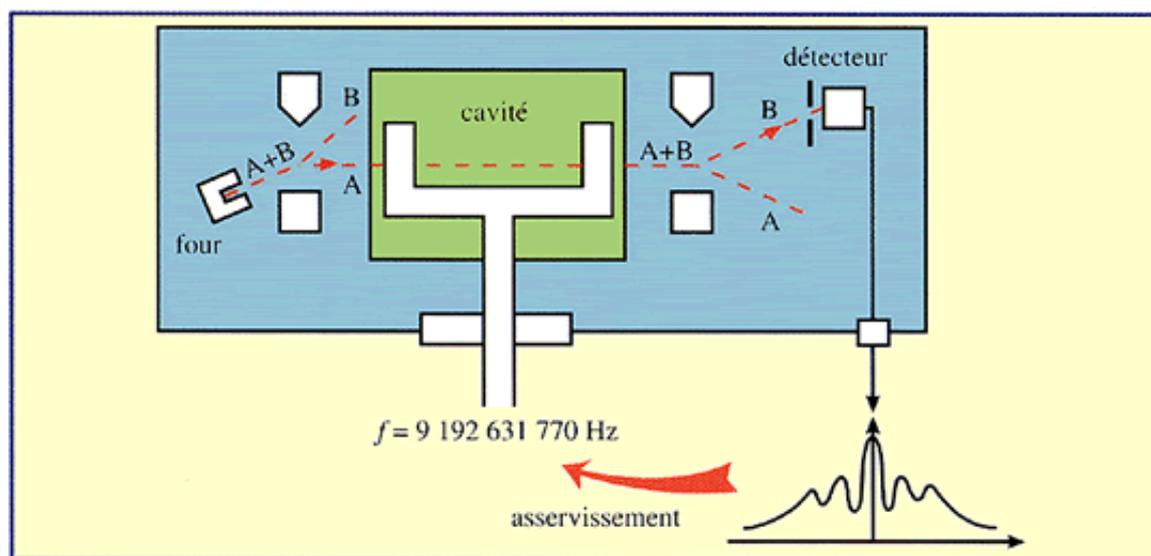
Le site de Carnac en Bretagne

L'homme avait par ailleurs remarqué depuis longtemps que l'ombre d'un bâton planté dans le sol (gnomon) était fonction de la position du soleil dans le ciel, donc de l'heure de la journée. Le plus ancien cadran solaire qui nous soit parvenu est un cadran égyptien qui date de 1500 ans avant Jésus-Christ mais ce n'est véritablement qu'à partir du XIV^{ème} siècle que les cadrans à style incliné vont voir le jour (le style est une tige métallique dont l'ombre marque l'heure sur le cadran).



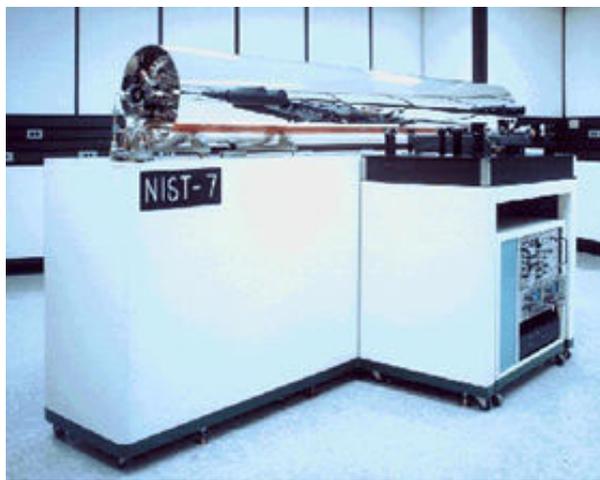
Un cadran solaire horizontal (cliquez sur l'image)

