

## NOTE EXPLICATIVE SUR LE BULLETIN H DU LNE-SYRTE

Le bulletin H est publié au début de chaque mois ; il comprend au moins trois pages :

- Le tableau 1 de la première page regroupe, pour le dernier mois  $m$  écoulé, les mesures rapportées à UTC(OP) du LORAN-C et du temps diffusé par les satellites du GPS.

- Le tableau 2 de la deuxième page présente, pour le dernier mois  $m$ , les mesures de UTC(OP) et de la fréquence moyenne journalière de la porteuse de France-Inter rapportées au Temps Atomique Français TA(F).

- Sur la troisième page, on reporte dans le tableau 3, pour le mois  $m-1$ , les écarts de UTC(OP) et de TA(F) par rapport aux échelles de temps internationales calculées par le BIPM ainsi que les fréquences moyennes normées des différentes échelles de temps par rapport aux étalons primaires de laboratoire. Ces étalons réalisent la définition de la seconde du Système International d'unités.

Cette troisième page peut comporter un quatrième tableau intitulé "Etalonnages" dans lequel seront rapportés les résultats des comparaisons entre les échelles de temps des différents laboratoires (résultats obtenus par des moyens divers tels que les transports d'horloges, transports de récepteurs GPS), ou des résultats de comparaisons de fréquence entre les échelles de temps et les étalons primaires de laboratoire.

De plus, le bulletin comporte une rubrique "Notes" sous laquelle on donne des informations diverses sur les échelles de temps, les moyens de comparaison (Loran-C, GPS, France-Inter) etc... Concernant les incidents sur les émissions des satellites du GPS, seuls sont signalés les incidents entraînant une inutilisation sur une durée supérieure à une demi-heure.

## I - NOTATIONS

- **TEMPS GPS** : Echelle de temps à laquelle se réfèrent toutes les opérations du Global Positioning System.

Officiellement la spécification fixant la tolérance sur le temps GPS est :

$$|\text{TEMPS GPS-UTC(USNO MC)}| < 1 \text{ microseconde à } M \text{ secondes près.}$$

Rappelons que UTC(USNO MC) est l'échelle de Temps Universel Coordonné généré par l'horloge maîtresse de l'Observatoire Naval de Washington.

Par ailleurs, une estimation de la différence GPS-UTC(USNO MC) est incluse dans le message de navigation sous la forme de deux constantes -  $A_0$  pour la phase et  $A_1$  pour la fréquence - que les récepteurs peuvent extraire automatiquement et appliquer aux mesures si on leur spécifie comme référence UTC au lieu de GPS. L'approximation de UTC(USNO MC) obtenue après application des corrections  $A_0$  et  $A_1$  du temps GPS diffère de moins de 110 ns d'UTC(USNO MC) pendant 99 % du temps. L'écart observé est généralement très inférieur à cette limite.

Il n'y a plus de satellites du bloc I en service.

Le signal d'horloge des satellites du bloc II, également utilisé pour le positionnement et la navigation, subissait une dégradation volontaire connue sous le nom de "Selective Availability", S.A. en abrégé. Cette dégradation générait un bruit qui introduisait une incertitude d'environ 85 nanosecondes à  $1 \sigma$  dans la restitution du Temps GPS à partir des satellites du bloc II, avec des récepteurs qui n'avaient accès qu'au code C/A. La SA a été supprimée le 2 mai 2000 à 4 h 00 UT (MJD = 51666)

La méthode de comparaison d'horloges par vues strictement communes des mêmes satellites permet aux laboratoires de comparer leurs étalons. C'est la méthode utilisée par le LNE-SYRTE pour comparer la plupart des horloges participant à l'établissement du TA(F).

- **TA(F)** ou Temps Atomique Français : Echelle de temps atomique élaborée à partir des lectures des horloges des étalons commerciaux de fréquence à jet de césium, fonctionnant de façon indépendante dans divers laboratoires français de métrologie.

Depuis le 1<sup>er</sup> janvier 1997, le TA(F) est calculé par un nouvel algorithme dénommé TAC (temps atomique calculé). Chaque horloge fait l'objet d'une modélisation ARIMA du type 0,2,1 qui est définie par trois paramètres.

Le but visé est d'obtenir une échelle française de référence de temps exacte en fréquence, pérenne et stable à mieux que  $\sigma = 1.10^{-14}$  sur des durées égales ou supérieures à 5 jours.

Le TA(F) est une moyenne des lectures d'horloges, pondérée en fonction de la stabilité à long terme des horloges. C'est une échelle de temps "papier" connue à posteriori qui a des qualités de pérennité et de stabilité de fréquence. Elle est accessible par l'intermédiaire des horloges qui participent à sa formation.

