

Temps – Fréquences

Time – Frequency

1. Introduction

L'exercice 2005, en temps-fréquence, a vu de nombreux faits marquants scientifiques, aussi bien dans les deux laboratoires nationaux de métrologie dans ce domaine, le LNE-SYRTE à l'Observatoire de Paris, où cinq thèses ont été soutenues, et le LNE-INM au CNAM, que dans les deux laboratoires associés au LNE, le LNE-FEMTO-ST (département LPMO) et le LNE-OB (Observatoire de Besançon).

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. Comme l'an passé, le LNE-SYRTE a participé à plusieurs campagnes BIPM d'étalonnage de récepteurs GPS. Lors de ces dernières, le récepteur transportable du BIPM est systématiquement étalonné, en début et fin de campagne, par rapport au récepteur de référence du LNE-SYRTE.

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 2005. Durant cette année, sa stabilité de fréquence était meilleure que $1 \cdot 10^{-14}$ sur des durées de 5 d à 80 d. L'étude qui vise à réaliser une meilleure échelle UTC(OP) reposant sur une solution de type algorithmique s'est poursuivie. Elle est basée sur l'utilisation d'un maser pour la stabilité court terme et d'un ensemble d'horloges à césium pour la stabilité long terme. Cette échelle expérimentale a démontré une stabilité de $3 \cdot 10^{-15}$ à 30 d. L'acquisition de deux nouveaux masers à hydrogène en 2005 sera appréciable pour la suite de ce développement. Notons qu'une seconde intercalaire dans les séquences de dates d'UTC(OP) a été introduite le 31 décembre 2005 à minuit.

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 sur des durées de 40 d à 80 d. La stabilité de fréquence du TA(F) a atteint, en 2005, un pallier de scintillation de fréquence à $2,3 \cdot 10^{-15}$ pour un temps d'intégration de 20 d.

La stabilité à 80 d est de $3,7 \cdot 10^{-15}$. L'exactitude du TA(F) a été maintenue à $\pm 2 \cdot 10^{-14}$ sur toute l'année 2005. Un effort de synchronisation a été fait pour améliorer cette exactitude et ainsi, la fréquence a pu être asservie sur celle de l'étalon JPO en temps réel. La figure 1 montre que les corrections appliquées améliorent son exactitude. On relève également qu'en décembre, l'asservissement du TA(F) sur JPO a permis de faire correspondre leur exactitude.

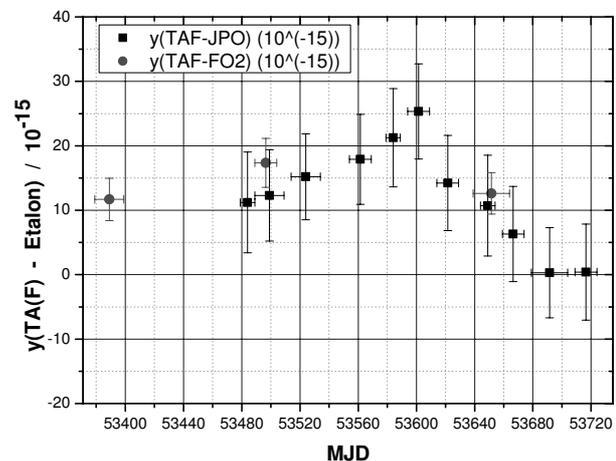


Fig. 1. – Moyenne des fréquences TA(F)-étalon du 1^{er} janvier au 31 décembre 2005.

2.1.3. TAI et UTC

Pour la première fois et pendant toute l'année 2005, la contribution française au calcul du TAI, effectué par le BIPM, a utilisé officiellement le lien étalonné OP-PTB réalisé par la méthode à deux voies : TWSTFT (*Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer*). Cela a permis au LNE-SYRTE de faire partie du groupe des cinq premiers laboratoires au monde en terme de l'incertitude sur son raccordement à UTC. Ce raccordement joue le rôle de comparaison clé en temps-fréquence et son incertitude a été publiée pour la première fois en 2005.

