



27 mai 2024

Workshop laser
**Spacepole
d'Uccle**

27 mai 2024

Assemblée
Générale
UCCLE

NEWSLETTER 8 - Vers l'infiniment précis ...

Comment les horloges optiques redéfinissent le temps

Bien que le temps soit un concept compliqué à définir, sa mesure est indispensable à l'organisation de nos sociétés à bien des égards. Dans notre vie de tous les jours, nous pouvons nous contenter de montres indiquant l'heure correcte à quelques secondes près, pour ne pas rater son train par exemple. Mais certaines applications sont bien plus exigeantes en termes de stabilité et de précision. Entre autres, les horloges des différentes places boursières doivent être synchronisées entre elles avec une précision inférieure à la centaine de microsecondes afin de garantir l'intégrité des transactions (norme MiFID II en Europe), en particulier pour le trading haute fréquence. Les télécommunications, les échanges de données et la géolocalisation, faisant désormais partie intégrante de nos quotidiens, imposent des conditions de synchronisation encore plus strictes. À titre indicatif, la technologie GPS repose sur la mesure du temps de transit d'un signal radio entre 3 satellites et un récepteur (votre téléphone par exemple) afin de vous géolocaliser. Une erreur d'une seule nanoseconde sur cette mesure entraîne une incertitude de 30 cm sur la position. Chaque satellite intègre sa propre horloge atomique, ayant une dérive de l'ordre de 10^{-13} par jour. Les horloges à quartz, présentes dans nos téléphones portables, présentent quant à elles une dérive de l'ordre de la microseconde par jour, imposant l'usage d'un quatrième satellite pour résoudre les problèmes de synchronisation des horloges.

En pratique, une bonne horloge est celle qui offre une mesure du temps aussi fidèle et stable que possible. Autrement dit, il s'agit d'une horloge minimisant le rapport suivant: $\Delta T/T$ avec ΔT les fluctuations de l'horloge durant la période T . Dans cette Newsletter, nous allons voir comment l'avènement des horloges atomiques basées sur des transitions optiques est en train de révolutionner la mesure du temps, avec des rapports $\Delta T/T$ excellant par plus de 3 ordres de grandeur les horloges atomiques actuelles utilisant des transitions dans le domaine micro-ondes, ouvrant la voie aux communications longues distances et à la navigation spatiale, mais aussi à supporter les recherches en physique (détection d'ondes gravitationnelles, variation hypothétique des constantes physiques au cours du temps, tests de la relativité restreinte, etc.).

Nous verrons également comment l'usage des peignes de fréquence (qui ne sont rien d'autre que des lasers à verrouillage de phase) nous permet de faire le lien entre les fréquences associées aux horloges optiques (plusieurs centaines de THz) et celles associées aux horloges atomiques fonctionnant dans le domaine RF ou micro-ondes (environ 10 GHz), reliant ainsi les différents standards.

Mais avant de s'atteler à ce programme chargé, revenons un peu en arrière avec la genèse de la mesure du temps. Les premiers hommes organisaient déjà leur temps en fonction du lever et du coucher du jour (rotation de la Terre autour de son axe), mais également en fonction des saisons (rotation de la Terre autour du Soleil) ou en fonction du cycle de la Lune (rotation de la Lune autour de la Terre). Il y a environ 5500 ans, les Égyptiens faisaient déjà usage de cadrans solaires pour subdiviser la journée en périodes plus courtes (Figure 1). Il est à noter que ces premières mesures du temps répondaient déjà à la définition de standard, car elles étaient accessibles par tous, indépendantes et fiables (impossibilité d'arrêter ou perdre le temps). Cependant, elles n'étaient pas précises, du fait de l'ellipticité de la trajectoire de la Terre autour du Soleil, par l'inclinaison de l'axe de la Terre par rapport à l'écliptique, etc. Ces références de temps ont cependant deux points communs avec nos références actuelles : elles reposent sur le principe de comptage d'un mouvement périodique et elles reposent sur la lumière pour sonder celui-ci.

24 et 27 février 2025

Formation
Sécurité laser
**LIEGE SCIENCE
PARK**

28 mars 2025

Conseil d'
Administration
UCLouvain

Membre de l'EOS (European Optical Society)

c/o Centre Spatial de Liège — Parc Scientifique du Sart-Tilman
Avenue du Pré Aily — B-4031 ANGLEUR - Belgium — Tél. +32 (0)4/382 46 00
www.promoptica.be

