

À quelles altitudes se trouvent les horloges atomiques de l'observatoire de Paris ?

■ Xavier COLLILIEUX - Pacôme DELVA - Laurent HEYDEL - Guillaume LION - Fabien BERGERAULT
Raphaëlle DELAUGERRE - Loïc EVRARD - Sylvain GONNET - Damien PESCE - Patrice PREZAT

L'exactitude des horloges optiques permet d'envisager dans le futur leur utilisation pour déterminer des différences d'altitudes à une précision centimétrique. Les développements actuels consistent à comparer les fréquences d'horloges en cours de développement. Ainsi, la mise en place de protocoles de comparaison constitue une première étape. Aujourd'hui, c'est encore au géomètre, au moyen des techniques traditionnelles, de déterminer l'altitude des horloges pour permettre ces comparaisons et fournir une mesure de référence. Cet article décrit les opérations de nivellement effectuées par l'IGN à l'Observatoire de Paris dans le contexte de projets scientifiques européens impliquant le laboratoire SYRTE de l'Observatoire de Paris.

MOTS-CLÉS

Métrologie – horloges atomiques – nivellement chronométrique – géodésie relativiste – nivellement

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. Son expertise internationalement reconnue lui vaut d'être un acteur de premier plan dans deux projets récents du programme *European Metrology Research Program* (EURAMET) qui ont la particularité de nécessiter des campagnes de nivellement. Le premier projet "*International Timescales with Optical Clocks*" (ITOC)¹ s'est déroulé de 2013 à 2016. Son objectif était de comparer des horloges optiques conçues par des instituts de métrologie en Europe, visant ainsi à établir des standards et étudier des méthodes de comparaison dans des gammes de précision encore inégalées.

¹ Site Internet du projet ITOC : <http://projects.npl.co.uk/itoc/>

Sans en énumérer tous les partenaires, citons parmi les prestigieux laboratoires étrangers le *Physikalisch-Technische Bundesanstalt* (PTB, Allemagne), le *National Physical Laboratory* (NPL, Grande-Bretagne) et le *Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica* (INRIM).

Ce travail se poursuit aujourd'hui avec le projet "*Optical frequency transfer – a European network*" (OFTEN)² qui vise plus particulièrement à transférer le temps issu d'horloges optiques entre deux observatoires au moyen de fibres optiques. Comme l'énonce le premier projet l'indique, un des enjeux majeurs est la redéfinition de la seconde à l'aide d'un nouveau standard. Nous allons voir ici en quoi le géomètre se trouve être un acteur indispensable à cette tâche.

Les horloges atomiques et leurs précisions

Une horloge est un instrument qui est basé sur l'étude d'un phénomène périodique. L'écoulement du

² Site Internet du projet OFTEN: https://www.ptb.de/emrp/often_home.html

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.

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. Pour mesurer cette fréquence, une onde électromagnétique de fréquence connue est émise en direction des atomes pour opérer la transition atomique, cette fréquence étant asservie par comptage du nombre d'atomes excités (Delva et Lodewyck, 2013). C'est en partie la hauteur de la fréquence du phénomène étudié qui assure une grande précision dans la mesure du temps.

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 diffé-



rence de cycles 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 quelques 10^{-16} (Guéna et al., 2017). Aujourd'hui, les 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 émettre en direction des atomes. Elles présentent une exactitude relative de 10^{-17} à 10^{-18} (Lisdat et al., 2016 ; Huntemann et al., 2016). Les horloges les plus stables à ce jour atteignent une stabilité relative de l'ordre de 10^{-18} en cumulant seulement 30 minutes de mesures (Chou et al., 2010 ; Nicholson et al., 2015 ; Takano et al., 2016 ; Schioppo et al., 2016).

