

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 sont deux laboratoires accrédités qui sont associés au LNE pour les raccordements non couverts par le LNE-SYRTE.

2. Métrologie des fréquences micro-ondes

2.1. Etalons 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 fonctionnant avec des atomes de césium.

2.1.1. Performances des fontaines atomiques

Après l'apport de quelques modifications (optimisation de la capture des atomes pour FO1, emploi d'un interrupteur interférentiel sur FO2 pour supprimer les signaux parasites micro-ondes pouvant affecter les atomes lors de leur vol libre...), les exactitudes des fontaines ont été ré-évaluées. FO1 présente une exactitude de $4,9 \cdot 10^{-16}$, la méconnaissance de la carte du champ micro-onde dans la cavité d'interrogation, étant aujourd'hui, la principale contribution à l'incertitude. Les exactitudes de FO2 en fonctionnement rubidium et de FOM ont été évaluées respectivement à $4,5 \cdot 10^{-16}$ et $7,1 \cdot 10^{-16}$. Par ailleurs, FOM a été transportée à l'université de Innsbruck en Autriche pour mesurer la fréquence optique (411 THz) des isotopes 40 et 43 de l'ion calcium.

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. Ainsi une stabilité de fréquence à court terme de l'ordre de $7 \cdot 10^{-14} t^{-1/2}$ 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 à court terme de l'ordre de $9 \cdot 10^{-14} t^{-1/2}$. Les différences de fréquence observées entre les fontaines confirment les niveaux d'exactitude affichés sur ces étalons.

Une comparaison a également été réalisée entre FO2 en fonctionnement rubidium et FOM sur une durée de 23 jours. Une stabilité de fréquence de $1,34 \cdot 10^{-13} t^{-1/2}$ a été obtenue, ce qui constitue un niveau de stabilité encore jamais atteint lors d'une mesure entre deux étalons fonctionnant dans le domaine micro-onde. A cette occasion, une nouvelle mesure de la fréquence hyperfine du rubidium a été réalisée, permettant donc d'améliorer la précision du test de la variation des constantes fondamentales mené avec les fontaines atomiques depuis 9 ans.

2.2. Projet Euramet 847

Ce projet auquel le LNE-SYRTE participait aux côtés de l'IPE, de la PTB et du ROA s'est terminé en 2007. Il visait notamment à explorer les performances des DMTDM développés pour les mesures de stabilité de fréquence à court terme d'oscillateurs ultra-stables. Des niveaux de plancher de *flicker* de quelques 10^{-14} à 5 MHz ont pu être mesurés dépassant ainsi les performances des dispositifs commerciaux.

2.3. PHARAO/ACES

Les tests au sol du modèle d'ingénierie de l'horloge à atomes froids Pharao se sont poursuivis au CNES à Toulouse et le modèle d'ingénierie a été complètement assemblé avec son ordinateur de bord UGB et son logiciel de commande. Toutefois, le comité des programmes scientifique (CPS) du CNES n'a pas recommandé, pour le moment, la réalisation du modèle de vol de Pharao compte tenu du budget important nécessaire.

Par ailleurs, le logiciel de traitement des données du lien micro-onde deux voies MWL de Aces a été développé. Ce logiciel vise à traiter les données relevées

au sol et dans l'espace afin d'en extraire les informations scientifiques exemptes de tous les effets perturbateurs. Afin de le valider, un second logiciel a été réalisé afin de simuler des mesures brutes perturbées du MWL. Les premiers tests menés fournissent des résultats satisfaisants.

2.4. Horloges compactes

Diverses optimisations (augmentation du nombre d'atomes froids, stabilisation en fréquence du laser de détection et réjection de ces fluctuations d'intensité...) ont permis progressivement d'améliorer la stabilité de fréquence à court terme de Horace pour atteindre aujourd'hui $3,7 \cdot 10^{-13} t^{-1/2}$. Toutefois, une remontée à moyen terme au niveau de quelques 10^{-14} est observée.

En outre, afin de répondre à l'objectif de miniaturisation du banc de refroidissement optique de Horace, des composants miniatures ont été développés puis testés (source laser compacte, cellules de césium pour l'asservissement en fréquence de la source laser). Dans cet objectif, un banc optique tenant sur un format A4 a été conçu. Il comporte la source laser compacte, un laser repompeur, des composants optiques et optoélectroniques.