2.1.4. EGNOS

Cette année a été marquée par le début de l'activité opérationnelle autour de la station sol du système de radionavigation par satellites EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) de l'agence spatiale européenne ESA. EGNOS est un système européen complémentaire aux systèmes américain GPS et

russe GLONASS. Il est l'équivalent du système américain WAAS ou japonais MSAS. Dans son message de navigation, EGNOS propose aux utilisateurs un raccordement de son échelle de temps de référence ENT à UTC *via* un ou plusieurs UTC(k) européens. Actuellement c'est UTC(OP) qui fournit ce raccordement, *via* la station du segment sol installée à l'Observatoire de Paris, sous la responsabilité du CNES.

2.1.5. Galileo Time Service Provider (GTSP)

Le LNE-SYRTE fait partie du consortium européen "Fidelity" pour la réalisation du prototype du *Galileo Time Service Provider*, responsable du raccordement entre le temps interne du système européen de radionavigation par satellites Galileo et UTC. Un contrat a été signé en 2005 entre l'entreprise commune Galileo (*Galileo Joint Undertaking*, GJU) et les membres du consortium. Cette activité est actuellement planifiée jusqu'à fin 2008 pour servir à la validation en orbite de Galileo.

2.2. Moyens de comparaisons et de transfert

2.2.1. Station TWSTFT

Cette nouvelle technique deux voies a apporté une amélioration considérable dans l'exactitude du moyen de comparaison, soit six fois meilleure que le même lien réalisé par GPS C/A. La station du LNE-SYRTE est le lien principal officiel dans la contribution française au TAI. Depuis octobre, les mesures quotidiennes sont passées de quatre à douze sessions par jour. L'incertitude type d'étalonnage de ce lien a été évaluée selon la méthode appliquée, à 1 ns avec une station portable et à 1,5 ns avec le GPS P3. De plus, l'installation du simulateur de satellite développé au laboratoire (fig. 2), destiné à la caractérisation des retards internes de la station, s'est achevée avec succès : le premier résultat de mesure de la stabilité en temps a été obtenu à moins de 50 ps sur une période d'échantillonnage de 0,3 d à 3 d.

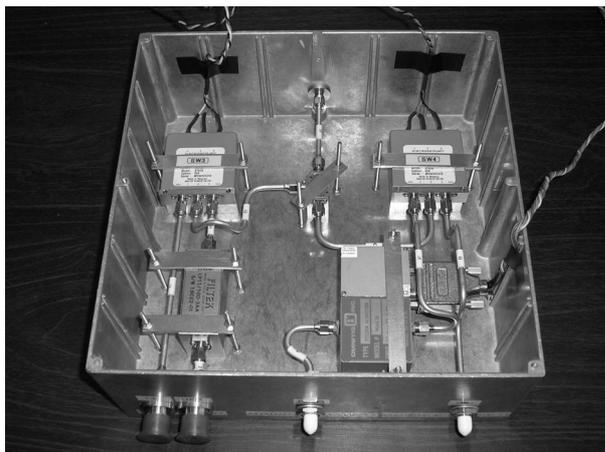


Fig. 2. – Le simulateur de satellite du LNE-SYRTE.

2.2.2. Liens optiques ultra-stables

Une collaboration entre le LNE-SYRTE et le Laboratoire de la Physique des Lasers (LPL) a démontré,

en 2005, la possibilité de transférer le signal de référence de l'oscillateur local du LNE-SYRTE à 1 GHz, par fibres optiques du réseau métropolitain parisien, sur une distance d'environ 100 km. Le système de distribution optique, incluant un dispositif de correction des erreurs de phases introduites le long du lien optique a montré une stabilité de fréquence de $3 \cdot 10^{-15}$ à 1 s et de quelques 10^{-17} à 1 d (fig. 3). Cette mesure a été réalisée en utilisant les deux fibres du lien LNE-SYRTE/LPL (2×44 km).

