

# Temps - Fréquences

## *Time - Frequency*

### 1. Introduction

L'exercice 2004 a vu de nombreux faits marquants scientifiques, que ce soit au LNE-SYRTE et LNE-INM, les laboratoires nationaux de métrologie dans le domaine ou dans les deux laboratoires associés au LNE, le LNE-FEMTO-ST (département LPMO) et le LNE-OB (Observatoire de Besançon). Parmi ces faits marquants, la comparaison internationale à distance de masers est à souligner compte tenu de la participation des principaux étalons primaires étalonnant le TAI et de la mise en œuvre des trois outils les plus efficaces sur de longues distances. Les résultats de cette comparaison ont mis en avant l'ensemble des améliorations apportées aux différentes expérimentations impliquées.

### 2. Métrologie du temps

#### 2.1. Échelles de temps

Deux références de temps sont établies par le LNE-SYRTE et mises à la disposition des utilisateurs avec l'aide de l'Observatoire de Besançon, laboratoire associé au LNE. Comme l'an passé, le LNE-SYRTE a participé à plusieurs campagnes BIPM d'étalonnage de récepteur GPS. Lors de ces campagnes, le récepteur transportable du BIPM est systématiquement étalonné par rapport au récepteur de référence du LNE-SYRTE en début et fin de campagne.

##### 2.1.1. UTC(OP)

L'échelle UTC(OP) a été en 2004, une référence de fréquence dont la stabilité était inférieure à  $9 \cdot 10^{-15}$  sur des durées de 5 d à 80 d. Cette échelle a été maintenue à moins de 50 ns de UTC durant toute l'année. L'étude visant à réaliser une meilleure échelle UTC(OP) reposant sur une solution de type algorithmique s'est poursuivi, en 2004 l'algorithme a permis d'atteindre une stabilité de  $3 \cdot 10^{-15}$  à 40 d.

##### 2.1.2. TA(F)

Les corrections de fréquence appliquées au TA(F), la seconde référence de temps, ont permis d'éliminer l'effet de dérive de fréquence constaté ces dernières années entre 40 d et 80 d. La stabilité de fréquence du TA(F) a atteint

en 2004, un pallier de scintillation de fréquence à  $2,4 \cdot 10^{-15}$  pour un temps d'intégration de 20 d et se maintient au-delà de 80 d. L'exactitude du TA(F) a été améliorée à l'aide des étalons primaires JPO, FO2 et FOM du laboratoire et a atteint  $1 \cdot 10^{-14}$  en 2004.

##### 2.1.3. Échelle de temps de EGNOS

Dans le cadre du programme EGNOS, système de radionavigation par satellite complémentaire au GPS et à GLONASS, la mise en œuvre opérationnelle de la station sol RIMS-UTC au LNE-SYRTE a été validée par L'ESA.

##### 2.1.4. Aspects temps de Galileo

Le LNE-SYRTE a été inclus dans un consortium comprenant entre autres, le NPL, la PTB, l'INRIM et le CNES pour répondre à l'appel d'offre du « *Galileo Joint Undertaking* » (GJU) concernant le « *Galileo Time Service Provider* » (GTSP). Le GJU est en charge de la mise en œuvre de Galileo et le GTSP est en charge des aspects temps du projet.

### 2.2. Moyens de comparaisons

En plus de ces travaux, une évaluation complète du bilan d'incertitudes sur des comparaisons d'horloges atomiques par lien micro-ondes TWSTFT a été effectuée. L'incertitude combinée vaut  $\pm 1,1$  ns ( $1\sigma$ ). La station a également été étalonnée en relatif pour la première fois, lors d'une campagne BIPM avec une station portable de TUG : une incertitude de type A de  $\pm 0,43$  ns ( $1\sigma$ ) a été obtenue. Suite à cet étalonnage, le lien entre l'Observatoire de Paris (OP) et la PTB par TWSTFT (incertitude combinée de  $\pm 1$  ns ( $1\sigma$ )) est depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2005, le lien principal dans la contribution française de UTC(OP) au TAI. Le lien OP-PTB par GPS C/A (incertitude combinée de  $\pm 6$  ns ( $1\sigma$ )) est désormais un lien de sauvegarde.

