

Des géomètres au service des horloges atomiques de l'Observatoire de Paris

Pacôme Delva, maître de conférences SYRTE, Observatoire de Paris

Xavier Collilieux, enseignant chercheur IGN, Institut de physique du globe de Paris

Le SYRTE à l'Observatoire de Paris participe à une campagne internationale de comparaison d'horloges atomiques. Ces horloges contribuent à l'établissement du TAI (Temps Atomique International). La mesure de chaque horloge varie avec le champ gravitationnel local qui dépend de l'altitude de chaque horloge (décalage relativiste, ou effet Einstein). Réciproquement l'extraordinaire précision de ces horloges permet de mesurer des variations d'altitude.

L'unité mixte de recherche Système de Référence Temps Espace (SYRTE), localisée à l'Observatoire de Paris, est chargée par le Laboratoire National de Métrologie et d'Essais (LNE) de la responsabilité des références nationales de temps et de fréquence, et participe à l'établissement du Temps Atomique International (TAI). À ce titre, elle mène des recherches en métrologie du temps et des fréquences qui débouchent sur le développement d'horloges atomiques extrêmement précises. De plus, le SYRTE participe régulièrement à des campagnes internationales de comparaison d'horloges, visant ainsi à établir des standards et étudier des méthodes de comparaison dans des gammes de précision encore inégalées. Un des enjeux majeurs est la redéfinition de la seconde à l'aide d'un nouveau standard. Nous allons voir ici comment les géomètres ont mesuré les différences d'altitudes des horloges atomiques de l'observatoire de Paris et en quoi ces quantités sont utiles¹.

Les horloges atomiques et leurs précisions

Une horloge est un instrument qui est basé sur l'étude d'un phénomène périodique. L'écoulement du temps est mesuré par le nombre de cycles accumulés par ce phénomène. Historiquement, ce sont les cycles d'alternance jour/nuit qui étaient utilisés pour la mesure du temps, un jour étant subdivisé en 24 heures. Le phénomène à la base du fonctionnement des horloges atomiques est lié à une propriété des atomes. En effet, les électrons d'un atome ne peuvent atteindre qu'un nombre limité de niveaux d'énergie. Pour changer de niveau d'énergie, ils émettent

ou absorbent une onde électromagnétique à une fréquence spécifique. Depuis 1967, deux niveaux de la structure hyperfine du césium ont été promus étalon pour la définition de la seconde par la Conférence générale des poids et mesures. La fréquence associée à ces deux niveaux, 9 192 631 770 battements par seconde, a ainsi été décrétée et sa valeur est, par conséquent, exacte. Une horloge est donc liée à un élément spécifique, par exemple le césium 133 pour les horloges à césium.

L'exactitude relative d'une horloge atomique est exprimée à l'aide de la quantité $\Delta f / f$, où f est la fréquence de l'onde et Δf la précision à laquelle cette fréquence peut être maintenue. Ce moyen d'exprimer l'exactitude est plutôt commode. Si deux horloges ont des fréquences différant de Δf , la différence de temps comptabilisée au bout d'un temps t serait $(\Delta f / f) \cdot t$. Autrement dit, $\Delta f / f$ peut être interprété comme la dérive d'une horloge en seconde par seconde. L'exactitude relative $\Delta f / f$ des meilleures horloges à césium est aujourd'hui de l'ordre de quelque 10^{-16} , c'est-à-dire qu'elles retardent d'une seconde au bout d'environ 300 millions d'années !

Cependant, des horloges utilisant d'autres atomes les surclassent en exactitude. La fréquence de ces horloges est si grande qu'elle correspond à une onde dans le domaine visible, on parle alors d'horloges optiques. Elles sont basées sur l'utilisation de laser pour interroger les atomes. Elles présentent une exactitude relative de 10^{-17} - 10^{-18} , atteinte en cumulant seulement 30 minutes de mesures. Autrement dit ces horloges retardent d'une seconde au bout d'environ 30 milliards d'années, deux fois l'âge de l'Univers !