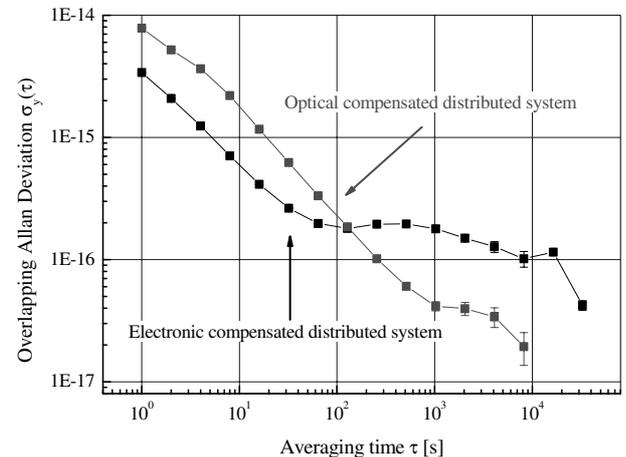


Fig. 3. – Stabilité de fréquence du lien optique compensé avec une fréquence de transfert de 1 GHz sur une distance de 88 km.

3. Fréquences micro-ondes

3.1. Étalons primaires

3.1.1. Améliorations des fontaines atomiques

De nombreuses modifications ont été apportées aux trois fontaines afin d'améliorer leurs performances et de préparer leur fonctionnement en mode opérationnel. Des études approfondies de certains effets systématiques ont été réalisées :

- chaînes de synthèse hyperfréquence : les éventuels déplacements de fréquence liés aux imperfections des chaînes de synthèse sont inférieurs à 10^{-16} ;
- imperfections de la phase du champ de la cavité micro-onde d'interrogation : l'incertitude due aux effets de la distribution de phase a été estimée à $3 \cdot 10^{-16}$ sur la partie césium de FO2 et constitue la principale source d'incertitude. Une nouvelle simulation numérique du champ doit permettre de diminuer cette valeur ;
- fuites micro-ondes : le développement d'un interrupteur non-déphasant du champ micro-onde a permis de démontrer que le déplacement de fréquence de FO2 dû à des fuites micro-ondes est inférieur à $2 \cdot 10^{-16}$.

La figure 4 démontre la très bonne stabilité de FO2 par la mesure de la stabilité du maser à hydrogène H890 acquis en 2005, lui-même très performant.

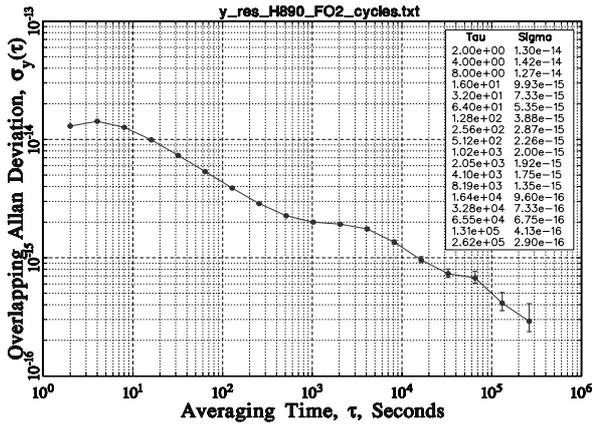


Fig. 4. – Instabilité de fréquence entre la fontaine FO2 et le maser à hydrogène (H890) acquis en 2005.

3.1.2. Étalonnages du TAI et comparaisons

La fontaine atomique FO2 a été utilisée par trois fois pour étalonner le temps atomique international TAI avec une incertitude de type B de $\sim 6 \cdot 10^{-16}$. Le dernier étalonnage se trouve être largement synchrone avec des étalonnages effectués par NIST-F1 et par IEN-CsF1 (voir fig. 5), ce qui permet *de facto* une comparaison avec ces étalons primaires. La comparaison entre FO2 et NIST-F1 donne un bon accord avec une différence de $(7 \pm 16) \cdot 10^{-16}$. La comparaison avec IEN-CsF1 donne également un bon accord avec une différence de $(-19 \pm 20) \cdot 10^{-16}$.

