



J. ACHKAR

Comparaisons d'horloges atomiques au sol par liaisons micro-ondes deux voies avec un satellite de télécommunications

Time and frequency transfer using two-way microwave links through satellite communications

Joseph ACHKAR et Philippe MERCK

LNE-SYRTE, Observatoire de Paris, 61 avenue de l'Observatoire, 75014 Paris, France, joseph.achkar@obspm.fr.

Résumé

Le laboratoire national de métrologie LNE-SYRTE a démarré en juin 2001, sur le site de l'Observatoire de Paris, le développement d'un moyen de comparaisons d'horloges atomiques au sol par liaisons micro-ondes 2 voies avec un satellite de télécommunications. Ce moyen très performant permet de comparer deux horloges distantes, par liaison directe - le satellite géostationnaire servant de relais micro-ondes-, sans faire appel à une horloge intermédiaire comme avec le système de radionavigation par satellite GPS. L'objectif principal est double : apporter la meilleure contribution des horloges atomiques françaises à la réalisation du Temps Atomique International (TAI) calculé par le BIPM et disposer d'un moyen performant de comparaison des étalons primaires de fréquence (fontaines atomiques) distants. C'est dans ce cadre qu'une station 2 voies a été développée, équipée d'un modem SATRE générant une porteuse à spectre étalé, modulée par un code pseudo aléatoire de bruit à 2,5 Mchips/s, contenant le signal d'horloge 1 pps. Les travaux scientifiques et techniques ont porté sur la mise en œuvre de logiciels de pilotage de la station, d'acquisition et de traitement statistique des données de comparaisons d'horloges, en mesure et en étalonnage. Un bilan complet d'incertitudes a été établi pour la liaison 2 voies. Les données de mesures obtenues avec la station sont intégrées dans le calcul du TAI depuis le 1^{er} janvier 2005 sur la liaison étalonnée OP-PTB, avec une exactitude de 1 ns, soit cinq fois plus faible que sur la liaison 1 voie mono fréquence du GPS C/A. De plus cette technique a permis d'atteindre le bruit des masers à hydrogène actif sur la liaison OP-PTB à seulement 0,6 jour, soit une stabilité de fréquence de $2 \cdot 10^{-15}$, qui par ailleurs est atteinte sur la liaison micro-onde 1 voie bi fréquences du GPS P3 au bout de 2 jours. Ces travaux ont été complétés par l'étude et la réalisation d'un dispositif d'étalonnage en absolu du retard interne de la station, basé sur un simulateur de satellite, de conception originale,

donnant une stabilité temporelle en bruit exceptionnelle, inférieure à 50 ps sur une période d'échantillonnage comprise entre 0,3 jour et 3 jours.

MOTS CLÉS : TWSTFT, MODEM SATRE, SIMULATEUR DE SATELLITE, COMPARAISONS D'HORLOGES ATOMIQUES MICRO-ONDES, TAI, ÉTALONNAGE, STABILITÉ, BILAN D'INCERTITUDES.

Abstract

In June 2001, the national metrology institute LNE-SYRTE launched, on the site of Observatoire de Paris, the development of a two-way satellite time and frequency transfer system using a microwave link through satellite communications. This high accuracy system permits to compare two remote clocks, with direct link – the geostationary satellite serving as microwave relay-, without any need to use an intermediate clock, such as with the radio-navigation satellite system GPS. The goal was twofold: to improve the contribution of the french atomic clocks in the realization of the international atomic time (TAI) calculated by BIPM and to possess a high performance comparison system of remote primary frequency standards (atomic fountains). Within this framework, a 2-way station has been developed, equipped with a SATRE modem which applied the spread spectrum method over a generated intermediate frequency carrier modulated by a pseudo-noise code sequence at 2,5 Mchips/s, carrying the 1 pps clock signal. The scientific and technical work dealt with the development of software for both data acquisition and processing data giving by clocks comparison, during regular measurement and calibration sessions. A complete uncertainty budget has been developed for the full calibrated link OP-PTB. The

related measurement data have been included in TAI since 1st January 2005, with 1 ns accuracy, five times better than the 1-way microwave link using a single frequency GPS C/A system. Moreover, a frequency stability of $2 \cdot 10^{-15}$ has been achieved at only 0,6 day averaging times on the OP-PTB link driven by Active Hydrogen Masers while 2 days were necessary to reach equivalent performance using the dual frequency GPS P3 technique. This work has been completed with the study and the realization of a calibration device based on a satellite simulator with an original design, in order to determine the internal delay of the station. The first promising results shown a time stability less than 50 ps over a period from 0,3 d to 3 d averaging time.

KEY WORDS: TWSTFT, SATRE MODEM, SATELLITE SIMULATOR, COMPARISON OF MICROWAVE ATOMIC CLOCKS, TAI, CALIBRATION, STABILITY, UNCERTAINTY BUDGET.

Acronymes utilisés

1 pps	<i>One pulse per second</i>
BIPM	Bureau international des poids et mesures
BNM-LPTF	Bureau national de métrologie – Laboratoire Primaire du Temps et des Fréquences (nom du laboratoire, jusqu'en décembre 2001)
BNM-SYRTE	Bureau national de métrologie - SYstèmes de Références Temps Espace (nom du laboratoire, janvier 2002 - décembre 2004)
CCTF	Comité consultatif du temps et des fréquences
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
EGNOS	<i>European Geostationary Navigation Overlay Service</i>
FI	Fréquence Intermédiaire 70 MHz
GPS C/A	<i>Global Positioning System Coarse Acquisition code</i>
GPS CP	<i>Global Positioning System Carrier Phase</i>
GPS P3	<i>Global Positioning System Precise code</i> , combinaison linéaire des codes P1 et P2
IEN	<i>Istituto elettrotecnico nazionale</i>
Ku	Bande de fréquence non normalisée, en usage dans les télécommunications par satellites pour désigner la bande 10 GHz – 18 GHz
LNE-SYRTE	Laboratoire national de métrologie et d'essais – SYstèmes de Références Temps Espace (nom du laboratoire, depuis janvier 2005, ex BNM-SYRTE, ex BNM-LPTF)
MJD	<i>Modified Julian Day</i>
NIST	<i>National institute of standards and technology</i>
NPL	<i>National physical laboratory</i>
OP	Observatoire de Paris (sigle historiquement utilisé en métrologie dans les comparaisons et publications internationales pour désigner le LNE-SYRTE)
PIRE	Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente
PTB	<i>Physikalisch-technische bundesanstalt</i>
R 120	Désignation de bride de guide d'ondes (10 GHz – 15 GHz) selon la norme CEI de la Commission électrotechnique internationale
SATRE	<i>SAtellite Time and Ranging Equipment</i>
TAI	Temps Atomique International

TEC	<i>Total Electron Content</i>
TRL	<i>Thru – Reflect - Line</i>
TUG	<i>Technische Universität Graz</i>
TWSTFT	<i>Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer</i>
UIT-R	Union internationale des télécommunications – secteur des radiocommunications
UTC	<i>Coordinated Universal Time</i> (Temps Universel Coordonné)
UTC(OP)	Temps Universel Coordonné de l'Observatoire de Paris
VSL	<i>Van Swinden Laboratorium</i>
YIG	<i>Yttrium-Iron-Garnet</i>
WP7A	<i>Working Party 7A</i>

1. Introduction

Le Bureau international des poids et mesures BIPM établit l'échelle scientifique internationale de temps TAI à partir des comparaisons d'environ 250 horloges atomiques disséminées dans une cinquantaine de laboratoires de temps à travers le monde, comme le montre le document BIPM de la figure 1. Ces comparaisons s'effectuent, pour les horloges distantes, par des moyens satellitaires, principalement par GPS en vues communes et par le système 2 voies TWSTFT pour les laboratoires qui en sont équipés. Ce moyen expérimenté par plusieurs laboratoires s'est révélé plus performant que le GPS en vues communes. Il a été officialisé suite à la Résolution 4 de la 18^e Conférence générale des poids et mesures (CGPM) de 1987 et la Déclaration S1 de 1989 du Comité consultatif pour la définition de la seconde (CCDS), devenu depuis 1997 Comité consultatif du temps et des fréquences (CCTF).

Ainsi le laboratoire national de métrologie LNE-SYRTE a décidé en 2001 de lancer le projet TWSTFT qui consistait à mettre en œuvre une station terrienne de comparaisons d'horloges atomiques au sol, par liaisons micro-ondes avec un satellite de télécommunications, afin de contribuer par ce moyen, plus performant et indépendant du GPS, au calcul du temps atomique international. De plus, le développement d'une telle station sur le site de l'Observatoire de Paris offre de nouvelles possibilités pour la comparaison des étalons primaires de laboratoire, impliquant les fontaines atomiques du LNE-SYRTE.

Afin de pouvoir exploiter une station terrienne de télécommunications spatiales dans les comparaisons d'horloges atomiques, des démarches techniques et administratives ont été engagées pour constituer des dossiers techniques valables de demande d'autorisations auprès des autorités compétentes (Mairie de Paris, Monuments historiques, Autorité de Régulation des Télécommunications, ART). Désormais, l'Observatoire de Paris est titulaire d'une licence de l'ART l'autorisant à établir et exploiter un réseau indépendant de télécommunications par satellite, dans la bande Ku.

