

Temps et fréquences

Time and Frequency

1. Introduction

Les activités relatives au domaine de la métrologie du temps et des fréquences sont assurées par le LNE-SYRTE à l'Observatoire de Paris, et le LNE-INM au CNAM qui sont les deux laboratoires nationaux de métrologie désignés dans le cadre de la métrologie française. Par ailleurs, le département LPMO du LNE-FEMTO-ST et le LNE-OB (Observatoire de Besançon) sont deux laboratoires accrédités qui sont associés au LNE pour les étalonnages et le raccordement dans ce domaine.

2. Métrologie du temps

2.1. Échelle de temps

Deux échelles de temps 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 UTC(OP), constitue la réalisation physique de la référence internationale UTC. Elle est matérialisée par la plus stable des sept horloges à césium du LNE-SYRTE. Cette stabilité est déterminée par étude de la stabilité à long terme dans le passé. L'autre, le TA(F), est une échelle de temps scientifique qui vise les qualités de stabilité et d'exactitude. Elle est calculée mensuellement au LNE-SYRTE en utilisant les lectures quotidiennes d'un ensemble d'horloges à césium fonctionnant dans huit laboratoires. En 2006, le LNE-SYRTE a participé à plusieurs campagnes d'étalonnage de récepteurs GPS organisées par le BIPM. Pour cela, le récepteur transportable du BIPM est systématiquement étalonné par rapport au récepteur de référence du LNE-SYRTE au début et à la fin de chaque campagne.

2.1.1. UTC(OP)

L'échelle de temps UTC(OP) a été maintenue à moins de 50 ns de UTC durant toute l'année 2006. Sa stabilité de fréquence était inférieure à $1 \cdot 10^{-14}$ sur des durées de 5 d à 80 d. L'étude qui vise à réaliser une échelle de temps UTC(OP) reposant sur une solution de type algorithmique s'est poursuivie. Elle est basée sur l'utilisation d'un maser à hydrogène pour la stabilité à court terme et d'un ensemble d'horloges à césium pour la stabilité à long terme. Ainsi, un module de détection automatique de sauts de phase et/ou de données manquantes a permis de mettre en service un module d'élimination automatique

d'horloge. De plus, un mode de pondération basé sur la variance d'Allan a été intégré au logiciel.

2.1.2. TA(F)

La stabilité de fréquence de l'échelle atomique TA(F) a atteint en 2006 un palier de scintillation de fréquence à $2,4 \cdot 10^{-15}$ pour un temps d'intégration supérieur à 20 d. Cette année a été marquée par l'étalonnage de la fréquence du TA(F) par comparaison directe avec l'étalon à jet de césium JPO, puis avec les fontaines à atomes froids FO1 et FO2. Au 2^e semestre 2006 l'exactitude de la fréquence du TA(F) a été maintenue à $\pm 3 \cdot 10^{-15}$, ce qui en fait l'une des échelles de temps atomique les plus exactes du monde. La figure 1 présente l'évolution de l'écart relatif de fréquence « TA(F)-Étalon » sur l'année 2006 qui montre que les corrections appliquées au TA(F) améliorent l'exactitude de TA(F) par rapport à la définition de la seconde fournie par les étalons de fréquence.

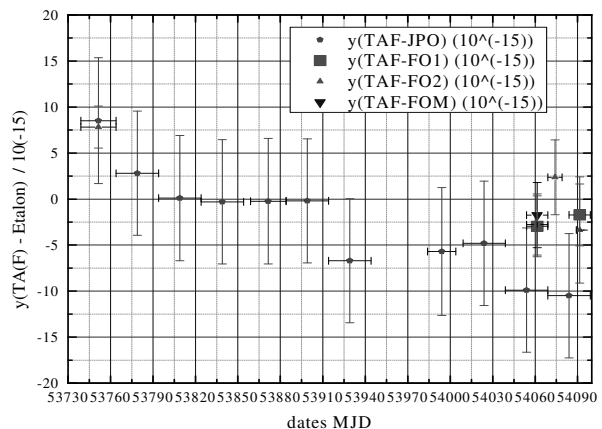


Fig. 1. – Moyenne des fréquences « TA(F)-Étalon » du LNE-SYRTE sur la période du 1^{er} janvier au 31 décembre 2006.