L'étalon à jet à pompage optique (JPO) a été remis en fonctionnement en 2005 suite à une panne grave et son exactitude a été réévaluée à $6,3 \cdot 10^{-15}$. Il a ensuite contribué à onze étalonnages du TAI.

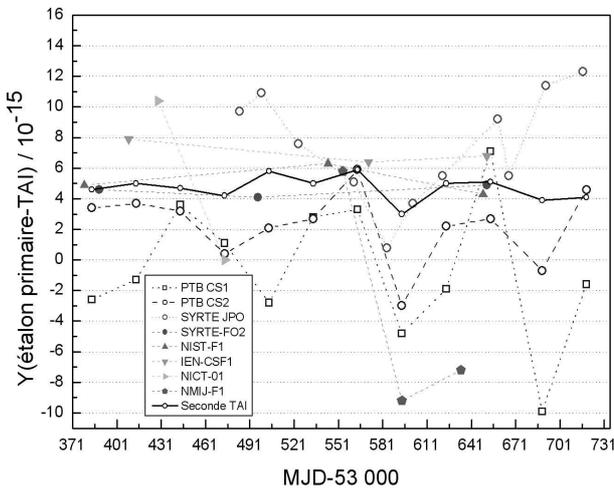


Fig. 5. – Comparaisons étalons primaires – TAI en 2005. Le trait noir donne l'estimation de la seconde du système international (SI) calculée par le BIPM à partir de la moyenne pondérée des étalons primaires.

3.1.3. Test de l'invariance de Lorentz

La partie césium de la fontaine FO2 a été utilisée pour réaliser un test de l'Invariance de Lorentz interprétée dans le cadre théorique SME (*Standard Model Extension*). Ce test, basé sur la spectroscopie des transitions dépendant

linéairement du champ magnétique statique, a permis de contraindre à un niveau très compétitif des paramètres de la théorie SME – premières contraintes pour quatre paramètres de la théorie SME et amélioration de onze à treize ordres de grandeurs pour quatre autres paramètres.

3.2. ACES/PHARAO

La revue Système « *System Requirements Review* » de la mission ACES a eu lieu avec succès à l'ESTEC en juin 2005. En 2005, le LNE-SYRTE a démarré une analyse scientifique du fonctionnement du lien micro-onde d'ACES, qui doit aboutir à un algorithme qui servira de base pour le logiciel qui sera implanté dans les stations sol utilisatrices d'ACES.

Plus que les années précédentes, le LNE-SYRTE s'est impliqué dans le conseil aux industriels concernant PHARAO, lors du développement du tube césium et de la source laser. La fontaine FO1 a servi durant une partie de l'année aux tests de la cavité micro-onde PHARAO. Les résultats ont démontré que la variation de la phase du champ le long de la cavité est de $12,5 \pm 53,6$ microradians, qui est inférieure à la limite nécessaire de 100 microradians. Les modèles d'ingénierie du tube césium et de la source laser ont été livrés au CNES par l'industriel début 2006.

3.3. Horloges compactes

Un modèle théorique, développé dans le cadre d'une thèse, décrit très bien le phénomène de piégeage cohérent de population « CPT ». Il permet entre autres de prédire les caractéristiques du signal d'horloge (contraste, largeur de raie) en fonction de la séquence temporelle d'interrogation : durée des impulsions, temps d'évolution libre entre deux impulsions consécutives, instant de détection.

4. Fréquences optiques

4.1. Horloge à atomes de strontium

L'année 2005 a été marquée par le début du fonctionnement de l'horloge optique à atomes de strontium piégés. La largeur de la résonance atomique observée a été de 260 Hz, ce qui correspond à un facteur de qualité atomique de $2 \cdot 10^{12}$, deux ordres de grandeur supérieurs à celui des fontaines atomiques.

