

# MANUEL

## TRANSFERT ET DIFFUSION PAR SATELLITE DE SIGNAUX HORAIRES ET DE FRÉQUENCE



Edition de 2010  
Bureau des radiocommunications





# MANUEL

## **TRANSFERT ET DIFFUSION PAR SATELLITE DE SIGNAUX HORAIRES ET DE FRÉQUENCE**

Edition de 2010  
Bureau des radiocommunications



## LE SECTEUR DES RADIOCOMMUNICATIONS DE L'UIT

Le rôle du Secteur des radiocommunications est d'assurer l'utilisation rationnelle, équitable, efficace et économique du spectre radioélectrique par tous les services de radiocommunication, y compris les services par satellite, et de procéder à des études pour toutes les gammes de fréquences, à partir desquelles les Recommandations seront élaborées et adoptées.

Les fonctions réglementaires et politiques du Secteur des radiocommunications sont remplies par les Conférences mondiales et régionales des radiocommunications et par les Assemblées des radiocommunications assistées par les Commissions d'études.

### **Pour tout renseignement sur les questions de radiocommunication**

*Veillez contacter:*

UIT  
Bureau des radiocommunications  
Place des Nations  
CH -1211 Genève 20  
Suisse

Téléphone: +41 22 730 5800  
Téléfax: +41 22 730 5785  
E-mail: [brmail@itu.int](mailto:brmail@itu.int)  
Web: [www.itu.int/itu-r](http://www.itu.int/itu-r)

### **Pour commander les publications de l'UIT**

*Les commandes ne sont pas acceptées par téléphone. Veillez les envoyer par télécopie ou par courrier électronique (E-mail).*

UIT  
Division des ventes et du marketing  
Place des Nations  
CH -1211 Genève 20  
Suisse

**Téléfax: +41 22 730 5194**  
**E-mail: [sales@itu.int](mailto:sales@itu.int)**

**La Librairie électronique de l'UIT: [www.itu.int/publications](http://www.itu.int/publications)**

## PRÉFACE

Le développement technologique en général, et les technologies et applications de l'information et de la communication en particulier, exige une base de temps et une synchronisation de divers dispositifs électroniques de plus en plus précises.

L'Union internationale des télécommunications procède à des études et élabore des normes internationales sur les échelles de temps pertinentes et sur leur utilisation par divers systèmes: réseaux informatiques et de télécommunication, systèmes de navigation électronique, etc.

En 1974, le Comité consultatif international des radiocommunications (CCIR) a établi, en coopération avec la Conférence générale des poids et mesures et le Bureau international de l'heure, le temps universel coordonné (UTC).

En 1978, le CCIR a approuvé l'utilisation du temps UTC pour «désign[er] l'heure dans toutes les activités internationales relevant des télécommunications et dans tous les documents officiels de l'Union internationale des télécommunications.» Le CCIR a également indiqué que le temps UTC devrait être employé «comme référence pour les émissions de fréquences étalon».

La Conférence administrative mondiale des radiocommunications de l'UIT tenue en 1979 (CAMR-79) a intégré le temps UTC dans le Règlement des radiocommunications, qui a valeur de traité international, et, depuis lors, le temps UTC est utilisé comme principale échelle de temps pour les réseaux de télécommunication (câblés et hertziens) et pour d'autres applications liées au temps.

Les systèmes modernes à satellites qui diffusent des signaux horaires et de fréquence le long de trajets dégagés, avec un retard facilement modélisable, constituent la première source de temps et de fréquence de précision qui est absolument essentielle aux services maritimes et d'aviation, aux systèmes de navigation et de radiopérage et au bon fonctionnement des réseaux informatiques et de télécommunication.

Cet ouvrage est le premier Manuel de l'UIT qui donne des informations détaillées sur les méthodes utilisées, les technologies, les algorithmes, les structures de données et l'utilisation concrète des signaux horaires et de fréquence provenant de systèmes à satellites.

Une attention particulière est accordée aux systèmes mondiaux de navigation par satellite (GNSS), qui relèvent du service de radionavigation par satellite. Les systèmes GNSS, qui diffusent des signaux horaires et de fréquence en tout endroit du globe, constituent actuellement la source primaire *de facto* de signaux horaires précis pour les applications gouvernementales, commerciales, de transport et scientifiques.

Valery TIMOFEEV

Directeur

Bureau des radiocommunications



## TABLE DES MATIÈRES

### Page

PRÉFACE.....	iii
AVANT-PROPOS.....	vii
REMERCIEMENTS .....	ix
INTRODUCTION.....	xi
CHAPITRE 1 – Transfert et diffusion par satellite de signaux horaires et de fréquence.....	1
CHAPITRE 2 – Système mondial de repérage .....	7
CHAPITRE 3 – SystÈme complémentaire AU GPS par satellite.....	23
CHAPITRE 4 – Temps du systÈme GPS.....	49
CHAPITRE 5 – Système de navigation par satellite GLONASS.....	55
CHAPITRE 6 – Systèmes de communication par satellite .....	73
CHAPITRE 7 – Echelles de temps.....	81
CHAPITRE 8 – Centres nationaux du temps .....	99
CHAPITRE 9 – Transfert et diffusion par satellite de signaux horaires et de fréquence: effets relativistes .....	105
CHAPITRE 10 – Orientation de la Terre et système géodésique .....	133
CHAPITRE 11 – Propagation et facteurs environnementaux .....	143
CHAPITRE 12 – Systèmes mondiaux de navigation par satellite – premiers outils de transfert du temps .....	155
CHAPITRE 13 – Techniques geodesiques faisant appel a des mesures de code et de phase du système GPS.....	173
CHAPITRE 14 – Comparaison de temps et de fréquence par aller et retour sur satellite (TWSTFT).	205
CHAPITRE 15 – Diffusion du temps et des fréquences: résumé.....	217





## **AVANT-PROPOS**

La Commission d'études 7 des radiocommunications (CE 7) a été créée dans le cadre d'une restructuration décidée lors de l'Assemblée plénière du CCIR, à Düsseldorf, en 1990: la Commission d'études sur la Recherche spatiale et la radioastronomie (CE 2) a été regroupée avec la Commission d'études sur les Emissions de fréquences étalon et de signaux horaires (CE 7) pour former une nouvelle Commission d'études 7 sur les Services scientifiques.

De nombreuses activités de la CE sur les Services scientifiques sont axées sur le développement de l'utilisation du spectre radioélectrique en vue d'atteindre des objectifs scientifiques. A cet égard, les spécialistes des étalons de temps et de fréquence sont associés depuis longtemps à l'Union internationale des télécommunications (UIT) dans le but exprès d'élaborer des Recommandations portant sur l'utilisation du spectre radioélectrique en vue de faciliter la diffusion de références temporelles précises et de normaliser les méthodes de diffusion. L'établissement de spécifications visant les étalons de fréquence de précision ainsi que leurs techniques de mise en œuvre constitue un corollaire essentiel de cette démarche.

La CE 7 du Secteur des radiocommunications (Services scientifiques) comprend quatre groupes de travail des radiocommunications (GT), qui analysent les questions techniques liées à certaines disciplines relevant des services scientifiques. Le Groupe de travail 7A (Emissions de fréquences étalon et de signaux horaires) s'intéresse à l'établissement et à la diffusion de signaux horaires et de fréquence par les services de radiocommunication de Terre et de radiocommunication spatiale. Dans les quinze à vingt dernières années, les services horaires et de fréquence de précision assurés par les systèmes à satellites – satellites de navigation essentiellement – sont devenus le premier moyen de diffusion. Ces systèmes à satellites ont vu leurs capacités se développer de façon spectaculaire et il est devenu difficile d'en suivre les évolutions et de tenir compte de leur incidence sur la communauté des spécialistes du temps et des fréquences et sur les communautés des radiocommunications et des télécommunications en général.

Le présent Manuel fournit des informations techniques et opérationnelles détaillées sur les systèmes à satellites actuellement utilisés pour la diffusion de signaux horaires et de fréquence de précision.

En ma qualité de Président du CE 7, c'est pour moi un grand plaisir de présenter ce Manuel aux communautés d'utilisateurs susmentionnées, qui, j'en suis persuadé, y trouveront un outil de référence essentiel pour leurs travaux.

Ce Manuel est l'aboutissement de plusieurs années de préparation et d'efforts en vue de cerner l'évolution des technologies par satellite et des possibilités toujours plus grandes qu'offrent ces technologies. Il n'aurait pu voir le jour sans les contributions de nombreuses administrations participant à la CE 7 et à son GT 7A. Nous tenons à remercier tout particulièrement le président du GT 7A, M. Ronald BEARD, pour les capacités de leadership dont il a fait preuve au cours de ce projet. Notre reconnaissance va aussi à M. A. VASSILIEV du Bureau des radiocommunications, dont le rôle a été central dans l'élaboration, le contrôle rédactionnel et la publication de ce Manuel.



## **REMERCIEMENTS**

Les Rapporteurs pour les différents chapitres du Manuel ont accompli un travail remarquable et nous remercions les contributeurs et les nombreuses autres personnes qui ont consacré du temps et de l'énergie à l'élaboration de cet ouvrage.

Systemes à satellites:

AXELRAD, P.  
KLEPCZYNSKI, W. J.  
BRUNET, M.  
IMAE, M.  
BARTENEV, V.  
KLIMOV, V.  
KOSSENKO, V.  
KRASILSCHKOV, M.  
REVNIVYKH, S.  
REINHARDT, V.  
VASSILIEV, A.

Echelle de temps, maintien du temps et systèmes de référence:

CORDARA, F.  
McCARTHY, D.  
NELSON, R.  
ARIAS, E.  
BAUCH, A.

Techniques:

LEWANDOWSKI, W. et AZOUBIB, J.  
KLEPCZYNSKI, W. J.  
KIRCHNER, D.  
De JONG, G.  
RAY, J.  
SENIOR, K.

Propagation et facteurs environnementaux:

KLOBUCHAR, John A.

Nous remercions tout particulièrement le Président du GT 7A, M. Ronald BEARD, pour les capacités de leadership dont il a fait preuve au cours de ce projet, et pour sa contribution à ce Manuel et son contrôle rédactionnel, ainsi que le Conseiller de la CE 7 des radiocommunications, M. Alexandre VASSILIEV, Bureau des radiocommunications, pour les textes additionnels, le contrôle rédactionnel et la préparation pour publication.

Vincent MEENS  
Président, Commission d'études 7 des  
radiocommunications

## INTRODUCTION

### *Un peu d'histoire...*

Autrefois, pour indiquer le temps, les hommes se référaient au mouvement du Soleil et d'autres étoiles, aux phases de la Lune, au changement des saisons et au passage des générations. On mesurait les intervalles de temps à l'aide de sabliers, de clepsydres et d'appareils mécaniques. Quant aux instruments de musique, ils étaient – et sont encore – accordés en comparant leur fréquence avec celle d'un diapason à branches ou à bouche.

L'Histoire fournit plusieurs exemples d'inventions destinées à mesurer le temps, les intervalles et les fréquences. Ainsi, un dispositif égyptien datant de 1500 environ avant Jésus-Christ, en forme d'équerre en T courbée, mesurait le passage du temps à partir de l'ombre projetée par la barre transversale sur une règle non linéaire. Le T était orienté vers l'est le matin, et à midi, on faisait pivoter le dispositif pour que son ombre se projette dans la direction du couchant.

Dès l'an 1000 avant Jésus-Christ, les Chinois ont élaboré des fréquences étalon en comptant le nombre de graines de haricot remplissant le tuyau d'un instrument à vent. Pour des tuyaux de diamètres identiques, la fréquence (le ton) était définie par le nombre de graines nécessaires pour remplir le tuyau.

Au XIII<sup>e</sup> siècle, en Espagne, les intervalles de temps étaient mesurés en faisant brûler des bougies disposées sur des bras de levier. A mesure que les bougies se consumaient, les bras perdaient du poids et leur mouvement indiquait le passage du temps.