La caractérisation initiale d'une nouvelle horloge dure sept mois, puis elle entre progressivement en cinq mois dans la constitution du TA(F). Ensuite, chaque mois, elle reçoit un poids compris entre 0 et 100.

Les critères de sélection et de pondération des horloges se rapportent aux performances des nouvelles horloges commerciales au césium, notamment les 5071A. Il en résulte que les horloges anciennes, HP 5061A ou B, Oscillosquartz..., reçoivent dans l'algorithme TAC un poids nul qui traduit des niveaux de bruit de phase et de fréquence relativement élevés. Depuis le 1<sup>er</sup> janvier 1997, les horloges anciennes ne participent donc plus effectivement au calcul du TA(F). Elles sont toutefois rattachées au TA(F) ce qui permet à l'utilisateur, comme précédemment, de connaître les écarts TA(F) - horloge et les fréquences moyennes mensuelles correspondantes.

Il est évident que de nouveaux modèles d'étalons au césium, avec des performances semblables ou supérieures à celles des 5071A, apparaissant dans les laboratoires pourront participer au TA(F).

L'exactitude de la fréquence du TA(F) est obtenue par ajustement de sa fréquence après comparaison à celle des meilleurs étalons primaires de laboratoire (fontaine atomique, étalon à jet de césium) du LNE-SYRTE. Entre le 1<sup>er</sup> janvier 2002 et le 31 décembre 2005, des corrections à la fréquence du TA(F) ont été appliquées pour compenser la dérive observée depuis plusieurs mois et ramener son exactitude de fréquence dans le domaine  $1 \times 10^{-14}$ .

Depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2006, les corrections à la fréquence du TA(F) sont calculées sur la base de comparaisons de fréquences avec les étalons primaires du laboratoire.

Corrections à la fréquence du TA(F) en 2006 :

Période	Mois de l'année	Correction	Etalon source
(53736-53766)	janvier 2006	+ 1,038*E 16 /d	FO2
(53767-53794)	février 2006	- 2,683*E 16 /d	FO2
(53795-53825)	mars 2006	+ 0,414*E 16 /d	JPO
(53826-53855)	avril 2006	+ 0,745*E 16 /d	JPO
(53856-53886)	mai 2006	+ 1,755*E 16 /d	JPO
(53887-53916)	juin 2006	+ 0,914*E 16 /d	JPO
(53917-53947)	juillet 2006	- 1,512*E 16 /d	FO1
(53948-53978)	août 2006	+ 1,161*E 16 /d	FO1
(53979-54008)	septembre 2006	+ 1,123*E 16 /d	----
(54009-54039)	octobre 2006	+ 0,287*E 16 /d	FO1
(54040-54069)	novembre 2006	+ 1,103*E 16 /d	FO1
(54070-54100)	décembre 2006	+ 1,650*E 16 /d	FO1 / FO2

Durant l'année 2006, 23 étalons à césium HP 5071A, option hautes performances, étaient en service dans les laboratoires suivants :

Laboratoires	Nombre d'étalons à césium	Température de la salle des étalons (°C)	Humidité relative de la salle des étalons (%)	Liaisons avec le LNE-SYRTE
Centre électronique de l'Armement (Rennes)	1	23 ± 1	40-60	GPS AUSTRON
Centre National d'Etudes Spatiales (Toulouse)	4	20,5 ± 0,2	30-65	GPS NRT2
France Télécom R & D (Lannion)	2	21 ± 1	50-60	GPS VP Oncore
Agilent Technologies (Palaiseau)	2	23 ± 1	40-60	GPS TTR05
Observatoire de la Côte d'Azur (Grasse)	2	20 ± 1	non mesurée	GPS TTR05
Observatoire de Besançon	3	22 ± 0,15	45-55	GPS NRT2
Observatoire de Paris : LNE-SYRTE	7	22,2 ± 0,5 *	20-70 *	
DCN Brest	2	22,7 ± 5	40-60	GPS TTR06
Tekelec (Les Ulis)	0	22 ± 0,2	mesurée non communiquée	GPS

- **TAI** ou Temps Atomique International : Echelle de temps atomique "papier" établie par le Bureau International des Poids et Mesures, à partir des lectures d'un ensemble d'environ 260 étalons de fréquence fonctionnant en horloges indépendantes dans les instituts de métrologie d'environ 30 pays en 2006. Les étalons utilisés sont des étalons primaires de laboratoire à jet de césium, des masers à hydrogène, des étalons commerciaux à jet de césium.

Le TAI est une moyenne pondérée en fonction de la stabilité à long terme des lectures de ces étalons. Des précautions sont prises pour garantir l'exactitude de la fréquence du TAI.

Le TAI est accessible par l'intermédiaire des horloges qui participent à sa formation et des UTC(laboratoire).