Par ailleurs, une évaluation très fine de l'effet du piège laser sur la fréquence de la transition d'horloge a été menée. La longueur d'onde « magique » pour laquelle l'effet du piège du premier ordre s'annule a été mesurée avec une incertitude de 10^{-3} nm, soit une amélioration d'un ordre de grandeur sur celles obtenues en 2005 par les laboratoires concurrents (Université de Tokyo, Japon et JILA, USA). Les effets d'ordre supérieur, liés à l'hyperpolarisabilité dynamique de l'atome, ont été étudiés pour la première fois à un niveau métrologique (fig. 6). L'étude montre que ces effets ne limiteront pas les performances de l'horloge jusqu'au niveau de 10^{-18} , écartant ainsi la

principale inquiétude quant à la faisabilité d'une horloge à atomes piégés de grande exactitude.

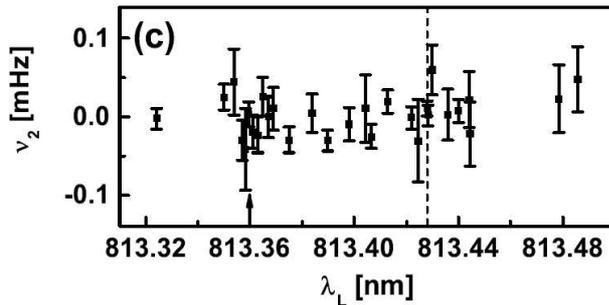


Fig. 6. – Terme du deuxième ordre du déplacement de la transition d'horloge du strontium en fonction de la longueur d'onde λ_L du piège. Tous ces points expérimentaux sont compatibles avec zéro. Flèche verticale : position attendue de la résonance à deux photons $^3P_0-^1P_1$. Pointillés : longueur d'onde « magique ».

4.2. Horloge à atomes d'argent

En 2005, un travail théorique a été entrepris dans le but d'évaluer les effets systématiques liés à la méthode de spectroscopie à deux photons sur la transition d'horloge $4d^{10}5s^2S_{1/2} \rightarrow 4d^95s^2D_{5/2}$ ($\Delta m_F = 0$). Des calculs atomiques *ab initio* utilisant des méthodes multi-configurationnelles auto-consistantes hartree-Fock (MCHF) et Dirac-Fock (MCDF) et de gros calculateurs (CERN) ont permis d'évaluer :

- le déplacement lumineux

$(\delta\omega_0/2\pi [Hz] = -1,42 \cdot 10^{-3} \cdot P/S [W / m^2])$ qui donne un $\Delta\omega/\omega_0 < 10^{-18}$ avec un contrôle de la puissance laser à 0,1 mW près (P , puissance du laser et S , surface du faisceau au niveau du *waist*) ;

- l'effet de rayonnement du corps noir

$(\Delta\omega/\omega_0 < 0,19 \cdot 10^{-15}$ à 293 K) ;

- ainsi que l'effet Zeeman quadratique :

$(627,70(2) \cdot 10^8 \text{ Hz/T}^2$ soit $\Delta\omega/\omega_0 < 10^{-18}$ pour un champ résiduel de 10^{-7} T).

Ces résultats, qui devront être confirmés expérimentalement, sont très encourageant et montrent la possibilité de réaliser un étalon de fréquence optique ayant un niveau d'exactitude meilleur que 10^{-16} en valeur relative.