Les Chinois brûlaient des horloges à encens: les bâtons étaient composés de plusieurs couches imprégnées de diverses huiles, qui, en brûlant, diffusaient une odeur différente et indiquaient l'écoulement du temps. La cartographie de la France en 1679 fut réalisée à partir de tables élaborées par Cassini, qui prévoyaient les éclipses des lunes de Jupiter; ces tables permettaient d'obtenir des mesures de temps indépendantes de la position, avec une précision de quelques minutes. Le chronomètre de Harrison, perfectionné en 1759, permettait de conserver le temps à bord des navires, avec une précision de l'ordre de dix secondes, sur des durées de plusieurs semaines [Dana et Penrod, 1990].

Dès 1450, des astronomes avaient proposé de calculer la longitude en mesurant l'angle formé par les étoiles fixes et la Lune, mais les tables stellaires utilisées à l'époque n'étaient pas adaptées à cette approche. En 1675, le roi Charles II fit construire l'Observatoire de Greenwich et le méridien de Greenwich fut instauré. Il fallut une centaine d'années pour élaborer les premières éphémérides nautiques. A cette période de l'histoire, le commerce vers le Nouveau Monde était extrêmement actif.

En 1707, un événement tragique mit en évidence l'importance fondamentale du calcul de la longitude, lorsqu'une flotte commandée par l'amiral Sir Cloudsley Shovel s'échoua sur les îles Scilly, entraînant la perte de quatre navires et la mort de 2 000 hommes. La Couronne britannique réagit en offrant 20 000 £ (environ 2 millions USD d'aujourd'hui) à qui inventerait un chronomètre capable de déterminer la longitude avec une précision de 30 milles.

John Harrison, de la province du Yorkshire, alors âgé de 21 ans, décida de relever le défi et passa sa vie à construire des chronomètres de bois et de métal. L'un d'eux, fait d'engrenages en bois, ne dérivait pas de plus d'une seconde par mois en quatorze ans. Son chronomètre N° 4, embarqué dans un navire parti de Plymouth pour rejoindre Madère, afficha une précision géographique de 1 mille environ. L'Astronome royal ayant émis des doutes sur ce résultat, une autre traversée fut organisée, cette fois vers la Barbade, Harrison avait alors 70 ans. Après cinq mois en mer, son chronomètre N° 4 estima la position de la Barbade à 10 milles près. Il lui fallut encore dix années de pénibles efforts pour toucher la prime promise, qu'il ne reçut jamais en totalité.

Si les chronomètres de navigation connurent des avancées significatives après les travaux de Harrison, ce n'est que dans les années 1920 qu'une nouvelle étape majeure fut franchie. Cette décennie fut celle de la découverte et du développement de l'oscillateur à quartz. Cette découverte a permis de concevoir des horloges à quartz capables de détecter les instabilités de la fréquence de rotation de la Terre, UT1. Ces horloges ont été une avancée majeure pour tous les domaines de la chronométrie, au service de la navigation et d'autres applications [Allan, 1995].

Le développement du radar et des communications hertziennes par ondes millimétriques dans les années 1930 et 1940 a rendu possible la production d'un certain type d'ondes électromagnétiques – les micro-ondes – nécessaires à l'interaction avec les atomes. Dans un premier temps, les travaux destinés à concevoir une horloge atomique se sont concentrés sur les résonances des micro-ondes dans la molécule d'ammoniac.

La première horloge atomique à ammoniac a été créée en 1948 et présentée en 1949. Mais ses performances ( $1 \times 10^{-10}$  environ) n'étant guère supérieures aux étalons existants, elle tomba presque immédiatement dans l'oubli, au profit de dispositifs plus prometteurs, à jet d'atomes, reposant sur la résonance atomique du césium. Le premier étalon de fréquence à atome de césium présentant une utilité pratique a été construit au Laboratoire national de physique d'Angleterre (National Physical Laboratory) en 1955. Le temps atomique est depuis lors la référence.

Le Manuel de l'UIT-R intitulé *Sélection et utilisation des systèmes de fréquence et de temps de précision* décrit les étalons de temps et de fréquence de précision actuellement utilisés, leurs sources et leurs caractéristiques, les échelles de temps, les méthodes de mesure, les systèmes existants et l'expérience opérationnelle.

### ***Importance de la mesure précise du temps et de la synchronisation en fréquence et en temps***

De nombreux processus technologiques et de la vie courante reposent désormais sur une mesure précise de la fréquence et du temps. Les systèmes suivants utilisent aujourd'hui une base de temps de précision:

- tous les systèmes de communication;
- la plupart des systèmes de navigation;
- les systèmes informatiques et de télécommunication et leurs réseaux;
- les systèmes bancaires et de comptabilité;
- les systèmes de régulation du trafic aérien et maritime;
- la recherche scientifique dans une large mesure;
- la détection des erreurs et le contrôle de l'efficacité des réseaux d'alimentation électrique;
- la plupart des systèmes militaires;
- la recherche et l'exploration spatiales;
- la détection des tremblements de terre et la tectonique des plaques;
- les systèmes de détection environnementale;
- les mesures du niveau des océans et des courants océaniques;
- les systèmes anticollision et d'atterrissage de précision pour les avions;
- le suivi des parcs de camions;
- la cartographie des itinéraires routiers.

Plus de deux milliards de résonateurs à quartz sont fabriqués chaque année et le nombre d'horloges atomiques en service avoisine 100 000.

La qualité des horloges, fût-elle un paramètre important, n'est pas le seul facteur qui contribue à la précision de la mesure du temps: il importe aussi de tenir compte de la qualité des liaisons temporelles utilisées pour la comparaison et la synchronisation des horloges. Citons, à titre d'exemple, les réseaux informatiques/de télécommunication, qui, pour la plupart, s'appuient sur des horloges. Une mauvaise synchronisation de ces horloges peut avoir des conséquences très préjudiciables, notamment:

- échec d'une opération dû à la violation d'une séquence d'événements déclenchés par un logiciel (protocoles), échec d'une sauvegarde de données, etc.;
- perte de données: une application peut exécuter des actions erronées, voire se bloquer, en cas d'erreur de modification dans une base de données due à un mauvais horodatage;
- failles de sécurité: les journaux d'accès à un serveur sont une compilation d'informations provenant d'autres serveurs; il est donc essentiel que les différents horodatages soient corrects. Si la référence horaire est erronée, les journaux d'exploitation sont incorrects et les administrateurs ne sont pas en mesure de retrouver l'origine d'éventuelles actions de piratage, ce qui peut compromettre la sécurité du serveur.

**Systèmes à satellites utilisés pour la diffusion du temps et des fréquences de précision**

Depuis le début du XXe siècle, les ondes radioélectriques sont utilisées pour acheminer et diffuser des signaux temporels. Mais l'on sait, depuis le début, que les signaux horaires hertziens sont retardés sur leur trajet entre l'émetteur et le récepteur de Terre et que la précision du signal horaire reçu ne peut pas être meilleure que la connaissance que l'on a du temps de propagation. Or les temps de propagation des signaux provenant des émetteurs au sol sont difficiles à estimer, car ils évoluent en permanence en fonction des conditions ionosphériques. Lorsque les signaux sont en visibilité directe et émis dans de petites zones de couverture, certains de ces problèmes sont atténués.

En revanche, le temps de propagation, sur un trajet sans obstacle, entre un émetteur embarqué à bord d'un satellite et un récepteur au sol est plus stable et peut être déterminé de manière plus précise que le temps de propagation entre stations au sol. L'avantage est de taille, car la précision des méthodes de diffusion est presque toujours limitée par l'incertitude associée à la façon de prendre en compte le temps nécessaire au signal pour aller de sa source à sa destination.

L'émission d'un signal horaire à une très grande altitude, où le trajet entre l'émetteur et le récepteur est dégagé et sans obstacle, est généralement plus précise que celle de n'importe quel signal au sol. De plus, étant donné que les signaux émis à partir d'un satellite peuvent être reçus sur une large zone, les systèmes à satellites sont en mesure d'assurer une diffusion du temps et des fréquences sur une vaste région, beaucoup plus facilement que ne peuvent le faire les systèmes de Terre. En outre, le temps de propagation entre un émetteur embarqué à bord d'un satellite et un récepteur au sol peut être modélisé de façon plus précise que le temps de propagation correspondant entre les stations d'un système entièrement basé au sol.

Le présent Manuel est conçu comme une introduction au domaine du transfert et de la diffusion par satellite de signaux horaires et de fréquence. Les premiers chapitres présentent une vue d'ensemble des systèmes à satellites utilisés à cette fin. Compte tenu de la prééminence des systèmes mondiaux de navigation par satellite comme le système mondial de repérage (GPS), le système mondial de navigation aéronautique par satellite (GLONASS) et les satellites de communication, qui jouent un rôle majeur dans la diffusion du temps, plusieurs chapitres sont consacrés à l'établissement du temps et à son rapport avec l'échelle de temps internationale. Suit une présentation générale de l'établissement et du maintien de l'échelle de temps internationale UTC (temps universel coordonné). Cette échelle de temps est produite à partir des contributions de nombreux centres et laboratoires nationaux du temps. Un chapitre est consacré à la description et à l'exploitation de ces centres. Le transfert et la diffusion de signaux horaires entre les centres du temps et les utilisateurs s'effectuent au moyen d'émissions hertziennes. Les effets de la relativité et de la propagation sur ces émissions sont examinés, puis les derniers chapitres décrivent les principales méthodes de transfert du temps et des fréquences actuellement en service.

**Références**

- ALLAN D. W. [5-7 juin 1995], *The Impact of Precise Time in Our Lives*, 50<sup>th</sup> Anniversary Annual Meeting, Institute of Navigation, Colorado Springs, Colorado, Etats-Unis d'Amérique, (<http://www.ALLANstime.com/Publications/DWA/PDF/95jungps.pdf>).
- DANA P. et PENROD B. [juillet-août 1990], «The Role of GPS in Precise Time and Frequency Dissemination», *GPS World*, ([http://www.pdana.com/PHDWWW\\_files/gpsrole.pdf](http://www.pdana.com/PHDWWW_files/gpsrole.pdf)).
- UIT-R [1997], *Manuel sur la sélection et l'utilisation des systèmes de fréquence et de temps de précision*, Genève, Suisse, (<http://www.itu.int/publ/R-HDB-31/fr>).





## CHAPITRE 1

### **TRANSFERT ET DIFFUSION PAR SATELLITE DE SIGNAUX HORAIRE ET DE FRÉQUENCE**

	<i>Page</i>
1.1 Introduction .....	2
1.2 Services de radiocommunication spatiale et systèmes à satellites employés pour le transfert et la diffusion de signaux horaires et de fréquence .....	2
1.2.1 Service des fréquences étalon et des signaux horaires .....	3
1.2.2 Systèmes mondiaux de navigation par satellite (GNSS).....	4
Références .....	5

## 1.1 Introduction

Les horloges atomiques, qui constituaient il y a quelques décennies à peine une nouveauté de laboratoire, sont aujourd'hui employées à grande échelle. Aux améliorations des horloges atomiques sont venues s'ajouter des avancées technologiques en matière d'oscillateurs à quartz et de systèmes de temps par satellite. Les systèmes de navigation, de communication et d'alimentation ont tous grandement bénéficié de ces améliorations. Les systèmes de temps de précision ont progressivement abandonné leur statut de nouveauté pour devenir une nécessité et de nombreuses applications dépendent aujourd'hui d'éléments reposant sur une base de temps précise.

Les définitions des termes de temps et de fréquence utilisés dans le présent Manuel ainsi qu'un glossaire figurent dans la Recommandation UIT-R TF.686 «Glossaire et définitions relatives aux fréquences étalon et aux signaux horaires».

## 1.2 Services de radiocommunication spatiale et systèmes à satellites employés pour le transfert et la diffusion de signaux horaires et de fréquence

L'ère spatiale a débuté avec le lancement du satellite russe *Sputnik 1* en octobre 1957, suivi par celui du premier satellite américain, *Explorer 1*, quatre mois plus tard seulement. Si les tout premiers satellites étaient utilisés pour étudier le Soleil et l'atmosphère, l'accent s'est rapidement porté sur les télécommunications. Un satellite relais passif, *Echo 1*, lancé par la NASA (National Aeronautics and Space Administration) en août 1960 a été utilisé comme un «miroir» pour renvoyer des signaux radioélectriques vers la Terre [Whalen, 2002]. Les premières études de propagation menées à l'aide d'*Echo 1* en 1960 [Jakes Jr, 1961] sont parfois désignées comme les premières expériences de transfert de signaux horaires par satellite. La première expérience consacrée au temps de précision a probablement été réalisée grâce au satellite relais actif *Telstar 1* en août 1962. Cette expérience a permis à l'Observatoire naval des Etats-Unis (USNO), au Laboratoire national de physique du Royaume-Uni (NPL) et à l'Observatoire royal de Greenwich (RGO) d'effectuer une comparaison d'horloges transatlantique au moyen d'une nouvelle technique appelée «comparaison d'horloges par aller et retour sur satellite».