Février
2025

Entre l'avènement des standards modernes (horloges atomiques) et l'emploi des cadrans solaires, les références de temps ont fait fi de la lumière durant plusieurs siècles. À quelques exceptions près, elles reposaient malgré tout toujours sur l'observation et le comptage d'un mouvement périodique supposé constant. En particulier, Galilée mit en évidence au 17^{ème} siècle l'isochronisme des oscillations de faible amplitude d'un pendule. Christian Huygens réalisa alors la première horloge à partir de celui-ci quelques années plus tard, faisant du pendule la pierre angulaire des horloges durant plusieurs siècles durant lesquels les horloges furent améliorées pour pallier les défauts menant à une dérive en fréquence de celles-ci (minimisation des frottements, compensation des changements de période causés par l'élongation/contraction du pendule en fonction de la température, etc.). Dans les années 1920, les pendules les plus stables présentaient des dérives en fréquence de l'ordre de la milliseconde par jour. Ces horloges étaient complexes, mais surtout, elles étaient insuffisantes pour satisfaire les besoins de plus en plus exigeants des entreprises de télécommunication, en particulier pour augmenter le multiplexage des lignes de communication et l'allocation des bandes de fréquences. C'est dans ce contexte que furent développées les résonateurs à quartz à la fin des années 1920. Ces résonateurs reposent sur l'effet piézoélectrique des cristaux de quartz pour transférer la stabilité en fréquence de leur résonance mécanique au circuit électrique utilisé pour leur excitation. À la fin des années 1930, ces résonateurs pouvaient atteindre des stabilités en fréquence de l'ordre de 10^{-10} et pouvaient servir à garder le temps. Cependant, en plus d'être limités à des fréquences de résonance de l'ordre 50 MHz et d'avoir une fréquence de résonance propre variant de cristal en cristal (entre autres fonction de la forme et la taille), les cristaux étaient soumis au vieillissement, aux variations de température, de pression et d'humidité ; menant inévitablement à une dérive de la mesure dans le temps.



Figure 1 : Cadrans solaire

Figure reprise de l'article Wikipedia correspondant.

Pour pallier ces problèmes, un changement de paradigme était nécessaire. L'idée survint d'utiliser les résonances dans les atomes et molécules puisque celles-ci sont identiques pour un même atome à tout moment et ce peu importe l'endroit. De plus il n'y a pas d'usure, empêchant ainsi une dérive dans le temps de la référence. Ce changement de paradigme a été rendu possible grâce à l'avènement de la physique quantique et des technologies micro-ondes. Les oscillateurs atomiques reposent sur la quantification des niveaux d'énergie des atomes et molécules. Dans le domaine micro-ondes, les transitions entre deux niveaux de la structure hyperfine d'atomes hydrogénoïdes, tels que le rubidium, l'hydrogène ou le césium sont d'excellents candidats. Il s'agit alors d'asservir un oscillateur au quartz sur l'une de ces transitions afin d'en améliorer la stabilité. En particulier, le césium se présentait comme un très bon candidat : l'abondance naturelle de son isotope principal, le césium 133 est de 100%, il est lourd, ayant une faible vitesse dans le repère du laboratoire, même à température ambiante, permettant des temps d'interaction plus longs entre le système de mesure et les atomes. Dans les années 1960, ces horloges atomiques étaient devenues suffisamment stables que pour être utilisées comme standard pour la mesure du temps, menant à la redéfinition de la seconde comme la durée de 9.192.631.770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre deux niveaux de la structure hyperfine de l'état fondamental du césium 133.

Comme nous pouvons le constater, l'amélioration des standards de temps et de fréquence va de pair avec la montée en fréquence de ces standards, depuis l'usage de la rotation de la Terre ($\sim 10\mu\text{Hz}$) jusqu'aux horloges atomiques ($\sim 1\text{GHz}$), en passant par les pendules ($\sim 1\text{Hz}$) et les oscillateurs à quartz ($\sim 1\text{MHz}$). L'incertitude relative de ces horloges étant définies comme le rapport entre l'incertitude sur la mesure de la fréquence de l'oscillateur (planétaire, pendulaire, électronique ou atomique) et sa fréquence de résonance : $\Delta\nu/\nu_0$ (ou similairement $\Delta T/T$).

Membre de l'EOS (European Optical Society)

**Février
2025**

Bien que les meilleures horloges atomiques, les horloges à fontaine atomique de césium (Figure 2), permettent d'atteindre des incertitudes relatives remarquablement basses, de l'ordre de 10^{-15} , le futur de la métrologie temps/fréquence se trouve dans l'emploi de transitions atomiques/moléculaires dans le domaine optique (10^{15} Hz) plutôt que micro-ondes ($10^9 \dots 10^{10}$ Hz). En effet, l'incertitude $\Delta\nu$ est très similaire pour les deux types de transitions, mais 5 ordres de grandeur sont gagnés sur la valeur de ν_0 . Cela est rendu possible grâce à l'avènement conjoint des peignes de fréquence, des atomes ultra-froids et leur piégeage et le développement des sources LASER. Avec ces horloges optiques, la lumière visible fait enfin son retour dans la métrologie temps/fréquence, près de 5500 ans après l'apparition des cadrans solaires. Les différentes technologies clef et leur incertitude relative associées sont données à la Figure 3. Un second avantage de l'augmentation de la fréquence des horloges est la capacité accrue à mesurer le temps sur de courtes échelles temporelles. En effet, une fréquence plus élevée permet une cadence de mesure plus rapide, améliorant ainsi la précision pour détecter les variations temporelles sur des intervalles réduits.