Fréquence de battement d'une horloge et différence d'altitude

La précision de la mesure de l'écoulement du temps est directement reliée à la précision à laquelle la

¹ Cet article est adapté d'un article publié en 2018 dans le volume 156 de la revue XYZ dont la référence complète est la suivante: Collilieux, X., P. Delva, L. Heydel, G. Lion, F. Bergerault, R. Delaugerre, L. Evrard, S. Gonnnet, D. Pesce and P. Prezant (2018) À quelles altitudes se trouvent les horloges atomiques de l'observatoire de Paris ? , XYZ, vol. 156, pp 26-30

fréquence de l'onde émise en direction des atomes peut être maintenue. Mais il s'avère que l'intensité du champ de pesanteur influence la façon dont le temps s'écoule. Ce phénomène est prédit par la théorie de la relativité générale : la différence de fréquence entre deux horloges fixes sur Terre est liée à la valeur de la différence du potentiel de pesanteur entre les positions de chacune des horloges. Cet effet est appelé de manière générale décalage relativiste des horloges². Il est composé d'une partie liée au champ gravitationnel (le décalage vers le rouge gravitationnel, ou effet Einstein), et une partie liée aux vitesses des deux horloges (par rapport aux étoiles lointaines). La différence de fréquence relative entre une horloge parfaite localisée au point A et une autre au point B, soumises respectivement aux potentiels de pesanteur W_A et W_B , est :

$$\frac{f_B - f_A}{f_B} = \frac{W_B - W_A}{c^2} \quad (1)$$

avec c la vitesse de la lumière dans le vide. Cette équation est valable jusqu'à une précision de 10^{-19} . A noter que cet effet de décalage relativiste est l'objet de tests poussés utilisant les horloges atomiques du système de positionnement par satellites Galileo³, ou encore l'horloge PHARAO, dans le cadre de la mission ACES, prévue pour être arrimée à la Station spatiale internationale début 2020.

Pour obtenir la différence théorique de fréquence entre deux horloges optiques d'exactitude relative de 10^{-18} localisées en deux points distincts, il faut donc connaître la différence de potentiel de pesanteur entre ces 2 points à environ $10^{-18} \cdot c^2 \approx 0.1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$. Comme l'accélération de pesanteur est le gradient du potentiel de pesanteur, on déduit la relation suivante :

$$dW = -gdH \quad (2)$$

avec dW la variation du potentiel liée à une variation de hauteur dH . Le vecteur accélération de pesanteur dirigé vers le bas explique le signe négatif de cette relation. En prenant $g \approx 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, on déduit que la différence d'altitude entre deux horloges optiques doit être connue à 1 cm près. La relation ci-dessus étant linéaire, une horloge à césium 100 fois moins exacte, nécessitera une correction relativiste basée sur une différence d'altitude de précision métrique.

Inversement, la connaissance de la différence de fréquence entre 2 horloges ayant une précision relative de 10^{-18} permettrait de calculer la différence

2 Voir Morfouli, M. et Delva, P. (2016) Introduction à la géodésie chronométrique, Cahiers Clairaut, vol. 156, p. 2

3 Voir Delva, P. (2019) Quand Galileo confirme les prédictions d'Einstein, Cahiers Clairaut, vol. 165, p. 36

de potentiel et donc la différence d'altitude avec une précision de 1 cm.

Ce phénomène de décalage vers le rouge relativiste est bien connu et est déjà exploité par le Bureau international des poids et mesures (BIPM) pour déterminer l'échelle de temps atomique internationale (TAI) à partir d'environ une dizaine de fontaines atomiques situées à des altitudes différentes. En réalité, chacune des fontaines atomiques utilisées pour le calcul du TAI mesure sa propre échelle de temps. Pour contribuer au TAI, les mesures d'une horloge doivent être corrigées du décalage vers le rouge relativiste : le temps d'une horloge contributrice (assimilable à un temps propre au sens de la relativité générale⁴) est ainsi transformé au temps qu'aurait mesuré une horloge fictive localisée sur une équipotentielle du champ de pesanteur dont le potentiel W_0 est défini par convention. Cette équipotentielle est aujourd'hui confondue avec le géoïde à la précision des horloges près. Pour mémoire, le géoïde est une équipotentielle du champ de pesanteur servant de référence aux altitudes. La formule (1) peut donc être appliquée pour calculer le décalage de fréquence.

En conclusion, la connaissance du potentiel de pesanteur à l'emplacement des horloges (donc des altitudes) est requise :

- pour comparer des horloges (distantes ou proches). Dans ce cas, seule la différence de potentiel (donc d'altitude) doit être connue.
- pour convertir l'échelle de temps locale réalisée par l'horloge en une échelle de temps globale telle qu'elle serait observée sur le géoïde. Dans ce cas, c'est $W_0 - W$ la cote géopotentielle qu'il faudra connaître.