Tous les systèmes à satellites appartenant aux différents services de radiocommunication spatiale (service de radiodiffusion par satellite, service fixe par satellite, service mobile par satellite, etc.) possèdent et utilisent, d'une manière ou d'une autre, des capacités de transfert de signaux horaires et de fréquence [Lowe *et al.*, 2007]. Le transfert de signaux horaires est nécessaire au bon fonctionnement des systèmes de télémesure, poursuite et commande, à des fins de mesure des distances et d'horodatage. Toutefois, en règle générale, en matière de précision en temps et en fréquence, les exigences de nombreux satellites de communication (en particulier les satellites commerciaux) se limitent au respect de la bande de radiofréquences assignée et à l'exécution des fonctions précitées. Parallèlement, certains systèmes de communication à satellites aussi (ceux utilisant l'accès multiple par répartition dans le temps [AMRT] par exemple) ont besoin d'un temps précis pour mener à bien leurs fonctions de communication.

Les systèmes d'exploration de la Terre et de météorologie par satellite ont besoin de ressources de métrologie précise du temps pour mesurer différents paramètres environnementaux (par exemple, le niveau de la mer). Ils sont en outre utilisés depuis longtemps pour la diffusion de signaux horaires de précision [Lombardi et Hanson, 2005; EUMETSAT Satellite Jason-2, 2008].

Certains systèmes, en particulier ceux appartenant au service de radionavigation par satellite [Règlement des radiocommunications, 2008], jouent un rôle très important dans la diffusion de signaux horaires et de fréquence de précision. Le transfert de signaux horaires et de fréquence est essentiel au fonctionnement de ces systèmes, dont le but premier est de fournir un service efficace de localisation et de détermination de la vitesse et de l'heure dans le monde entier. Ils comprennent des sources de temps/fréquence de précision embarquées à bord de satellites ainsi que des segments au sol efficaces qui contrôlent le fonctionnement de ces satellites et maintiennent la précision des sources de temps/fréquence embarquées.

Le Règlement des radiocommunications (RR) de l'UIT a désigné un service spécial de radiocommunication spatiale pour la diffusion de signaux horaires et de fréquence de précision dans le monde: le service des fréquences étalon et des signaux horaires par satellite.

### 1.2.1 Service des fréquences étalon et des signaux horaires

Reconnaissant l'importance des étalons de temps et de fréquence de précision pour de nombreux secteurs, organisations scientifiques et télécommunications d'urgence, l'Union internationale des télécommunications a intégré dans son traité international RR [Règlement des radiocommunications, 2008] les définitions du *service des fréquences étalon et des signaux horaires* et des stations de radiocommunication associées. Les définitions figurant dans l'Édition de 2008 du RR sont rappelées ci-dessous:

«**1.53** *service des fréquences étalon et des signaux horaires*: Service de radiocommunication assurant, à des fins scientifiques, techniques et diverses, l'émission de fréquences spécifiées, de signaux horaires ou des deux à la fois, de précision élevée et donnée, et destinée à la réception générale.

**1.54** *service des fréquences étalon et des signaux horaires par satellite*: Service de radiocommunication faisant usage de stations spatiales situées sur des satellites de la Terre pour les mêmes fins que le service des fréquences étalon et des signaux horaires.

Ce service peut aussi comprendre les liaisons de connexion nécessaires à son exploitation.

**1.95** *station de fréquences étalon et de signaux horaires*: Station du service des fréquences étalon et des signaux horaires.»

Les Conférences mondiales des radiocommunications (CMR) allouent certaines parties du spectre radioélectrique au service des fréquences étalon et des signaux horaires. Le Tableau 1-1 est un extrait du Tableau d'attribution des bandes de fréquences du RR décrivant les bandes de fréquences attribuées au service des fréquences étalon et des signaux horaires par satellite.

TABLEAU 1-1

#### Bandes de fréquences attribuées au service des fréquences étalon et des signaux horaires par satellite (Règlement des radiocommunications, Édition de 2008)

Bande de fréquences	Attribution	Statut	Observation
400,05-400,15 MHz		primaire	Les numéros 5.261 et 5.262 du RR s'appliquent.
4 202 ± 2 MHz	espace vers Terre		Autorisé par le numéro 5.440 du RR sous réserve de l'accord obtenu au titre du numéro 9.21
6 427 ± 2 MHz	Terre vers espace		Autorisé par le numéro 5.440 du RR sous réserve de l'accord obtenu au titre du numéro 9.21
13,4-13,75 GHz	Terre vers espace	secondaire	
13,75-14 GHz	Terre vers espace	secondaire	
20,2-21,2 GHz	espace vers Terre	secondaire	
25,25-25,5 GHz	Terre vers espace	secondaire	
30-31 GHz	espace vers Terre	secondaire	
31-31,3 GHz	espace vers Terre	secondaire	Le numéro 5.149 du RR s'applique.

L'Article 26 du RR (voir ci-dessous le texte extrait de l'Édition de 2008 du RR) demande aux États Membres de l'UIT de soutenir les activités concernant le bon fonctionnement des systèmes de fréquences étalon et de signaux horaires (y compris par satellite) et la protection de ces systèmes contre les brouillages préjudiciables.

## ARTICLE 26

**Service des fréquences étalon et des signaux horaires**

**26.1** § 1 1) Pour permettre une utilisation plus efficace du spectre des fréquences radioélectriques et pour favoriser d'autres activités techniques et scientifiques, les administrations qui assurent ou envisagent d'assurer un service de fréquences étalon et de signaux horaires doivent coordonner, conformément aux dispositions du présent Article, l'établissement et l'exploitation de ce service au plan mondial, en veillant à l'étendre aux régions du monde qui sont insuffisamment desservies.

**26.2** 2) A cet effet, les administrations prennent les mesures voulues pour coordonner avec le concours du Bureau toute nouvelle émission de fréquences étalon ou de signaux horaires ou toute modification apportée aux émissions existantes dans les bandes des fréquences étalon. Elles échangent entre elles et communiquent au Bureau tous renseignements utiles à ce sujet. Le Bureau consulte en cette matière les autres organisations internationales ayant un intérêt direct et essentiel dans ce domaine.

**26.3** 3) Autant que possible, aucune nouvelle fréquence n'est assignée dans les bandes du service des fréquences étalon, ni notifiée au Bureau avant qu'ait été effectuée la coordination dont il est fait état ci-dessus.

**26.4** § 2 Dans les bandes des fréquences dans lesquelles le service des fréquences étalon et des signaux horaires dispose d'attributions, les administrations coopèrent entre elles en vue de réduire les brouillages.

**26.5** § 3 Les administrations qui assurent ce service coopèrent entre elles, par l'intermédiaire du Bureau, pour rassembler et distribuer les résultats des mesures de fréquences étalon et de signaux horaires, ainsi que les valeurs des ajustements des fréquences et des signaux horaires.

**26.6** § 4 En choisissant les caractéristiques techniques des émissions de fréquences étalon et de signaux horaires, les administrations s'inspireront des Recommandations pertinentes de l'UIT-R.

Il est intéressant de noter qu'aucun système à satellites n'est exclusivement dédié à la diffusion de fréquences étalon et de signaux horaires. Comme indiqué plus haut, l'équipement de temps et de fréquence de précision est généralement associé à d'autres applications embarquées à bord d'un même satellite.

Certains pays ne disposent pas d'assignations dans le *service des fréquences étalon et des signaux horaires par satellite*. Ils utilisent en effet comme source de signaux horaires et de fréquence de précision les systèmes à satellites appartenant à d'autres services de radiocommunication spatiale capables d'émettre un signal horaire très précis vers n'importe quel emplacement sur la Terre (systèmes GNSS par exemple).

**1.2.2 Systèmes mondiaux de navigation par satellite (GNSS)**

Actuellement (2010), les systèmes mondiaux de navigation par satellite (GNSS) appartenant au *service de radionavigation par satellite* (SRNS) [Règlement des radiocommunications, 2008] sont, dans la pratique, les premiers outils utilisés pour le transfert de signaux horaires et de fréquence de précision à l'échelle mondiale.

On compte deux GNSS opérationnels et trois systèmes complémentaires à satellite (SBAS):

- le système mondial de repérage des Etats-Unis d'Amérique (GPS), qui offre une couverture mondiale;
- le système mondial de navigation par satellite (GLONASS) de la Fédération de Russie, qui offre une couverture quasi mondiale.

Les SBAS, qui permettent d'augmenter la couverture de navigation locale, sont:

- le système complémentaire de zone étendue (WAAS), qui fournit des signaux GNSS supplémentaires en s'appuyant sur le satellite géostationnaire Inmarsat en vue d'améliorer la couverture sur le territoire des Etats-Unis d'Amérique;
- le service européen de navigation par complément géostationnaire (EGNOS), qui fournit des signaux GNSS supplémentaires en s'appuyant sur Inmarsat en vue d'améliorer la couverture sur le territoire européen;

- le système complémentaire à satellites multifonctionnel (MSAS), qui utilise des satellites MSAS spécialisés pour produire des signaux GNSS supplémentaires au Japon et dans des pays asiatiques voisins.

Les chapitres suivants décrivent en détail les systèmes GPS, GLONASS et SBAS.

A noter également plusieurs autres systèmes nationaux et internationaux en phase de conception ou de développement, notamment COMPASS (Chine), GALILEO (Agence spatiale européenne), le système régional indien de navigation par satellite (IRNSS) (Inde) et QZSS (Japon).

On trouvera également de courtes descriptions des systèmes précités ainsi que les caractéristiques techniques de base de leurs segments spatiaux dans la Recommandation UIT-R M.1787 «Description des systèmes et réseaux du service de radionavigation par satellite (espace vers Terre et espace-espace) et caractéristiques techniques des stations spatiales d'émission fonctionnant dans les bandes 1 164-1 215 MHz, 1 215-1 300 MHz et 1 559-1 10 MHz».

## Références

- JAKES Jr W. C. [1961], «Participation of Bell Telephone Laboratories in Project Echo», *Bell System Technical Journal*, 40, 975-1028.
- LOMBARDI M. A. et HANSON D. W. [mars-avril 2005], «The GOES Time Code Service, 1974-2004: A Retrospectiv», *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, Vol. 11, 2, (<http://nvl.nist.gov/pub/nistpubs/jres/110/2/j110-2lom.pdf>).
- Low Earth Orbiting (LEO) satellite Jason-2 Space segment*, the European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT), 2006, ([http://www.eumetsat.int/Home/Main/What\\_We\\_Do/Satellites/Jason/SpaceSegment/?l=en](http://www.eumetsat.int/Home/Main/What_We_Do/Satellites/Jason/SpaceSegment/?l=en)).
- LOWE J., HEIDECKER J., SWIDAN M., HISHAM A. et SAMUEL A. S. [2007], *Standard time and frequency dissemination via Egyptian digital satellite*, 39<sup>th</sup> Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, Long Beach, Californie, Etats-Unis (<http://tf.nist.gov/timefreq/general/pdf/2274.pdf>).
- WHALEN D. J. [2002], *The origins of Satellite Communications: 1945-1965*, Smithsonian History of Aviation and Spaceflight Series, Smithsonian Books.

## Textes UIT-R

- Règlement des radiocommunications, Edition de 2008, Volume 1, Article 1 – Termes et définitions, Union internationale des télécommunications, 2008 (<http://www.itu.int/publ/R-REG-RR-2008/fr>).
- Recommandation UIT-R TF.686-2 – Glossaire et définitions relatives aux fréquences étalon et aux signaux horaires, (<http://web.itu.int/rec/R-REC-TF.686-2-200202-I/fr>).
- Recommandation UIT-R M.1787 – Description des systèmes et réseaux du service de radionavigation par satellite (espace vers Terre et espace-espace) et caractéristiques techniques des stations spatiales d'émission fonctionnant dans les bandes 1 164-1 215 MHz, 1 215-1 300 MHz et 1 559-1 610 MHz (<http://www.itu.int/rec/R-REC-M.1787-0-200908-I/fr>).