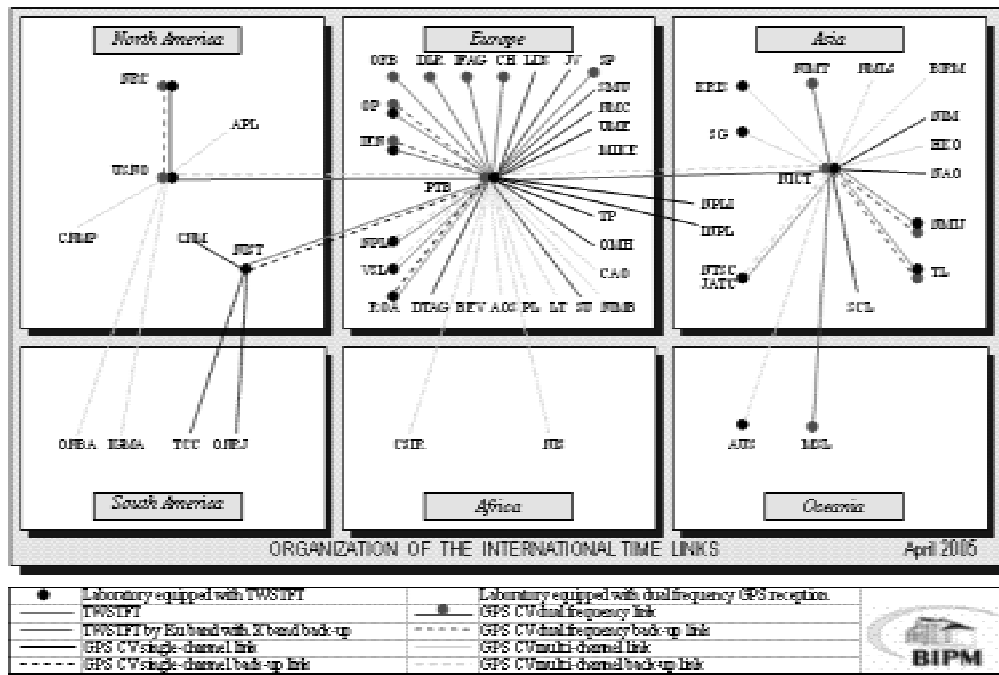


Fig. 1. – Organisation des liaisons inter laboratoires (indiqués par leurs sigles) utilisées pour le calcul du TAI.

2. Principe de la technique 2 voies de comparaison d'horloges atomiques

La technique 2 voies consiste à comparer des horloges atomiques distantes au sol par émission/réception de leurs signaux horaires codés à des fréquences micro-ondes en passant par un satellite géostationnaire de télécommunications. Chaque horloge atomique, délivrant un signal de type 1 pps (1 impulsion par seconde), alimente une station terrienne chargée de la modulation/démodulation des signaux d'horloge ainsi que de leur transposition de fréquence. Le principe utilisé est celui de la technique CDMA : toutes les stations émettent chaque seconde à la même fréquence leur signal d'horloge codé (1 code par station) en direction du satellite qui va l'amplifier et le ré-émettre vers l'ensemble des stations. La comparaison des séquences de codes reçues avec un code sélectionné en réception, au niveau de chacune des stations, permet de mesurer le retard de propagation du signal émis par la station utilisant le code sélectionné en émission, référencé à l'horloge de la station réceptrice. Le décalage temporel entre les deux horloges est ensuite calculé par combinaison des mesures effectuées de part et d'autre de la liaison. De part la réciprocity du trajet des signaux (liaisons bidirectionnelles), les retards liés à la propagation sont éliminés au 1^{er} ordre et seuls subsistent des effets résiduels non réciproques qui doivent être déterminés et dont dépend le niveau d'exactitude de la comparaison.

L'équation caractéristique décrivant la comparaison de temps faite entre deux horloges atomiques au sol, localisées en 1 et 2 (fig. 2) est donnée par la relation suivante :

$$T_1 - T_2 = \frac{1}{2}(\Delta T_1 - \Delta T_2) + \frac{1}{2}[(\tau_1^{T_x} - \tau_1^{R_x}) - (\tau_2^{T_x} - \tau_2^{R_x})] + \frac{1}{2}[(\tau_1^U - \tau_1^D) - (\tau_2^U - \tau_2^D)] + \frac{1}{2}(\tau_{21} - \tau_{12}) + \frac{1}{2}\Delta\tau_R$$

Les grandeurs ΔT_1 et ΔT_2 sont les retards de propagation des signaux d'horloge mesurés à l'aide de compteurs d'intervalles de temps aux stations 1 et 2 respectivement. Les termes $\tau_1^{T_x}, \tau_1^{R_x}, \tau_2^{T_x}$ et $\tau_2^{R_x}$ représentent les retards dans les stations terriennes sur les trajets d'émission et de réception. Les termes $\tau_1^U, \tau_2^D, \tau_1^U$ et τ_1^D représentent les retards liés à la propagation atmosphérique sur les deux trajets : montant (sol – satellite) et descendant (satellite – sol). Les termes τ_{21} et τ_{12} représentent les retards dans le répéteur du satellite (antennes incluses) des signaux émis par les deux stations. Enfin, le terme $\Delta\tau_R$ traduit le retard dû à la rotation de la Terre et à la vitesse du satellite entraînant un rallongement ou un raccourcissement du trajet satellite – station (effet Sagnac) :

$$\Delta\tau_R = [(\tau_{R1}^U - \tau_{R1}^D) - (\tau_{R2}^U - \tau_{R2}^D)]$$

A cette équation caractéristique s'ajoute le raccordement aux échelles de temps nationales UTC(k) à comparer (k étant l'acronyme du laboratoire). En effet, chaque échelle de temps est déterminée dans chaque laboratoire de façon indépendante. Dans le cas général, on exprimera la relation entre deux échelles de temps, de la manière suivante :

$$UTC(1) - UTC(2) = (T_1 - T_2) + [\tau_1^{\text{REF}(1)} - \tau_2^{\text{REF}(2)}].$$

Les termes $\tau_1^{\text{REF}(1)}$ et $\tau_2^{\text{REF}(2)}$ représentent le retard de la chaîne de l'échelle de temps propre à chaque laboratoire. Ils sont déterminés de la manière suivante :

$$\tau_1^{\text{REF}(1)} = [UTC(1) - CLK(1)] + [CLK(1) - REF(1)] + [REF(1) - 1\text{ppsTX}(1)] ;$$

$$\tau_2^{\text{REF}(2)} = [UTC(2) - CLK(2)] + [CLK(2) - REF(2)] + [REF(2) - 1\text{ppsTX}(2)].$$

Le paramètre $REF(k) - 1\text{ppsTX}(k)$ représente le retard entre le signal 1 pps IN présent à l'entrée du modem et le signal 1 pps TX présent au niveau du compteur d'intervalle de temps de la station k ;

Le paramètre $CLK(k) - REF(k)$ représente le retard entre le signal 1 pps de l'horloge intermédiaire CLK pilotant la station k et le signal 1 pps IN présent à l'entrée du modem ;

Le paramètre $UTC(k) - CLK(k)$ représente le retard entre le signal 1 pps généré par l'échelle de temps du laboratoire k et le signal 1 pps de l'horloge intermédiaire pilotant la station k ; lorsque $UTC(k) = CLK(k)$, ce paramètre est annulé (c'est-à-dire $CLK(k)$ n'existe pas physiquement), et c'est l'échelle de temps du laboratoire k qui pilote directement la station k .

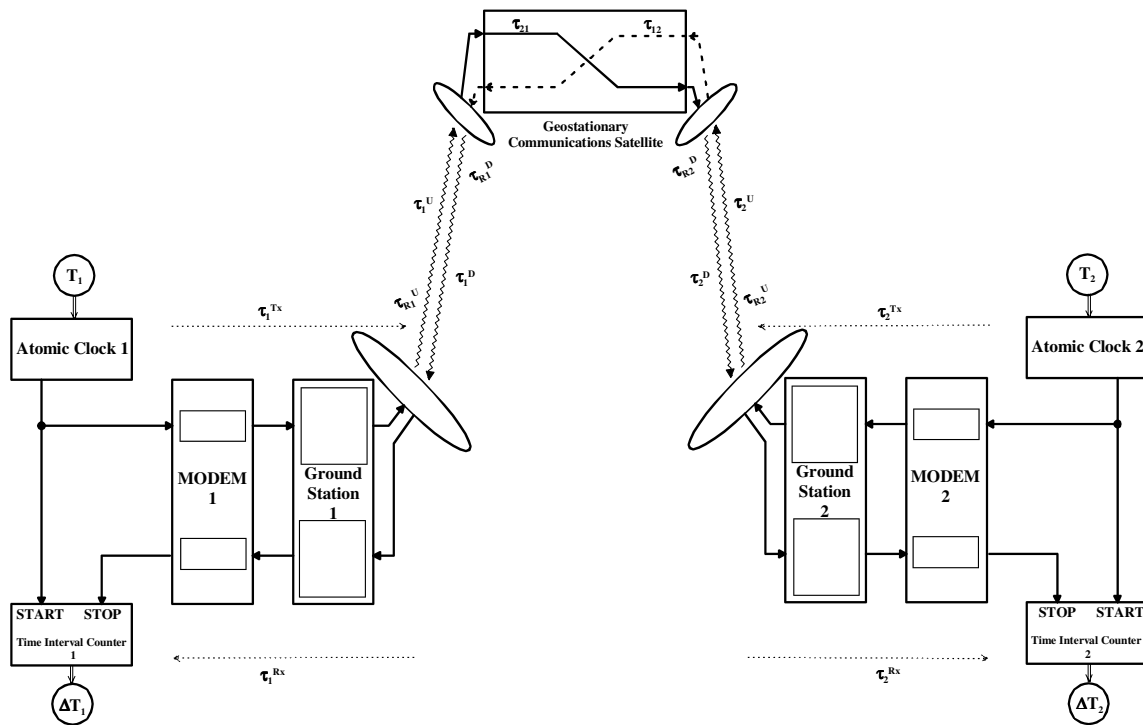


Fig. 2. – Schéma de principe d'une comparaison d'horloges distantes au sol par TWSTFT.

2.1. Effets non réciproques

2.1.1. Non réciprocity liée au répéteur satellite

Dans le cas général, les retards τ_{21} et τ_{12} doivent être déterminés (avant le lancement du satellite) ou éliminés. Lorsqu'à bord du satellite, l'ensemble « antenne de réception, canal répéteur et antenne d'émission » sont communs aux trajets des signaux 2 voies, alors $\tau_{21} = \tau_{12}$.

2.1.2. Non réciprocity liée aux stations terrestres

Le paramètre $[(\tau_1^{\text{Tx}} - \tau_1^{\text{Rx}}) - (\tau_2^{\text{Tx}} - \tau_2^{\text{Rx}})]$ (noté également $CALR(1) - CALR(2)$), incluant les transpositions de fréquence à l'émission et à la réception, le modulateur - démodulateur, le cornet d'antenne, et les différentes lignes de transmission pour chacune des deux stations) doit être déterminé. Ceci peut se faire en utilisant une station portable en colocation successive avec deux

stations en comparaison, ou encore en utilisant un simulateur de satellite dans chacune des stations.