Les égyptiens avaient par ailleurs inventé d'autres systèmes pour mesurer le temps: La clepsydre ou horloge à eau est l'un d'entre eux. La plus ancienne est conservée au musée du Caire et a été construite en 3500 avant Jésus-Christ sous le règne d'Aménophis III. Le sablier est un autre instrument de la mesure du temps dont la découverte est attribuée à un moine de Chartres au VIII^{ème} siècle. Il apparaît tardivement car il nécessite tout le savoir faire d'un maître verrier, l'écoulement régulier du sable étant plus difficile à maîtriser que celui de l'eau. Les garde-temps (horloge de précision servant de référence pour la conservation de l'heure) apparaissent eux aussi très tard, au XIII^{ème} siècle, à cause de la complexité de leur mécanisme. Une horloge à poids est décrite en 1276 sans laisser de traces mais la véritable horloge mécanique apparaît réellement en 1370 avec un système de régulation appelé foliot. En 1638 Galilée publie la théorie du pendule et imagine la première horloge à poids et à pendule. D'autres systèmes mécaniques suivront qui permettront d'améliorer progressivement la qualité des horloges notamment dans le but de pouvoir naviguer sur toutes les mers du globe: Ressort moteur, horloge à balancier, échappement à encre, ressort de rappel, horloge de marine... Au XVIII^{ème} siècle en effet, la mesure des latitudes à l'aide d'instruments astronomiques ne pose pas de problèmes majeurs. Il n'en va pas de même de la longitude qu'on déduit de la position du soleil grâce à la lecture de l'heure donnée par une horloge. Un dérive de cette horloge d'une minute par jour provoque au bout d'un mois une erreur de position de 500 km rendant impossible la navigation près des côtes. En 1761 l'horloge de J. Harrison possède une dérive de l'ordre de cinq secondes au bout de neuf semaines grâce à l'annulation partielle de certains effets thermiques. La réalisation la plus achevée de ces oscillateurs mécaniques fut celle des horloges à pendule d'observatoires qui avaient atteint leur degré de perfectionnement ultime au début du vingtième siècle. C'est à cette époque que les premiers oscillateurs piézo-électriques à quartz voient le jour grâce aux découvertes de P. Curie (piézoélectricité en 1880) et de de Forest (amplificateur électronique, triode, en 1907). En 1955 le premier [étalon primaire de fréquence à jet de césium](#) a vu le jour au NPL (National Physical Laboratory, Grande Bretagne).



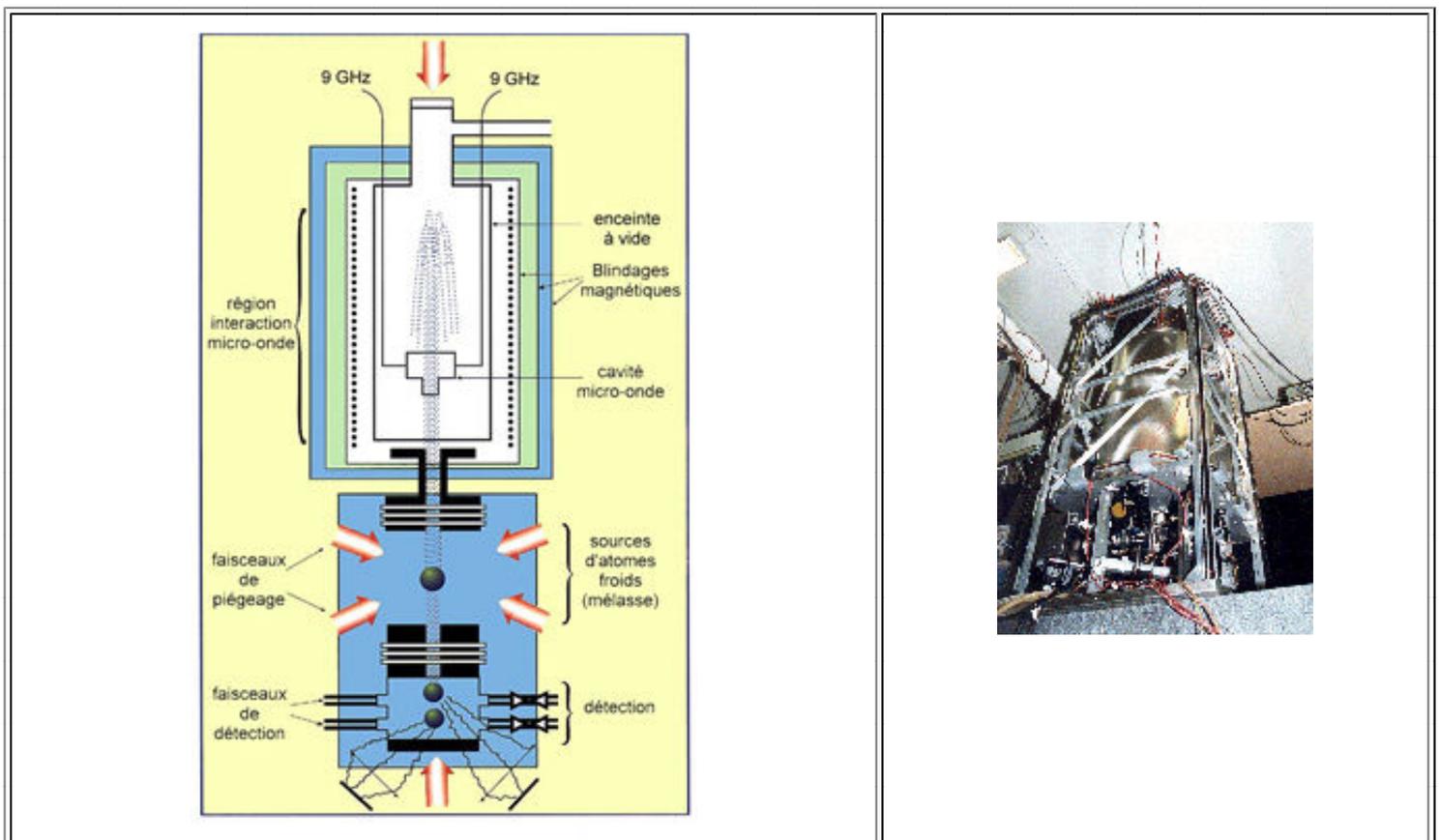
Principe d'un étalon primaire de fréquence à déflexion magnétique