Ainsi, la différence d'altitude entre les horloges optiques doit être connue à mieux que 1 cm, soit $0.1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$. Pour cela, l'Observatoire de Paris a fait appel à plusieurs reprises aux géomètres du « Service de géodésie et métrologie » de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN).

Les horloges atomiques

Le SYRTE héberge une grande variété d'horloges atomiques dans différents locaux du parc, citons notamment :

- des horloges à césium et rubidium et en particulier des horloges destinées à des applications industrielles et spatiales ;

4 Voir Delva, P. et Angonin, M.-C. (2015) Promenons-nous dans l'espace-temps, Cahiers Clairaut, vol. 152, p. 2

- une horloge optique basée sur l'atome de mercure ;
- deux horloges optiques basées sur l'atome de strontium affichant une exactitude de 4.10^{-17} .

Par ailleurs, au printemps 2017, l'horloge optique transportable du PTB d'exactitude 7.10^{-17} , hébergée dans une remorque, a été stationnée dans le parc de l'Observatoire de Paris. Reliée par fibre optique à une autre horloge, elle permet la comparaison de fréquences mesurées en des endroits non accessibles par des horloges fixes.

Campagne de mesures

L'objectif des campagnes de mesures effectuées à l'Observatoire de Paris était de déterminer les altitudes des différentes horloges. Deux repères de nivellement du réseau NGF/IGN69 sont présents dans l'enceinte de l'Observatoire de Paris. Ces repères, fixés à un mur extérieur de bâtiment, ont une altitude connue, car préalablement déterminée par l'IGN, dans le référentiel d'altitude légal français.

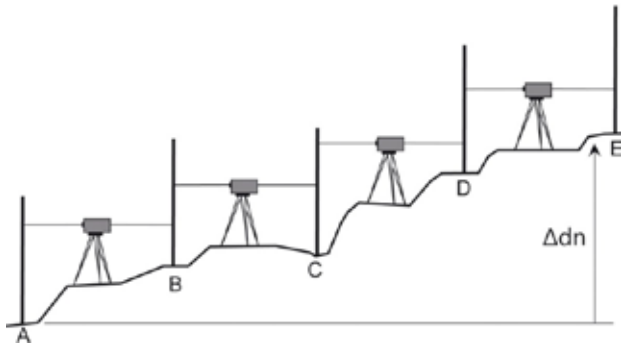


Fig.1. Principe du nivellement. La différence d'altitude entre les points A et E est mesurée en effectuant la différence des lectures des graduations d'une mire (« règle ») déplacée du point A vers le point E en passant par un nombre quelconque de points intermédiaires.

Source : <https://geodesie.ign.fr> consulté en juillet 2019.

En 2013, une première campagne a été l'occasion d'installer et de déterminer l'altitude d'un réseau de repères laiton scellés à la verticale dans le sol ou horizontalement dans des murs. Ce réseau comprend des points :

- dans le parc de l'Observatoire, c'est-à-dire à l'extérieur des laboratoires ;
- sur les toits de deux bâtiments ;
- à l'intérieur des bâtiments abritant les horloges ou gravimètres.

La méthode utilisée s'appelle le nivellement, voir figure 1. Elle consiste à utiliser des mires (règles graduées, aujourd'hui, la graduation est remplacée par un code-barres) et un niveau pour mesurer des différences de hauteur entre des points stationnés par la mire, voir les figures 2a et 2b). La figure 2b montre notamment la « règle » utilisée par les géomètres

pour niveler une des tables portant une horloge optique. Les altitudes relatives des horloges de l'Observatoire ont été déduites avec une précision inférieure au millimètre.