Notons également que le site du LNE-SYRTE est redevenu station IGS en 2004 et est devenu station du réseau GPS permanent français, sous la responsabilité de l'IGN.

### 2.3. Comparaisons à distance

Suite à une nouvelle comparaison directe avec la PTB, de masers à hydrogène avec des liens GPS P3 et TWSTFT au premier trimestre 2004, une comparaison impliquant la PTB, le NPL, l'IEN, le NIST et le LNE-SYRTE a eu lieu. Elle impliquait quatre fontaines atomiques, cinq masers (ou ensemble de masers) à hydrogène et trois moyens de comparaison, le GPS Carrier Phase (GPS CP), traité par l'AIUB, s'ajoutant au TWSTFT, traité par les LNM, et au GPS P3 traité par le BIPM.

Sur la figure 1, on distingue les étalons primaires de fréquence de l'IEN noté CsF1 et du LNE-SYRTE noté FO2 ainsi que les oscillateurs locaux, des masers à hydrogène : Hm2 pour l'IEN et H816 pour le LNE-SYRTE.

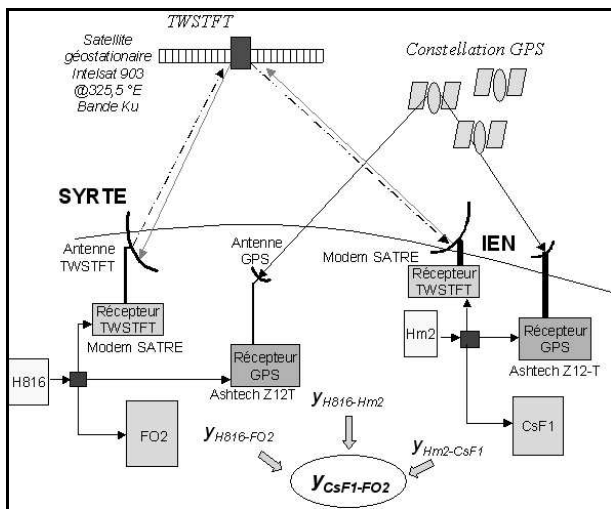


Fig. 1. - Schéma du dispositif de comparaison de fréquence d'horloges distantes entre l'IEN et le LNE-SYRTE. Les différences de fréquences sont notées  $y$ .

Les fluctuations observées sur le lien OP-PTB, sur une période d'analyse de 27 d pour le TWSTFT et 19 d pour le GPS, sont de 4,5 ns par la méthode TWSTFT et de 9 ns par la méthode GPS P3. Par contre les fluctuations observées sur le lien OP-NPL, sur une période d'analyse de 27 d pour le TWSTFT et 20 d pour le GPS, sont de 6 ns par les deux méthodes. Ce lien est plus bruité que celui avec la PTB. Cependant les écarts type temporel d'Allan montrent clairement que les masers sont atteints par le lien TWSTFT à 0,6 d et au bout de 2 d par le GPS P3 pour les deux liens OP-PTB et OP-NPL. Cette étude a permis de comparer les trois liens et de positionner le GPS CP non utilisé au LNE-SYRTE par rapport aux deux autres liens. La figure 2 permet de comparer les trois techniques pour le lien OP-NPL.