2.1.3. TAI et UTC

Les étalonnages des masers à hydrogène du LNE-SYRTE par les étalons primaires JPO, FO1, FO2 et FOM ont été communiqués, au moyen du lien officiel OP-PTB réalisé par TWSTFT, à la section temps du BIPM pour leur participation au calcul du TAI. Dans ce cadre, l'incertitude sur l'écart UTC-UTC(OP) a atteint son meilleur niveau en 2006, soit 1,5 ns, ce qui hisse le LNE-SYRTE au plus haut rang international.

2.1.4. Galileo Time Service Provider (GTSP)

Le consortium Fidelity, dont le LNE-SYRTE fait parti, a débuté la réalisation du prototype du GTSP afin de raccorder l'échelle de temps des satellites de GALILEO (GALILEO System Time, GST) à UTC pour sa validation en orbite prévue en 2008. Par ailleurs, la revue critique du design du prototype du GTSP a été passée avec succès.

2.2. Moyens de comparaisons et de transfert

2.2.1. Comparaison de temps/fréquence par TWSTFT

Pendant toute l'année 2006, le lien TWSTFT a constitué le lien principal pour la contribution française au TAI. L'incertitude sur l'écart sur UTC-UTC(OP) a été évaluée à 1,5 ns.

En outre, pour permettre l'étalonnage en absolu de la station TWSTFT au moyen du simulateur de satellite, le retard différentiel introduit par les différents éléments linéaires constituant le simulateur a été caractérisé au moyen d'un analyseur de réseau vectoriel. Par ailleurs, l'étude de la stabilité à court terme de l'ensemble « simulateur + station » a montré un excellent bruit de mesure inférieur à 30 ps sur 1 s comme le montre la figure 2.

Enfin, les travaux de mise en place de la seconde station TWSTFT pour des liaisons avec des laboratoires asiatiques a commencé.

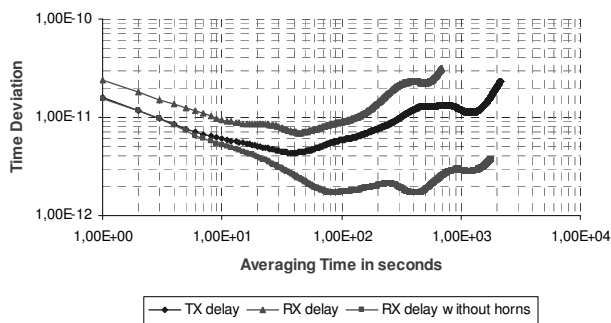


Fig. 2. – Ecart temporel d'Allan donnant la stabilité à court terme du dispositif composé de la station TWSTFT et du simulateur de satellite.

3. Métrologie des fréquences micro-ondes

3.1. Étalons primaires

3.1.1. Amélioration des fontaines atomiques

Pendant l'année 2006, de nombreuses améliorations ont été apportées aux trois fontaines atomiques. Ainsi, la fiabilité, la stabilité en fréquence et l'exactitude de FO1 ont été accrues. En effet, aujourd'hui elle peut fonctionner de manière automatique pendant une semaine ; sa stabilité est de $2,0 \cdot 10^{-14}$ à une seconde et son exactitude est de $4,2 \cdot 10^{-16}$. Concernant FO2, les différents éléments (collimateurs dichroïques, piège magnéto-optique 2D pour le rubidium) indispensables à son fonctionnement en simultané avec des atomes de rubidium et de césium, ont

été montés. L'exactitude de FO2 en fonctionnement avec du césium est de $4 \cdot 10^{-16}$. Suite à de profondes modifications (banc optique, électronique, tube césium), la fontaine mobile FOM a été remise en fonction. Sa stabilité est de $7,3 \cdot 10^{-14}$ à une seconde et son exactitude préliminaire est de $12 \cdot 10^{-16}$ (l'objectif étant d'atteindre une exactitude inférieure à $5 \cdot 10^{-16}$).