## CHAPITRE 2

## SYSTÈME MONDIAL DE REPÉRAGE

	<i>Page</i>
2.1 Description générale et principes de fonctionnement .....	8
2.2 Données fondamentales sur le GPS .....	8
2.2.1 Codes BPA utilisés pour la modulation AMRC et la mesure des distances .....	9
2.2.2 Spectre du système GPS.....	10
2.2.3 Message de navigation .....	11
2.3 Segments GPS.....	12
2.3.1 Segment spatial .....	12
2.3.2 Segment de commande.....	13
2.3.3 Segment utilisateur.....	13
2.4 Rôle de la datation et de la synchronisation dans l'exploitation du système .....	14
2.4.1 Mesures de la distance et facteurs de qualité de fonctionnement.....	14
2.4.2 Stabilité des horloges des satellites et prévision .....	15
2.5 Evaluation de la qualité de fonctionnement des horloges des satellites du GPS.....	15
2.5.1 Temps de propagation dans les satellites .....	17
2.5.2 Relativité .....	18
2.6 Contributions de l'horloge du récepteur .....	18
2.6.1 Horloge des récepteurs de navigation .....	19
2.6.2 Horloge des récepteurs du temps .....	19
2.7 Détermination et maintien de la base de temps.....	20
2.7.1 Fonctions du segment de commande .....	20
2.7.2 Asservissement du temps du GPS.....	21
Références .....	21

Le transfert de signaux horaires et de fréquence joue un rôle essentiel dans le fonctionnement du système mondial de repérage (GPS) et ce rôle est grandement renforcé par l'adoption du GPS dans le monde. Le présent chapitre met en lumière le rôle des horloges, du temps et des fréquences dans le fonctionnement du GPS ainsi que les capacités et les limitations de ce système à fournir un mécanisme pour leur diffusion.

## 2.1 Description générale et principes de fonctionnement

Le GPS offre l'infrastructure permettant de déterminer, à l'échelle mondiale, la position, la vitesse et l'heure (PVH). Il fournit aussi une multitude d'autres applications qui s'appuient sur ces capacités de base. Le système est composé de trois «segments»: le segment spatial, le segment de commande et le segment utilisateur.

Le plus connu est le segment spatial, constellation officiellement composée de 24 satellites en orbite semi synchrone (11 h 58 min) qui émettent en continu des signaux de télémétrie à étalement de spectre vers la Terre. Tous les satellites émettent aux mêmes fréquences (au voisinage de 1,5 GHz [bande L]), modulées par plusieurs codes d'identification de bruit pseudo-aléatoire (BPA).

Le segment de commande surveille l'état de santé, le statut et la qualité de fonctionnement des satellites, construit un message de données qui est diffusé par les satellites et prend les mesures nécessaires pour signaler et corriger toute anomalie décelée sur un satellite. Enfin, le segment utilisateur comprend les récepteurs militaires et les récepteurs civils situés partout dans le monde. Les satellites GPS embarquent des étalons au rubidium ou au césium (ou les deux), qui leur servent de référence pour générer les signaux de télémétrie à émettre.

## 2.2 Données fondamentales sur le GPS

Le Tableau 2-1 récapitule bon nombre des caractéristiques fondamentales du GPS. Chaque satellite GPS émet deux porteuses (ou plus) en bande L modulées par deux codes de bruit pseudo-aléatoire (BPA) au minimum et par un flux de données binaires. Les codes BPA sont essentiels à l'accès multiple par répartition en code, qui permet à l'ensemble des satellites d'utiliser les mêmes fréquences tout en réduisant les brouillages au minimum. Les codes permettent aussi d'effectuer des mesures de distance unidirectionnelles de grande précision. Pour ce faire, le récepteur génère une réplique locale du code du satellite qu'il s'attend à avoir dans son champ de visibilité et recherche l'alignement correct du signal répliqué, à la fois en termes de temps de propagation et de décalage Doppler. Un message de données, appelé «NAV-MSG», fournit des informations sur l'horloge du satellite, la position précise de ce dernier, un almanach de la constellation de satellites, des indicateurs d'état de santé et de statut, etc. Il existe plusieurs documents de référence d'excellente qualité sur le GPS, qui décrivent le fonctionnement de base de ce système de manière beaucoup plus détaillée que nous ne le faisons ici. On se reportera en particulier aux manuels de Misra et Enge [Misra et Enge, 2001] et de Kaplan [Kaplan et Hegarty, 2006], qui fournissent des descriptions à la fois simples et détaillées du système GPS sous tous ses aspects. Parkinson *et al.* [Parkinson *et al.*, 1996] en donnent une description plus complète et examinent de façon approfondie les applications ainsi que les principes d'exploitation. Nous nous contenterons, ici, d'en donner un aperçu qui permettra d'analyser le rôle que joue la métrologie du temps dans ce système de première importance.

TABLEAU 2-1

### Systeme GPS

Fréquence du signal	Codes d'étalement du spectre	Débits du code
L1 1575,42 MHz	Acquisition grossière – C/A ( <i>Clear Acquisition</i> )	1,023 MHz
	Précision – Code P	10,23 MHz
	Code Y (signal militaire)	10,23 MHz
	NAV-MSG (données du satellite)	50 bits/s
L2 1227,60 MHz	Précision – Code P	10,23 MHz
	Code Y (signal militaire)	10,23 MHz
	NAV-MSG (données du satellite)	50 bits/s



Le GPS a été conçu au début des années 1970 dans le but premier de fournir aux utilisateurs du ministère de la Défense des Etats-Unis (DoD, *Department of Defense*) et de leurs alliés un service efficace de calcul de la position, de la vitesse et de l'heure. Les spécifications de l'architecture d'origine du système étaient presque entièrement inspirées par les missions du DoD. Cela étant, le GPS est depuis devenu un système qui se caractérise par son «double usage». On estime ainsi qu'en 2002, en ne comptant que les Etats-Unis, il a servi environ 300 000 utilisateurs du DoD et 4 millions d'utilisateurs civils et commerciaux. Le rôle des utilisateurs civils n'a pas été sous-estimé et le système est actuellement contrôlé par le bureau d'un programme conjoint, qui compte des représentants du DoD, de l'OTAN et du Ministère des transports, ce dernier étant chargé des applications civiles.

L'importance du double usage du système a été reconnue au sein du Gouvernement américain au point qu'un comité directeur a été créé pour coordonner et orienter l'utilisation du système dans son rôle dual. Le Position Navigation and Time (PNT) Executive Committee (comité exécutif pour la localisation, la navigation et la mesure du temps) est coprésidé par les Secrétaires adjoints de la défense et des transports ainsi que par des représentants des autres agences gouvernementales. Un bureau de coordination assiste le comité exécutif dans le suivi des objectifs du programme.

### 2.2.1 Codes BPA utilisés pour la modulation AMRC et la mesure des distances

Le système GPS utilise des codes de bruit pseudo-aléatoire (BPA) pour permettre la mesure des distances et les accès multiples à une fréquence commune. Les deux codes d'origine du système GPS sont le code de précision (P pour *Precise*) et le code d'acquisition grossière (C/A pour *Coarse Acquisition*). Les codes C/A sont choisis parmi une famille de codes de Gold, de longueur 1 023 bits, qui sont générés dans le satellite à un débit de 1,023 MHz.

Pour que le récepteur de l'utilisateur puisse immédiatement identifier le satellite dont il capte le signal, chaque satellite GPS émet un code C/A unique. La courte durée (1 ms) du code C/A facilite l'acquisition rapide, mais rend le système sensible aux brouillages. La durée de chaque bit de code C/A est de 900 ns environ, soit 300 m. En règle générale, la boucle de poursuite de code des récepteurs d'utilisateur mesure l'alignement du code avec une précision comprise entre 1/100 et 1/1 000 de bit.

Le code P, beaucoup plus long, est généré à une fréquence de 10,23 MHz. A ce débit, il faudrait 37 semaines pour émettre la totalité du code. Chaque satellite GPS se voit donc attribuer un segment du code P d'une durée d'une semaine, dont l'émission commence au changement de semaine, à savoir à minuit dans la nuit du samedi au dimanche.

Un procédé appelé «A/S» ou *anti-spoofing* (antipiratage) a été mis en place, selon lequel le code P n'est normalement pas émis, mais remplacé par un code P chiffré possédant des propriétés analogues, connu sous le nom de «code Y». La terminologie P(Y) est généralement utilisée pour représenter cette composante du signal. Le signal P(Y) est beaucoup plus résistant aux brouillages que le code C/A et, sa durée d'émission des bits étant plus courte, il est susceptible de fournir une plus grande précision de mesure.

Les codes C/A et P(Y) ont été choisis pour leurs propriétés de corrélation croisée et d'autocorrélation. Les faibles corrélations croisées entre les codes de la famille permettent de réduire les brouillages par accès multiple entre les satellites émettant simultanément.

Les propriétés d'autocorrélation des codes BPA sont analogues à celles du bruit blanc gaussien. Ainsi, pour des temps de propagation non nuls, il est peu probable que le code se répète. Cette propriété est importante, car elle permet à un récepteur d'aligner précisément et sans ambiguïté son signal répliqué avec le signal GPS reçu. La Figure 2-1 illustre les propriétés de corrélation des codes C/A du système GPS.

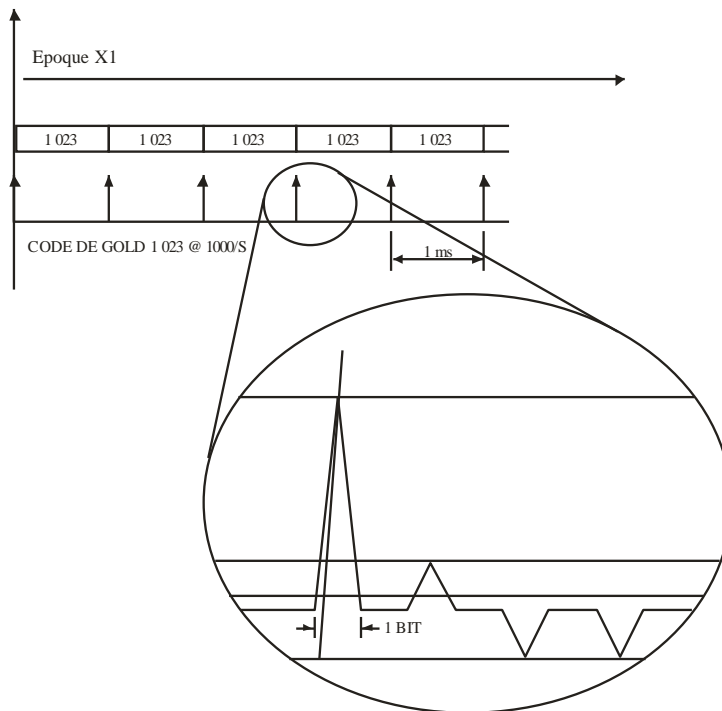
Plusieurs nouveaux jeux de code sont en cours de définition et de développement pour la nouvelle génération des satellites du GPS: nouveaux codes à usage civil ajoutés à la fréquence L2, désignés «L2C», une fréquence totalement nouvelle, 1 176,45 MHz, appelée «L5», et un nouveau jeu de codes militaires appelés «codes M».

Les nouveaux codes ont été conçus en tenant compte des progrès en matière de codage, de correction d'erreurs et de traitement numérique du signal accomplis depuis les années 1970. Ces nouveaux codes devraient commencer à être diffusés à l'occasion du lancement de la prochaine flotte de satellites (satellites de la série

Block IIF) pour être à terme émis par l'ensemble de la constellation avec la mise en service de la prochaine génération de satellites GPS appelée «GPS III».