Les étalons primaires de fréquence à jet de césium sont des instruments qui permettent une réalisation de la seconde telle qu'elle est définie dans le système international d'unités (SI). Il existe actuellement une dizaine d'étalons de ce type, qu'ils soient à déflexion magnétique ou à pompage optique (BNM-LPTF en France, [PTB](#) en Allemagne, [NIST](#) aux Etats Unis d'Amérique, NRLM au Japon).



L'étalon à pompage optique NIST 7

Les meilleures horloges atomiques commerciales sont actuellement basées sur cette technologie (une horloge est en quelque sorte un étalon de fréquence qui accumule au cours du temps les secondes qu'il génère afin de construire une échelle de temps semblable à celle de nos montres). Les techniques de refroidissement d'atomes par laser ont valu le prix Nobel de physique 1997 au professeur C. Cohen-Tannoudji. Une des applications des travaux sur les [atomes froids](#) concerne les horloges atomiques qui tirent parti de la faible vitesse de déplacement de ces atomes. Cette faible vitesse permet d'observer les atomes pendant des temps longs d'où une meilleure précision de mesure. C'est à l'heure actuelle la technique qui permet de fabriquer le meilleur étalon primaire de fréquence du monde qui se trouve au [BNM-LPTF](#) à l'[Observatoire de Paris](#).



La fontaine atomique du BNM-LPTF

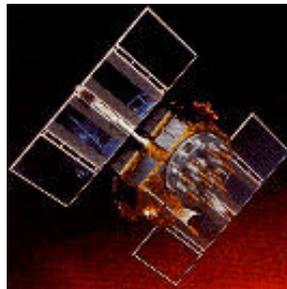
Le BNM-LPTF participe également au Projet d'horloge atomique par refroidissement d'atomes en orbite [PHARAO](#). D'autres horloges existent encore qui sont toutes basées sur des principes de physique atomique: Les masers (effet laser en ondes radio) à hydrogène, les horloges à cellule de rubidium, à ions mercure.