2.1.3. Non réciprocity liée à la propagation atmosphérique

- correction troposphérique : la troposphère introduit un retard qui dépend de l'angle d'élévation, de la pression, de l'humidité et de la température de l'air. Mais jusqu'à 20 GHz, ce retard est indépendant de la fréquence : l'influence de la fréquence sur la propagation montante et descendante est identique et aucune correction n'est nécessaire.

- correction ionosphérique : le retard ionosphérique sur le trajet montant et descendant d'une station terrestre s'exprime par l'équation suivante [4] :

$$\tau_i^D - \tau_i^U = 40,5 \text{ TEC } 1/c [1/(f_d)^2 - 1/(f_a)^2],$$

où TEC est le contenu électronique total dans la couche ionosphérique, f_u et f_d les fréquences des signaux sur les trajets montant et descendant, et c la vitesse de la lumière.

2.1.4. Non réciprocity liée à la rotation de la Terre

À cause du mouvement autour de l'axe de rotation de la Terre, des deux stations terriennes et du satellite, pendant la propagation du signal temps, vers et depuis le satellite, une correction doit être appliquée au temps de propagation du signal. La correction Sagnac sur le trajet 1 voie satellite (s) - sol (k) est donnée par [4] :

$$\tau_R^D(k) = \frac{\Omega}{c^2} [Y(k) X(s) - X(k) Y(s)], \text{ où :}$$

Ω : vitesse de rotation de la terre (en rad/s) ;

c : vitesse de la lumière (en m/s) ;

$X(k)$: x géocentrique – coordonnée de la station
= $r \cos [LA(k)] \cos [LO(k)]$ (en m) ;

$X(s)$: x géocentrique – coordonnée du satellite
= $R \cos [LA(s)] \cos [LO(s)]$ (en m) ;

$Y(k)$: y géocentrique – coordonnée de la station
= $r \cos [LA(k)] \sin [LO(k)]$ (en m) ;

$Y(s)$: y géocentrique – coordonnée du satellite
= $R \cos [LA(s)] \sin [LO(s)]$ (en m) ;

r : rayon de la terre (en m) ;

R : rayon orbital du satellite (en m) ;

LA : latitude ;

LO : longitude ;

$h(k)$: hauteur de la station au-dessus du géoïde (niveau moyen des mers) (en m) ;

Pour un satellite géostationnaire $LA(s) = 0^\circ N$, donc

$$\tau_R^D(k) = \frac{\Omega}{c^2} R [r + h(k)] \cos[LA(k)] \sin[LO(k) - LO(s)]$$

La correction Sagnac totale pour l'horloge de la station 1 comparée à l'horloge de la station 2 est :

$$\tau_R^{21} = \left[(\tau_{R1}^U - \tau_{R1}^D) - (\tau_{R2}^U - \tau_{R2}^D) \right] / 2$$

De plus, le signe de la correction Sagnac pour la liaison descendante est l'opposé du signe de la correction Sagnac pour la liaison montante due à l'opposition des trajets des signaux :

$$\tau_R^U(k) = -\tau_R^D(k), \text{ alors } \tau_R^{21} = -\tau_{R1}^D + \tau_{R2}^D.$$

3. Description de la station du LNE-SYRTE

La station TWSTFT développée au LNE-SYRTE est constituée des principaux dispositifs suivants (fig. 3) : la référence nationale de temps UTC(OP) qui est la réalisation physique en temps réel de UTC ; un maser à hydrogène actif pilotant la station ; un terminal satellite dédié TWSTFT ; un compteur d'intervalles de temps externe ; la station terrienne de télécommunications par satellite ; un ordinateur de pilotage et de contrôle de la

station, de l'acquisition et du traitement des données ; un analyseur de spectre ; un dispositif de mesure de puissance à l'émission.

3.1. Référence nationale de temps UTC(OP) et horloge de référence

La génération du signal UTC(OP) s'effectue par une horloge atomique à césium (HP5071A) délivrant un signal de fréquence 5 MHz. Ce signal rentre sur un micro déphaseur qui assure la correction de fréquence et, par ailleurs, la multiplication ou division de fréquence. En sortie, le signal 5 MHz corrigé est ensuite amplifié puis converti en un signal 1 pps à travers une horloge numérique. Il atteint ensuite un compteur d'intervalles de temps dédié où le point physique de UTC(OP) est défini.

L'horloge de référence pilotant la station est un maser à hydrogène actif du laboratoire dont le raccordement à UTC(OP) est réalisé quotidiennement.

3.2. Terminal satellite dédié TWSTFT

Le terminal satellite dédié TWSTFT est un modem Timetech SATRE-077, équipé d'un module d'émission à fréquence intermédiaire 70 MHz, de deux modules de réception à 70 MHz et d'un compteur d'intervalles de temps. Il permet de générer les codes pseudo aléatoires de bruit à 2,5 Mchips/s et de réaliser la modulation à étalement de spectre ou la démodulation.

Le modem SATRE, piloté par l'horloge de référence, réalise les opérations suivantes :

- fournir à la station, la porteuse 70 MHz modulée par le code pseudo aléatoire de bruit à 2,5 Mchips/s contenant le signal d'information de type 1 pps ;
- fournir aux oscillateurs locaux des transpositions de fréquence et au compteur d'intervalles de temps externe, les références de fréquences générées par le maser ;
- recevoir de la station, la porteuse 70 MHz modulée par le code PN de la station TWSTFT distante ;
- mesurer l'intervalle de temps $1 \text{ pps Tx} - 1 \text{ pps Rx}$ compté entre le temps d'émission du signal d'une station et le temps de réception du signal émis par l'autre station.

3.3. Compteur d'intervalles de temps

Un compteur d'intervalles de temps externe est utilisé pour mesurer le retard interne $1 \text{ pps IN} - 1 \text{ pps Tx}$, entre l'entrée 1 pps du modem et le point de déclenchement du compteur interne, à chaque début de session TWSTFT. Il s'agit du compteur Stanford Research SR620 incluant un oscillateur haute stabilité, piloté par une référence de fréquence externe générée par le modem SATRE à partir du signal de l'horloge de référence.

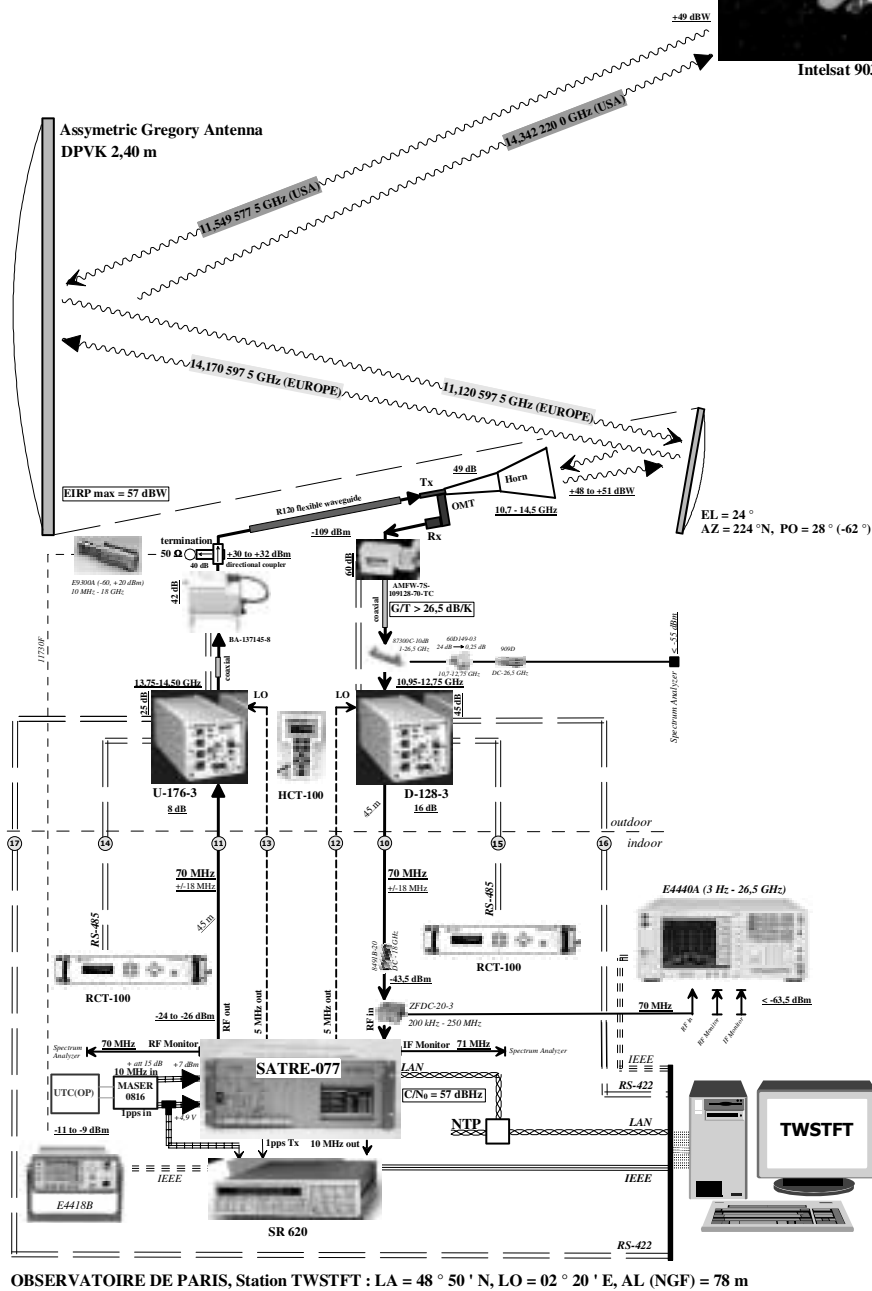
3.4. Station terrienne de télécommunications par satellite

La station terrienne assure les fonctions suivantes :

- à l'émission, la transposition de la porteuse aux fréquences micro-ondes, l'amplification du signal et son rayonnement par l'antenne asymétrique grégorienne en direction du satellite qui le ré-émettra vers le sol pour qu'il soit reçu par la station distante ;

- à la réception, la captation du signal venant du satellite, son amplification, sa transposition à fréquence intermédiaire, puis sa réception par le modem.