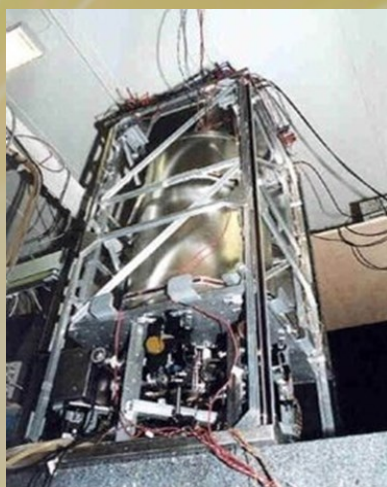


Figure 2 : Horloge à fontaine de césium 133 présente au SYRTE, France. Figure reprise de la page officielle du SYRTE.

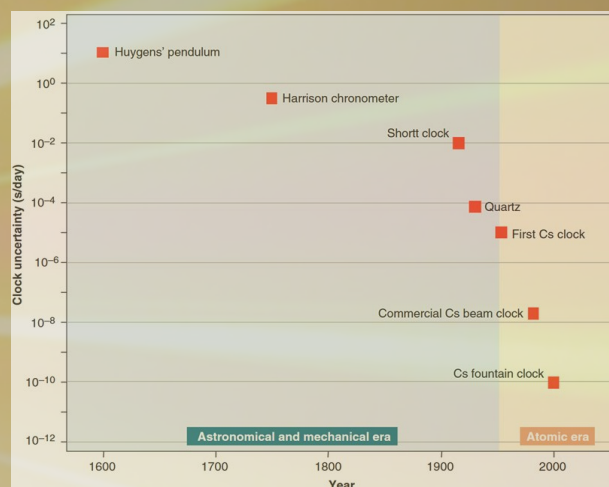


Figure 3 : Technologies clef et leur incertitude relative associée. Figure reprise de [5].

Un schéma de principe des horloges atomiques optiques est représenté à la Figure 4. L'oscillateur local d'une horloge atomique optique est un laser possédant une largeur d'émission ultrafine. Ces lasers sont obtenus en asservissant leur mode d'émission sur ceux d'une cavité ultrastable ayant une grande finesse (de l'ordre de 200.000), la largeur des modes de cavité est alors de quelques kHz. Les miroirs sont placés sur un espaceur fabriqué dans un matériau à ultra faible dilatation, couramment appelé ULE, pour ultra-low expansion material. L'espaceur est placé sur un support minimisant la transmission des vibrations environnantes et sa température est stabilisée. Ces efforts sur la stabilité intrinsèque de l'oscillateur sont nécessaires pour ne pas dégrader la performance générale de l'horloge. L'oscillateur est utilisé pour sonder une référence atomique qui consiste en une transition spécifique dans un échantillon d'atomes froids ou bien dans des ions refroidis et piégés et d'asservir le LASER sur celle-ci. Cette transition permet donc de garantir la stabilité de l'horloge dans le temps.

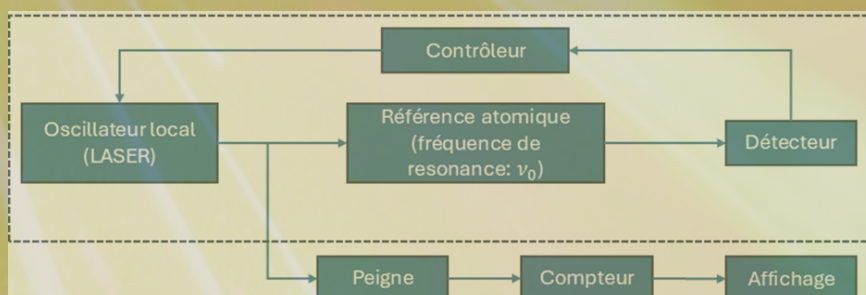


Figure 4 : Schéma de principe d'une horloge atomique optique. Figure reprise de [1].