- **UTC** ou Temps Universel Coordonné est une échelle de temps coordonné issue du TAI. Elle a la même fréquence que le TAI ; elle subit occasionnellement des sauts de temps d'une seconde pour que  $|UTC-UT1| < 0,9$  seconde.

(UT1 = Temps Universel 1 = Temps moyen local observé, corrigé de la longitude conventionnelle du lieu et du mouvement du pôle).

La décision d'introduire une seconde intercalaire est prise par le Bureau central du Service de la rotation de la Terre (IERS).

Le dernier ajustement a eu lieu le 31 décembre 2005 à 23h 59m 60s. L'écart TAI-UTC est depuis cette date 33 secondes.

- **UTC(OP)** ou Temps Universel Coordonné de l'Observatoire de Paris est généré à partir d'un étalon commercial à jet de césium, fonctionnant au LNE-SYRTE, associé à un micro-déphaseur et à une horloge numérique de haute stabilité. UTC(OP) est accessible sous forme d'impulsions électriques apparaissant chaque seconde et également sous forme de fréquences disponibles sans discontinuité.

Il sert de référence à toutes les comparaisons de temps et de fréquences effectuées au LNE-SYRTE, il est accessible en temps réel. Il est également la référence du temps légal français diffusé par l'horloge parlante.

La fréquence de l'étalon générant UTC(OP) est ajustée dans le but de maintenir le synchronisme entre les échelles de temps UTC et UTC(OP) à  $\pm 100$  nanosecondes à un écart type, conformément à la recommandation S5 du Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde (CCDS - 12<sup>ème</sup> session - 1993).

Six ajustements de fréquence d'UTC(OP) ont été effectués en 2006 :

- le 18 janvier 2006 à 13h 30 UTC	MJD = 53753,562500	- 0,5 x 10 <sup>-14</sup>
- le 21 février 2006 à 13h 30 UTC	MJD = 53787,562500	- 1,0 x 10 <sup>-14</sup>
- le 27 avril 2006 à 14h 12 UTC	MJD = 53852,591700	- 1,0 x 10 <sup>-14</sup>
- le 5 octobre 2006 à 13h 59 UTC	MJD = 54013,582600	- 1,0 x 10 <sup>-14</sup>
- le 24 octobre 2006 à 13h 30 UTC	MJD = 54032,562500	- 0,5 x 10 <sup>-14</sup>

Depuis le 25 juillet 2005 13h 50 UTC, l'étalon à césium 5071A n° 1352027 pilote le micro-déphaseur générant UTC(OP) en remplacement de l'étalon n° 1350124.

Les ajustements de fréquence d'UTC(OP) d'amplitude inférieure à  $2 \cdot 10^{-14}$  ne sont pas publiés dans les bulletins H mensuels, mais ils figurent dans le rapport annuel du LNE-SYRTE. Ils sont disponibles, sur demande, à tout laboratoire intéressé.

## **II - EXPLICATION DES TABLEAUX**

### **II - 1 Tableau 1 : Mesures de temps rapportées à UTC(OP)**

#### ***a ) Mesures de phase de la chaîne de Loran-C***

Dans le cadre de la reconfiguration des chaînes européennes de Loran-C, la station maîtresse de LESSAY a commencé à émettre avec le GRI de 6731 (67310 microsecondes) le 23 septembre 1997 vers 08h 30 UT. L'émission de LESSAY (6731) a été définitivement synchronisée sur l'UTC de la DCN-BREST le 27 septembre 1997 à 0h UT.

Grâce au prêt d'un récepteur par la DCN-BREST, le LNE-SYRTE continue de recevoir l'émission de LESSAY et à en publier les écarts de temps UTC(OP) - LESSAY(6731). Par contre, le LNE-SYRTE n'effectue pas de mesure sur les stations secondaires SOUSTONS et SYLT de cette chaîne.

Pour être en accord avec les spécifications de synchronisation de l'US Coast Guard (Loran-C américain), le « North Europe LORAN System » a effectué une resynchronisation de 2,5 microsecondes sur le signal émis, le 25 mars 2003 entre 08h00 UT et 11h00 UT. A cette date, une constante de continuité de - 2,5 microsecondes a été ajoutée au bilan des retards pour le traitement des données UTC (OP) - LESSAY (67310).

Le retard total de réception appliqué aux mesures de LESSAY (6731) est de 999,875  $\mu$ s. L'exactitude des valeurs publiées est estimée à  $\sigma = \pm 0,20 \mu$ s.