3.1.2. Comparaisons des fontaines atomiques

Deux comparaisons de fontaines atomiques ont été organisées. L'une locale, au moyen de l'oscillateur cryogénique, a duré 10 jours et a mis en évidence une différence de fréquence de $4,4 \cdot 10^{-16}$. L'autre a permis de comparer, au moyen du lien TWSTFT, les fontaines FO1 et FO2 à la fontaine CsF1 de la PTB. La comparaison entre FO1 et CsF1, d'une durée de 6 jours, a montré une différence de fréquence de $(2,4 \pm 1,4) \cdot 10^{-15}$. Celle entre FO2 et CsF1, d'une durée de 3 jours, a montré une différence de fréquence de $(2,8 \pm 1,9) \cdot 10^{-15}$.

3.1.3. Mesure de l'effet Stark avec FO1

Le décalage en fréquence (de la transition d'horloge) créé par le corps noir représente l'une des sources les plus significatives de perturbation de la précision des fontaines atomiques. Ce décalage dû à l'effet Stark lié au module du champ électrique par un coefficient k avait déjà été mesuré en 1997 par le LNE-SYRTE mais à fort champ. Des mesures complémentaires à bas champ ont été réalisées, et se sont révélées en accord avec celles de 1997. La valeur moyenne du coefficient k est de $2,273\ 2(34) \cdot 10^{-10}$ Hz/(V/m)⁻² comme le montre la figure 3.

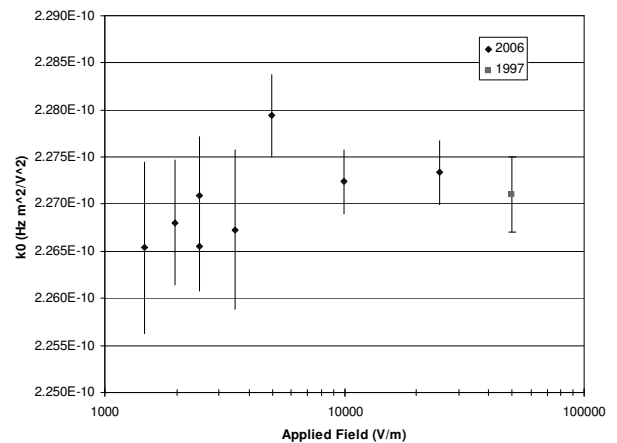


Fig. 3 – Mesure du coefficient Stark effectuée avec la fontaine FO1 en 2006 et en 1997.

3.2. PHARAO/ACES

Les premiers essais du modèle d'ingénierie de l'horloge spatiale à atomes froids PHARAO, au CNES à Toulouse, ont permis de valider son architecture et la spécification de chacune de ces composantes. Les mesures réalisées au sol donnent une largeur de 5,5 Hz pour la résonance centrale des franges de Ramsey et une stabilité de fréquence de $3,8 \cdot 10^{-13} \tau^{-1/2}$. Ces performances sont en

accord avec celles attendues et sont de bon augure pour atteindre les performances voulues pour le fonctionnement en micro-gravité.

De plus, la validation de la charge utile du projet ACES a connu des progrès importants. ACES comprend l'horloge PHARAO, le maser à hydrogène, le lien micro-onde deux voies et le dispositif FCDP (*Frequency Comparison and Distribution Package*) qui permet de distribuer le signal d'horloge de référence vers le lien micro-onde et d'asservir la phase de l'oscillateur local micro-onde de PHARAO sur le signal du maser. Le modèle d'ingénierie du FCDP a été testé avec succès. Il a été montré qu'il n'apporte pas de dégradation du bruit de phase du signal d'interrogation micro-onde. En outre, le programme de modélisation sur les incertitudes de transfert temps-fréquences sur ACES a été finalisé.