La station est enregistrée auprès de l'opérateur Intelsat, valant autorisation d'utilisation de la constellation des satellites d'Intelsat.



2005-04-29

Fig. 3. – Schéma d'ensemble des équipements de la station TWSTFT développée au LNE-SYRTE.

3.5. Dispositifs de contrôle et de mesure

L'ensemble de la station est géré par ordinateur à travers différents ports : LAN, IEEE, RS-232, RS-422/485. Un analyseur de spectre Agilent PSA E4440A est intégré à la station. Il assure les opérations suivantes :

- à la réception (en permanence) : détection et visualisation des porteuses pures à fréquence intermédiaire lors des sessions régulières TWSTFT. Mesure des fréquences de translation du satellite. Contrôle du niveau de puissance du bilan de liaison ;
- à la réception (ponctuellement) : détection et visualisation des signaux radiofréquences avant transposition, optimisation des réglages des paramètres de la station (élévation, azimut, polarisation), mesure du facteur de mérite G/T ;
- à l'émission (ponctuellement) : détection et visualisation des porteuses, avant et après transposition de fréquence.

De plus, un module de mesure de la puissance d'émission a été installé permettant de déterminer la puissance isotrope rayonnée équivalente de la station. Il comporte un ensemble d'équipements Agilent constitué d'un milliwattmètre E4418B, d'un câble spécifique 11730F de longueur 61 m, et d'une sonde de puissance E9300A ayant une dynamique de 80 dB. L'ensemble des équipements (hors milliwattmètre) est installé dans une enceinte régulée en température.

Enfin, une station météo installée au pied de l'antenne mesure les conditions atmosphériques ambiantes (température, humidité, pression) en permanence, notamment lors des sessions régulières TWSTFT afin d'intégrer ces paramètres dans les fichiers de mesure. De plus, elle permet d'étudier une possible corrélation des retards de la station avec les variations des paramètres météo.

3.6. Bilan de liaison

Afin d'évaluer les performances de la liaison entre la station du LNE-SYRTE et le satellite Intelsat 903, un bilan de liaison typique en mode aller – retour (*ranging*), a été calculé en fonction des paramètres d'émission de la station (puissance isotrope rayonnée équivalente, largeur de la porteuse à étalement de spectre), des caractéristiques de réception et d'émission du satellite de télécommunications utilisé (facteur de mérite, puissance isotrope rayonnée équivalente, bande passante allouée), ainsi que les paramètres de réception de la station (facteur de mérite, rapport de la puissance de la porteuse sur la puissance de bruit). Ceci est illustré dans le tableau 1.

Les performances de la station du LNE-SYRTE, en bande Ku, attestent une PIRE maximale de 48 dBW pour un rendement d'antenne de 65 %, un facteur de mérite supérieur à 26,5 dB/K, et un rapport porteuse sur bruit global de 57 dBHz, pour une occupation de bande satellite de 3,5 MHz. Ces résultats affichent une qualité optimale d'utilisation de la station dans des comparaisons de haute précision d'horloges atomiques de hautes performances.

Tableau 1

Bilan de liaison en mode aller – retour à travers Intelsat 903.

1 – Calculation of uplink path loss	
Uplink frequency [13,75 – 14,50] (GHz)	14,170 597 500
Range [36 000 – 42 000] (km)	39 000
Speed of the light (m/s)	299 792 458
Uplink path loss (dB)	207,30
2 – Calculation of transmitting antenna gain	
Uplink antenna diameter (m)	2,4
Uplink antenna aperture efficiency [0,55 – 0,75]	0,65
Uplink antenna transmit gain (dBi)	49,16
3 – Calculation of transmit EIRP & operating flux density	
Transmit power per carrier (W)	1,00
Transmitter feeder losses (dB)	0,5
Antenna pointing loss	0,5
No of carriers	1
Amplifier back off (dB)	9,0
Transmit EIRP (dBW)	48,16
Uplink PFD at satellite (dBW/m²)	-114,95
Power rating of ground transmitter (W)	7,94
4 – Calculation of uplink to noise ratio (IS-903 @925,5 °E)	
Uplink rain attenuation (dB)	0,3
Satellite uplink (G/T) (dB/K)	9,0
Boltzmann constant (dBJ/K)	-228,6
Uplink C/No (dBHz)	78,16
5 - Calculation of satellite operating downlink EIRP	
Saturated EIRP [37,0 – 54,0] (dBW)	42,0
Saturated EIRP (W)	15 848,93
Saturated FD [-87,0 – -69,0] (dBW/m ²)	-78,0
Output back off (dB)	6,0
Input back off (dB)	9,0
Satellite operating downlink EIRP (dBW)	8,05
Satellite operating downlink EIRP (W)	6,38
6 – Calculation of satellite operating band width	
Input data rate [2,5 Mchips] (kb/s)	2 500,000
Link overhead factor [0 : 20] (%)	0
FEC rate coding [0 : 1]	1,00
BPSK modulation, bits/symbol (b/symbol)	1
Effective input data rate (kb/s)	2 500,000
Transmission rate (kb/s)	2 500,000
Nyquist bandwidth filter (kHz) [r=0,4]	3 500,000
7 – Calculation of downlink path loss	
Downlink frequency [10,95 – 12,75] (GHz)	11,120 597 500
Downlink path loss (dB)	205,19
8 – Calculation of receiver antenna gain	
Downlink receive antenna diameter (m)	2,4
Downlink antenna aperture efficiency [0,55 – 0,75]	0,65
Downlink receive antenna gain (dBi)	47,06
9 – Calculation of receiver G/T	
Antenna elevation angle (°)	24
Antenna noise temp (K)	39,8
Increase in noise temperature due to rain (K)	0,2
LNA noise temp (K)	70,0
System noise temperature (K)	110,0
Downlink receive antenna G/T (dB/K)	26,64
10 - Calculation of overall downlink C/No	
Downlink rain attenuation (dB)	0,2
Receive antenna pointing loss (dB)	0,5
Downlink C/No (dB)	57,40
Overall downlink C/No (dBHz)	57,36
Available Eb/No	-6,62

4. Visibilité des satellites et organisation des sessions de mesures

4.1. Visibilité des satellites

Dans le cadre du projet EGNOS, des mesures de la visibilité sur l'horizon à partir du site de l'Observatoire de Paris, faites au laser à l'aide d'un théodolite ont été réalisées en novembre 2001. Le théodolite a été placé à une hauteur de 3 m au-dessus de la terrasse du bâtiment dans lequel sont installées les horloges et les moyens de comparaisons du laboratoire. Ces mesures ont été l'occasion d'étudier la visibilité des satellites de télécommunications utilisés dans les comparaisons d'horloges par liaisons 2 voies (Intelsat 706, 707 et 903), connaissant les paramètres orbitaux de ces satellites et l'élévation de la parabole de la station au-dessus de la terrasse du bâtiment.

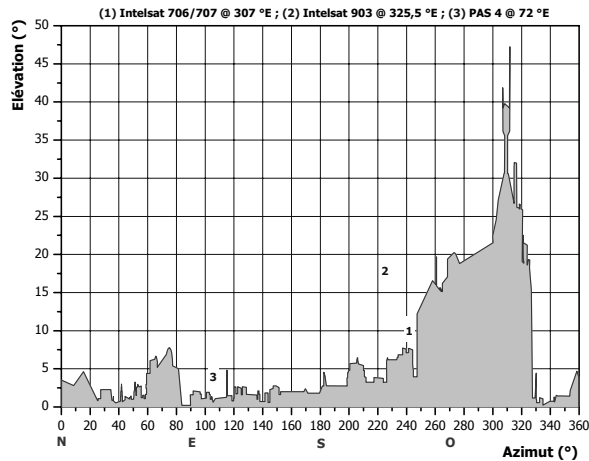


Fig. 4. – Visibilité sur l’horizon à partir du site de l’Observatoire de Paris.

Le choix de cette série de satellites dépend essentiellement de leur couverture en bande Ku de l’Europe et de l’Amérique du Nord. De plus, la visibilité du satellite PanAmSat 4 est également indiquée car ce satellite assurera dans le futur proche des liaisons entre une deuxième station du LNE-SYRTE en cours d’installation et des laboratoires de temps en Asie.

4.2. Organisation des sessions régulières de mesures

Actuellement, dix laboratoires européens (OP, NPL, VSL, SP, PTB, OCA, IEN, ROA, CH, IPQ) et deux laboratoires américains (USNO, NIST) participent aux sessions TWSTFT à travers trois répéteurs d’Intelsat. Chaque laboratoire est identifié par une lettre (A pour OP), utilise un décalage (*offset*) de fréquence prédéfini pour la transmission de sa porteuse pure (−20 kHz pour OP), utilise un code spécifique du modem SATRE ou MITREX pour la transmission de sa porteuse codée à 2,5 Mchips/s (0 pour OP).

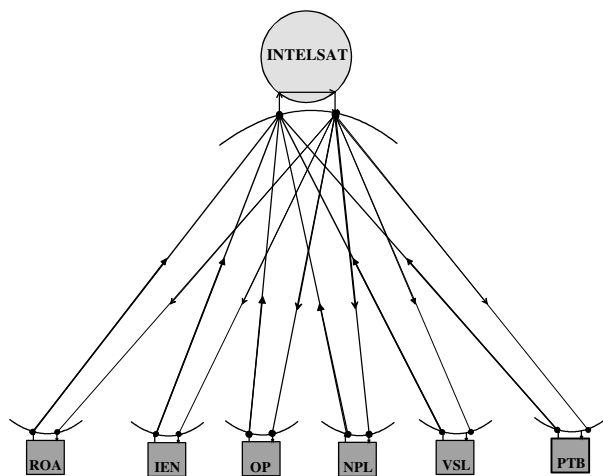


Fig. 5. – Liaisons TWSTFT entre laboratoires européens participant au TAI, à travers un répéteur du satellite INTELSAT.