Le développement de sources lasers solides destinées au remplacement des lasers à colorant s'est poursuivi. D'une part, une amélioration a été effectuée sur la robustesse du laser en anneau Nd:YLF avec doublage intra cavité (par cristal BBO) : ce laser fournit une puissance stable à 661 nm (destiné à la transition d'horloge) de plusieurs centaines de mW, largement suffisante pour la transition d'horloge. D'autre part, une étude a commencé dans le but de générer encore plus de puissance par doublage intra cavité, cette fois avec un cristal de PPKTP (à 656 nm), dont le faisceau de sortie

sera doublé une seconde fois en fréquence avec l'aide d'un cristal de BBO, en compensation de *walk-off*, placé dans une cavité de surtension externe. Une puissance de près de 300 mW dans l'UV (328 nm) est espérée ; cette transition correspond à la transition de refroidissement. Cette source UV sera utilisée d'une part par le piège magnéto-optique (en cours de conception) et d'autre part par le ralentisseur Zeeman placé en ligne avec le jet effusif d'atomes.

4.3. Horloge à atomes de mercure

Le projet d'une deuxième horloge optique au LNE-SYRTE, à atomes froids de mercure, a démarré en 2005. Ce développement permettra à terme de réaliser des évaluations (mutuelles) d'exactitude avec l'horloge à strontium à un niveau inférieur à 10^{-17} . Des travaux ont débuté notamment sur la réalisation de la source laser d'interrogation à 265,6 nm, d'une cavité de référence provisoire (fig. 7) et d'un système à vide pour un jet atomique de mercure, ainsi que sur la modélisation de cavités optiques ultra stables.

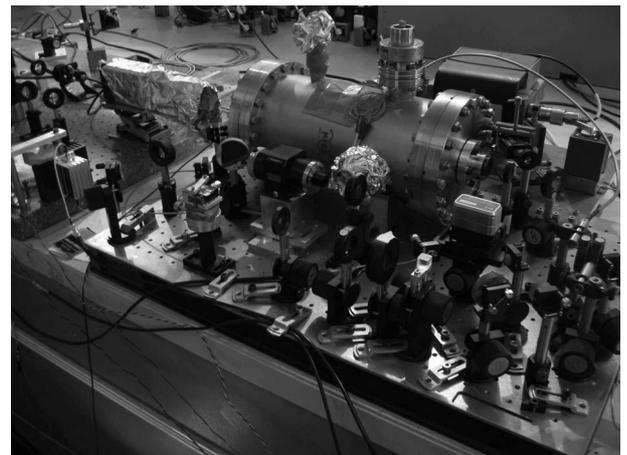


Fig. 7. – Dispositif préliminaire de stabilisation en fréquence des lasers à 1,06 μm .

4.4. Chaîne de mesure de fréquences optiques

Un deuxième dispositif de mesure de fréquences a été réalisé au LNE-SYRTE, à base d'un laser femtoseconde commercial, avec des durées d'impulsions de l'ordre de 35 fs, une fréquence de répétition voisine de 1 GHz, et une puissance moyenne de sortie de l'ordre de 750 mW. Achievé en décembre 2005, les premières mesures de fréquence ont donné une stabilité de l'ordre de $7 \cdot 10^{-14}$ à 1 s pour des comparaisons entre les gammes micro-onde et visible, ce qui est nettement mieux qu'avec l'ancien dispositif.

5. LNE-FEMTO-ST (département LPMO)

5.1. Oscillateur à résonateur saphir refroidi à l'hélium liquide

Les électroniques de contrôle des différents paramètres de l'oscillateur ont été remises à niveau. Ainsi, les asservissements de phase et de puissance sont aujourd'hui intégrés dans un boîtier. Le circuit d'oscillation est placé sur le dessus du cryostat dans un boîtier isolé et régulé en température. Un oscillateur cryogénique est donc aujourd'hui complètement opérationnel. Un deuxième oscillateur cryogénique est en phase de validation. L'objectif est de comparer ces deux oscillateurs pour permettre la détermination de la stabilité à court terme pour l'instant limitée par la source de référence, le maser à hydrogène.

