

Temps – Fréquences

Time – Frequency

1. Introduction

Le LNE-SYRTE à l'Observatoire de Paris est le Laboratoire national de métrologie désigné dans le cadre de la métrologie française pour réaliser les activités du domaine Temps – Fréquences. En outre, le LNE-FEMTO-ST et le LNE-OB ont fusionné pour former le LNE-LTFB.

2. Métrologie des fréquences micro-ondes

2.1. Étalons primaires

Le LNE-SYRTE dispose de quatre étalons primaires de fréquence micro-onde. Le premier dénommé JPO utilise un jet thermique d'atomes de césium pompés puis détectés optiquement. Les trois autres dénommés FO1, FO2 et FOM sont des fontaines atomiques dont le principe repose sur le refroidissement et le piégeage des atomes, au moyen de faisceaux lasers et d'un gradient de champ magnétique, avant d'être lancés verticalement puis interrogés par un champ micro-onde (fourni par un oscillateur cryogénique à résonateur en saphir asservi sur un maser à hydrogène) pour être finalement optiquement détectés. FO1 fonctionne avec des atomes de césium, FO2 est une fontaine double fonctionnant avec des atomes de césium et de rubidium et FOM est une fontaine mobile issue du prototype de l'horloge spatiale PHARAO et fonctionne avec des atomes de césium.

2.1.1. Performances des étalons primaires de fréquence micro-onde

JPO présente les meilleures performances obtenues avec ce type d'étalon. Son exactitude est de $6,3 \cdot 10^{-15}$ et sa stabilité de fréquence relative, réduite pour limiter la consommation de césium, est de $8 \cdot 10^{-13} t^{-1/2}$.

Quelques modifications ont été apportées aux fontaines atomiques afin de les fiabiliser, de simplifier leur fonctionnement et d'augmenter leur performance : emploi de miroirs motorisés pour le réaligement des faisceaux lasers, installation d'un MOT 2D comme source d'atomes de césium sur FO2... En particulier, FO2 fonctionne aujourd'hui simultanément avec les atomes de césium et de rubidium sans modifier les performances des deux étalons. L'exactitude de FO1 et de FO2 est de $4,5 \cdot 10^{-16}$, et celle de FOM est de $7,1 \cdot 10^{-16}$. Enfin, un lien fibré à 9 GHz a été mis en place pour permettre la distribution des signaux de référence avec une meilleure

stabilité de fréquence que celle du lien fibré à 1 GHz (quelques 10^{-14} à 1 s). Il permet d'améliorer les comparaisons entre fontaines atomiques, mais aussi entre ces dernières et les horloges optiques en développement.

2.1.2. Comparaisons directes des fontaines atomiques

Les trois fontaines atomiques en fonctionnement césium ont été comparées localement au moyen de l'oscillateur cryogénique à résonateur en saphir asservi sur l'un des masers à hydrogène du laboratoire. Ainsi une stabilité de fréquence relative à court terme de l'ordre de $8 \cdot 10^{-14} t^{-1/2}$ a été obtenue entre FO1 et FO2. Les comparaisons entre, d'une part, FOM et FO1, et d'autre part, FOM et FO2, ont montré des stabilités de fréquence relative à court terme de l'ordre de $1 \cdot 10^{-13} t^{-1/2}$. A plus long terme ces stabilités de fréquence relatives descendent en dessous de 10^{-16} pour remonter au niveau de $5 \cdot 10^{-16}$ après 1 d.

2.2. ACES / PHARAO

Le financement du programme spatial ACES / PHARAO est désormais acquis. Un modèle précis de la comparaison entre les horloges embarquées et celles au sol au moyen du lien micro-onde deux voies a été établi avec une résolution de 0,1 ps en tenant compte de tous les effets perturbateurs connus (retards atmosphériques, erreurs d'orbitographie...). Dès lors, un algorithme de traitement des mesures brutes a été élaboré puis testé. Il sera implanté dans les stations constituant le segment sol de ACES. En outre, le logiciel de vol visant à contrôler le fonctionnement de PHARAO a été finalisé et validé. Il permet aujourd'hui de piloter entièrement le modèle d'ingénierie de PHARAO dont les performances au sol sont évaluées au moyen de FOM qui a été déplacée, en juin 2008, au CNES à Toulouse. La première évaluation montre une résonance de Ramsey de largeur 6 Hz et une stabilité de fréquence relative de $3,3 \cdot 10^{-13} t^{-1/2}$ dont la valeur extrapolée en microgravité ($10^{-13} t^{-1/2}$) est conforme aux attentes.