L’organisation du déroulement des sessions régulières TWSTFT s’effectue dans le cadre du groupe de travail TWSTFT du CCTF. Aujourd’hui 12 sessions de mesures par jour sont assurées pour le BIPM, dans lesquelles des séries de mesure de 120 s sont effectuées entre tous les laboratoires (deux à deux). Les liaisons européennes et transatlantiques sont respectivement présentées sur les figures 5 et 6. Le déroulement des sessions suit la recommandation UIT-R TF.1153-2 du groupe de travail WP7A de l’UIT-R.

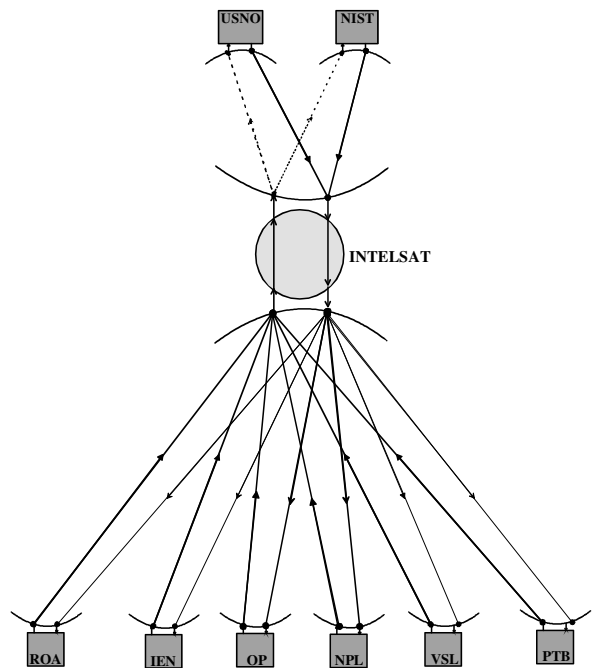


Fig. 6. – Liaisons TWSTFT transatlantiques entre laboratoires européens et américains participant au TAI, à travers deux répéteurs du satellite INTELSAT.

5. Comparaisons de fréquences des horloges atomiques micro-ondes

5.1. Comparaison bilatérale entre PTB et LNE-SYRTE

Pour la première fois, une comparaison de fréquence a eu lieu entre PTB et LNE-SYRTE durant 5 jours consécutifs en mars 2004, en utilisant la technique 2 voies (*via* Intelsat 903) à raison de 24 sessions de mesures par jour. Le but était de valider techniquement le moyen de comparaison d’horloges par 2 voies entre les deux laboratoires et de considérer avant d’entreprendre une comparaison d’horloges impliquant davantage de laboratoires sur une période de mesure atteignant le mois.

L’expérimentation de 24 sessions de mesures par jour a permis de mettre en évidence une erreur de datation générée par le modem comme il est montré sur la figure 7. Par rajout de décalages temporels par pas de 0,5 s, nous avons compensé cette erreur en diminuant l’écart type expérimental de 3,3 ns (décalage = 0 s) à 0,2 ns (décalage = +1,5 s). Cette compensation annule l’effet du

mouvement du satellite dans les mesures de temps – fréquences par liaisons 2 voies.

Les principaux résultats de cette comparaison inédite entre les deux laboratoires sont reportés dans les figures 8 et 9.

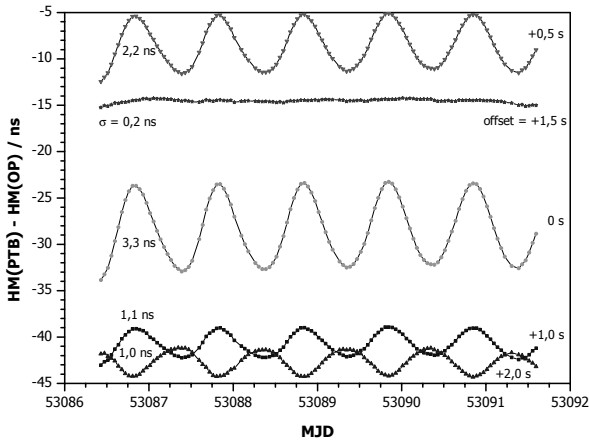


Fig. 7. – Comparaison de masers à hydrogène actif entre PTB et LNE-SYRTE à raison de 24 sessions de mesures par jour. L’ajout de décalages temporels de 0,5 s à 2 s dans les mesures permet de réduire les fluctuations engendrées par l’erreur de datation. Un décalage de +1,5 s compense cette erreur.

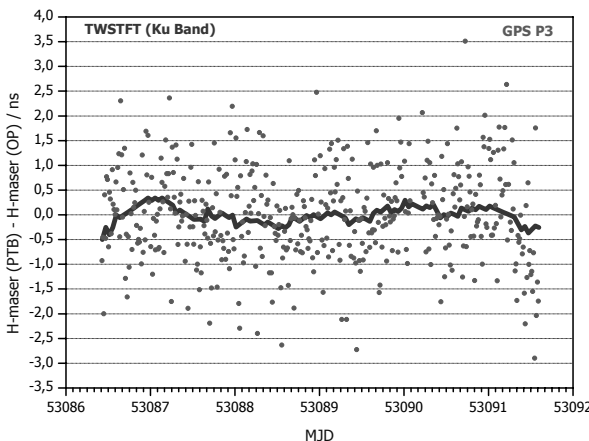


Fig. 8. – Fluctuations des mesures par TWSTFT (en trait plein) et par GPS P3 (en pointillé) sur la liaison PTB-OP.

La figure 8 montre les fluctuations de mesures d’écarts de temps entre les masers à hydrogène actif de PTB et du LNE-SYRTE obtenues par les techniques (indépendantes) TWSTFT et GPS P3, après soustraction d’un lissage quadratique modélisant la dérive de fréquence des masers. Les fluctuations de bruit de la liaison 2 voies ne dépassent pas 1 ns sur une période d’échantillonnage de 5 jours tandis que celles de la liaison GPS P3 atteignent 6 ns sur la même période.

La caractérisation de bruit des moyens de comparaison d’horloges a été réalisée à l’aide de la variance d’Allan, outil statistique permettant de distinguer différents types de bruits (représentés par des pentes) en fonction de la durée d’échantillonnage des mesures.

La figure 9 montre la stabilité temporelle des deux techniques utilisées, la technique TWSTFT présentant un bruit de mesure exceptionnel de 47 ps à 3 600 s. L’excellence de ces résultats a encouragé plusieurs laboratoires nationaux de métrologie à expérimenter une nouvelle campagne de comparaison décrite ci-après.

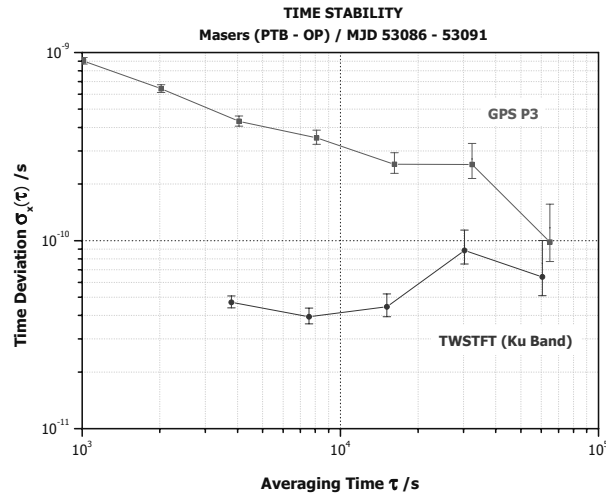


Fig. 9. – Comparaison des techniques TWSTFT et GPS P3 en terme de stabilité de temps sur les données de la figure 8.

5.2. Comparaison d’horloges entre laboratoires européens et américains

Le NIST, le NPL, l’IEN, le PTB et le LNE-SYRTE ont participé à une comparaison de fréquences entre masers à hydrogène actifs servant de références de fréquences pour leurs fontaines atomiques. La campagne de comparaison a été menée durant 25 jours consécutifs en octobre – novembre 2004. Trois techniques de comparaisons ont été utilisées :

- Transmission et réception des données d’horloges codées à travers des modems de type SATRE ou MITREX, par liaisons micro-ondes à 2 voies (TWSTFT), selon un programme intensif à raison de 12 sessions de mesures par jour ;
- Données d’horloges à travers des récepteurs géodésiques GPS bi fréquences et leur traitement par combinaison linéaire de codes d’observations (GPS P3) ;
- Données d’horloges à travers les mêmes récepteurs géodésiques GPS bi fréquences et leur traitement séparément par la méthode de phase des porteuses (GPS CP).

Les principaux résultats présentés ci-après sont extraits d’une publication récente [11]. Ces résultats illustrent d’une part, le bruit des liaisons et d’autre part, la durée d’échantillonnage pour laquelle le bruit des masers est atteint.

Sur la figure 10 sont reportées les stabilités de fréquence en terme d’écart type d’Allan modifié, exprimées à partir des doubles différences TWSTFT –

GPS CP des liaisons IEN-OP, NIST-OP, NPL-OP et PTB-OP. Ainsi la liaison NPL-OP présente le niveau de bruit le plus faible à court terme. Une stabilité de fréquence de $1 \cdot 10^{-15}$ est atteinte à 1 jour d'échantillonnage et un niveau de bruit de $2 \cdot 10^{-16}$ est atteint en moyennant sur 5 jours seulement.

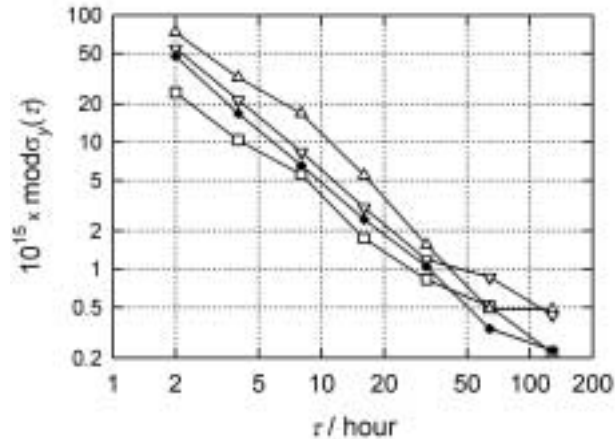


Fig. 10. – Analyse de stabilité des doubles différences TWSTFT – GPS CP pour tous les liaisons par rapport à OP: IEN (∇), NIST (Δ), NPL (\square) et PTB (\blacklozenge). Une stabilité de fréquence de $2 \cdot 10^{-16}$ est atteinte sur les liaisons PTB-OP et NPL-OP en moyennant sur 5 jours seulement.