Membre de l'EOS (European Optical Society)

Afin que ce système, bien que stable, puisse être utilisé comme horloge, il est nécessaire de pouvoir compter les oscillations de l'oscillateur LASER, de mesurer sa fréquence. Ce comptage ne peut être réalisé de façon directe, les fréquences optiques étant plusieurs ordres de grandeur supérieures à la bande passante des détecteurs les plus rapides. C'est ici que les peignes de fréquence entrent en jeu. Les peignes de fréquence sont des sources LASER à verrouillage de phase ; ces sources pulsées génèrent dans le domaine temporel un train d'impulsions, chacune d'entre elles étant séparées par le temps de révolution de l'impulsion dans la cavité. Dans le domaine fréquentiel, une telle source génère un peigne de fréquence, chacune des dents pouvant être exprimée par la relation suivante : $f_m = f_{CEO} + m \cdot f_{rep}$, avec f_{CEO} la fréquence de décalage, qui est liée dans le domaine fréquentiel au décalage entre la porteuse et l'enveloppe induit entre deux impulsions consécutives, m , l'indice de la dent (un nombre entier, de l'ordre de quelques millions), et f_{rep} la fréquence de répétition, dont la valeur vaut l'inverse du temps de révolution de l'impulsion dans la cavité. La fréquence f_m est dans le domaine optique tandis que les deux fréquences f_{CEO} et f_{rep} sont dans le domaine des fréquences micro-ondes, les peignes de fréquence permettent donc de faire le lien entre les deux gammes de fréquences et de comparer ces nouvelles horloges avec les horloges atomiques au rubidium et au césium. La fréquence f_{CEO} peut être stabilisée en utilisant une méthode d'auto-référencement, voire supprimée dans certains cas. Le peigne et l'oscillateur LASER de l'horloge atomique optique sont injectés sur une photodiode rapide, permettant la mesure d'un battement entre l'une des dents du peigne et l'oscillateur. La fréquence de ce battement possède la stabilité de l'horloge optique, convertie dans le domaine micro-ondes. L'inter-comparaison de deux peignes de fréquence verrouillés sur une même horloge atomique révèle une incertitude relative de l'ordre de 10^{-17} engendrée par le processus de conversion des fréquences optiques vers micro-ondes réalisée par les peignes de fréquence.

Les meilleures horloges atomiques optiques se trouvent actuellement au JILA, à Boulder (Colorado, USA). Elles sont basées sur l'emploi d'atomes de strontium piégés dans un réseau optique, obtenu par l'interférence de faisceaux LASER contre-propageant qui génèrent un potentiel périodique. Les atomes sont piégés dans les puits de potentiel, à la manière d'œufs dans leur boîte. Ces atomes, ultra-froids et presque immobiles possèdent des transitions relativement isolées et très fines qui sont très adéquates pour servir de référence fréquentielle. Différentes méthodes ont permis de caractériser ces horloges (inter-comparaison d'horloges imagerie d'absorption), qui possèdent des stabilités relatives records de l'ordre de $2.5 \cdot 10^{-19}$ sur une période de 6 heures, soit une dérive de 10 millisecondes sur l'âge de l'Univers (13.8 milliards d'années) ... Impressionnant ! Ces horloges représentent déjà un intérêt scientifique pour répondre à une série de questions très fondamentales, de l'étude de l'éventuelle variation des constantes fondamentales, en passant par une mise à l'épreuve des théories de la relativité générale et du modèle standard ou bientôt la volonté de connecter la gravitation et la mécanique quantique.

Alexis LIBERT

Chercheur à l'institut d'aéronomie spatiale de Belgique et à l'UCLouvain
Administrateur PromOptica

Bibliographie :

- [1] Maddaloni, P., Bellini, M., & De Natale, P. (2013). *Laser-based measurements for time and frequency domain applications: a handbook*. CRC Press.
- [2] Katzir, S. (2015). Pursuing frequency standards and control: the invention of quartz clock technologies. *Annals of Science*, 73(1), 1–39.
- [3] Young, B. C., Cruz, F. C., Itano, W. M., & Bergquist, J. C. (1999). Visible lasers with subhertz linewidths. *Physical Review Letters*, 82(19), 3799.
- [4] Marti, G. E., Hutson, R. B., Goban, A., Campbell, S. L., Poli, N., & Ye, J. (2018). Imaging optical frequencies with 100 μ Hz precision and 1.1 μ m resolution. *Physical review letters*, 120(10), 103201.
- [5] Diddams, S. A., Bergquist, J. C., Jefferts, S. R., & Oates, C. W. (2004). Standards of time and frequency at the outset of the 21st century. *Science*, 306(5700), 1318-1324.

Membre de l'EOS (European Optical Society)

c/o Centre Spatial de Liège — Parc Scientifique du Sart-Tilman
Avenue du Pré Aily — B-4031 ANGLEUR - Belgium — Tél. +32 (0)4/382 46 00
www.promoptica.be