2.3. Oscillateur photonique ultra-stable OPUS

Le principe d'OPUS repose sur l'asservissement d'un laser à 1 064 nm sur une cavité ultra-stable horizontale de très haute finesse placée sous vide. Il vise une stabilité de fréquence relative de quelques 10^{-15} entre 1 s et 100 s avec un fonctionnement pratiquement continu. A terme,

l'objectif est de constituer une source de signaux micro-ondes à très bas bruit de phase permettant d'envisager le remplacement de l'oscillateur cryogénique à résonateur en saphir. La cavité ultra-stable développée présente une très faible sensibilité aux vibrations dans toutes les directions y compris celles liées à la position des points d'appuis. La comparaison de OPUS avec le laser ultra-stable de l'expérience de l'horloge à atomes de mercure a montré une stabilité de fréquence relative de $7,9 \cdot 10^{-16}$ à 1 s et proche de 10^{-15} à 100 s. La comparaison entre le signal micro-onde généré par le laser femtoseconde à fibre dopée erbium asservi sur OPUS et celui de l'oscillateur cryogénique à résonateur en saphir a montré des stabilités de fréquence relatives de $3 \cdot 10^{-15}$ à 1 s et de $2 \cdot 10^{-15}$ à 10 s comme le représente la figure 1. FO2 a ensuite été pilotée par ce signal micro-onde généré à partir de OPUS. La stabilité de fréquence obtenue lorsque FO2 est pilotée par ce signal micro-onde est identique à celle obtenue lorsque le pilotage est opéré avec celui de l'oscillateur cryogénique à résonateur en saphir.

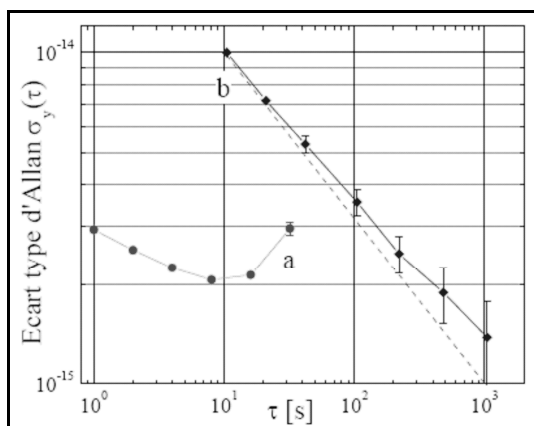


Fig. 1. – Stabilité de fréquence relative de la comparaison des signaux micro-ondes : (a) signal généré par OPUS par rapport à celui de l'oscillateur cryogénique à résonateur à saphir. (b) stabilité de fréquence relative de FO2 pilotée par le signal micro-onde de OPUS comparé à celui de l'oscillateur cryogénique à résonateur à saphir.

2.4. Horloge sur puce à atomes

Le développement de l'horloge miniature (de stabilité de fréquence relative de quelques 10^{-13} à 1 s) employant en alternance des atomes thermiques refroidis et dégénérés de rubidium piégés à proximité de la surface d'une puce s'est poursuivi. Après la première étape permettant d'obtenir les premiers atomes de rubidium thermiques refroidis dans le piège magnéto-optique, le refroidissement par évaporation a été mis en place puis optimisé. Dès lors, le premier condensat de Bose-Einstein (avec dans un premier temps 3 000 atomes) a été observé. Ensuite, la réalisation du synthétiseur du signal d'interrogation de la transition d'horloge à 6,8 GHz a été finalisée avec une stabilité de fréquence relative de $1 \cdot 10^{-14}$ à 1 s (assurant ainsi qu'il ne dégradera pas la stabilité de l'horloge). Une fois, toutes ces étapes achevées, la transition d'horloge des atomes de rubidium refroidis et piégés a pu être interrogée.

3. Métrologie du temps

3.1. Références nationales de temps

Deux échelles de temps nationales sont établies par le LNE-SYRTE et mises à la disposition des utilisateurs avec l'aide de l'Observatoire de Besançon.

L'une, le temps atomique français TA(F), est une échelle de temps scientifique qui vise les qualités de pérennité, de stabilité et d'exactitude. Elle est calculée mensuellement au LNE-SYRTE en utilisant les lectures quotidiennes d'un ensemble de vingt-sept horloges commerciales à césium fonctionnant librement dans huit laboratoires en France (la comparaison des horloges est réalisée plusieurs fois quotidiennement par la méthode vue commune des signaux GPS). Au cours de l'élaboration du TA(F), le poids de chacune de ces horloges est ajusté dans l'algorithme en fonction de leur stabilité à long terme.