2.5. Oscillateur photonique ultra stable OPUS

Ce projet vise à réaliser un oscillateur optique ayant une stabilité de fréquence de quelques 10^{-15} entre 1 s et 100 s avec un fonctionnement pratiquement continu. Pour cela, il repose sur l'asservissement d'un laser à 1 064 nm sur une frange issue d'une cavité optique de très haute finesse placée sous vide. Après la conception de la géométrie de la cavité, puis sa validation théorique, cette dernière a été produite (fig. 1).

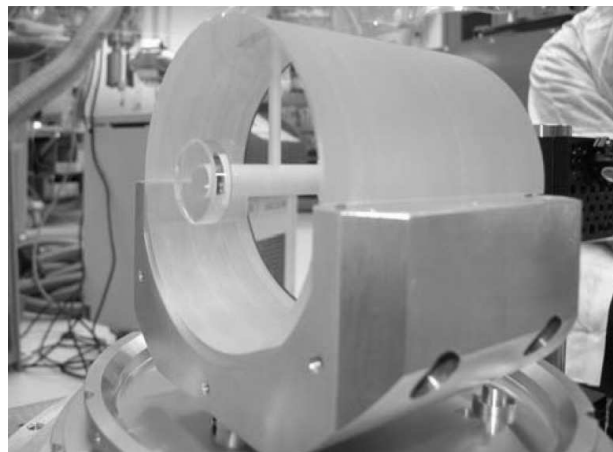


Fig. 1. – Cavité ultra stable installée sur son support.

Il s'agit d'une cavité cylindrique horizontale réalisée en ULE[®] avec des miroirs de haute finesse en silice fondue. Elle présente une finesse de 800 000 et a démontré une très faible sensibilité aux accélérations dans toutes les directions et avec différentes positions des points d'appuis. Enfin, une comparaison entre le laser Opus et le laser ultra stable de l'expérience de l'horloge à atomes de mercure a été réalisée et a montré une stabilité

de fréquence de $1,2 \cdot 10^{-15}$ à 1 s, dépassant les spécifications définies dans le cahier des charges (quelques 10^{-15} entre 1 s et 100 s).

2.6. Horloge sur puce à atomes

Ce projet a pour objectif de développer une horloge miniature sur une puce à atomes fonctionnant en alternance avec des atomes thermiques refroidis de rubidium et avec des atomes dégénérés de rubidium. Ces atomes sont piégés à proximité de la surface de la puce par le champ magnétique créé par le courant circulant dans les pistes conductrices. La stabilité de fréquence cible est de quelques 10^{-13} à 1 s.

La puce dédiée à ce projet (fig. 2) a été conçue, réalisée puis caractérisée. Elle est constituée de deux couches de microcircuits dont l'une comporte la ligne de transmission du signal micro-onde d'interrogation à 6,8 GHz et assure le confinement longitudinal des atomes, et l'autre assure le confinement transverse.

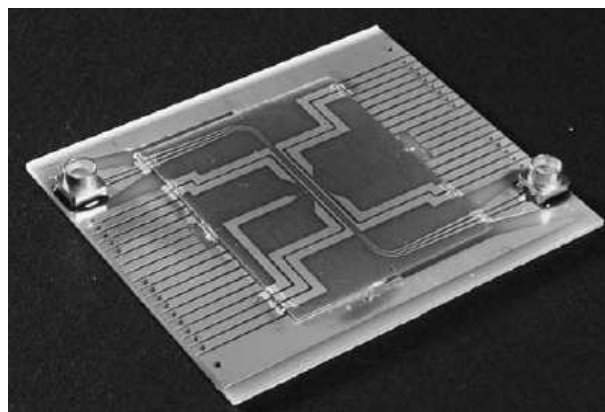


Fig. 2. – Puce dédiée au projet.

De même différents éléments (enceinte à vide, le banc optique et le chapeau optique) constituant l'expérience, ont été conçus puis réalisés. Une fois l'ensemble monté, les premiers atomes de rubidium thermiques refroidis ont pu être observés dans le piège magnéto-optique.

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, 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.

L'autre, 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 d'horloges commerciales à césium fonctionnant librement dans huit laboratoires en France. 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.

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 : les mesures rapportées à UTC(OP) du Loran-C et du temps diffusé par les satellites de la constellation GPS, les mesures de UTC(OP) et de la fréquence moyenne journalière de la porteuse de France Inter rapportées au 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 2007, 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 $8 \cdot 10^{-15}$ sur des durées de 5 d à 80 d.

Parallèlement, une nouvelle échelle de temps dénommée UTC(OP) maser est en cours de développement pour améliorer la stabilité de fréquence à court terme de l'échelle de temps UTC(OP) et la prédiction en temps réel de UTC. Pour cela, elle s'appuie sur un maser à hydrogène pour la stabilité de fréquence à court terme (1 d) et un groupe d'horloges commerciales à césium pour la stabilité de fréquence à long terme (30 d à 45 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 que celle de TAI comme le montre la figure 3.