FIGURE 2-1

Propriétés de corrélation des codes C/A du système GPS



Sat\_time\_freq-02-01

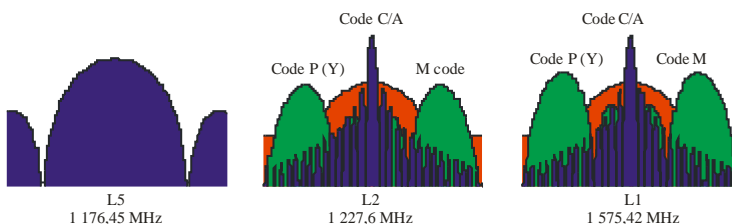
2.2.2 Spectre du système GPS

La Figure 2-2 illustre le spectre des signaux GPS actuels et modernisés. Toutes les fréquences à bord des satellites du GPS sont générées à partir d'un étalon de fréquence atomique à 10,23 MHz, généralement connu sous le nom d'«horloges atomiques». Les deux porteuses de première génération sont L1, à 1 575,42 MHz, et L2, à 1 227,6 MHz.

Depuis 2002, le signal L2 n'achemine que le code P(Y) à 10,23 MHz, tandis que L1 transporte à la fois P(Y) et C/A, en quadrature de phase.

FIGURE 2-2

Spectre du signal GPS



Sat\_time\_freq-02-02

Pour l'heure, la plupart des récepteurs à bas prix ne poursuivent que les signaux L1 acheminant le code C/A. En revanche, les récepteurs du DoD sont largement capables de poursuivre les codes P(Y) aux deux fréquences L1 et L2. Les récepteurs commerciaux de qualité, conçus pour des applications scientifiques ou d'autres fonctions nécessitant une haute précision, poursuivent également les deux porteuses au moyen de diverses techniques permettant d'accéder aux signaux radiofréquences sous-jacents, mais non sans une réduction significative du rapport signal/bruit [Misra et Enge, 2001].

Dans le spectre GPS modernisé, deux signaux civils BPA distincts à bande étroite seront ajoutés à la porteuse L2: le signal L2C et une nouvelle version du message de navigation appelée «CNAV». Le spectre divisé du code M sera ajouté à L1 et à L2. Le nouveau signal civil L5C, destiné à la sécurité des personnes, devrait être mis en service lors du premier lancement du GPS IIF (2010) [Kaplan et Hegarty, 2006]. Deux codes de télémétrie BPA sont émis sur la porteuse L5: le code en phase (noté «code I5» pour *In-phase*) et le code en quadrature de phase (noté «code Q5»). Les deux codes, d'une longueur de 10 230 bits, sont émis à la fréquence de 10,23 MHz avec un taux de répétition de 1 ms. Le flux I5 est modulé à l'aide d'un code de Neuman-Hofman à 10 bits synchronisé à 1 kHz et le code Q5 avec un code de Neuman-Hofman à 20 bits synchronisé à 1 kHz.

Outre les avantages qu'apporte une fréquence supplémentaire, la structure du signal et les codes sont conçus pour:

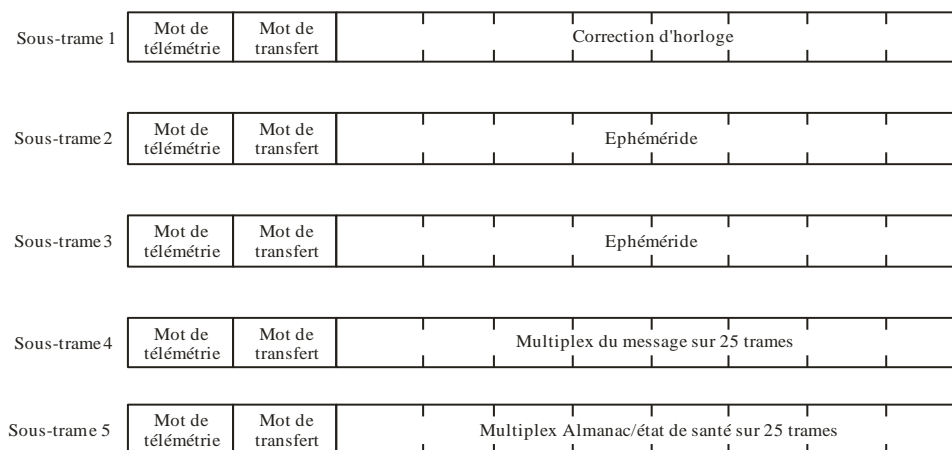
- améliorer la structure du signal pour une meilleure qualité de fonctionnement;
- apporter un supplément de puissance de 3 dB;
- multiplier par dix le gain résultant du traitement en raison d'une plus grande largeur de bande.

### 2.2.3 Message de navigation

Le message de navigation (NAV-MSG) contient toutes les données nécessaires à un récepteur pour calculer la position, la vitesse et l'heure à partir de l'observation de la pseudo-distance et/ou du décalage Doppler [IS-GPS-200 rev D, 2006]. La Figure 2-3 présente les différents éléments du message NAV-MSG. Ce message consiste en une trame de 1 500 bits composée de cinq sous-trames de 300 bits. Le débit étant de 50 bit/s, l'émission complète de chaque sous-trame prend 6 s. Toutefois, étant donné que les sous-trames 4 et 5 combinées ne représentent que 1/25 de l'almanach complet de la constellation, il faut 12,5 min pour émettre la totalité de l'almanach.

FIGURE 2-3

#### Message de navigation



Au début de chaque sous-trame se trouve le mot de transfert ou HOW (*handover word*). Le mot HOW fournit des informations d'horodatage essentielles, qui sont requises par les récepteurs du système de positionnement précis (PPS, *Precise Positioning System*) pour passer de la poursuite des codes C/A à la poursuite des codes P(Y). Il indique l'heure absolue de la semaine du début de la prochaine sous-trame en unités de 1,5 s. Ainsi, les récepteurs qui ont décodé le mot HOW peuvent, sans ambiguïté, régler leur heure interne à partir de cette valeur.

Les deux premières sous-frames contiennent des informations propres au satellite d'émission. Ces données, dont l'ensemble constitue les «éphémérides», comprennent les paramètres orbitaux et les prévisions d'erreur d'horloge. La sous-trame 1 contient trois paramètres d'horloge qui permettent de modéliser l'écart de l'horloge du satellite par rapport au temps du GPS au moyen d'un polynôme du second degré. Le terme af0 correspond au biais horaire, exprimé en secondes, à l'instant de référence (toc); le terme af1 correspond à l'erreur en fréquence, exprimée en sec/sec, à l'instant de référence; et le terme af2 correspond à la dérive de fréquence exprimée en sec/sec<sup>2</sup>.

La sous-trame 4 du message de navigation contient un terme horaire supplémentaire: la correction UTC-GPS. Le temps UTC peut être calculé à partir du temps GPS et de ces paramètres. Cette différence est aussi modélisée par un terme de décalage et un terme de dérive. En outre, dans l'éventualité d'un ajustement du temps UTC par seconde intercalaire, cette sous-trame indique la semaine où se produira l'ajustement et l'instant précis où la seconde intercalaire sera appliquée à l'information temporelle en sortie.

Dès leur mise en service, les signaux L2C et L5 transmettront chacun une nouvelle version du message NAV-MSG appelée «message CNAV». En fait, chacun de ces signaux sera constitué d'un ensemble de modulations sur la fréquence porteuse. Un signal d'aide à l'acquisition, dépourvu de données (parfois appelé «porteuse pilote»), sera émis en même temps que le signal de données. De par sa conception, cette porteuse pilote sera plus facile à acquérir que les données codées et pourra servir – si elle est correctement reçue – à acquérir le signal de données.

Cette technique permet d'améliorer l'acquisition du signal GPS et d'augmenter les valeurs de puissance au niveau du corrélateur. Le message CNAV sera acheminé par le signal de données et contiendra les mêmes informations que le message d'ancienne génération, si ce n'est qu'il n'adoptera pas une structure de trames, mais un «pseudo-format paquet» composé de paquets de messages d'une longueur de 300 bits et d'une durée de 12 s. Le message CNAV utilisera la correction d'erreur directe dans un code convolutif de rendement 1/2. Le flux de données résultant, à 100 symboles par seconde, sera ensuite ajouté à l'onde porteuse en phase pour produire le signal de données. La porteuse en quadrature de phase ne contiendra pas de données et deviendra le signal pilote.

## 2.3 Segments GPS

En règle générale, le GPS est décrit comme un système à trois segments: le segment spatial, le segment de commande et le segment utilisateur. La génération du signal est répartie sur le segment spatial et le segment de commande.

### 2.3.1 Segment spatial

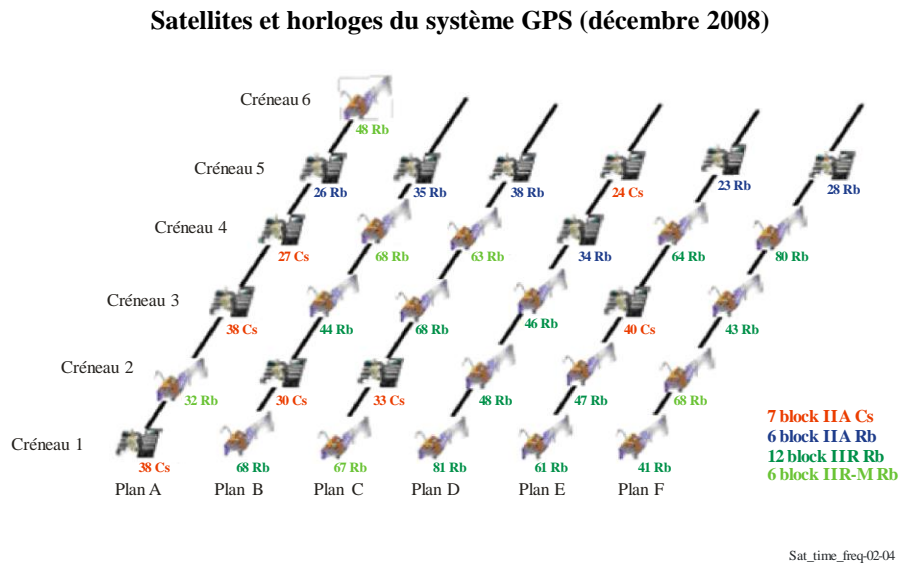
La constellation nominale ou opérationnelle du système GPS est composée de 24 satellites en orbite semi-psynchrone. Les satellites se répartissent sur six plans orbitaux, avec une inclinaison de 55° et quatre satellites par plan. Comme le montre la Figure 2-4, la constellation actuelle dépasse l'exigence nominale de 24 satellites en service.

Les satellites sont stabilisés sur trois axes pour pointer leur réseau d'antennes d'émission vers la Terre et leurs panneaux solaires vers le Soleil. Plusieurs «blocs» de satellites ont été développés, du prototype Block I jusqu'à la mise en service la plus récente des satellites de la série Block IIF. La prochaine génération, la série Block III, est en cours de conception.

Les signaux GPS sont émis au moyen d'un réseau de 12 antennes en hélice conçu pour produire un diagramme de gain orienté vers la Terre et assurant une puissance de signal reçu quasiment constante à la surface du globe. Ce principe a été retenu pour réduire au minimum les brouillages intersatellites et pour améliorer la qualité de fonctionnement pour l'utilisateur. La charge utile de navigation du système GPS comprend trois ou quatre horloges atomiques ainsi que des circuits électroniques permettant de générer des signaux à étalement

de spectre à partir de l'horloge en service. L'utilisation d'horloges atomiques s'est imposée pour offrir une précision d'orbite améliorée et un fonctionnement étendu des satellites en mode autonome dans l'éventualité d'un dysfonctionnement du segment de commande au sol. Ainsi, contrairement aux satellites de communication classiques, qui se contentent de retransmettre des signaux produits par une station au sol, les satellites du GPS génèrent des signaux de référence à bord. La Figure 2-4 illustre les types d'horloge présents à bord de chaque satellite dans la constellation en 2008. A tout moment, une seule de ces horloges est utilisée, les autres restant en veille jusqu'à ce qu'une panne ou une dégradation survienne. L'horloge embarquée sert de référence de fréquence pour la production des codes C/A et P(Y) et des porteuses L1 et L2.