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

Comme exposé ci-dessus, la précision de la mesure de l'écoulement du temps est directement liée à la précision à laquelle la 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 (Delva et Lodewyck, 2013 ; Delva et al. 2018). Cet effet est appelé de manière générale décalage relativiste des horloges. 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, soumis respectivement aux potentiels de pesanteur W_A et W_B , est :

$$(f_B - f_A) / f_B = (W_B - W_A) / c^2 \quad (1)$$

avec c la vitesse de la lumière dans le vide. Cette équation est valable jusqu'à une précision de 10^{-19} , ce qui est suffisant au regard de la précision recherchée, voir la section "les horloges atomiques" ci-dessous. À noter que cet effet de décalage relativiste est l'objet de tests poussés utilisant les horloges atomiques du système de positionnement par satellites Galileo, ou encore l'horloge PHARAO, dans le cadre de la mission ACES, prévue pour être arriérée à la station spatiale internationale début 2020 (Delva et al., 2015a, Delva et al., 2015b, Meynadier et al., 2018).

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 $0.1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$. Comme l'accélération de pesanteur est le gradient du potentiel de pesanteur, on déduit la relation suivante :

$$dW = -g \cdot dH \quad (2)$$

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 de *redshift* relativiste (ou décalage vers le rouge) 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 de potentiel et donc la différence d'altitude à une précision de 1 cm. En effet, pour mémoire, une altitude est par définition la différence entre un potentiel de référence W_0 et le potentiel de pesanteur au point divisé par un modèle d'accélération de pesanteur.

Ce phénomène de décalage vers le rouge relativiste est bien connu et est déjà exploité par le Bureau internatio-

nal des poids et mesures (BIPM) pour déterminer l'exactitude de l'échelle de temps atomique internationale (TAI) à partir d'environ une dizaine de fontaines atomiques situées à des altitudes différentes (BIPM, 2016 ; Arias et al., 2011). 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 générale) 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. 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 exemple, la relation (1) doit être utilisée pour comparer des horloges localisées à des altitudes différentes dans les locaux de l'Observatoire de Paris, voir *Table 1* ;
- 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. La meilleure précision pour le calcul de W est obtenue par combinaison de modèles gravimétriques (quasi-géoïde) et de mesures de hauteurs ellipsoïdales par GNSS (Denker et al., 2017). D'où l'intérêt de niveler les antennes GNSS permanentes proches des horloges pour fournir une hauteur ellipsoïdale aux horloges.

Retenons donc pour la suite que la différence d'altitude entre horloges doit être connue à mieux que 1 cm, soit $0.1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$.



Les horloges atomiques

Le SYRTE héberge une grande variété d'horloges atomiques dans différents locaux du parc, citons notamment (SYRTE, 2018) :

- des horloges à césium et rubidium et en particulier des horloges destinées à des applications industrielles et spatiales ;
- 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} (Lisdar et al 2016 (Table 1)).

Par ailleurs, au printemps 2017, l'horloge optique transportable du PTB d'exactitude 7.10^{-17} (Koller et al., 2017), 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. Les stations GNSS permanentes nommées OPMT et OMPX ont également été nivelées. La station OPMT appartient au réseau GNSS du service International GNSS (IGS) et au réseau GNSS permanent français

(RGP) ; ses coordonnées sont donc connues dans le référentiel international ITRF2014 ou européen ETRF2000. Deux repères de nivellement (RN) du réseau NGF/IGN69, référentiel d'altitude légal français, sont présents dans l'enceinte de l'Observatoire de Paris. Ils sont présentés en *figure 1* et serviront de référence pour les altitudes calculées.

En 2013, la première campagne a été l'occasion d'installer un réseau de repères comprenant des points :

- dans le parc de l'Observatoire, c'est-à-dire à l'extérieur des laboratoires. Un point de référence central proche des bâtiments d'intérêt a notamment été matérialisé ;
- sur les toits de deux bâtiments ;
- à l'intérieur des bâtiments abritant les horloges ou gravimètres. Des rivets ont été scellés dans les murs à proximité des tables des horloges pour servir de points auxiliaires.

Les coordonnées horizontales des points situés en extérieur ont été déterminées par GNSS dans le référentiel RGF93 et leurs altitudes obtenues par combinaison de nivellement direct et indirect. Le nivellement direct a été effectué sur la base d'un cheminement en aller-retour entre les 2 repères de nivellement du réseau NGF/IGN69 de la *figure 1*. Ce cheminement a permis de montrer la stabilité relative de ces 2 repères puisque la différence entre la dénivellation théorique calculée à partir des altitudes publiées et celle mesurée est de 1 mm.