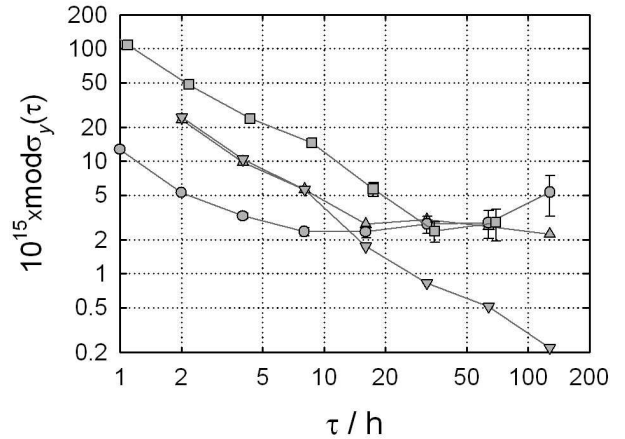


Fig. 2. - Instabilités relatives de fréquence exprimées en  $\text{mod}_{\sigma_y}(\tau)$ , obtenues avec les trois techniques de comparaison à distance : TAI P3 (carrés), GPS CP (cercles) et TWSTFT (triangles pointant vers le haut), pour le lien OP-NPL. Est également représentée la différence entre TWSTFT et GPS CP (triangles pointant vers le bas). Les liens TWSTFT et GPS CP voient le maser au bout de 0,6 d et au bout de 2 d pour le lien GPS P3.

## 3. Fréquences micro-ondes

### 3.1. Fontaines atomiques

#### 3.1.1. Étalonnage du TAI

Avant d'être arrêté en juin pour recharger les fours à césium, l'étalon à jet de césium à pompage optique JPO a contribué en 2004 à 4 campagnes d'étalonnage du TAI. La fontaine mobile FOM a également contribué à un étalonnage en début d'année avant d'être démontée pour changer le tube d'horloge, améliorer la stabilité du champ magnétique et la détection. Quant à FO2, l'étalon a fourni 4 étalonnages « directs » en 2004 plus un étalonnage issu de la comparaison à distance avec les étalons primaires de l'IEN et du NPL. Notons que ces sessions d'étalonnage du TAI et autres évaluations des étalons primaires sont grandement facilitées par la fiabilité de fonctionnement de l'oscillateur ultra stable (OUS) cryogénique du LNE-SYRTE dont l'autonomie courante est de 25 d.

#### 3.1.2. Améliorations des étalons

Plusieurs améliorations visant à optimiser la stabilité et l'exactitude de fréquence des étalons et également à fiabiliser l'utilisation des fontaines atomiques ont été apportées en 2004. Sur la fontaine historique FO1, notons entre autre que la méthode du passage adiabatique a été mise en place pour permettre un meilleur contrôle du déplacement collisionnel ( $\sim 1\%$ ) et que l'amélioration du laser de détection et de sa stabilisation permet d'atteindre une stabilité court terme excellente de  $2,8 \cdot 10^{-14} \cdot \tau^{-1/2}$  lorsque l'oscillateur cryogénique est utilisé. Une nouvelle source d'atomes froids basée sur un piège magnéto-optique à deux dimensions (MOT-2D) a été développée permettant une consommation de césium moindre. Sur la partie césium de la fontaine FO2, des améliorations telles que le contrôle automatique du champ magnétique en

cours d'intégration (par spectroscopie de la transition  $F = 3, m_F = 1 \rightarrow F = 4, m_F = 1$ ) a été mis en place, rendant négligeable ( $< 3 \cdot 10^{-17}$ ) l'incertitude liée à l'effet Zeeman quadratique. L'homogénéité de la température au niveau de la zone d'interrogation a été améliorée d'un facteur 10, elle est désormais de  $\pm 0,1$  K. L'incertitude sur la température du rayonnement thermique vu par les atomes est estimée de 0,2 K, l'incertitude correspondante sur la correction liée au rayonnement du corps noir est de  $4,6 \cdot 10^{-17}$ . Un MOT-2D à rubidium sur FO2 a également été développé.