FIGURE 2-4



### 2.3.2 Segment de commande

Le segment de commande se compose de la Station de commande principale (MCS, *master control station*) située sur la base aérienne militaire de Schriever, à proximité de Colorado Springs, et de stations de surveillance réservées au DoD, situées à Hawaï, sur les îles de l'Ascension et sur les atolls de Diego Garcia et de Kwajelein. La National Geophysical Intelligence Agency (NGA) exploite également d'autres sites de surveillance, qui fournissent des mesures GPS au segment de commande en vue d'améliorer les éphémérides et la précision des horloges. Les stations de surveillance hébergent des récepteurs GPS compatibles PPS, connectés à des antennes de gain élevé qui poursuivent les satellites GPS dans le ciel. Les récepteurs des stations de surveillance enregistrent en continu des mesures de pseudo-distance, de décalage Doppler et de phase des porteuses, à la fois sur L1 et sur L2, à raison d'une fois toutes les 1,5 s.

La station MCS est chargée d'analyser les données collectées par les stations de surveillance en vue de déterminer, d'une part, l'état de santé et la qualité de fonctionnement de la charge utile de navigation des satellites du GPS et, d'autre part, les orbites et les erreurs d'horloge de ces satellites. Les éphémérides et les paramètres d'horloge du message de navigation sont déterminés à partir des prévisions des orbites et des horloges sur les prochaines 24 heures. En règle générale, les téléchargements vers les satellites des paramètres servant aux messages de navigation sont effectués une ou deux fois par jour.

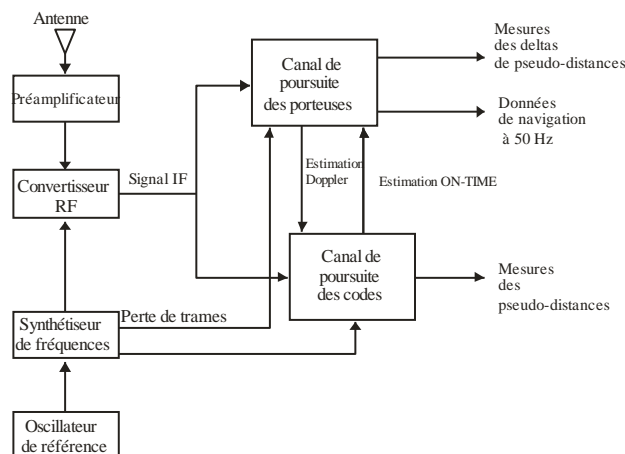
### 2.3.3 Segment utilisateur

Les équipements d'utilisateur GPS sont conçus pour acquérir et poursuivre des signaux GPS en mode passif. La Figure 2-5 présente les composants essentiels d'un récepteur GPS: antenne, oscillateur et synthétiseur de fréquences, convertisseur-abaisseur et convertisseur analogique/numérique (A/N), processeur de voie ou de signal, processeur de navigation.

Dans les récepteurs de navigation types, la référence de fréquence est un oscillateur à quartz; dans les récepteurs de transfert du temps, il est possible d'utiliser un oscillateur de référence externe. En règle générale, les antennes sont de type hémisphérique, certaines installations utilisant toutefois des antennes dotées d'un anneau d'arrêt (*choke ring*) destiné à atténuer les réflexions des signaux par des surfaces voisines [Misra et Enge, 2001]. L'abaissement en fréquence et l'échantillonnage produisent des échantillons, à la fréquence intermédiaire (FI), du spectre GPS dominé par le bruit. En corrélant les échantillons reçus avec les répliques locales des codes GPS, le récepteur peut mesurer la distance qui le sépare de chacun des satellites qui sont dans son champ de visibilité.

FIGURE 2-5

## Schéma synoptique générique d'un récepteur GPS



Sat\_time\_freq-02-05

## 2.4 Rôle de la datation et de la synchronisation dans l'exploitation du système

Le présent paragraphe décrit le rôle important que joue la datation de précision dans l'exploitation normale du système GPS pour la navigation et d'autres applications.

### 2.4.1 Mesures de la distance et facteurs de qualité de fonctionnement

Le système GPS mesure deux grandeurs essentielles: le temps de propagation du satellite au récepteur et le décalage Doppler. On appelle «pseudo-distance» la mesure de la différence entre l'instant d'arrivée perçu d'un signal au niveau d'un récepteur et l'instant où ce signal a été émis par un satellite GPS.

Soit, sous forme d'équation:

$$PR = c(t_R - t_E) \quad (2-1)$$

La pseudo-distance (PR, *pseudorange*) est liée à l'emplacement du récepteur selon la formule ci-dessous:

$$PR = R + b_R - b_E + I + T + TM + \varepsilon \quad (2-2)$$

Erreurs contribuant à l'erreur globale de mesure de la pseudo-distance: erreurs sur l'instant d'émission présumé du signal dues à des biais de la base de temps utilisée dans le satellite GPS ( $b_E$ ), erreurs sur l'instant de réception du signal dues à des biais de la base de temps utilisée dans le récepteur ( $b_R$ ), temps de propagation dans l'ionosphère ( $I$ ), temps de propagation dans la troposphère ( $T$ ), propagation par trajets multiples ( $TM$ ) et erreurs dans le récepteur ( $\gamma$ ). Tous les récepteurs GPS mettent en œuvre des modèles permettant de corriger les erreurs dues aux temps de propagation. Les erreurs de poursuite du récepteur ( $\varepsilon$ ) apparaissant généralement à des fréquences élevées, leur contribution peut être réduite en procédant à une intégration dans le temps. Le bilan d'erreur alloué à la prévision des horloges des satellites est fourni au Tableau 2-2 [Parkinson *et al.*, 1996].

L'horloge du récepteur n'étant pas nécessairement un oscillateur atomique, sa contribution aux erreurs est pour l'essentiel non plafonnée. Ce paramètre doit donc être estimé dans la solution de navigation du récepteur ou être éliminé par la méthode de la double différence (*double differencing*) dans le cas d'une solution en réseau.

TABLEAU 2-2  
Bilan d'erreur d'un système GPS

Source de l'erreur	Spatial (m)	Commande (m)	Utilisateur (m)	Système (m)
Stabilité de l'horloge et du sous-système de navigation	2,7	2,7	–	2,7
Prévision de perturbation du satellite	1,0	1,0	–	1,0
Autre	0,5	0,5	–	0,5
Prévision des éphémérides et des horloges	–	2,5	–	2,5
Compensation du temps de propagation dans l'ionosphère	–	–	2,3	2,3
Compensation du temps de propagation dans la troposphère	–	–	2,0	2,0
Bruit et résolution du récepteur	–	–	1,5	1,5
Trajets multiples	–	–	1,2	1,2
Autre	–	–	0,5	0,5
Somme quadratique	3,0	3,8	3,6	
Erreur système ( $1\sigma$ )				5,3

#### 2.4.2 Stabilité des horloges des satellites et prévision

Tous les signaux émis sont produits à partir de l'horloge du satellite GPS. Comme indiqué au § 2.3.1, chaque satellite embarque trois ou quatre horloges atomiques redondantes, dont une seulement est opérationnelle à un moment donné. La prévisibilité de cette horloge détermine dans quelle mesure les erreurs contribuent au calcul de la position et à la précision du transfert de temps absolue que peut attendre un utilisateur autonome. Elle définit aussi la fréquence à laquelle il convient de mettre à jour le message de navigation.

#### 2.5 Evaluation de la qualité de fonctionnement des horloges des satellites du GPS

Le Naval Center for Space Technology du Naval Research Laboratory (NCST/NRL) surveille la qualité de fonctionnement des horloges des satellites du GPS sur une base trimestrielle et rend compte de ses observations. Un aspect important du soutien apporté au programme global est l'évaluation de la qualité de fonctionnement sur orbite des horloges atomiques embarquées, le but de cette évaluation étant de concevoir des horloges atomiques spatiales de meilleure qualité, d'évaluer les concepts du point de vue de l'exploitation et de mesurer la qualité de fonctionnement du système. L'évaluation précise de la qualité de fonctionnement des sous-systèmes GPS est rendue possible par une base de données en ligne très complète qui contient des informations sur les pseudo-distances observées de NAVSTAR (engins spatiaux et station principale).

La base de données est alimentée en continu pendant toute la vie des engins spatiaux de NAVSTAR après leur lancement. Des données provenant du segment de commande opérationnel GPS et de stations de surveillance de la NGA ainsi que du post-traitement précis des éphémérides de la NGA sont utilisées pour déterminer les signaux d'horloge émis par chaque horloge atomique en service dans le système.

A l'origine, cette initiative a été lancée dans le cadre du programme conjoint NCST/NRL NAVSTAR Block I et du bureau du programme conjoint GPS, à l'occasion des essais de poursuite effectués sur les satellites de démonstration NST-2 (*Navigation Technology Satellite-2*) et Block I, avec le segment de commande intérimaire (*Interim Control Segment*). Elle a ensuite été étendue aux satellites opérationnels des séries Block II/IIA et IIR ainsi qu'au segment de commande opérationnel (OCS).

En 2004, le laboratoire NRL a commencé à produire des estimations d'horloge à partir d'observations de la phase de la porteuse et d'éphémérides précises fournies par l'IGS (International GNSS Service). L'IGS est une fédération de plus de 200 agences nationales, universités et instituts de recherche situés dans plus de 80 pays.

Chaque participant apporte des acquisitions de données GPS très variées et des produits d'analyse. Ces contributions donnent lieu à l'élaboration des meilleurs modèles, techniques d'analyse et produits de données disponibles, qui, en retour, bénéficient à chaque agence. L'IGS dispose de plus de 350 stations de poursuite GPS en fonctionnement continu, qui emploient des récepteurs de poursuite de codes et de porteuses à canaux multiples et à double fréquence.

Des normes communes ont été élaborées et adoptées pour le stockage et l'échange des données. Les produits horaires de l'IGS comprennent des estimations des horloges GPS et des horloges des stations au sol, et ce à la fois pour les produits rapides et les produits finaux. Les échelles de temps diffusées par l'IGS (IGRT et IGST) sont produites au NCST/NRL et constituent une référence stable pour l'analyse des données horaires du GPS, qui ne dépend pas d'une horloge de station au sol unique.

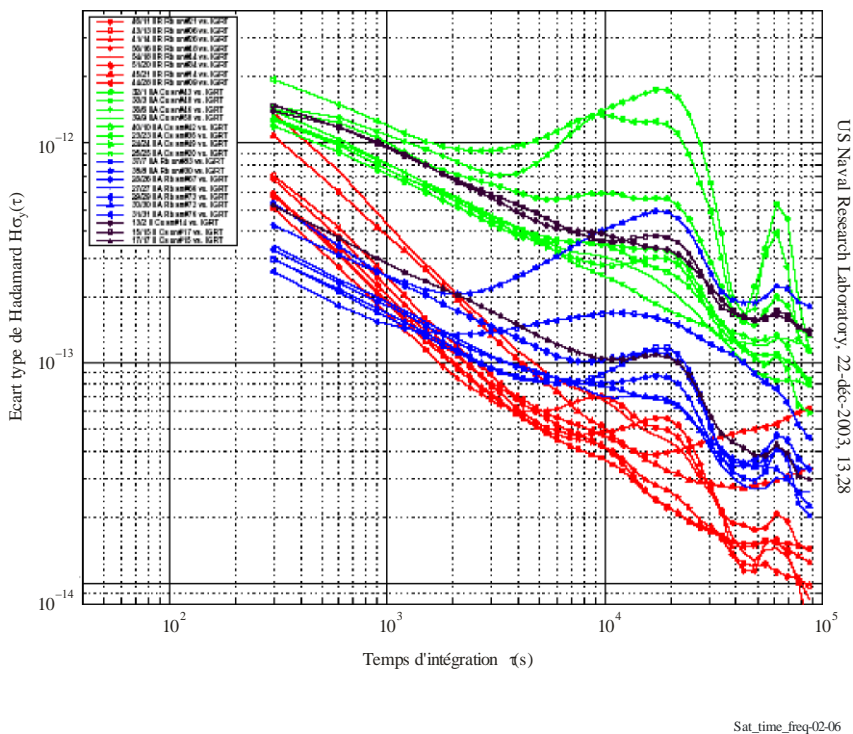
Pour chaque horloge atomique d'engin spatial et de station principale en service, la stabilité de fréquence est déterminée à partir d'informations contenues dans la base des données «en orbite» et évaluée à partir d'une série continue de données. Cette analyse est indépendante et complémentaire de celles effectuées par les autres organisations. Une intercomparaison avec d'autres analyses – souvent coordonnée de façon informelle – sert de métrique pour le contrôle de l'indépendance. La qualité de fonctionnement nominale fait l'objet de rapports trimestriels et les observations qui révèlent un comportement inhabituel ou anomalistique sont soumises à une analyse détaillée. Les archives des données «en orbite» de la base GPS, disponibles en ligne, peuvent servir à analyser la qualité de fonctionnement – normale ou anormale – d'une horloge observée antérieurement. Cette base de données en ligne permet d'estimer la stabilité de fréquence à partir de plages de données continues, avec des durées d'intégration comprises entre 5 min et plusieurs années, par rapport à une norme commune.