#### ***b ) Mesures du Temps du GPS***

Pour chaque passage de satellite du GPS, le récepteur du LNE-SYRTE effectue un grand nombre de mesures (par exemple 780 correspondant à 13 minutes avec le récepteur actuellement utilisé). Après traitement de ces mesures, on obtient l'écart UTC(OP) - GPS pour la date correspondant au milieu de la poursuite.

Chacune des valeurs publiées dans le tableau 1 est le résultat, donné pour 14h UT, de l'ajustement linéaire effectué avec les mesures de nombreux passages de satellites du système GPS répartis dans un intervalle de temps de 24 heures débutant chaque jour à 0h UT. (Au 1<sup>er</sup> janvier 2006, 48 passages sont utilisés).

L'incertitude de mesure des valeurs moyennes journalières publiées est estimée à  $\sigma = \pm 2,5$  ns. Elle résulte d'une incertitude de type A due à la stabilité à court terme du récepteur du LNE-SYRTE ( $\sigma_A = \pm 0,25$  ns)

et d'une incertitude de type B déterminée par sept étalonnages du retard du récepteur du LNE-SYRTE par rapport au récepteur de référence du NIST (National Institute of Standards and Technology, Boulder, USA) réalisés entre 1986 et 2003 ( $\sigma_B = \pm 2,5$  ns). Les fluctuations observées d'un jour à l'autre représentent donc la stabilité par rapport à UTC(OP) de l'évaluation faite par le LNE-SYRTE du temps du GPS restitué par le récepteur.

## II - 2 Tableau 2 : Mesures de temps et de fréquences rapportées au TA(F)

a ) TA(F)-UTC(OP) : L'écart TA(F)-UTC(OP) est donné pour chaque jour à 0h UT en nanosecondes.

b ) Fréquence de France-Inter : L'émission de France-Inter est diffusée par l'émetteur d'Allouis (Cher). La fréquence porteuse  $f_0$  qui lui est assignée, 162 KHz, est stabilisée par un étalon commercial à jet de césium. La table donne pour chaque jour la valeur moyenne, rapportée à TA(F) de  $\Delta f / f_0 = (f-f_0) / f_0$ .

Depuis le mois de janvier 1991, sauf exception signalée sous la rubrique "Notes", les mesures publiées sont faites au LNE-SYRTE. L'écart normé de fréquence, centré sur 0h UT, est déduit de la variation en 24 heures de la phase de l'onde reçue entre deux mesures relevées à 12h UT, compte tenu des éventuels sauts de phase. Cette mesure représente la fréquence moyenne pendant les périodes non perturbées.

L'incertitude des mesures journalières rapportées à TA(F) est estimée à  $\sigma = \pm 3 \times 10^{-13}$ . A cette incertitude de mesure, il y a lieu d'ajouter les effets de la propagation. L'exactitude des mesures publiées est estimée à  $\sigma = \pm 2,5 \times 10^{-12}$ .

## II - 3 Tableau 3 : Mesures de temps et de fréquences rapportées aux échelles internationales

a ) Mesures de temps : Les données concernant les échelles de temps françaises UTC(OP) et TA(F) sont extraites de la circulaire T du BIPM.

b ) Mesures de fréquences : Ces mesures sont basées sur les étalons primaires à jet de césium des laboratoires suivants

- Communications Research Laboratory (CRL), Tokyo, Japan.
- Laboratoire d'Etat de l'Etalon de Temps et de Fréquences (SU), URSS.
- Laboratoire National de Métrologie et d'Essais - Systèmes de Référence Temps Espace (LNE-SYRTE), Paris.
- National Institute of Standards and Technology (NIST), Boulder, USA.
- National Research Council (NRC), Ottawa, Canada.
- Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig, RFA.

Après correction pour tenir compte du décalage de fréquence dû au rayonnement du corps noir, le BIPM calcule une estimation de la durée moyenne de l'intervalle unitaire du TAI en seconde du SI (Système International) au niveau de la mer. A partir de cet étalonnage, le LNE-SYRTE calcule les fréquences moyennes normées mensuelles de TA(F) et d'UTC(OP).

## II - 4 Etalonnages

Les étalonnages effectués par le LNE-SYRTE sont reportés sous cette rubrique.

Les valeurs publiées sont corrigées pour tenir compte des effets systématiques dus à la gravitation, au rayonnement du corps noir et de l'effet Zeeman (champ magnétique). Les corrections effectuées ainsi que leurs incertitudes sont également publiées.

Les mesures d'étalonnages sont réalisées par rapport à la référence de fréquence la plus stable du LNE-SYRTE : un des 4 masers à hydrogène. Le transfert est ensuite effectué aux échelles de temps UTC(OP) et TA(F) pour les périodes correspondantes aux dates des mesures. Quand la durée des étalonnages est suffisante, une évaluation mensuelle des fréquences de TA(F) et d'UTC(OP) est publiée.