Par ailleurs, la stabilité de fréquence dans les comparaisons d'horloges entre le NPL et OP par les trois techniques est illustrée sur la figure 11. La liaison NPL-OP par TWSTFT est caractérisée par un bruit de scintillation de phase jusqu'à 0,6 jour puis ensuite par un bruit de scintillation de fréquence caractéristique du bruit des masers. Ce dernier est atteint par le GPS CP à 0,3 jour seulement et par le GPS P3 au bout de 2 jours d'échantillonnage.

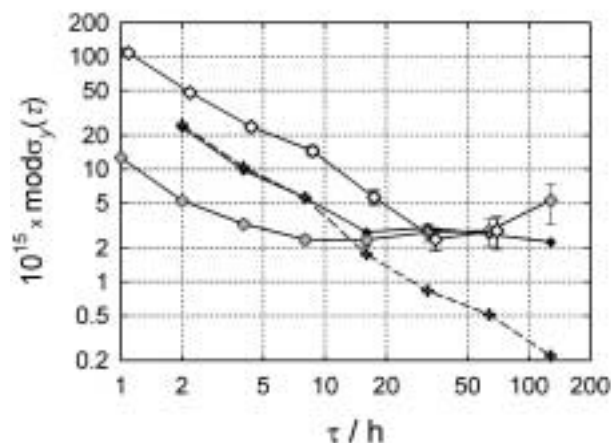


Fig. 11. – Stabilité de fréquence dans les comparaisons d'horloges entre NPL et OP par les trois techniques: GPS P3 (blanc), GPS CP (gris) et TWSTFT (noir). L'analyse de stabilité de la double différence TWSTFT – GPS CP (croix) est également illustrée.

6. Etalonnage en relatif de la station

En juillet 2004, une campagne d'étalonnage, organisée par le groupe de travail TWSTFT du CCTF, a permis d'étalonner, en relatif, les retards des stations de quatre laboratoires nationaux de métrologie : PTB, NPL, VSL et LNE-SYRTE. L'étalon de transfert voyageur était la station portable de TUG. L'étalonnage des stations a consisté à déterminer le paramètre $\Delta\tau_R$ intervenant dans l'équation horaire, dont la connaissance est indispensable pour la mesure de l'écart de temps absolu entre deux horloges atomiques distantes.

6.1. Méthode d'étalonnage en relatif par station portable

La méthode consiste en deux séries de mesures successives en colocation entre la station portable et chaque station fixe, de part et d'autre de la liaison concernée (fig. 12 et fig. 13).

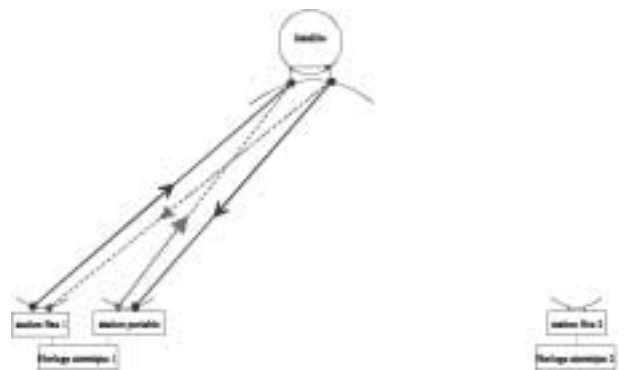


Fig. 12. – 1^{re} série de mesures en colocation entre station fixe n° 1 et station portable.

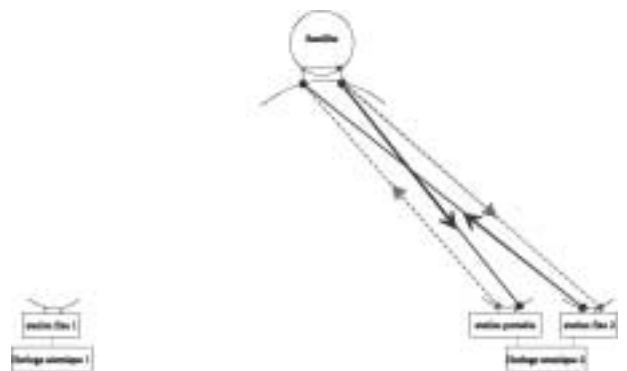


Fig. 13. – 2^e série de mesures en colocation entre station fixe n° 2 et station portable.

La station portable est alimentée par le même signal d'horloge qui pilote la station fixe en colocation. La 1^{re} série de mesures permet de déterminer la différence de retards différentiels entre la station fixe n° 1 et la station portable (PS), notée $CALR(\text{station 1}) - CALR(\text{PS})$, la différence $CALR(\text{station 2}) - CALR(\text{PS})$ entre la station

fixe n° 2 et la station portable est alors déterminée par la 2^e série de mesures. Par différence algébrique, le paramètre $\Delta\tau_R = CALR(\text{station 1}) - CALR(\text{station 2})$ est déduit. Cette méthode considère que les retards dans les équipements des stations restent stables pendant la durée de l'étalonnage. Toutefois une série de mesures de clôture, en fin de campagne, sur le site initial est réalisée et prise en compte dans le résultat final d'étalonnage.

6.2. Campagne d'étalonnage de juillet 2004

La campagne d'étalonnage s'est déroulée sur deux semaines, du 5 au 16 juillet 2004. Les mesures en colocation entre la station portable et la station fixe du LNE-SYRTE ont eu lieu le 9 juillet (fig. 14).



Fig. 14. – Stations fixe et portable en colocation à l'Observatoire de Paris.

Les résultats d'étalonnage des stations fixe et portable sont présentés sur la figure 15. Une incertitude d'étalonnage de 0,43 ns a été obtenue, incluant la variation du retard des stations (session de clôture de campagne réalisée à PTB).

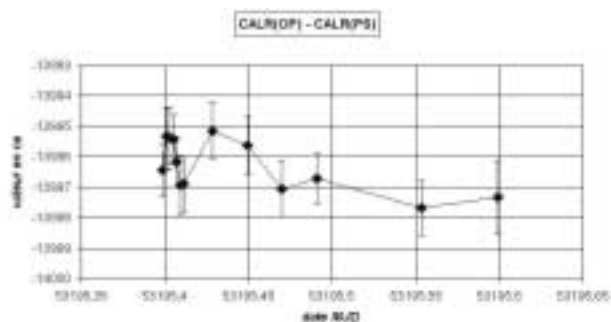


Fig. 15. – Résultats d'étalonnage des stations fixe et portable en colocation à l'Observatoire de Paris.

Ce résultat associé à ceux des stations participantes, contribue à la détermination des constantes d'étalonnage ($\frac{1}{2}\Delta\tau_R$) recherchées (tableau 2). Par ailleurs, lors de la colocation entre la station portable et la station du LNE-SYRTE, une erreur de boucle calculée sur le parcours OP-PTB + PTB-PS + PS-OP a été évaluée à 0,18 ns (suppression de la différence de marche des horloges et du retard des stations). Cette erreur, traduisant une

dépendance du retard dans les équipements des stations avec les caractéristiques des signaux reçus, est largement inférieure à l'incertitude d'étalonnage.

Tableau 2

Constantes d'étalonnage des liaisons de PTB, NPL et VSL avec le LNE-SYRTE

Liaisons TWSTFT étalonnées	Constantes d'étalonnage
PTB-OP	-6 982,77 ns ± 0,95 ns
NPL-OP	-7 832,05 ns ± 1,02 ns
VSL-OP	-7 029,06 ns ± 0,88 ns

Ainsi, l'étalonnage de la liaison OP-PTB par station portable a permis d'intégrer les données de mesures de la station du LNE-SYRTE dans le calcul du TAI, à compter du 1^{er} janvier 2005, avec une incertitude combinée de 1 ns. La liaison OP-PTB par TWSTFT devient donc la liaison principale dans la contribution des horloges françaises par UTC(OP) au calcul du TAI.

7. Bilan d'incertitudes de mesure typique

Une évaluation préliminaire de l'incertitude combinée sur la mesure d'intervalles de temps entre deux stations distantes liées par TWSTFT a été effectuée. Un exemple d'évaluation des différentes composantes d'incertitudes liées aux comparaisons d'horloges atomiques par TWSTFT entre le PTB et le LNE-SYRTE est donné dans le tableau 3 :

Une incertitude de type A $U_A = 0,53$ ns ($k = 1$, k étant le facteur d'élargissement) [2] a été obtenue, dont la principale cause d'incertitude est liée à l'étalonnage de la liaison OP-PTB. À cela s'ajoutent des contributions moindres liées au bruit de mesure du système 2 voies. Une incertitude de type B, $U_B = 0,97$ ns ($k = 1$) a été obtenue, dont les principales causes d'incertitude sont liées aux mesures d'intervalles de temps effectuées par des modems et des compteurs externes, mesures du retard des liaisons coaxiales entre horloges et stations, étalonnage des stations, trajet des signaux dans la couche ionosphérique, et une contribution liée à l'effet Sagnac. Soit, une incertitude combinée $U = 1,10$ ns ($k = 1$), obtenue sur l'ensemble de la liaison OP-PTB.

Afin de valider ces calculs d'incertitude, les écarts de temps absolus entre les échelles de temps UTC(OP) et UTC(PTB) sur l'ensemble de l'année 2004, mesurés à la fois par TWSTFT et par GPS C/A, ont été comparés et les résultats présentés sur la figure 16 (un point tous les 5 jours).