L'autre, la référence de temps légal français UTC(OP), constitue la réalisation physique de la référence internationale UTC qui n'est disponible qu'en différé. Elle est matérialisée par l'horloge commerciale à césium ayant montré la meilleure stabilité à long terme dans le passé parmi les huit dont dispose le LNE-SYRTE.

En outre, à chaque début de mois, le LNE-SYRTE publie le bulletin H qui comprend différentes informations pour le mois écoulé et le mois précédent ce dernier. Parmi elles, les mesures rapportées à UTC(OP) du LORAN-C et du temps diffusé par les satellites de la constellation GPS, les écarts entre TA(F) et UTC(OP), les écarts entre la fréquence moyenne journalière de la porteuse de France Inter et TA(F), les écarts entre UTC et UTC(OP), les écarts entre TAI et TA(F)...

3.1.1. UTC(OP)

L'échelle de temps UTC(OP) a été maintenue à moins de 60 ns de UTC durant toute l'année 2008, respectant ainsi la recommandation actuelle du CIPM de garder les UTC(k) à moins de ± 100 ns ($k = 1$) de UTC. Sa stabilité de fréquence relative était meilleure que $1 \cdot 10^{-14}$ sur des durées de 5 d à 80 d.

3.1.2. TA(F)

Compte tenu du pilotage de la fréquence de TA(F) par les étalons primaires du laboratoire, l'exactitude de la fréquence de TA(F) a été aussi proche de la seconde du SI (inférieure à $\pm 3 \cdot 10^{-15}$) comme le montre la figure 2. Sa stabilité de fréquence relative est de $9,0 \cdot 10^{-16}$ à 80 d. Ces performances font de TA(F) l'une des échelles de temps les plus performantes du monde.

3.2. TAI

Le LNE-SYRTE participe au pilotage du Temps atomique international TAI en communiquant au BIPM (au moyen du lien principal TWSTFT ou du lien secondaire GPS P3) les étalonnages des masers à hydrogène du laboratoire par ses étalons primaires micro-ondes.

En 2007, le LNE-SYRTE a contribué 35 fois au pilotage du TAI (12 étalonnages par JPO, 8 par FO1, 9 par FO2 et 6 par FOM) contre 27 contributions en 2007 (12 étalonnages par JPO, 1 par FO1, 6 par FO2 et 8 par FOM) et 18 contributions en 2006 (11 étalonnages par JPO, 2 par FO1, 4 par FO2 et 1 par FOM). Ainsi en 2008, le LNE-SYRTE a fourni au BIPM, 23 des 45 étalonnages du TAI par des fontaines atomiques.

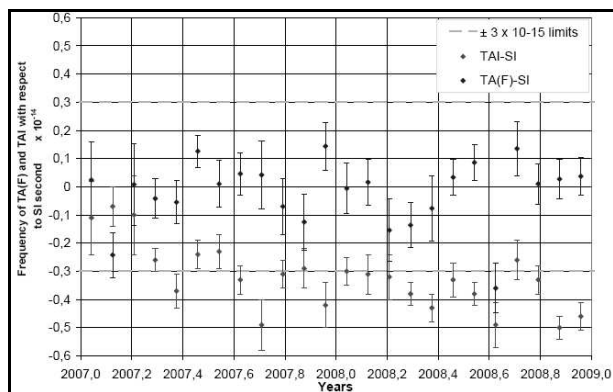


Fig. 2. – Fréquences moyennes normées de TAI et de TA(F) rapporté à la seconde du SI sur la période 2007-2009.

3.3. UTC

L'échelle de temps UTC est un compromis entre le TAI et l'UT1 liée à la rotation irrégulière de la Terre. Des secondes intercalaires sont introduites afin que l'écart entre UTC et UT1 ne dépasse jamais 0,9 s. Ainsi, le 31 décembre 2008, une seconde intercalaire positive a été introduite. Depuis l'instauration de ce système en 1972, le nombre de seconde intercalaire est donc aujourd'hui de 34.

3.4. Moyens de comparaisons et de transfert

Depuis le 1^{er} janvier 2005, le lien OP-PTB réalisé par TWSTFT est le lien principal pour la transmission de la contribution française au calcul du TAI par le BIPM. En cas d'indisponibilité de ce lien principal, le lien de secours est réalisé par GPS P3. Bien qu'un changement de satellite a été opéré en 2008, le lien principal OP-PTB réalisé par TWSTFT a pu être employé toute l'année avec une incertitude de 1,5 ns ($k = 1$) sur UTC-UTC(OP). Enfin, Le LNE-SYRTE a poursuivi la fourniture quotidienne des ses données de type GPS P3 au BIPM.