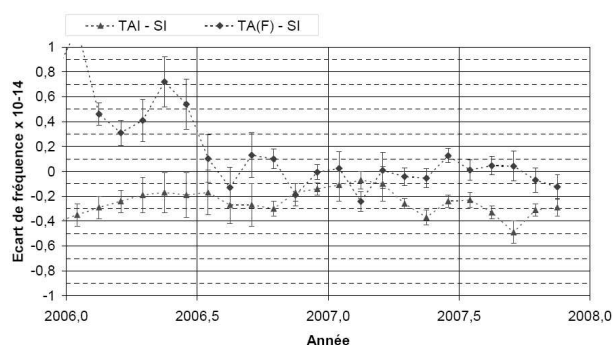


Fig. 3. – Fréquences moyennes normées de TAI et de TA(F) rapporté à la seconde du SI.

La stabilité de fréquence à long terme de TA(F) bénéficie aussi de ce pilotage. L'étude de la stabilité de fréquence de l'échelle de temps TA(F) montre qu'elle est de $1,1 \cdot 10^{-15}$ à 65 d, et que, pour des temps d'intégration compris entre 5 d et 65 d, elle présente un bruit blanc de fréquence.

Ainsi, TA(F) est l'une des échelles de temps atomique les plus exactes du monde et elle peut être employée pour caractériser sur le long terme les oscillateurs du laboratoire.

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 27 fois au pilotage du TAI (12 étalonnages par JPO, 1 par FO1, 6 par FO2 et 8 par FOM) contre 18 contributions en 2006 (11 étalonnages par JPO, 2 par FO1, 4 par FO2 et 1 par FOM). Ainsi en 2007, le LNE-SYRTE a fourni au BIPM, 15 des 29 étalonnages du TAI par des fontaines atomiques.

3.3. Moyens de comparaisons et de transfert

Le lien principal OP-PTB réalisé par TWSTFT (lien officiel depuis le 1^{er} janvier 2005) a été employé toute l'année 2007 pour transmettre la contribution française au calcul du TAI par le BIPM, excepté au mois de décembre 2007 où le lien de sauvegarde par GPS P3 a pris le relais à la suite d'une panne apparue sur la station TWSTFT OP01. En outre, depuis avril 2007 le LNE-SYRTE fournit quotidiennement, dans le cadre de la réalisation du GTSP par le consortium Fidelity, les données TWSTFT et GPS code C/A, ainsi que celles des horloges du laboratoire par rapport à UTC(OP).

3.3.1. Comparaison de temps/fréquence par TWSTFT

L'emploi du lien TWSTFT (entre janvier et novembre) a permis de conserver à moins de 1,5 ns l'incertitude sur l'écart entre UTC et UTC(OP).

En outre, la caractérisation préliminaire du retard absolu introduit, dans la bande Ku, par le mélangeur micro-onde équilibré (implanté dans le simulateur de satellite), a été réalisée au moyen d'une méthode développée par Agilent avec ses analyseurs de réseau vectoriel (technique de calibrage en employant un mélangeur de référence). Ainsi, la connaissance des retards internes du simulateur de satellite permet d'étalonner en absolu le retard interne de la station et contribue donc à améliorer l'exactitude lors de comparaisons d'horloges.

Enfin, une seconde station TWSTFT dédiée aux liaisons temps - fréquences avec des LNM asiatiques a été installée puis expérimentée. Elle permettra d'une part d'étendre les comparaisons d'horloges du LNE-SYRTE, et d'autre part, d'apporter des liens supplémentaires au BIPM pour l'élaboration du TAI.

4. Métrologie des fréquences optiques

4.1. Horloge à atomes de strontium

En 2006 la première évaluation de l'exactitude de l'horloge optique à atomes de strontium piégés avait conduit à $1,2 \cdot 10^{-14}$, avec comme contribution principale, l'incertitude liée à l'effet Zeeman du 1^{er} ordre. En 2007, en alternant les mesures sur des sous niveaux Zeeman opposés de l'état fondamental 1S_0 , le champ magnétique résiduel est mieux contrôlé ce qui conduit à diminuer sa contribution au bilan d'incertitude. Par conséquent, le niveau d'exactitude de cette horloge est aujourd'hui de $2,6 \cdot 10^{-15}$.