Le cadre théorique de la mesure du temps

Le cadre théorique de la mesure du temps a bien sûr évolué au cours de l'histoire de l'humanité. Le modèle newtonien, qui était la référence jusqu'au début du XX^{ème} siècle, admet l'existence d'un espace et d'un temps absolus. A la suite de diverses expériences d'optique et d'électrodynamique (Fizeau, 1849, Foucault, 1850, électrodynamique de Maxwell en 1869, mesure de la vitesse absolue orbitale de la Terre par Michelson, 1881, puis Michelson et Morley, 1887) le modèle newtonien a été pris en défaut. Ce n'est qu'en 1905, dans le cadre de la théorie de la relativité restreinte d'[Einstein](#), que les résultats de ces expériences pourront être expliqués. La relativité restreinte est cependant une théorie qui ne prend pas en compte les forces gravitationnelles engendrées par les masses situées dans notre univers. La théorie de la relativité générale d'Einstein s'applique, elle, à un monde réel où masses et énergie trouvent leur place. C'est le cadre théorique actuel le plus large de la [métrologie du temps](#). Les diverses échelles de temps réalisées par des méthodes astronomique ou physique ont pour cadre ces différents modèles théoriques. L'année 1967 a été une période charnière dans l'histoire de la mesure du temps puisque la seconde du système international a été définie à partir d'un phénomène physique et non plus à partir du mouvement des astres: "*La seconde est la durée de 9192631770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133*". Les notions concernant les échelles de temps [astronomiques](#) ou [atomiques](#) sortent du cadre de cette brève présentation mais les ouvrages cités dans la bibliographie ainsi que les divers liens apporteront de plus amples informations.

Les comparaisons continentale et intercontinentale des horloges atomiques

Il existe de nombreux [organismes](#) dans le monde qui possèdent des horloges atomiques ou des étalons primaires de fréquence. Bien sûr chacun de ces organismes souhaite [comparer ses propres instruments à ceux des autres](#) à des fins d'évaluation et d'amélioration de leurs qualités métrologiques ou simplement pour participer au calcul du temps atomique international, [TAI](#). La méthode la plus classique pour comparer des horloges distantes consiste à employer les satellites du Global Positioning System, [GPS](#).



Un satellite du GPS

Le GPS est un système militaire de radionavigation constitué d'un ensemble de satellites en orbite à 20000 km autour de la Terre. Chaque station équipée d'une des horloges à comparer reçoit les signaux d'un satellite du GPS. Les temps d'arrivée des signaux sont datés grâce à l'horloge de la station réceptrice alors que les temps d'émission de ces signaux par un satellite quelconque sont datés dans l'échelle de temps de l'horloge embarquée par ce satellite. Un algorithme permet de faire la correspondance entre l'échelle de temps du satellite et le temps du GPS. En faisant une simple différence des observations effectuées aux mêmes instants dans les deux stations le temps du GPS disparaît et il est ainsi possible d'obtenir la différence de lecture des horloges des deux stations.

Applications de la métrologie du temps

Toutes les études entreprises en métrologie du temps ont bien sûr des applications. Dans le domaine de la recherche fondamentale on peut citer les tentatives de raccordement des unités du SI à la définition de la seconde car c'est l'unité qu'on sait, de loin, le mieux réaliser (incertitude relative de l'ordre de 10^{-15}). Certaines constantes

de la physique peuvent être déterminées par la seule mesure de la fréquence de phénomènes physiques, on peut alors obtenir leur valeur avec une très faible incertitude: La constante de Rydberg, le facteur de Landé de l'électron et la constante de structure fine en sont quelques exemples. La métrologie du temps a également un impact sur la physique atomique par le biais de la vérification de la linéarité de la mécanique quantique (équation de Schrödinger) et par sa contribution à la connaissance de certaines propriétés atomiques et moléculaires. La mesure du temps intervient également dans les tests des modèles de structure de l'espace-temps et de la gravitation par l'utilisation directe ou indirecte des étalons atomiques de temps. La finalité de ces tests est la discrimination des différentes théories de la gravitation, la relativité générale d'Einstein n'étant qu'une théorie parmi d'autres. La métrologie du temps trouve aussi sa place dans bon nombre d'applications de positionnement, de géodésie ou de navigation: Le système GPS en est un exemple, le GLObal NAVigation Satellite System (GLONASS) ainsi que les systèmes [DORIS](#) (Détermination d'orbite et radiopositionnement intégrés par satellites) et [PRARE](#) (Precise Range Rate Equipment) en sont d'autres. La technique de radio-interférométrie à très longue base dite [VLBI](#) (Very Long Baseline Interferometry) trouve des applications dans l'étude de la [rotation de la Terre](#) et dans la formation des [systèmes de référence](#) céleste et terrestre.