La Figure 2-6 illustre la stabilité de fréquence des horloges des satellites appartenant à la constellation GPS.



FIGURE 2-6

Stabilité des horloges atomiques des satellites du GPS



2.5.1 Temps de propagation dans les satellites

Outre la variabilité de la charge utile dédiée à la base de temps, les temps de propagation ou les différences de temps de propagation dans les satellites du GPS peuvent aussi être une source d'erreurs horaires dans la solution de transfert du temps au niveau de l'utilisateur final. Il convient en particulier de prendre en compte les différences de temps de propagation entre les trajets des signaux L1 et L2, les différences des retards de phase et de code, ainsi que les variations du centre de phase des antennes.

Les paramètres de correction d'horloge,  $af_0$  et  $af_1$ , transmis dans le message de navigation sont calculés pour un récepteur compatible P(Y) à double fréquence. La raison en est que la solution repose sur des observations de double fréquence effectuées par des stations de surveillance du segment de commande du GPS. La correction intègre donc l'effet des différences du trajet des signaux sur la combinaison de P1 et P2 dite «ionosphere-free», c'est-à-dire la combinaison permettant d'éliminer les perturbations liées à l'ionosphère. Les utilisateurs à une seule fréquence doivent donc appliquer une correction aux valeurs horaires diffusées; cette correction est appelée «retard de groupe» (*tgd*, *timing group delay*). Autrefois, une valeur unique de *tgd* était utilisée pour tous les satellites, mais le message de diffusion intègre aujourd'hui des mesures individuelles de retard de groupe effectuées pour chaque satellite.

Jusqu'à une date récente, les erreurs inférieures à un cycle de porteuse (0,6 ns) étaient considérées comme non significatives pour le transfert des signaux horaires, mais avec l'apparition de solutions de transfert du temps basées sur la phase de la porteuse [Larson et Levine, 1999], les variations du centre de phase des antennes GPS suscitent aujourd'hui un intérêt croissant. Du fait de l'utilisation d'antennes à polarisation circulaire dextrogyre, si l'engin spatial faisait une révolution complète autour de la direction du nadir, la phase de la porteuse parcourrait 1 cycle complet (19,04 cm ou 0,6 ns). Par analogie, les utilisateurs recevant des émissions GPS en différents lieux de la Terre voient des valeurs de phase différentes du signal. Il est aujourd'hui possible de corriger ces écarts pour les applications de haute précision [Larson *et al.*, 2000].

### 2.5.2 Relativité

La relativité joue un rôle important dans la mesure du temps du GPS. De nombreux articles et chapitres de livre y ont été consacrés. Ce sujet faisant l'objet d'un chapitre détaillé dans la suite du document, nous nous contenterons ici d'en mentionner les éléments essentiels.

En raison de leur altitude, soit 20 000 km au-dessus du géoïde, les horloges embarquées dans les satellites du GPS subissent deux effets relativistes qui en modifient la fréquence. Sous les effets combinés de la dilatation du temps, d'une part, et du déplacement de fréquence dû à la gravitation, d'autre part, les horloges des satellites du GPS avancent plus vite que des horloges équivalentes situées sur le géoïde; l'avance est de 38,59  $\mu\text{s}/\text{jour}$ .

Pour permettre aux satellites de produire, avec une plus grande précision, les fréquences de signal requises vues du géoïde, les oscillateurs spatioportés sont réglés de façon à retarder de 38,59  $\mu\text{s}/\text{jour}$ . Ainsi, les fréquences reçues sont correctes par rapport au temps-coordonnée sur le géoïde. S'ajoute à cela un second déplacement de fréquence relativiste, qui s'explique par le fait que les orbites des satellites ne sont pas parfaitement circulaires. Une valeur approchée de l'erreur résultant de ce déplacement est donnée par la formule suivante:

$$\Delta t_r = \frac{2}{c^2} \sqrt{GM a e \sin E} = \frac{2 \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}}{c^2} \quad (2-3)$$

où:

**r** et **v**: position et vitesse du satellite. L'erreur  $\Delta t_r$  est corrigée dans le traitement du récepteur GPS à partir de données d'excentricité tirées du message de navigation diffusé.

L'erreur horaire due à l'excentricité de l'orbite GPS est de l'ordre de quelques dizaines de nanosecondes; elle est identique pour tous les récepteurs poursuivant un même satellite GPS.

### 2.6 Contributions de l'horloge du récepteur

Dans les récepteurs GPS, comme dans les satellites GPS, la base de temps est obtenue à partir d'un oscillateur commun, à la différence que, dans la plupart des récepteurs commerciaux et militaires, cette référence n'est pas un étalon au rubidium ou au césium, mais un quartz. Dans le récepteur, les erreurs de fréquence de l'oscillateur et les instabilités du composant de synthèse de fréquence se manifestent dans la mesure du décalage Doppler et dans l'accumulation de ce décalage, ou dans la mesure de la phase de la porteuse. Les erreurs systématiques ou les décalages horaires de l'horloge du récepteur ainsi que les retards qui s'accumulent dans le récepteur entre l'antenne et le convertisseur A/N viennent entacher les mesures de pseudo-distance et de phase de la porteuse ainsi que l'horodatage des observations et des solutions de position. Si les mesures concernant l'ensemble des satellites sont effectuées en même temps, elles sont toutes entachées des mêmes erreurs systématiques et de fréquence.

En général, l'heure dans le récepteur GPS est déterminée en plusieurs étapes. Cette base de temps est appelée «heure du récepteur» ou «heure locale». Lors de la mise sous tension en mode «démarrage à chaud», le récepteur règle son heure à partir de valeurs sauvegardées en mémoire non volatile. En fonction du récepteur, il est probable que la précision de ce réglage soit d'une seconde, ou pire. Lors d'un démarrage à froid, le récepteur n'ayant aucune connaissance de l'heure, celle-ci est, dans un premier temps, fixée à une valeur arbitraire.

Après décodage du premier message d'éphémérides des satellites, l'heure locale peut être réglée, avec une précision comprise entre 1 et 10 ms, à partir de l'heure de la semaine (TOW, *time of week*) contenue dans le message de navigation. La précision de ce réglage initial détermine ce qui reste à corriger dans la solution horaire. L'heure locale au moment de l'interruption correspondant à la prochaine époque de mesures est fixée à la valeur TOW de l'émission, plus la valeur estimée de la durée nécessaire au signal pour aller du satellite (instant d'émission) jusqu'à l'emplacement du récepteur (instant de réception). Une estimation de la position avec une précision inférieure à 100 km suffit pour fixer cette valeur avec une précision nettement inférieure à 1 ms. (Pour un récepteur situé à la surface de la Terre, la durée d'émission est comprise entre 67 ms environ pour un satellite du GPS émettant directement à la verticale et 85 ms environ pour un émetteur situé à l'horizon.)

Une fois l'heure locale déterminée avec une précision de 1 ms, le biais de l'horloge est estimé pendant le traitement relatif aux applications. Dans certains récepteurs, ce biais est conservé – on parle de «correction d'horloge sur papier» –, ce qui signifie qu'aucun ajustement physique n'est effectué pour le réduire, mais qu'il fait l'objet d'un suivi et qu'il est communiqué. Dans d'autres récepteurs, l'heure des mesures est ajustée pour corriger ce biais de façon à ce qu'elles soient effectivement réalisées aux époques GPS à 1 s. Ce point revêt une importance particulière dans le cas des récepteurs utilisés en géodésie, car les mesures de plusieurs récepteurs sont coordonnées afin d'obtenir un positionnement relatif statique ou cinématique de grande précision. Enfin, certains récepteurs n'ajustent pas l'heure effective à laquelle les mesures sont réalisées, mais corrigent les horodatages et les mesures communiquées en tenant compte du biais en question.

### **2.6.1 Horloge des récepteurs de navigation**

Dans la plupart des applications de navigation, la valeur réelle du biais de l'horloge n'est pas d'une grande importance. La synchronisation des mesures avec les époques horaires du GPS n'est nécessaire que s'il faut effectuer une coordination avec des mesures provenant d'autres récepteurs, et, même dans ce cas, elle n'est indispensable que pour les applications exigeant une précision de l'ordre du centimètre ou du millimètre. En revanche, il est important d'effectuer un horodatage correct des mesures et des solutions de navigation dans le cas des plates-formes à déplacement rapide telles que les avions et les satellites évoluant à grande vitesse. S'agissant des satellites proches de la Terre, il convient de noter qu'une erreur d'horodatage de 1 ms entraîne des erreurs de positionnement le long du trajet de l'ordre de 7 m. Des erreurs de positionnement de l'ordre du mètre sont également possibles en cas d'erreurs d'horodatage de cet ordre de grandeur sur d'autres plates-formes à dynamique élevée.

Les erreurs systématiques sur les mesures de pseudo-distance et les erreurs de fréquence résultant du biais horaire du récepteur sont corrigées de façon fiable lors de la résolution de l'équation de position et de vitesse de navigation. En général, ces valeurs ne présentent pas d'intérêt pour les applications de navigation. Dans les applications de prospection et de navigation relative, une technique courante consiste à utiliser la double différence de phase de la porteuse [Misra et Enge, 2001]. Le paramètre de biais horaire est éliminé de la solution en effectuant la différence entre des paires d'observations simultanées provenant de deux récepteurs et de deux satellites. Si les corrélations des mesures sont traitées correctement, les solutions ponctuelles obtenues par la méthode de la double différence sont équivalentes aux solutions de l'équation de position relative, dans lesquelles les problèmes de calage d'horloge sont résolus.

### **2.6.2 Horloge des récepteurs du temps**

#### **2.6.2.1 Relativité**

Dans un récepteur spécialement conçu pour le transfert du temps, l'oscillateur interne est généralement court-circuité ou laissé de côté et remplacé par un signal d'entrée provenant d'un oscillateur de référence externe ou par un signal de référence à une impulsion par seconde (1 ips). Il est nécessaire d'appliquer des corrections relativistes pour éliminer les décalages en temps et en fréquence des horloges des satellites du GPS. Dans les plates-formes très dynamiques, des effets analogues dus à la relativité se manifestent au niveau de l'horloge du récepteur. Ces décalages touchant toutes les mesures, ils n'ont pas d'incidence sur la précision de la solution de l'équation de navigation. En revanche, dans le cas du transfert du temps vers des plates-formes à déplacement rapide, il convient de corriger les décalages de l'oscillateur de référence dus à la relativité.

#### **2.6.2.2 Corrections horaires sur papier**

Comme on l'a vu précédemment, la plupart des récepteurs GPS n'intègrent pas les erreurs horaires dans leur base de temps interne. Les erreurs font l'objet d'une estimation et sont consignées sous forme de «corrections horaires sur papier». Dans certains cas, les corrections sont appliquées aux heures affichées et communiquées, ainsi qu'aux mesures transmises.

#### **2.6.2.3 Correction des horloges en sortie – Fréquence et 1 ips**

Les récepteurs du temps qui doivent générer une fréquence corrigée et un signal à 1 ips doivent appliquer en interne les corrections d'horloge nécessaires pour produire ces sorties synchronisées. Pour y parvenir, il est possible d'appliquer un ajustement en boucle fermée au niveau de l'oscillateur interne ou du composant du récepteur chargé de la synthèse des fréquences, ou d'utiliser un circuit distinct en boucle ouverte pour produire

les signaux corrigés. Si elle est effectuée en boucle fermée, la commande doit être mise en œuvre de façon à ne pas perturber les fonctions de poursuite des signaux.

