

NOTE EXPLICATIVE SUR LE BULLETIN H DU LNE-SYRTE

Le bulletin H est publié au milieu 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 1σ 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 04h00 UTC (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^{er} janvier 1997, le TA(F) est calculé par un 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 $\sigma = 1 \times 10^{-14}$ 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^{er} 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 peuvent 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^{er} 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 1×10^{-14} .

Depuis le 1^{er} 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 2007 :

| Période | Mois de l'année | Correction | Etalon source |
|---------------|-----------------|-----------------|---------------|
| (54101-54131) | janvier 2007 | + 0,470*E-16 /d | FO1Cs/FO2Cs |
| (54132-54159) | février 2007 | - 0,455*E-16 /d | FO1Cs/FO2Rb |
| (54160-54190) | mars 2007 | + 1,296*E-16 /d | FO1Cs/FO2Rb |
| (54191-54220) | avril 2007 | + 1,169*E-16 /d | FO1Cs |
| (54221-54251) | mai 2007 | + 0,948*E-16 /d | FO1Cs/FO2Cs |
| (54252-54281) | juin 2007 | + 0,918*E-16 /d | FO2Cs |
| (54282-54312) | juillet 2007 | + 1,105*E-16 /d | FO2Cs |
| (54313-54343) | août 2007 | + 1,927*E-16 /d | FO2Cs |
| (54344-54373) | septembre 2007 | - 0,147*E-16 /d | FOMCs |
| (54374-54404) | octobre 2007 | + 2,304*E-16 /d | FOMCs |
| (54405-54435) | novembre 2007 | + 0,586*E-16 /d | FOMCs |
| (54435-54465) | décembre 2007 | + 1,859*E-16 /d | FOMCs |

Durant l'année 2007, 23 étalons à césium 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 ± 0,3 | 15-60 | GPS NRT2 |
| France Télécom R & D (Lannion) | 2 | 21 ± 1 | 50-60 | GPS VP Oncore |
| Agilent Technologies (Palaiseau) | 2 | 23 ± 2 | < 70 | GPS TTR05 |
| Observatoire de la Côte d'Azur (Grasse) | 2 | 23 ± 1 | 35 | GPS TTR05 |
| Observatoire de Besançon | 3 | 22,6 ± 0,15 | 40-60 | GPS NRT2 |
| Observatoire de Paris : LNE-SYRTE | 7 | 22,2 ± 0,5 | 20-70 | |
| DCN Brest | 2 | 23 ± 5 | 20-60 | GPS TTR06 |

- **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 2007. 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.

A partir du 12 avril 2007 à 08h00 UTC, le micro-déphaseur et l'horloge numérique ont été remplacé par une nouvelle chaîne constituée d'un synthétiseur numérique, de convertisseurs de fréquences et d'amplificateurs de distribution.

L'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 ± 100 nanosecondes à un écart type, conformément à la recommandation S5 du Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde (CCDS - 12^{ème} session - 1993).

Trois ajustements de fréquence d'UTC(OP) ont été effectués en 2007 :

| | | |
|------------------------------------|--------------------|-------------------------|
| - le 22 mars 2007 à 13h 47 UTC | MJD = 54181,574300 | - $1,5 \times 10^{-14}$ |
| - le 14 mai 2007 à 14h 35 UTC | MJD = 54234,607600 | + $1,0 \times 10^{-14}$ |
| - le 12 novembre 2007 à 14h 36 UTC | MJD = 54416,608300 | - $2,0 \times 10^{-14}$ |

Depuis le 25 juillet 2005 13h 50 UTC, l'étalon à césium 5071A n° 1352027 pilote la chaîne de génération de l'UTC(OP).

Les ajustements de fréquence d'UTC(OP) d'amplitude inférieure ou égale à 2×10^{-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 UTC. L'émission de LESSAY (6731) a été définitivement synchronisée sur l'UTC de la DCN-BREST le 27 septembre 1997 à 0h UTC.

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 μ s. L'exactitude des valeurs publiées est estimée à $\sigma = 0,20 \mu$ s.

Bilan d'incertitude sur chaque mesure UTC(OP) - LESSAY(6731) faite par un compteur d'intervalle de temps :

| Cause | Nom | Type | Valeur (s) |
|--|-----------|------|----------------|
| Référence UTC(OP) | $u_{réf}$ | B | 5.10^{-12} |
| Horloge X | u_x | B | $< 1.10^{-8}$ |
| Compteur | u_{rd} | B | $1,0.10^{-10}$ |
| Câble UTC(OP) → Commutateur | u_{c1} | B | 300.10^{-12} |
| Câble Commutateur → Voie A Compteur | u_{c2} | B | 300.10^{-12} |
| Câble Commutateur → Voie B Compteur | u_{c3} | B | 300.10^{-12} |
| Câble Horloge X → Commutateur | u_{c4} | B | 300.10^{-12} |
| Retard Commutateur | u_{cp} | B | 300.10^{-12} |
| TOTAL | u | | $1,0.10^{-8}$ |
| Incertitude élargie | I | | $2,0.10^{-8}$ |

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 14h00 UTC, 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 00h00 UTC. (Au 1^{er} janvier 2006, 48 passages sont utilisés).