Les tables des horloges, ainsi que les repères auxiliaires ont pu être nivelés à l'aide d'une mire de taille réduite (avec ruban INSAR), comme illustré sur la *figure 2*. Le nivellement indirect a été utilisé pour déterminer les altitudes des points situés sur les toits par visées zénithales réciproques et simultanées afin de s'affranchir de la réfraction atmosphérique. Des stations totales Leica TCA2003 et TDA5005 ont été utilisées à cette fin. L'ensemble des données de nivellement a été compensé par moindres carrés en prenant comme référence les altitudes des deux RN présents dans le parc. Les demi-intervalles de confiance à 95 % des altitudes déterminées (précision à



Figure 2. Nivellement d'une table d'horloge, campagne de 2013.



Figure 1. Repères de nivellement disponibles dans le parc de l'Observatoire de Paris. Ils portent les matricules P.A.A3B3-41 et P.A.A3B3-42.



Description	Campagne	dH (m)	dW associé. (m ² .s ⁻²)	Différence de fréquence relative
FO2 (bat B) - FO1 (bat Foucault)	2013	-3.44	33.78	3.8 10 ⁻¹⁶
FO1 (bat Foucault) -SR1 (sous-sol Foucault)	2013	6.87	-67.39	-7.5 10 ⁻¹⁶
FO1 (bat Foucault) – PT1 (PTB)	2017	-0.73	7.12	7.9 10 ⁻¹⁷

Table 1. Différence d'altitude entre certains points de référence à proximité des horloges, différence de potentiel et différence de fréquence relative des horloges

2 sigma) s'échelonnent de 0.6 mm à 1.0 mm.

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. Celle-ci se trouvait dans une remorque à proximité du bâtiment Foucault. 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 reporté entre les deux campagnes. Les points qui ont été nivelés sont situés sur la remorque, sur le marbre supportant l'horloge, et de part et d'autre d'une chambre à vide sphérique dont le centre est le point de référence de l'horloge, voir figure 3. Un nouveau cheminement en aller-retour entre les 2 repères de la figure 1 et le point de référence central implanté en 2013 a été effectué validant la stabilité du site, les différences d'altitudes obtenues étant inférieures à 0.3 mm.

Exploitation des mesures

La table 1 présente les différences d'altitudes déterminées pour des points de référence proches des trois horloges (les points utilisés ici sont situés sur les marbres). A titre d'illustration, les différences relatives théoriques de fréquences associées à ces différences d'altitudes sont fournies et calculées à l'aide des équations (1) et (2) comme :

$$(f_B - f_A) / f_B = -g_{\text{moy}} (H_B - H_A) / c^2 \quad (3)$$

Une valeur de $g_{\text{moy}} = 9.809 \text{ m.s}^{-2}$ a été adoptée pour la conversion. Elle correspond aux trois premières décimales de la valeur de gravité du point OBSP situé à l'Observatoire (source BGI, <http://bgi.obs-mip.fr>). Cette valeur unique et cette

précision suffisent pour obtenir une incertitude sur la fréquence relative de 2.10^{-18} pour des dénivelées inférieures à 100 m. On note que la différence de fréquence relative calculée (dernière colonne) est du même ordre de grandeur ou supérieure à la précision des meilleures horloges du SYRTE.

Les valeurs d'altitudes dérivées des campagnes de mesures décrites ici, ainsi que celles obtenues sur 3 sites en Allemagne équipés d'horloges atomiques, ont été étudiées pour calculer la différence du potentiel de pesanteur entre les sites allemand et français (Denker et al., 2017). L'étude visait à comparer 2 méthodes de calcul du potentiel de pesanteur à l'emplacement des horloges. La première méthode discutée est basée sur une