Tableau 3

Bilan d'incertitudes de mesure d'intervalle de temps entre deux horloges distantes liées par TWSTFT (liaison OP-PTB).

signification physique de la composante d'incertitude	valeur calculée (ns)
trajet dans l'atmosphère terrestre (ionosphère, effet Sagnac), le répéteur satellite et les équipements des stations terrestres [côté PTB]	0,033
trajet dans l'atmosphère terrestre (ionosphère, effet Sagnac), le répéteur satellite et les équipements des stations terrestres [côté OP]	0,016
raccordement entre les signaux 1pps TX et 1 pps UTC(k) [côté PTB]	0,003
raccordement entre les signaux 1pps TX et 1 pps UTC(k) [côté OP]	0,002
étalementage en relatif par station portable [côté PTB]	0,307
étalementage en relatif par station portable [côté OP]	0,410
incertitude totale type A (ns)	0,53
appareil effectuant les mesures TWSTFT (modèle SATRE) [côté PTB]	0,200
appareil effectuant les mesures TWSTFT (modèle SATRE) [côté OP]	0,200
raccordement entre les signaux 1pps TX et 1 pps UTC(k) [côté PTB]	0,333
raccordement entre les signaux 1pps TX et 1 pps UTC(k) [côté OP]	0,333
étalementage en relatif par station portable [côté PTB]	0,540
étalementage en relatif par station portable [côté OP]	0,540
trajet dans la couche ionosphérique	0,102
trajet dans le répéteur satellite	0,000
prise en compte de l'effet Sagnac	0,100
incertitude totale type B (ns)	0,97
incertitude globale (type A et B) (ns)	1,11

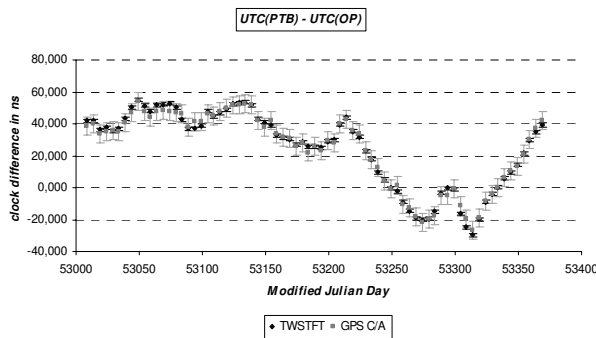


Fig. 16. – Ecarts de temps UTC(PTB)-UTC(OP) mesurés par TWSTFT et par GPS C/A, en 2004.

Les barres d'incertitude sur les points GPS C/A sont fournies par la *Circular T* du BIPM ($U = 5,60$ ns, $k = 1$), celles des points TWSTFT sont directement issues du bilan d'incertitude développé ($U = 1,10$ ns). La technique

TWSTFT permet donc une amélioration d'un facteur 5 de l'incertitude combinée. La différence entre les deux techniques permet d'éliminer le bruit des horloges et une valeur moyenne de 0,32 ns a été obtenue, valeur largement inférieure à l'incertitude combinée du GPS C/A (cas le plus défavorable) montrant qu'aucun effet majeur n'a été oublié dans le bilan d'incertitudes TWSTFT. Cependant, cette comparaison est fortement limitée par l'incertitude importante sur les points GPS C/A, empêchant la détection d'éventuels effets de l'ordre de la nanoseconde ou moins. De plus, les retards dans les stations 2 voies ont été supposés constants sur l'année 2004, en raison de l'impossibilité de les mesurer périodiquement. Le développement en cours d'un simulateur de satellite, à l'Observatoire de Paris, permettra d'étudier l'évolution des retards de la station du LNE-SYRTE dans le temps et de mettre ainsi en évidence d'éventuels effets systématiques qui n'auraient pas été pris en compte, afin de compléter ce bilan d'incertitudes.

8. Etude, réalisation et caractérisation d'un simulateur de satellite

Un dispositif original d'étalonnage en absolu des retards internes de la station installée sur le site de l'Observatoire de Paris a été développé récemment. Ce dispositif, basé sur un simulateur de satellite, permet principalement :

- l'étalonnage en absolu du retard différentiel $\tau_I^{TX} - \tau_I^{RX}$ de la station, intervenant directement dans l'équation horaire traduisant la différence entre deux horloges atomiques distantes. La connaissance de ce retard est indispensable pour déterminer l'écart de temps absolu entre les deux horloges en comparaison (étude de l'exactitude) ;
- le suivi dans le temps du retard différentiel en fonction des conditions atmosphériques (température, pression, humidité), afin de mettre en évidence certains effets systématiques (notamment les variations journalière et saisonnière du retard) dégradant l'exactitude atteignable. La prise en compte de ces effets permettra d'améliorer le niveau d'exactitude (étude de la stabilité). Une description du dispositif d'étalonnage réalisé et de la méthode employée, ainsi que les premiers résultats obtenus en termes de stabilité sont présentés.

8.1. Description du dispositif d'étalonnage

Le dispositif d'étalonnage, également appelé simulateur de satellite, est conçu pour un usage en extérieur : il est ainsi disposé à proximité de l'antenne de la station, dans une enceinte régulée en température à $(25 \pm 5)^\circ\text{C}$ avec un taux d'humidité relative inférieur à 50 % (fig. 17). Il comprend également un cornet conique en bande Ku polarisé linéairement, relié à l'enceinte par deux guides d'ondes flexibles munis de brides R 120.



Fig. 17. – Vue d'ensemble du simulateur de satellite du LNE-SYRTE.

Les composants micro-ondes du simulateur sont présentés sur la figure 18. Ils comportent principalement un mélangeur doublement équilibré piloté par un

synthétiseur radiofréquence, un filtre YIG accordable en fréquence, un filtre passe-bas et deux commutateurs programmables.



Fig. 18. – Composants micro-ondes du simulateur disposés dans un caisson à l'intérieur de l'enceinte.

Enfin, deux commutateurs programmables sont disposés en entrée et en sortie FI du modem dans la salle opérationnelle de temps, reliés à l'enceinte par deux câbles coaxiaux à faibles pertes de longueur 45 m. L'ordinateur de la station assure l'automatisation du dispositif d'étalonnage.

8.2. Principe de la mesure

La méthode mise en oeuvre est basée sur la technique du simulateur de satellite initialement développée au VSL, avec une conception originale du dispositif et une procédure de mesures rigoureuse et plus rapide. La mesure du retard différentiel de la station (trajet en émission – trajet en réception) repose seulement sur deux séries de mesures successives. Une première configuration, illustrée sur la figure 19 (trajet en gras), permet de mesurer le retard global en mode émission (émission par la station et réception avec le simulateur). Une seconde configuration, illustrée sur la figure 20 (trajet en gras), permet de mesurer le retard global en mode réception (émission par le simulateur et réception avec la station). Par différence entre ces deux étapes de mesures, le retard différentiel de la station est obtenu, moyennant la connaissance des retards internes du simulateur qui doivent être déterminés au préalable à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel à partir des mesures de phase.

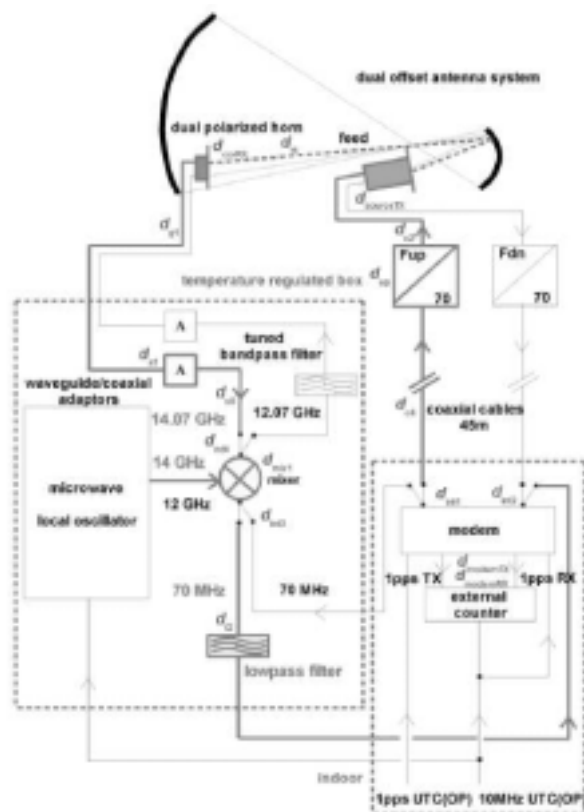


Fig. 19. – Configuration du simulateur en mode d’émission par la station.

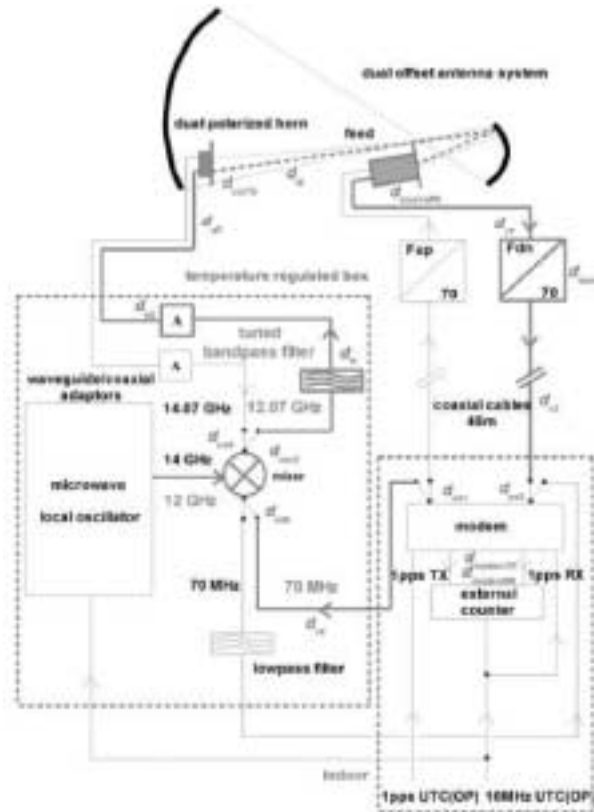


Fig. 21. – Configuration du simulateur en mode de réception avec la station.