Comparaison de temps/fréquence par TWSTFT

Le LNE-SYRTE dispose aujourd'hui de deux stations TWSTFT. La première, notée OP01, est dédiée aux réseaux européen et nord-américain. La seconde (OP02), réservée au réseau asiatique, a été installée et a reçu la licence de l'ARCEP, pour une durée de 10 ans (renouvelable), afin d'émettre en bande Ku. En outre, son logiciel de contrôle, d'acquisition et de traitement des données a été mis au point et implémenté. Par ailleurs, la station OP02 est installée et motorisée pour qu'elle puisse être employée également sur les réseaux européen et nord-américain. Enfin, une campagne d'étalonnage en relatif

des retards de la station OP01 et des stations d'autres Laboratoires nationaux de métrologie européens a été réalisée au moyen d'une station portable placée en colocation des stations fixes de par et d'autre d'un lien donné. Ainsi, les incertitudes d'étalonnage des différents liens entre ces Laboratoires et le LNE-SYRTE se situent entre 0,9 ns et 1,1 ns ($k = 1$).

3.5. Galileo

Une campagne d'étalonnage en relatif des récepteurs GPS des Laboratoires nationaux de métrologie (INRIM, NPL, PTB) engagés dans Fidelity a été réalisée par le LNE-SYRTE au moyen d'un de ses récepteurs. Préalablement, le LNE-SYRTE a développé les logiciels permettant le traitement des données d'étalonnages. Ainsi, la liaison NPL-PTB utilisant la méthode GPS P3 a été étalonnée avec une incertitude de 5,3 ns ($k = 1$). Enfin, l'ensemble du système GPS (récepteur, antenne et son câble) a été transféré au CNES à Toulouse afin d'être étalonné en absolu.

4. Métrologie des fréquences optiques

4.1. Horloge à atomes de strontium

En 2007, l'exactitude de l'horloge à atomes de strontium avait été évaluée à $2,6 \cdot 10^{-15}$. L'amélioration de cette exactitude a nécessité en 2008 de rendre cette horloge plus stable. Cette étape a été réalisée d'une part en stabilisant le laser d'interrogation à 698 nm sur une cavité ultra-stable de haute finesse (600 000), et d'autre part en mettant au point une méthode de détection non destructive des atomes piégés. Enfin, la seconde enceinte à vide a été finalisée, permettant alors de disposer *in fine* de deux horloges à atomes de strontium.

4.2. Horloge à atomes de mercure

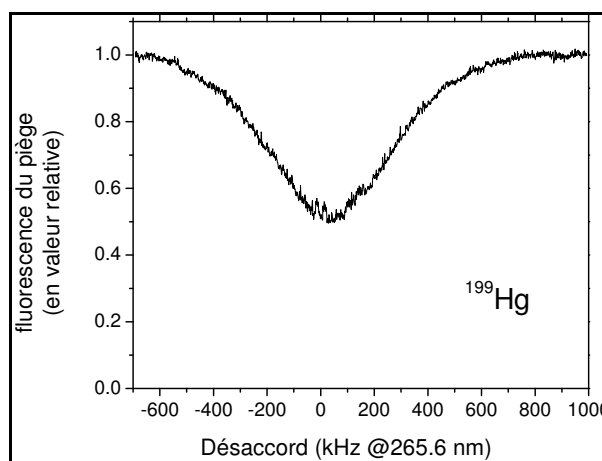


Fig. 3. – Spectre de la transition d'horloge du ^{199}Hg .

En 2008, le LNE-SYRTE a mené la première mesure mondiale de la spectroscopie de la transition d'horloge $^1\text{S}_0\text{-}^3\text{P}_0$ à 265,6 nm (laser ultra-stable à 1 062,5 nm quadruplé en fréquence au moyen de deux doublages

successifs) pour des isotopes fermioniques de l'atome de mercure préalablement refroidis dans un piège magnéto-optique. Ces fréquences mesurées par rapport aux références de fréquence micro-onde du laboratoire au moyen d'un peigne de fréquence généré par un laser femtoseconde titane-saphir sont de $1\,28\,575\,290\,808 \pm 5,6$ kHz pour l'isotope 199 (fig. 3) du mercure et $1\,28\,569\,561\,140 \pm 5,3$ kHz pour son isotope 201.

4.3. Lasers femtosecondes

En 2008, le LNE-SYRTE a acquis un laser femtoseconde fibré. Tout d'abord, quelques modifications ont été apportées pour améliorer les performances de ce laser (stabilité en température, fonctionnement en continu sur plusieurs semaines...), mais aussi celles du laser femtoseconde titane-saphir (bande passante de 120 kHz contre une dizaine de kilohertz initialement, fonctionnement en continu sur plusieurs heures...).