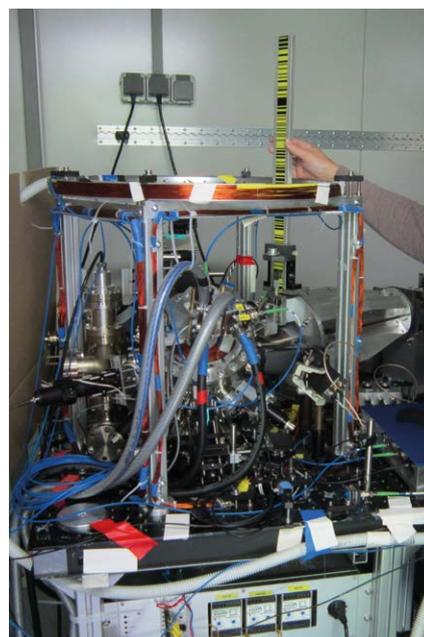


Figure 3. Nivellement du sommet d'un disque juxtaposant la chambre à vide de l'horloge transportable (Koller, 2017). *Courtesy of Physikalisch-Technische Bundesanstalt*

conversion directe des altitudes en potentiel. Mais comme l'altitude est ici fournie en NGF/IGN69 qui diffère du système d'altitude allemand, une correction supplémentaire s'avère nécessaire en amont. La seconde méthode est basée sur l'utilisation de la hauteur ellipsoïdale obtenue par GNSS (dérivée de la hauteur de la station OPMT et des données de nivellement) et d'un modèle de quasi-géoïde régional. La première méthode est recommandée par les auteurs pour des distances inférieures à 100 km et la seconde pour les distances supérieures pour s'affranchir de l'accumulation des erreurs dans les réseaux de nivellement classiques.

Horloges et nivellement chronométrique

Le nivellement à l'aide d'horloges atomiques est appelé nivellement chronométrique (Bjerhammar 1975 ; Vermeer 1983 ; Bjerhammar 1985). Une démonstration expérimentale de ce concept a été effectuée pour la première fois en 2010 (Chou et al., 2010). 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 (Takano et al., 2016). 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 (Denker et al., 2017 ; Lisdat et al., 2016).

Aujourd'hui, 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 (Lion et al., 2017). 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 de l'ordre de 300 s (Meynadier et al., 2018). 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 (Wolf, 2016) mais aujourd'hui, seule la fibre optique permet d'atteindre cette précision. ●

Remerciements

Un grand merci à Jérôme Lodewyck, Rodolphe Le Targat, Paul-Eric Pottie, Eva Bookjans du SYRTE ainsi qu'aux partenaires du Physikalisch-Technische Bundesanstalt.

Contacts

Xavier COLLILIEUX

enseignant-chercheur IGN, ENSG, Univ Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité
xavier.collilieux@ensg.eu

Pacome DELVA

maître de conférences SYRTE, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, LNE – pacome.delva@obspm.fr

Laurent HEYDEL

chef des Travaux spéciaux IGN, Service de géodésie et nivellement
travaux.speciaux@ign.fr

Guillaume LION

chargé de recherche IGN, ENSG, Univ Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité
guillaume.lion@ign.fr

Fabien BERGERAULT,

Raphaëlle DELAUGERRE, Loïc EVRARD,

Sylvain GONNET, Damien PESCE,

Patrice PREZAT

géomètres au Service de géodésie et nivellement de l'IGN
travaux.speciaux@ign.fr

Références

Arias E. F., G. Panfilo, and G. Petit (2011) *Timescales at the BIPM*, *Metrologia*, vol. 48, no. 4, p. S145

Bjerhammar A. (1975) *Discrete approaches to the solution of the boundary value problem in physical geodesy*, *Bolletino di geodesia e scienze affini*, no. 2, pp. 185-241

Bjerhammar A. (1985) *On a relativistic geodesy*, *Bull. Geodesique*, vol. 59, no. 3, pp. 207-220

BIPM (2016) *BIPM Annual Report on Time Activities* (2016)

Chou CW, Hume DB, Rosenband T, Wineland DJ (2010) *Optical clocks and relativity*. *Science* 329(5999):1630-1633, doi:10.1126/science.1192720

Delva, P., H. Denker, and G. Lion (2018) *Chronometric geodesy: methods and applications*, arXiv:1804.09506 [gr-qc]