5.2. Maser à mode de galerie

Un phénomène de bi-stabilité a été mis en évidence dans les résonateurs saphir résultant de la présence d'impuretés paramagnétiques (ions Fe^{3+}) dans la matrice saphir. Les ions Fe^{3+} présentant trois niveaux d'énergie, il a été prévu et démontré la possibilité d'obtenir une oscillation MASER en pompant le cristal à l'aide d'une onde à 31 GHz. L'oscillation MASER à 12 GHz est obtenue très facilement. Avec seulement 2 dBm de puissance de pompe, un signal à 12 GHz de puissance -56 dBm est observé. La stabilité de ce signal est meilleure que $4 \cdot 10^{-14}$ pour des durées d'intégration inférieure à 100 s. Des études théoriques et expérimentales sur ce phénomène MASER ont été engagées, phénomène qui présente de très nombreux avantages par rapport aux oscillateurs cryogéniques classiques. Le principal avantage est que l'ensemble de l'oscillateur (résonateur et composant actif) est intégré dans une seule et même pièce de saphir portée à basse température.

5.3. Intégration des références cryogéniques à haute stabilité court terme dans la chaîne d'étalonnage

L'intégration des références cryogéniques à haute stabilité court terme dans la chaîne d'étalonnage s'est effectuée par la mise en oeuvre d'un oscillateur cryogénique qui présente une stabilité de fréquence exceptionnelle de $7 \cdot 10^{-15}$ jusqu'à 10 000 s. Toutefois, la régulation thermique utilisée pour contrôler la température du résonateur cryogénique limite la performance à court terme. De plus, le système actuel est sensible à des perturbations électromagnétiques incontrôlables.

Un système de régulation de la température de haute sensibilité a été mis en oeuvre, de manière à ce que le nouvel instrument puisse à terme servir de référence de stabilité court et moyen terme au laboratoire.

En 2005, le domaine d'accréditation du Femto-ST a été étendu de 1 MHz à 20 MHz, pour la stabilité et l'exactitude des sources de fréquences pour des temps d'intégration compris entre 0,1 s à 100 s.

6. LNE-OB

Le LNE-OB (Observatoire de Besançon) développe un système « SYREF » de raccordement continu aux références nationales de fréquence par comparaisons GPS. Une nouvelle version du système a été complétée et testée en 2005. Elle se présente sous la forme d'un ordinateur industriel incluant une carte métrologique au format PCI (développé par le LNE-OB), et met en oeuvre un module GPS commercial. Ce système a démontré une stabilité de mesure de fréquence de $8 \cdot 10^{-14}$ à 1 d (fig. 8) pour des transferts entre Paris et Besançon, soit une distance de 324 km. Ce système est proposé à des clients tels des laboratoires accrédités, comme une alternative au raccordement en fréquence par la porteuse de l'émission hertzienne France Inter. Un exemplaire a également été fourni pour permettre le raccordement en temps, à l'émission, du code horaire diffusé sur la porteuse de France Inter.

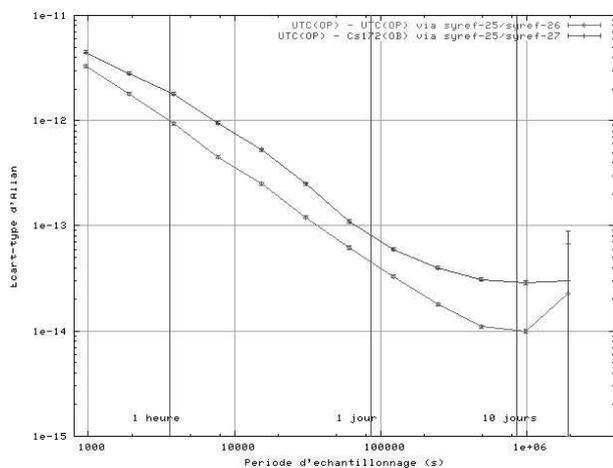


Fig. 8. – Stabilité de fréquence de liens réalisés par des systèmes SYREF. Courbe du dessous : systèmes co-localisés, ligne de base 0. Courbe du dessus : lien entre Paris et Besançon, ligne de base 324 km.