### 3.1.3. Comparaisons directes

La fiabilisation de l'oscillateur d'interrogation constitué de l'oscillateur cryogénique asservi en phase sur un des masers à hydrogène et sa distribution vers la fontaine FO1 ont permis de réaliser pour la première fois une comparaison directe entre FO1 et FO2 avec l'oscillateur cryogénique. Une stabilité à court terme de  $5 \cdot 10^{-14} \cdot \tau^{-1/2}$  a été obtenue entre les deux fontaines. A long terme, la stabilité a atteint la valeur remarquable de  $2,2 \cdot 10^{-16}$  à 50 000 s. La différence de fréquence observée au cours de cette comparaison entre les deux fontaines est de  $(4 \pm 2,2) \times 10^{-16}$ , un très bon accord qui confirme parfaitement les exactitudes affichées ( $7,5 \cdot 10^{-16}$  et  $6,5 \cdot 10^{-16}$ ).

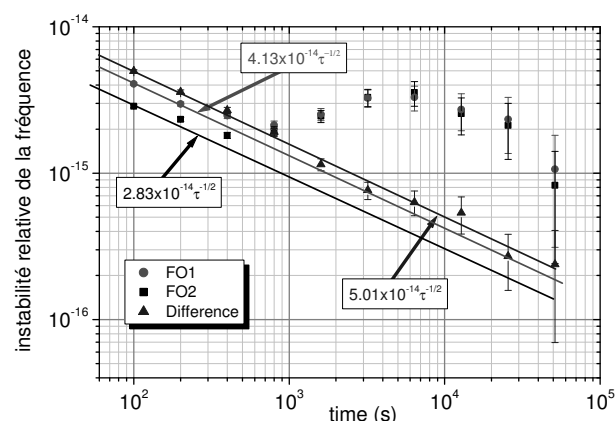


Fig. 3. - Stabilité de chacune des fontaines contre l'oscillateur d'interrogation (OUS + maser) (ronds et carrés). Les stabilités prennent en compte la mesure différentielle du déplacement collisionnel ainsi que les corrections des autres effets systématiques. L'autre courbe (triangles), représente la stabilité de la différence de fréquence entre les deux fontaines. Elle vaut  $5 \cdot 10^{-14} \cdot \tau^{-1/2}$  et descend comme du bruit blanc de fréquence jusqu'à la valeur remarquable de  $2,2 \cdot 10^{-16}$  à 50 000 s.

### 3.1.4. Mesure de la fréquence hyperfine du $^{87}\text{Rb}$

La fontaine FO2 a été utilisée pour réaliser une nouvelle mesure de la fréquence hyperfine du  $^{87}\text{Rb}$  par comparaison avec FOM, utilisant du césium. Cette mesure a permis d'améliorer la précision du test de la stabilité des constantes fondamentales réalisé avec les fontaines. Grâce aux comparaisons Rb/Cs effectuées les 6 dernières années, la fréquence hyperfine du  $^{87}\text{Rb}$  est la fréquence atomique la mieux connue en unité SI, au point qu'en 2004, cette

transition a été recommandée par le groupe de travail du CCTF du BIPM comme représentation secondaire de la seconde avec la fréquence mesurée au LNE-SYRTE : 6 834 682 610,904 324 Hz. C'est la première transition atomique, et pour l'instant la seule, qui soit recommandée par le CCTF comme représentation secondaire de la seconde.

### 3.1.5. Comparaison avec les étalons du NPL et de L'EN

La comparaison mentionnée au paragraphe 2.2 a permis de comparer les étalons CsF1 de l'EN, CsF1 du NPL et FO2 du LNE-SYRTE. Cette comparaison a montré un écart de fréquence de  $40,1 \cdot 10^{-16} \pm 15,7 \cdot 10^{-16}$  entre FO2 et CsF1(EN) et de  $8,1 \cdot 10^{-16} \pm 15,0 \cdot 10^{-16}$  entre FO2 et CsF1(NPL) par lien TWSTFT.

## 3.2. ACES/PHARAO

Le SYRTE a contribué à l'installation d'un oscillateur cryogénique au CNES Toulouse, et a livré au CNES les systèmes de synthèse de fréquence destinés aux comparaisons entre les différentes horloges pendant les tests au sol. Outre le suivi industriel, divers éléments ont été testés au laboratoire : réservoir de césium, modèle de vol de la cavité micro-onde (testé sur FO1), source hyperfréquence (testé sur FO2). La source hyperfréquence a permis d'obtenir une stabilité de  $8 \cdot 10^{-14} \cdot \tau^{-1/2}$ , un record pour une source à base d'oscillateur à quartz.