Delva, P., F. Meynadier, P. Wolf, C. Guerlin, (2015a), *La gravitation vue par les horloges atomiques*, Hors-série "La Recherche" N° 6 :57-60

Delva P., A. Hees, S. Bertone, E. Richard, and P. Wolf (2015b) *Test of the gravitational redshift with stable clocks in eccentric orbits: application to Galileo satellites 5 and 6*, *Class. Quantum Grav.*, vol. 32, no. 23, p. 232003, doi:10.1088/0264-9381/32/23/232003

Delva P., J. Lodewyck (2013) *Atomic clocks: new prospects in metrology and geodesy*, *Acta Futura*, vol. 07, pp. 67-78

Denker et al., Timmen, L., Voigt, C. et al. (2017) *Geodetic methods to determine the relativistic redshift at the level of 10^{-18} in the context of international timescales : a review and practical results*, *Journal of geodesy*, doi: 10.1007/s00190-017-1075-1

Hinkley, N. et al. (2013) *An atomic clock with 10^{-18} instability*. *Science*, 341(6151), 1215-1218, doi:10.1126/science.1240420

Koller, S. B., Grotti, J., Al-Masoudi, A., Dörscher, S., Häfner, S., Sterr, U., et Lisdat, C. (2017) *Transportable Optical Lattice Clock with 7×10^{-17} Uncertainty*. *Physical Review Letters*, 118(7), 073601, doi:10.1103/PhysRevLett.118.073601

Guéna, J. et al. (2017) *First international comparison of fountain primary frequency standards via a long distance optical fiber link*, *Metrologia*, vol. 54, no. 3, p. 348

N. Huntemann, C. Sanner, B. Lipphardt, C. Tamm, and E. Peik (2016) *Single-Ion Atomic Clock with 3×10^{-18} Systematic Uncertainty*, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 116, no. 6, p. 063001, doi: 10.1103/PhysRevLett.116.063001

Lion, G., I. Panet, P. Wolf, C. Guerlin, S. Bize and P. Delva (2017) *Determination of a high spatial resolution geopotential model using atomic clocks comparisons*, *Journal of Geodesy*, doi:10.1007/s00190-016-0986-6

Lisdat, C. et al. (2016) *A clock network for geodesy and fundamental science*, *Nature communications* 7 (2016):12443, doi:10.1038/ncomms12443

Meynadier F., P. Delva, C. le Poncin-Lafitte, C. Guerlin, and P. Wolf (2018) *Atomic clock ensemble in space (ACES) data analysis*, *Class. Quantum Grav.*, vol. 35, no. 3, p. 035018, doi:10.1088/1361-6382/aaa279

Morfolou M., P. Delva, (2016) *Introduction à la géodésie chronométrique*, Les Cahiers Clairaut, 156

Nicholson, T. L. et al. (2015) *Systematic evaluation of an atomic clock at 2×10^{-18} total uncertainty*. *Nat. Commun.* 6, 6896

Schioppo M. et al. (2016) *Ultrastable optical clock with two cold-atom ensembles*, *Nat Photon*, vol. 11, no. 1, pp. 48-52, doi:10.1038/nphoton.2016.231

SYRTE (2018) *Site Internet du SYRTE*, URL : <https://syрте.obspm.fr/>, consulté en Janvier 2018

Takano T et al. (2016) *Geopotential measurements with synchronously linked optical lattice clocks*. *Nat Photon* 10(10):662-666, doi:10.1038/nphoton.2016.159

Vermeer M. (1983) *Chronometric levelling*, Finnish Geodetic Institute, Helsinki

Wolf P. (2016) *Viewpoint: Next Generation Clock Networks*, *Physics* 9, 51

ABSTRACT

The accuracy of atomic clocks is becoming large enough to determine altitude differences at the centimeter level in the near future. Current research activities consist in developing and comparing clock frequencies, and in setting up time transfer techniques with the required precision. Today, surveyor still has to provide clock altitude differences by traditional methods to allow these comparisons. This article reports levelling carried out by IGN at Paris Observatory for two European scientific projects in which the SYRTE Laboratory is involved.