De plus, une seconde enceinte à vide avec un système de déflexion du jet atomique et le laser de refroidissement afférent ont été réalisés pour permettre d'effectuer des comparaisons entre deux nuages indépendants de strontium. Cela permettra alors de mieux discerner l'influence des différents effets systématiques.

4.2. Horloge à atomes de mercure

La source laser de refroidissement à 253,7 nm reposant sur le quadruplage en fréquence d'un laser à disque Yb:YAG a été réalisée puis stabilisée au moyen de la méthode de spectroscopie d'absorption saturée sur une cellule à vapeur de mercure. De plus, l'enceinte à vide accueillant les pièges magnéto-optiques où est obtenu le nuage dense d'atomes froids de mercure a également été réalisée. Dès lors, le refroidissement d'atomes de mercure a été observé, faisant du LNE-SYRTE le second laboratoire au monde à l'accomplir.

Le développement du laser d'interrogation à 265,6 nm reposant sur l'emploi d'une source ultra stable à 1 062,5 nm constituée d'un laser à fibre dopé ytterbium asservi sur une cavité ultra stable de haute finesse verticale s'est poursuivi. Ainsi, cette cavité ultra stable a été montée puis caractérisée (mesure de sa finesse, mesure de sa stabilité de fréquence au moyen du laser femtoseconde titane saphir, dans un premier temps par rapport à l'oscillateur cryogénique à résonateur en saphir asservi sur un maser, puis dans un second temps par rapport à Opus...). Ces mesures démontrent la grande qualité du niveau de performance de cette cavité.

4.3. Lien optique optique ultra stable

L'objectif de ce projet est de disséminer des fréquences optiques de référence sur de longues distances (de l'ordre de 1 000 km) avec une stabilité de fréquence meilleure que 10^{-17} en employant la phase d'une porteuse optique à 1 550 nm. Il a débuté avec des mesures

préliminaires de la stabilité de fréquence du transfert sur des liens de 7 km et 86 km compensés sans employer un laser à 1 550 nm stabilisé. Les résultats obtenus montrent une stabilité de fréquence de $5 \cdot 10^{-18}$ à 1 s et $2 \cdot 10^{-20}$ sur une journée pour le lien de 7 km, et $1 \cdot 10^{-15}$ à 1 s et $4 \cdot 10^{-19}$ sur une journée pour le lien de 86 km, ce qui confirme l'adéquation de ce type de lien avec l'objectif visé.

La stabilisation du laser, avec une largeur de raie de quelques hertz, nécessite la réalisation d'une cavité ultra stable de haute finesse. Ainsi deux lasers stabilisés sur des cavités ultra stables de finesse 800 000 ont été réalisés et présentent une stabilité de fréquence meilleure que $3 \cdot 10^{-15}$ à 1 s.

5. Capteurs inertiels

Les études menées en 2007 sur le gyromètre accéléromètre ont employé une configuration dans laquelle les lasers Raman sont dirigés verticalement, ce qui donne accès à la rotation suivant un axe horizontal et à l'accélération verticale. Après quelques modifications apportées à l'expérience (fibre polarisante...), les mesures de stabilité ont été réalisées.

Des stabilités de $2,4 \cdot 10^{-7}$ rad·s⁻¹ à la rotation et de $5 \cdot 10^{-7}$ m·s⁻² à l'accélération ont été obtenues à 1 s. Les sensibilités s'améliorent ensuite pour atteindre, à 1 000 s de temps de mesure, une stabilité à la rotation de 10^{-8} rad·s⁻¹ et une stabilité à l'accélération de 10^{-8} m·s⁻² à 5 000 s. Ces résultats sont aussi bons que ceux obtenus par les gyrolasers et par les gravimètres absolus.

En outre, l'étude des facteurs d'échelle montre un très bon accord avec les valeurs attendues et une très bonne linéarité, limitée par les fluctuations des biais qui semblent être liées à la position du nuage atomique dans les faisceaux lasers Raman.

6. Laboratoires associés

6.1. LNE-FEMTO-ST

Le LNE-FEMTO-ST développe une méthode d'étalonnage absolu pour la mesure de bruit de phase. Les premiers éléments du banc ont été testés et ce dernier est en cours de montage.

De plus, le LNE-FEMTO-ST, en collaboration avec l'IPE, s'est lancé sur l'évaluation et l'amélioration des limites de mesures de stabilité de fréquence à court terme et dans celles de confiance accordées dans la détermination de la variance d'Allan lors de l'asservissement d'un oscillateur sur un autre. Des mesures réalisées sur des oscillateurs à quartz à 5 MHz ont permis de déterminer un plancher de *flicker* à $4 \cdot 10^{-14}$.