3.3. Horloges compactes

La caractérisation métrologique du nouveau prototype de l'horloge HORACE apportant diverses améliorations par rapport au précédent (dont un faisceau sonde vertical de diamètre important, de nouveaux hublots...) a débuté. Ainsi, les franges de Ramsey obtenues ont des largeurs de 15 Hz et la mesure de la stabilité en fréquence donne $8 \cdot 10^{-13}$ à 1 s.

Pour l'horloge CPT, différents éléments du banc optique équipé des deux diodes à 895 nm ont été remplacés et la cellule de césium a été optimisée. La stabilité de fréquence a été grandement améliorée et vaut actuellement $2 \cdot 10^{-12}$ sur 1 s.

4. Métrologie des fréquences optiques

4.1. Horloge à atomes de strontium

Les performances de l'horloge optique à atomes de ^{87}Sr piégés dont les travaux ont débuté en 1999 ont été évaluées pour la première fois au cours de cet exercice. Ceci a conduit à une exactitude de $1,2 \cdot 10^{-14}$, l'incertitude liée à l'effet Zeeman du 1^{er} ordre étant la contribution la plus importante. En outre, la fréquence de la transition d'horloge du strontium a été mesurée. Elle est de 429 228 004 229 879 (5) Hz, ce qui est en parfait accord avec les mesures effectuées au JILA (Université du Colorado et NIST) et à l'Université de Tokyo. Cette mesure de fréquence a contribué à la recommandation par le CIPM de cette transition comme référence secondaire pour la réalisation de la seconde.

L'horloge fonctionnant avec l'isotope bosonique ^{88}Sr a été mise en œuvre en utilisant un schéma qui jusqu'alors n'existait que théoriquement. Cela a montré que ce schéma permettrait d'obtenir une exactitude intéressante que si la largeur des résonances est au niveau de 0,1 Hz. La transition d'horloge du ^{88}Sr a été mesurée avec une incertitude de $5 \cdot 10^{-14}$.

4.2. Horloge à atomes de mercure

Le développement de l'horloge à atomes de mercure s'est poursuivi. Ainsi, l'utilisation d'un laser à disque Yb:YAG quadruplé en fréquence au moyen de deux doublages successifs, a permis d'obtenir une puissance de 700 mW pour la source laser de refroidissement à 253,7 nm. Cette source sera stabilisée en fréquence sur des cellules à vapeur de mercure au moyen de la méthode de spectroscopie d'absorption saturée. Concernant la source d'interrogation à 265,6 nm, une puissance de 6 mW a été obtenue (l'objectif étant d'obtenir 5 mW) en réalisant un quadruplage en fréquence d'une diode α -DFB à 1 062,5 nm.

4.3. Horloge à atomes d'argent

L'activité du LNE-INM consacrée à l'horloge optique à atomes d'argent s'est poursuivie en 2006 par le développement des sources lasers de refroidissement et d'interrogation à partir non plus d'un laser à colorant, mais d'un laser solide YLF:Nd pompé par diode. Ainsi pour réaliser la transition d'interrogation à 661,2 nm une centaine de milliwatts a été obtenue par doublage intracavité de laser dont la cavité en anneau est équipée d'un cristal de LBO. Concernant la transition de refroidissement à 328 nm, une puissance de 80 mW a été obtenue. Diverses améliorations sont envisagées pour disposer des 300 mW nécessaires.

5. Capteurs inertiels

Après une période de modifications profondes des sources atomiques, une étape importante de l'évaluation du gyromètre-accéléromètre a été franchie permettant d'améliorer la sensibilité de près d'un ordre de grandeur en terme de rotation ($2,8 \cdot 10^{-7} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ en 1 s d'intégration), qui est maintenant équivalente à celle des gyromètres optiques à fibre.

De plus, une première phase de l'étude de l'exactitude a été réalisée, notamment en mesurant la variation du facteur avec le temps d'interrogation à mieux que 0,2 %. Ce résultat permet de montrer que l'un des intérêts principaux de ce type de capteur est le très bon contrôle des paramètres expérimentaux, nécessaire à l'obtention d'une grande exactitude et stabilité à long terme.