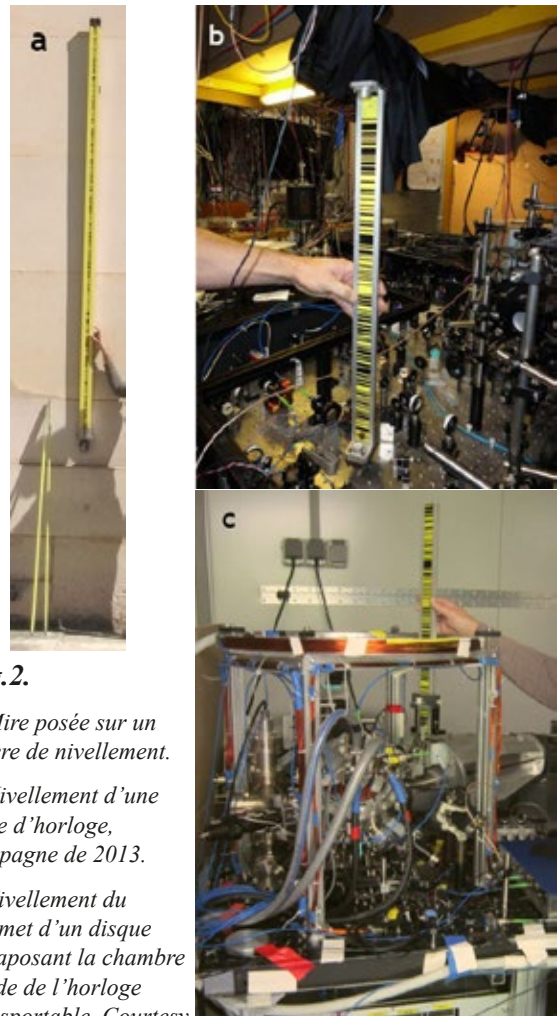


Fig.2.

a. Mire posée sur un repère de nivellement.

b. Nivellement d'une table d'horloge, campagne de 2013.

c. Nivellement du sommet d'un disque juxtaposant la chambre à vide de l'horloge transportable. Courtesy of Physikalisch-Technische Bundesanstalt.

En 2017, ce réseau a été réutilisé pour déterminer l'altitude de l'horloge optique transportable du PTB stationnée dans le parc de l'Observatoire de Paris, dans une remorque (voir la figure 2c). Une campagne de mesure a été effectuée à l'installation, début mai 2017, puis une autre fin juin 2017 avant le démontage afin de contrôler la stabilité de l'équipement. Un écart inférieur à 0.5 mm a été évalué entre les deux campagnes.

Le détail des mesures et de leur exploitation a été écrit dans la revue XYZ, vol. 156 : Collilieux, X. et al. (2018) dont la référence est fournie en préambule.

Horloges et nivellement chronométrique

Le nivellement à l'aide d'horloges atomiques est appelé nivellement chronométrique. Une démonstration expérimentale de ce concept a été

effectuée pour la première fois en 2010 par l'équipe de C. W. Chou du NIST (USA) : le déplacement vertical entre deux horloges atomiques optiques d'une trentaine de centimètres a pu être détecté dans la différence de fréquence mesurée. Plus récemment, une mesure de nivellement d'une précision de 5 cm entre 2 points séparés de 15 km a été effectuée par horloges atomiques reliées par fibre optique, par l'équipe de H. Katori au Japon. Une distance plus importante a été franchie avec la comparaison des horloges du PTB à Braunschweig et de l'Observatoire de Paris reliées par fibre optique sur une distance de 1 415 km.

De plus, un programme de recherche entre le SYRTE et l'IGN vise à étudier l'apport des horloges atomiques pour la détermination à haute résolution du géoïde, c'est-à-dire à des échelles spatiales de 10 km sur la base de simulations numériques. Ceci en attendant demain les premières horloges atomiques destinées au nivellement, mais il faudra pour cela résoudre le problème de la transmission à distance de la fréquence entre deux horloges pour des applications opérationnelles. Un premier pas sera franchi avec la

mission ACES/PHARAO qui reposera sur la mise en orbite d'une horloge à atomes froids sur la station ISS pour du transfert de temps avec une stabilité inégalée inférieure à la picoseconde après un passage de l'ISS d'une durée de l'ordre de 300 s. Une synchronisation meilleure encore à hauteur de 10^{-18} pourrait être obtenue par l'utilisation de signaux laser transmis à une constellation de satellites, comme celle de futurs GNSS, mais aujourd'hui, seule la fibre optique permet d'atteindre cette précision.

Remerciements :

Un grand merci aux géomètres du Service de géodésie et métrologie de l'IGN : Fabien Bergerault, Raphaëlle Delaugerre, Loïc Evrard, Sylvain Gonnet, Damien Pesce, Patrice Prezant ; à Laurent Heydel, chef des travaux spéciaux IGN ; à Guillaume Lion, chercheur IGN rattaché à l'UMR IPGP ; aux chercheurs du SYRTE/Observatoire de Paris : Jérôme Lodewyck, Rodolphe Le Targat, Paul-Eric Pottie et Eva Bookjans ; ainsi qu'aux partenaires du Physikalisch-Technische Bundesanstalt. ■