Ensuite, ces systèmes ont été employés lors de plusieurs campagnes de mesure :

- mesure de la transition d'horloge pour les isotopes 199 et 201 du mercure avec une exactitude de $5 \cdot 10^{-12}$;
- mesure de la transition d'horloge pour les isotopes 87 et 88 du strontium respectivement avec une exactitude de $2,6 \cdot 10^{-15}$ et $7,4 \cdot 10^{-14}$;
- comparaisons entre des signaux de fréquences optiques avec une stabilité de fréquence relative de $2,2 \cdot 10^{-15}$ à 1 s ;
- comparaisons entre des signaux de fréquences micro-ondes avec une stabilité de fréquence relative de $3 \cdot 10^{-15}$ à 1 s.

4.4. Lien optique ultra-stable

Les deux lasers ultra-stable à 1 550 nm ont été finalisés avec d'excellentes performances (largeur de raie meilleure que 1 Hz, stabilités de fréquence relatives meilleures que $2 \cdot 10^{-15}$ à 1 s et 10^{-14} à 100 s). Dans un premier temps, ces lasers ont été employés pour transférer le signal optique ultra-stable sur une fibre optique placée entre le LNE-SYRTE et le LPL à Villeteuse, soit une distance de 86 km aller-retour. Des stabilités de fréquence relatives de $1 \cdot 10^{-16}$ à 1 s et de $4 \cdot 10^{-19}$ à 10 000 s ont été obtenues avec ce lien compensé. Dans un second temps, le lien a été réalisé sur une distance de 172 km aller-retour en doublant le passage du signal entre le LNE-SYRTE et le LPL. Des stabilités de fréquence relatives de $4 \cdot 10^{-16}$ à

1 s et de $6 \cdot 10^{-19}$ à 10 000 s ont été obtenues avec ce lien compensé comme le montre la figure 4.

Enfin, une première expérience de transfert du signal optique ultra-stable sur une fibre optique véhiculant du trafic Internet a été réalisée en employant le réseau RENATER. Ce transfert, réalisé sur une distance de 108 km, a donné des stabilités de fréquence relatives de $4 \cdot 10^{-16}$ à 1 s et meilleures que $1 \cdot 10^{-19}$ à 10 000 s.

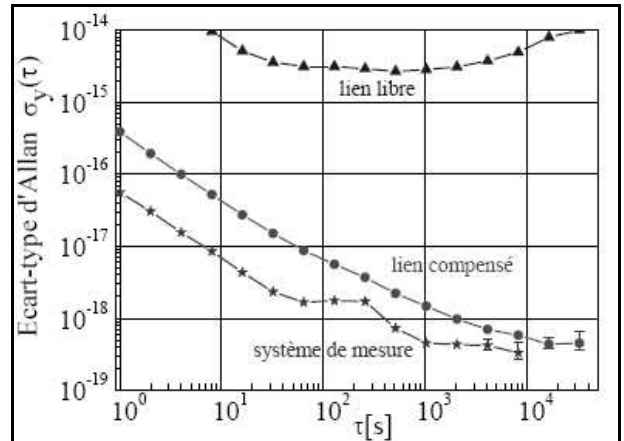


Fig. 4. – Stabilité relative de fréquence du lien optique de 172 km.

5. Capteurs inertiels

Le LNE-SYRTE développe un nouveau gyromètre de grande sensibilité ($1 \cdot 10^{-8}$ rad.s⁻¹ à court terme et $1 \cdot 10^{-9}$ rad.s⁻¹ à long terme). Ainsi, la conception et le montage de la source atomique comportant le MOT 2D et le MOT se sont achevés. Enfin, la zone interférométrique a été conçue et usinée.

6. Laboratoires associés

Avant 2008, deux laboratoires accrédités, le LNE-FEMTO-ST et le LNE-OB, étaient associés au LNE pour les raccordements non couverts par le LNE-SYRTE. En 2008, ces deux laboratoires ont fusionné pour former un nouveau laboratoire accrédité qui est associé au LNE : le LNE-LTFB (Laboratoire Temps Fréquence de Besançon). Ils couvrent notamment les mesures de densité spectrales de bruit de phase entre 5 MHz et 18 GHz, les mesures de stabilité de fréquence entre 0,1 s et 100 s, les mesures d'intervalle de temps jusqu'à 10 d, les mesures de fréquence (de 0,1 Hz à 1,3 GHz).