Enfin, la séparabilité des déphasages de rotation et d'accélération a été montrée à un très bon niveau ($1,5 \cdot 10^{-4} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} / \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$), démontrant la pertinence de ce type de capteur pour des applications à la navigation inertielle.

6. Lien optique ultra stable

L'étude d'une dissémination de référence de fréquence micro-onde (100 MHz ou 1 GHz) par fibre optique *via* la modulation d'une porteuse optique dans le domaine des télécommunications s'est achevée cette année. Les fluctuations de phase dues aux vibrations mécaniques et

aux variations de température dans les fibres optiques sont corrigées au moyen d'un système de compensation. Pour cela deux approches ont été développées, l'une s'appuyant sur une compensation électronique et l'autre sur une compensation optoélectronique. Ainsi, une référence de fréquence de 1 GHz a été transférée sur une distance de 186 km avec une stabilité relative de $1 \cdot 10^{-14}$ sur 1 s d'intégration et de quelques 10^{-18} sur la journée comme le montre la figure 4.

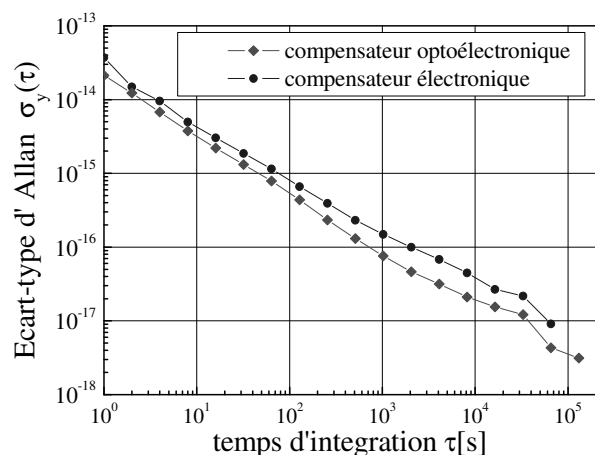


Fig. 4 – Stabilité de fréquence du lien optique compensé avec une fréquence de transfert de 1 GHz sur une distance de 186 km.

7. Laboratoires associés

7.1. LNE-FEMTO-ST/LPMO

Le LPMO est accrédité pour les étalonnages de sources de fréquence entre 5 MHz et 18 GHz en terme de bruit de phase. Il l'est également pour caractériser la stabilité à court terme des signaux de fréquence de 1 MHz à 1 GHz pour des temps d'intégration de 0,1 s à 100 s. Les mesures de stabilité à court terme sont réalisées par comparaison entre le dispositif sous test et l'oscillateur de référence asservi sur une horloge à césium ; la principale limitation de ces mesures étant le bruit propre du pré-multiplicateur d'écart. Pour remédier à ce problème, le

LPMO a développé en 2006 un nouveau pré-multiplicateur d'écart de facteur de multiplication 10 présentant un bruit propre réduit et destiné à être utilisé sur le banc de mesure accrédité. Ainsi à ce jour la stabilité de fréquence est à 5 MHz, $5 \cdot 10^{-14}$ à 1 s.

7.2. LNE-OB

Le LNE-OB participe à l'élaboration du TA(F) et du TAI au moyen de trois horloges atomique à jet de césium. Le LNE-OB est accrédité pour l'étalonnage de montres, chronomètres... Il a également mis au point un système dénommé SYREF (fig. 5) regroupant en un seul appareil les systèmes d'acquisition, de comparaison, de traitement et de stockage des données, et permettant de raccorder les laboratoires et industriels aux références nationales de fréquence par comparaison GPS.



Fig. 5 – Système SYREF.

En 2006, pour réaliser les transferts de temps, un récepteur Ashtech Z12T a été mis en place pour palier aux risques de disfonctionnement du récepteur de référence Sercel NRT2. En outre, les équipements opérationnels du lien optique entre le LNE-OB et le LNE-FEMTO-ST (départements LPMO et LCEP) ont été mis en place, permettant ainsi l'élaboration d'une référence commune présentant de bonnes performances en terme de stabilités à court et à long terme.