L'incertitude de mesure des valeurs moyennes journalières publiées est estimée à $\sigma = 3,7$ ns.

Elle résulte d'une incertitude de type A due à la stabilité à court terme de la comparaison UTC(OP)-TGPS ($\sigma_A = 2,73$ 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 ($\sigma_B = 2,5$ 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 00h00 UTC en nanosecondes.

L'incertitude de mesure des valeurs journalières publiées de TA(F)-UTC(OP) est estimée à $\sigma = 2,6$ ns.

Cette incertitude de type A est estimée sur la base de la stabilité de fréquence des écarts de phases mesurés ($\sigma_y(1 \text{ jour}) = 2,95 \times 10^{-14}$). Il n'y a pas d'incertitude de type B dans ce cas.

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 00h00 UTC, est déduit de la variation en 24 heures de la phase de l'onde reçue entre deux mesures relevées à 12h00 UTC, 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 $\sigma = 3 \times 10^{-13}$.

Cette incertitude prend en compte l'incertitude liée au relevé de deux phases à 12h00 UTC et d'un maximum de 5 sauts de phase sur l'intervalle de 24h00 correspondant. Dans le cas où le nombre de sauts de phase est supérieur à 5, la mesure n'est pas validée et donc pas publiée.

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

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.

L'incertitude sur les écarts UTC-UTC(OP) est reportée telle que données par le BIPM dans la circulaire T mensuelle.

L'incertitude sur les écarts TAI-TA(F) est de type A. Elle est estimée sur la base de la stabilité de fréquence des écarts de phases mesurés ($\sigma_y(5 \text{ jour})=4,2 \times 10^{-15}$ sur toute l'année 2007). Il n'y a pas d'incertitude de type B dans ce cas.

- b) *Mesures de fréquences* : Ces mesures sont basées sur les données d'étalons de fréquence de laboratoires du monde entier.

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).

Le calcul des fréquences moyennes normées mensuelles de TA(F) et d'UTC(OP) et des incertitudes associées est fait chaque mois selon la méthode décrite ci-dessous :

Les écarts de fréquences moyens mensuels de UTC(OP) par rapport à UTC et de TA(F) par rapport à TAI sont estimés par les pentes des droites de régression ajustées par la méthode des moindres carrés aux écarts de temps UTC – UTC(OP) et TAI – TA(F) publiés par le BIPM.

L'équation de la droite est de la forme :

$$\Delta\Phi_i = \Delta\Phi_0 + \frac{\Delta F}{F} (t_i - \bar{t})$$

Les dates t_i , étant régulièrement espacées, la pente de la droite est donnée par :

$$\Delta\Phi_i = \Delta\Phi_0 + \frac{\Delta F}{F} = \frac{\sum (t_i - \bar{t})(\Delta\Phi_i - \Delta\Phi_0)}{86400 \sum (t_i - \bar{t})^2}$$

avec

$\Delta\Phi_i$: Ecart de temps UTC – UTC(OP) ou TAI – TA(F) calculés pour les dates t_i ,

$\Delta\Phi_0$: Ecart de temps UTC – UTC(OP) ou TAI – TA(F) calculés pour les dates \bar{t} ,

$\bar{t} = \frac{\sum t_i}{n}$: moyenne des n dates t_i des comparaisons UTC – UTC(OP) ou TAI – TA(F), en jours,

$\frac{\Delta F}{F}$: Ecart relatif calculé de fréquence de $\frac{UTC - UTC(OP)}{UTC}$ ou $\frac{TAI - TA(F)}{TAI}$

$\Delta\Phi = \frac{\sum \Delta\Phi_i}{n}$: Moyenne des n écarts de temps $\Delta\Phi_i$ mesurés, en seconde.

L'incertitude sur la pente de la droite de régression, donc sur l'écart relatif de fréquence est alors :

$$\sigma_{\frac{\Delta F}{F}} = \frac{1}{86400} \sqrt{\frac{(\Delta\Phi_i - \Delta\Phi_0)^2}{(n-2)\sum(t_i - \bar{t})^2}}$$

Les écarts relatifs de fréquence $\frac{UTC - UTC(OP)}{UTC}$ et $\frac{TAI - TA(F)}{TAI}$ sont sommés avec l'écart relatif de fréquence $\frac{TAI - SI}{SI}$ pour obtenir les écarts relatifs des fréquences $\frac{UTC(OP) - SI}{SI}$ et $\frac{TA(F) - SI}{SI}$ et les fréquences normées d'UTC(OP) et de TA(F). Dans ces expressions, SI représente le Hertz du système international d'unités.

Les incertitudes correspondantes sont sommées quadratiquement. Les incertitudes sur les raccordements des fréquences d'UTC(OP) et de TA(F), évaluées par la méthode ci-dessus, sont de l'ordre de 2 à $3 \cdot 10^{-15}$.

II – 4 Étalonnages

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.