## 3.3. Horloges compactes

Les premières franges de Rabi et de Ramsey ont été observées dans l'horloge HORACE en détectant les populations atomiques par temps de vol. Les signaux obtenus, de largeur de raie inférieure à 25 Hz, valident ainsi l'interrogation micro-onde dans la cavité HORACE. Sur le projet CPT, une méthode d'interrogation pulsée a permis d'observer pour la première fois des franges de Ramsey avec une interrogation de type CPT. Plusieurs séquences d'interrogation et détection en étudiant la relaxation collisionnelle de la cohérence hyperfine induite ont été testées permettant d'observer des largeurs de raies de 25 Hz. Cette méthode originale d'interrogation et détection a fait l'objet d'un brevet. Les mesures très préliminaires ont donné une stabilité de fréquence de quelques  $10^{-12}$  sur 1 seconde d'intégration.

## 4. Fréquences optiques

Parallèlement aux études visant à développer des étalons de fréquences optiques, à atomes de strontium au LNE-SYRTE et à atomes d'argent au LNE-INM, est mis en place un dispositif de mesure de fréquences basé sur un laser femtoseconde. L'objectif est d'obtenir une résolution de mesure voisine des exactitudes visées pour les horloges optiques ( $10^{-17}$ ). Cet outil a permis en 2004 de comparer des fréquences micro-onde et infrarouge avec une stabilité de  $3 \cdot 10^{-14}$  à 1 s.

#### 4.1. Horloge à atomes de strontium

L'activité a essentiellement été consacrée à la mise au point du piège dipolaire. Suivant la proposition formulée par Katori en 2001, l'horloge à Sr fonctionnera avec des atomes piégés dans un réseau optique formé par une onde stationnaire à 813 nm. Le premier problème qui se pose est de charger ce piège avec des atomes. Une manière de charger le piège consisterait à refroidir les atomes en deux étapes, dans un premier temps avec un piège magnéto-optique bleu, dans un deuxième temps avec un piège sur une transition atomique étroite. Afin de limiter l'effet Dick, le LNE-SYRTE a décidé s'affranchir de la deuxième étape de refroidissement car ce second refroidissement accroîtrait de manière considérable le temps « mort » de l'expérience. La méthode retenue est de réaliser un piège aussi profond que possible et de sélectionner spatialement les atomes. Dans une première version de l'expérience la puissance maximale disponible dans la cavité est proche de 3 W. Afin d'optimiser la profondeur du piège (proportionnelle à l'intensité pic du faisceau laser) le faisceau est focalisé au centre de l'enceinte à vide avec un diamètre minimal de 170  $\mu\text{m}$ , ce qui conduit à une profondeur de piège de l'ordre de 100  $\mu\text{K}$ . Une sélection spatiale des atomes est réalisée au moyen de deux faisceaux lasers : les atomes atteignant le centre du piège sont pompés optiquement vers un niveau métastable et si leur énergie cinétique est suffisamment basse, ils restent en principe piégés. Avec ce dispositif, on s'attend à capturer environ  $10^{-3}$  des atomes produits par la première étape de refroidissement. Parallèlement à la mise au point du piège dipolaire, une étude théorique a été menée concernant la profondeur du piège. Si pour le chargement, il est nécessaire de disposer d'un piège profond, pour la phase d'interrogation, ce piège doit être aussi peu profond que possible afin de minimiser les perturbations de la transition d'horloge. Par ailleurs, la transition piège profond/piège peu profond peu *a priori* être faite en un temps court (quelques millisecondes) sans perte d'atomes si l'on se place dans des conditions d'adiabaticité. Le laboratoire a montré que l'utilisation d'un piège strictement périodique tel que proposé par Katori était assez contraignante : l'effet tunnel entre puits voisins formés par l'onde stationnaire conduit à un mouvement résiduel des atomes dans le réseau entraînant déplacement de fréquence et élargissement des résonances et *in fine* à la nécessité d'un piège très profond. Le LNE-SYRTE propose de disposer le système verticalement afin d'éradiquer l'effet tunnel : du fait de la gravité, les puits de potentiel voisins n'ont pas exactement la même énergie ce qui rend l'effet tunnel non résonant et le réduit considérablement. Plus d'un ordre de grandeur peut être gagné par cette technique.