Le radiotélescope de Fairbanks (station VLBI)

Les mesures VLBI font appel à la stabilité de fréquence des masers à hydrogène présents dans les stations d'observation: c'est le domaine de la métrologie du temps. Les [pulsars millisecondes](#) sont des objets dont l'observation a démontré que leur stabilité de fréquence pouvait peut-être rivaliser avec la stabilité des meilleures échelles de temps atomique (TAI, TT(BIPM),...). Des [études](#) de très longue haleine sont en cours pour connaître la réponse à cette question. La métrologie du temps est doublement présente dans ces recherches. Premièrement parce que les temps d'arrivée des impulsions radio émises par ces astres sont datés par rapport à une horloge atomique présente dans la station d'observation. Deuxièmement parce qu'il faut raccorder cette horloge aux meilleures échelles de temps atomique à des fins de comparaison.

La formation des enseignants à l'Observatoire de Paris

Pendant l'année scolaire 1999/2000 l'Observatoire de Paris propose aux enseignants des écoles, collèges et lycées des [stages](#) dont le thème général est le TEMPS. Ces stages qui sont également ouverts aux étudiants d'IUFM se dérouleront, dans le cadre des mercredis de Meudon à l'Observatoire de Meudon et, pour la journée du 7 juin 2000, à l'Observatoire de Paris. Une journée consacrée à un panorama de l'astronomie/astrophysique (26 janvier 2000) permettra également d'aborder ce thème qui fait maintenant également partie du programme de physique des lycées pour l'année 1999/2000 (BOEN HS-6 du 12 août 1999). Divers sujets seront abordés durant ces journées: l'histoire de la mesure du temps, les calendriers, les phénomènes astronomiques périodiques (alternance des jours et des nuits, phases de la lune, saisons), les instruments de la mesure du temps, le fonctionnement d'une horloge atomique, les applications modernes de la métrologie du temps, une visite du Laboratoire primaire du temps et des fréquences du Bureau national de métrologie à l'Observatoire de Paris (fontaine atomique, étalons primaires de fréquence, horloge parlante, horloges qui participent au calcul du temps atomique français, TA(F), et du TAI), la construction de cadrans solaires simples (primaire/collège) et plus complexes (lycées)... D'une façon plus générale des échanges entre participants seront encouragés afin de mettre au point des séances de travaux pratiques dédiées aux élèves. Les thèmes abordés pourront éventuellement

déborder le cadre de la métrologie du temps en direction de la métrologie de l'espace (mesure du rayon de la Terre par la méthode d'Eratosthène, mesure de la distance Terre-Lune ou Terre-Mars... tous ces exemples d'activité étant susceptibles de mettre en jeu les Technologies de l'information et de la communication dans l'enseignement (TICE)). Le texte ci-dessus présente un résumé succinct des différents thèmes qui seront abordés. Pour aller plus loin les quelques ouvrages ci-dessous pourront être consultés avec profit car ils sont à la base du texte précédent et ils constituent en même temps le support des interventions auxquelles vous pourrez assister à l'Observatoire. La page du [NIST](#) concernant l'histoire de la mesure du temps peut aussi être consultée... en anglais (transversalité des compétences).

Bibliographie

Calendriers et chronologie

J. P. Parisot, F. Suagher

Ed. Masson

Les fondements de la mesure du temps. Comment les fréquences atomiques règlent le monde

C. Audoin, B. Guinot

Ed. Masson

Gnomonique moderne

D. Savoie

Ed. Société astronomique de France

Introduction aux éphémérides astronomiques. Supplément explicatif à la connaissance des temps

L. L. Simon, M. Chapront-Touzé, B. Morando, W. Thuillot

Les éditions de physique

Echelles de temps atomiques

M. Granveaud

Ed. Chiron

[François Taris](#)