8.3. Etude de stabilité

Une étude préliminaire de la stabilité temporelle de l’ensemble (station, simulateur de satellite) a été réalisée à l’Observatoire de Paris. Le retard différentiel a été mesuré sur une période d’analyse de 20 jours, du 6 décembre 2005 (MJD 53 710) au 25 décembre 2005 (MJD 53 729) avec douze sessions de mesures par jour (toutes les 2 h). A chaque session, des mesures ont été collectées toutes les secondes pendant 120 s en mode émission puis en mode réception. Une valeur moyenne a ensuite été calculée sur chaque série de 120 s. Les résultats obtenus sont tracés sur la figure 21, après retrait des points situés au-delà de la limite du niveau de confiance correspondant à $k = 3$.

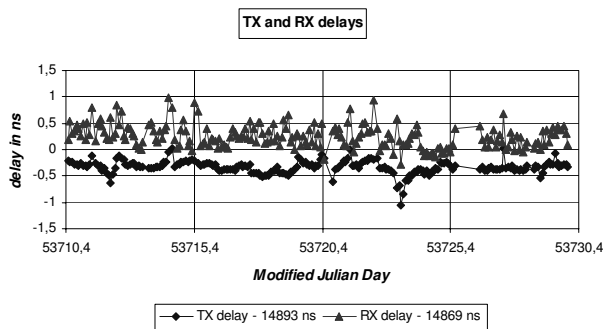


Fig. 20. – Retard temporel mesuré sur une période de 20 jours, des trajets TX et RX de l’ensemble (station, simulateur).

Aucune donnée n’a été enregistrée du MJD 53 725 à 15h00 UTC au MJD 53 726 à 13h00 UTC, en raison d’un dysfonctionnement dans le programme d’acquisition des mesures.

On constate que les fluctuations en émission (TX) et en réception (RX) n’excèdent pas 1,3 ns sur toute la période de mesure, avec une puissance captée par le modem SATRE-077 inférieure à 0,5 dB et 1,0 dB, respectivement. Les écart-types d’Allan temporels obtenus à partir des mesures des retards sur les trajets TX et RX sont représentés sur la figure 22 :

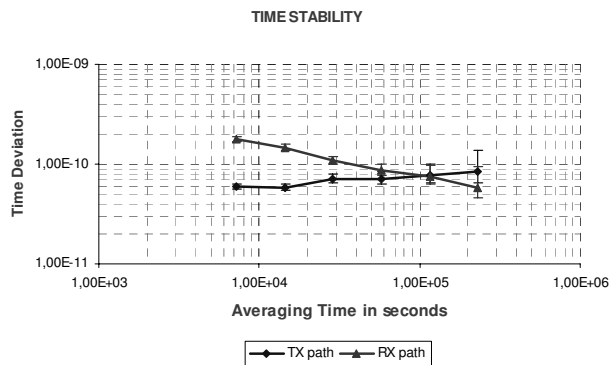


Fig. 22. – Ecart-type d’Allan temporel des trajets TX et RX de l’ensemble (station, simulateur).

Les tracés indiquent que le trajet *TX* présente du bruit de scintillation de phase (pente nulle) avec un niveau de bruit inférieur à 90 ps pour des temps d'intégration compris entre 2 h et environ 3 jours, tandis que le trajet *RX* est caractérisé par du bruit blanc de phase (pente -1) et atteint un faible niveau de bruit de 60 ps au bout de 3 jours d'intégration des données.

Enfin, l'écart-type d'Allan du retard différentiel ($(TX - RX)/2$) est tracé sur la figure 23. Une excellente stabilité de 60 ps est atteinte pour des temps d'intégration compris entre 0,3 jour et 3 jours, ce qui est très prometteur en comparaison des autres dispositifs d'étalonnage existants.

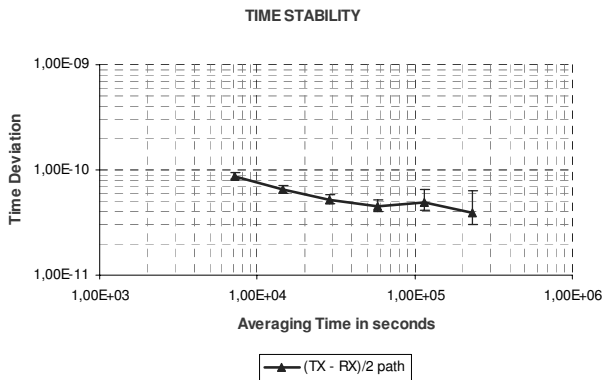


Fig. 23. – Ecart-type d'Allan temporel du retard différentiel (station + simulateur satellite).

Cette étude sera complétée par la mesure et le suivi du retard différentiel sur une année entière, permettant une caractérisation de la stabilité de l'ensemble (station, simulateur) sur le long terme.

De plus, la caractérisation du simulateur de satellite en terme de retards temporels sera effectuée durant l'année 2006, à l'aide de l'analyseur de réseau vectoriel du LNE à Trappes. La méthode de calibrage TRL serait appliquée et les retards des composants linéaires, constituant le simulateur, seront déterminés à partir des mesures de phase. Quant à la mesure en absolu du retard du mélangeur micro-ondes doublement équilibré, la technique de calibrage en vectoriel en utilisant un mélangeur de référence serait utilisée, avec le support logistique de la société Agilent Technologies France.

9. Conclusion et perspectives

Aux côtés du système GPS avec différents récepteurs (mono canal / multi canaux mono fréquence C/A, multi canaux bi fréquences P) que possède le LNE-SYRTE, une alternative plus performante mais plus compliquée à mettre en œuvre devient alors opérationnelle avec une station 2 voies assurant des liaisons temps – fréquences inter européenne et transatlantique de haute précision.

Cette performance positionne le laboratoire au plus haut rang mondial dans les moyens de comparaisons d'horloges, à côté de PTB et NPL en Europe, ou encore NIST et USNO aux Etats-Unis d'Amérique. En outre, le LNE-SYRTE est actuellement l'un des rares laboratoires

de métrologie dans le monde à posséder un simulateur de satellite original et performant, dont le rôle sera, à terme, d'améliorer significativement l'exactitude et la stabilité des comparaisons d'horloges atomiques distantes.

La qualité des résultats obtenus incite le laboratoire à poursuivre les développements scientifiques et techniques dans ce domaine selon les voies suivantes :

- Validation du simulateur de satellite comme dispositif d'étalonnage du retard de la station 2 voies et étude de stabilité sur le moyen et le long terme ;
- Développement d'une 2^e station assurant des liaisons temps – fréquences avec des laboratoires nationaux de métrologie asiatiques ;
- Utilisation de codes pseudo aléatoires de bruit à taux de modulation plus élevé (20 Mchips) et contribution dans la mise en œuvre de la méthode *two-way carrier phase* permettant d'atteindre des performances métrologiques inexistantes aujourd'hui (liaison micro-onde 2 voies ayant une stabilité de fréquence de $2 \cdot 10^{-15}$ à 5 min).

Remerciements

Les auteurs remercient Michel Granveaud, ancien directeur du BNM-LPTF pour son soutien au lancement du projet, l'équipe métrologie du temps du LNE-SYRTE notamment David Valat, Ihsan Ibn Taïeb et Pascal Blondé ainsi que Jacques Vandenberghe du STID de l'Observatoire de Paris de leurs contributions ponctuelles à ce projet.

Nos remerciements vont également à toutes les personnes ayant coopéré ou collaboré avec nous, appartenant aux groupes ou organisations suivantes : groupe de travail TWSTFT du CCTF, groupe de travail WP7A de l'UIT, France Télécom (notamment leur site spatial de Rambouillet), Autorité de Régulation des Télécommunications, Intelsat, Mairie de Paris et Monuments historiques.

Références

- [1] « Télécommunications spatiales », *Collection CNET-ENST*, 1983.
- [2] "Guide to the expression of uncertainty in measurement", *ISO/TAG4/WG3*, 1992.
- [3] DE JONG G., "Delay stability of the TWSTFT earth station at VSL", *European Frequency and Time Forum*, Warsaw, Poland 1998, 175-181.
- [4] "The operational use of two-way satellite time and frequency transfer employing PN codes", *Rec. ITU-R TF.1153-2*, 2003.
- [5] ACHKAR J., « Métrologie micro-ondes et métrologie du temps », *Habilitation à diriger des recherches de l'Université Paris VI*, avril 2004.

- [6] MERCK P. et ACHKAR J., "Design of a Ku band delay difference calibration device for TWSTFT station", *IEEE Instr. & Meas.*, **54**, 2005, 814-818.
- [7] MERCK P. et ACHKAR J., "Typical combined uncertainty evaluation on the Ku band TWSTFT link", *19th European Frequency and Time Forum*, Besançon, France, mars 2005.
- [8] PIESTER D., ACHKAR J., HLAVAC R., DE JONG G., BLANZANO B., RESSLER H., BECKER J., MERCK P. et KOUDELKA O., "Calibration of four European TWSTFT earth stations with a portable station through INTELSAT 903", *19th European Frequency and Time Forum*, Besançon, France, mars 2005.
- [9] MERCK P., « Développement d'une station terrienne de comparaisons d'horloges atomiques par liaisons micro-ondes avec un satellite de télécommunications », *Thèse de doctorat de l'Observatoire de Paris*, décembre 2005.
- [10] ACHKAR J., UHRICH P., MERCK P. et VALAT D., "Recent time and frequency transfer activities at the Observatoire de Paris", *2005 IEEE International Frequency Control Symposium jointly with the Precise Time and Time Interval meetings*, Vancouver, Canada, 2005.
- [11] BAUCH A., ACHKAR J., BIZE S., CALONICO D., DACH R., HLAVAC R., LORINI L., PARKER T., PETIT G., PIESTER D., SZYMANIEC K. et UHRICH P., "Comparison between frequency standards in Europe and the USA at the 10^{-15} uncertainty level", *Metrologia*, **43**, 2006, 109-120.
- [12] MERCK P. et ACHKAR J., "Stability study of the TWSTFT microwave satellite simulator developed at LNE-SYRTE", *Conference on Precision Electromagnetic Measurement (CPEM 2006)*, Turin, Italie, 2006.
- [13] ARIAS E.F. et GUINOT B., « Avenir du temps universel coordonné (UTC) », *Navigation*, **54**, 214, 2006, 59-78.