#### 4.2. Horloge à atomes d'argent

L'activité 2004 a été marquée par la première observation de cette raie de résonance à deux photons à 661 nm. Comme pour la transition à deux photons de 576 nm observée l'année précédente, il s'agit d'une première mondiale car cette transition n'avait jamais été observée auparavant. Cette transition d'horloge a pu être

observée avec un rapport signal sur bruit équivalent à celui obtenu à 576 nm, soit un rapport signal sur bruit supérieur à 100 et une largeur à mi-hauteur de l'ordre du mégahertz. Toutes les raies de structures hyperfines des deux isotopes  $^{107}\text{Ag}$  et  $^{109}\text{Ag}$  ont été mesurées par rapport à la composante de structure hyperfine  $a_1$  de la raie de l'iode moléculaire prise comme raie de référence et observée par spectroscopie d'absorption saturée. La valeur de la composante de structure hyperfine  $a_1$  de l'iode a été mesurée au BIPM avec une incertitude de l'ordre de quelques kilohertz.

#### 4.3. Étalon secondaire $\text{CO}_2/\text{OsO}_4$

Outre la comparaison de fréquence entre l'oscillateur cryogénique (12 GHz) et le laser  $\text{CO}_2/\text{OsO}_4$  (29 THz) avec le dispositif femtoseconde, la spectroscopie des raies d'absorption à deux photons de  $\text{OsO}_4$  au voisinage de 10,4  $\mu\text{m}$ , très prometteuses pour accroître la stabilité à court terme des lasers à  $\text{CO}_2$  a été poursuivie en 2004. 34 transitions à deux photons de  $\text{OsO}_4$  ont été observées et localisées, présentant des contrastes allant de 0,1 % à 10 %. Un travail préliminaire a permis d'obtenir une stabilité de fréquence des lasers à  $\text{CO}_2/\text{OsO}_4$  de  $8,4 \cdot 10^{-15}$  à 1 s, en utilisant une transition particulière, accessible par les deux dispositifs  $\text{CO}_2/\text{OsO}_4$  en même temps. Malheureusement une forte dérive a été observée, qui dégradait la stabilité de fréquence spontanément.

### 5. Liens optiques ultra-stables

Un signal métrologique à 100 MHz, issu de l'oscillateur cryogénique, présentant une stabilité de  $10^{-14}$  sur 1 s et  $10^{-17}$  sur 1 d, a été transféré par la liaison fibrée de 88 km aller retour, reliant le Laboratoire de Physique des Lasers (LPL) au LNE-SYRTE. Ce signal pilotant le dispositif femtoseconde du LPL, ce laboratoire a pu effectuer une comparaison directe optique-micro-onde avec une stabilité de  $3 \cdot 10^{-14}$  sur 1 s confirmant la stabilité de fréquence du lien optique.

### 6. Capteurs inertiels

Le gyro-accéléromètre utilisé en configuration à trois impulsions Raman horizontales donne accès à l'accélération suivant ce même axe et à la rotation autour de l'axe vertical. Suite aux premiers signaux d'interférences obtenus en 2003, le dispositif a été optimisé en 2004, la sensibilité mesurée de l'appareil à la rotation est de  $2,5 \mu\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$  sur 1 s et de  $6 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$  sur 1 s pour la rotation.

### 7. LNE-FEMTO-ST (Département LPMO)

Ce laboratoire a amélioré en 2004 les performances de son oscillateur ultra-stable pour obtenir une stabilité de fréquence de  $2 \cdot 10^{-14}$  sur 1 d.