## 2.7 Détermination et maintien de la base de temps

Toutes les mesures GPS reposent sur ce que l'on appelle le «temps du GPS» (GPST, *GPS time*), base de temps continue établie à l'époque GPS, c'est-à-dire à 00 h 00, le 6 janvier 1980 UTC. Le temps du GPS est lié à l'échelle de temps internationale UTC (temps universel coordonné) au moyen du temps UTC (USNO) [ICD-GPS-202B Navstar, 2001]. Toutefois, contrairement à l'échelle de temps UTC, les secondes intercalaires ne sont pas appliquées au temps du GPS, qui, par conséquent, dérive en permanence par rapport au temps UTC, avec un décalage qui est actuellement de 14 s. Le segment de commande est chargé de maintenir le temps du GPS à partir d'informations fournies par l'USNO et de surveiller la qualité de la base de temps de tous les satellites du système. Les émissions des satellites sont liées au temps du GPS. Les récepteurs peuvent donc relier leur heure locale à cette échelle de temps, puis au temps UTC (USNO), à partir des mesures effectuées par rapport aux satellites du GPS.

### 2.7.1 Fonctions du segment de commande

Depuis le 17 juin 1990, le temps du GPS est défini comme un temps composite obtenu à partir d'un ensemble d'étalons de fréquence atomiques. Ces étalons sont situés à la Station de commande principale (MCS), dans les stations de surveillance GPS et à bord des satellites (horloges embarquées). Concrètement, le temps du GPS proprement dit n'est conservé par aucune horloge au sein de ce système, mais il est calculé de façon implicite à l'aide d'un filtre de Kalman intégré à la fonction d'analyse et de prévision de la station MCS. Les mesures individuelles des étalons de fréquence sont pondérées en fonction de leur stabilité pendant l'intervalle d'estimation.

Le temps du GPS consiste donc en une moyenne pondérée d'un ensemble d'horloges atomiques. Les corrections d'horloge sur papier pour chaque fréquence étalon sont également calculées à l'aide des corrections horaires des satellites du GPS et constituent la base des paramètres transmis dans le message de diffusion.

La station MCS utilise des mesures provenant des stations de surveillance pour évaluer les orbites et les bases de temps des satellites du GPS, les erreurs horaires des stations de surveillance ainsi que d'autres paramètres. Le système de la MCS chargé de cette estimation divise les mesures et les états à estimer en plusieurs «partitions», chacune s'occupant de toutes les stations de surveillance et d'un sous-ensemble des satellites du GPS. Ce partitionnement, mis en place à l'origine en raison de la puissance de calcul limitée des premiers ordinateurs de la station MCS, est toujours utilisé aujourd'hui, car il permet d'alléger la charge de calcul et d'isoler plus facilement les problèmes, satellite par satellite [Hutsell, 1994]. Chaque partition comprend les états des cinq stations de surveillance GPS et de six satellites au maximum. Un algorithme distinct appelé «rapprochement des partitions» (*partition reconciliation*) ajuste les états des stations de surveillance de façon à assurer la cohérence de l'ensemble des partitions.

Une «moyenne globale» (*grand average*) sur l'ensemble des partitions fournit à la station MCS les meilleures estimations des écarts entre le temps du GPS et les horloges des stations de surveillance et des satellites.

L'Observatoire naval des Etats-Unis (USNO) est chargé de maintenir une référence horaire physique pour le compte du DoD. Le temps UTC (USNO) désigne la réalisation en temps réel du temps UTC pour le DoD. L'USNO assure également le bon fonctionnement de l'horloge principale de remplacement (USNO/AMC, USNO/*Alternate Master Clock*) qui est hébergée dans la station MCS de la base aérienne militaire de Schriever.

L'USNO surveille les émissions des satellites GPS du service de positionnement standard (SPS, *Standard Positioning Service*) et du système de positionnement précis (PPS) à l'aide de récepteurs du temps spécialisés situés à Washington. Pour chacun des satellites, des mesures sont effectuées toutes les 6 s sur une poursuite de 13 min. Les poursuites de l'ensemble des satellites sont utilisées pour former un ajustement linéaire de deux jours qui permet de calculer une valeur approchée des paramètres de correction GPS-UTC (USNO),  $a_0$  et  $a_1$ . La valeur quadratique moyenne des solutions obtenues à partir des poursuites de 13 minutes est de l'ordre de 15 à 20 ns. Les observations de chaque satellite et les estimations linéaires sont transmises à la station MCS et saisies manuellement dans son logiciel pour que le système GPS reste un système fermé, sans apport de données externes.

### 2.7.2 Asservissement du temps du GPS

En vertu du document de contrôle des interfaces (*interface control document*), le temps du GPS doit être maintenu dans un intervalle de  $\pm 1 \mu\text{s}$  par rapport au temps UTC (USNO), à l'exception des décalages dus aux secondes intercalaires [ICD-GPS-202B Navstar, 2001]. Pour satisfaire à ce critère, le temps du GPS est donc asservi sur le temps UTC (USNO). L'asservissement repose sur une analyse des estimations journalières de l'écart GPS-UTC (USNO). Chaque jour, on détermine s'il faudra effectuer un asservissement le lendemain pour maintenir cet écart dans les limites spécifiées.

L'asservissement consiste à introduire une dérive de décalage fixe, positive ou négative, dans le temps du GPS pendant une journée. Une dérive fixe égale à  $\pm 2 \times 10^{-19} \text{ s/s}^2$  était utilisée avant le 18 mars 1994; après cette date, elle a été fixée à  $\pm 1 \times 10^{-19} \text{ s/s}^2$ . L'asservissement est mis en œuvre en modifiant les corrections horaires des satellites qui sont diffusées ainsi que les corrections GPS-UTC; il est transparent pour les utilisateurs [Hutsell, 1994]. Si un asservissement non nécessaire était effectué, les utilisateurs du système GPS le percevraient comme une instabilité du temps du GPS.

### Références

- HUTSELL S.T. [20-23 septembre 1994], «Recent MCS Improvements to GPS Timing», *Proc. ION GPS-94*, Salt Lake City, UT, p. 261-273.
- KAPLAN E.D. et HEGARTY C.J., dir. [2006], *Understanding GPS: Principles and applications. 2ed.*, Artech House, Inc., 685 Canton Street, Norwood, MA 02062.
- LARSON, K.M. *et al.* [mars 2000], «Assessment of GPS Carrier-Phase Stability for Time-Transfer Applications», *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 47, 2, p. 484-494.
- LARSON K.M. et LEVINE J. [juillet 1999], «Carrier-Phase Time Transfer», *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 46, 4, p. 1001-1012.
- MISRA P. et ENGE P. [2001], *Global Positioning System – Signals, Measurements, and Performance*, Ganga-Jamuna Press.
- Naval Observatory Time Transfer Interfaces ICD-GPS-202B [31 octobre 2001], *Navstar GPS Control Segment/U.S.*
- Navstar Global Positioning System Interface Specification IS-200 rev D [2006], *Navstar GPS Space Segment/ Navigation User Interfaces*, IRN-200D-001, ARINC Engineering Services, LLC, El Segundo, CA 90245.
- PARKINSON B.W. *et al.*, dir. [1996], *Global Positioning System: Theory and Applications*, AIAA Press.



## CHAPITRE 3

## SYSTÈME COMPLÉMENTAIRE AU GPS PAR SATELLITE

	<i>Page</i>
3.1 Introduction .....	24
3.2 Description d'un système complémentaire par satellite (SBAS).....	24
3.3 Description du système WAAS (Etats-Unis d'Amérique) .....	24
3.4 Description du système MSAS (Japon) .....	26
3.4.1 Présentation générale .....	26
3.4.2 Fonction de bruit pseudo aléatoire duale.....	27
3.4.3 Régulation de la puissance sur la liaison montante .....	28
3.5 Description du système EGNOS (Europe).....	28
3.5.1 Présentation générale du segment au sol du système EGNOS .....	29
3.5.2 Le système EGNOS et la gestion du temps: vue d'ensemble .....	29
3.5.3 Synchronisation horaire des stations RIMS et établissement du temps ENT .....	29
3.5.4 Asservissement du temps ENT sur le temps du GPS .....	30
3.5.5 Corrections horaires des satellites .....	31
3.5.6 Temps ENT diffusé au moyen des satellites géostationnaires en orbite autour de la Terre (GEO).....	31
3.5.7 Estimation de la différence entre le temps ENT et le temps UTC .....	31
3.5.8 Les systèmes SBAS et le temps .....	32
3.5.9 Temps et satellite GEO .....	34
3.5.10 Systèmes SBAS et transfert du temps .....	42
3.5.11 Comparaison d'horloges entre deux laboratoires.....	42
3.5.12 Comparaison horaire entre deux systèmes SBAS .....	45
Références .....	47
Appendice A – Brève description du contenu du message SBAS.....	48

### 3.1 Introduction

Les systèmes de navigation ont toujours eu besoin de connaître l'heure. Cette dépendance fut clairement mise en évidence en 1761, lorsque le chronomètre de Harrison, embarqué à bord du HMS *Deptford*, apporta la preuve que les navigateurs étaient en mesure, pour la première fois, de déterminer la longitude avec précision et fiabilité. Du fait de cette relation entre temps et navigation, la communauté des spécialistes des références horaires a toujours montré un vif intérêt pour l'utilisation des systèmes de navigation dans le contexte de la *diffusion* du temps. Même aujourd'hui, le cœur du système GPS repose sur une technologie très évoluée de mesure du temps. Contrairement aux navigateurs, qui ont besoin de quatre satellites GPS pour trouver leur position, les garde-temps sont en mesure de déterminer l'heure à partir d'un seul satellite seulement et pourraient ainsi, sur la base des observations d'un seul satellite, synchroniser les horloges dans le monde entier.

### 3.2 Description d'un système complémentaire par satellite (SBAS)

Les systèmes complémentaires par satellite (SBAS, *satellite based augmentation systems*) constituent l'une des évolutions les plus récentes dans le domaine des systèmes de navigation. S'ils sont analogues aux systèmes GPS différentiels dans leur conception, les systèmes SBAS offrent aux administrations nationales de l'aviation civile et à la navigation aérienne un niveau de performance sensiblement plus élevé. Les systèmes SBAS appliquent des méthodes de complémentarité, qui améliorent non seulement la précision, mais aussi la disponibilité, l'intégrité et la continuité de service. Pour ce faire, ils surveillent en permanence les émissions GPS à partir de stations de référence au sol et émettent un message complémentaire via des satellites de communication géostationnaires (GEO). Le signal émis par les satellites GEO est de même fréquence que le signal L1 du système GPS, mais diffère en termes de format et de débit binaire.

Les informations contenues dans le message provenant d'un satellite GEO permettent d'améliorer non seulement la précision de la position d'un utilisateur déterminée à partir de signaux GPS, mais aussi la fiabilité de cette position. En outre, le signal GEO peut être utilisé comme une source complémentaire de mesure des distances pour la navigation, à condition toutefois que les signaux soient synchronisés sur le temps du GPS.

Par conséquent, les signaux provenant du satellite GEO peuvent aussi servir à la diffusion de l'heure et à la comparaison d'horloges. Les études actuelles sur les fonctions horaires du système SBAS montrent que celles-ci ont déjà atteint le niveau de qualité du système de positionnement précis (PPS) du GPS. À mesure que les systèmes gagneront en maturité, on peut raisonnablement s'attendre à une amélioration des performances en termes de fiabilité et de précision.

### 3.3 Description du système WAAS (Etats-Unis d'Amérique)

La Figure 3-1 décrit de façon schématique le fonctionnement du système complémentaire de zone étendue (WAAS, *wide area augmentation system*). La station de référence (WRS), unité de base de ce système, abrite des étalons de fréquence à jet de césium redondants ou d'autres types d'horloges atomiques, plusieurs récepteurs WAAS/GPS double fréquence à 12 canaux ainsi que des récepteurs GPS de poursuite de phase spécialisés à bande large et à bande étroite. Chaque station de référence poursuit en continu autant de satellites GPS et GEO qu'elle est en mesure de voir et capable de traiter.

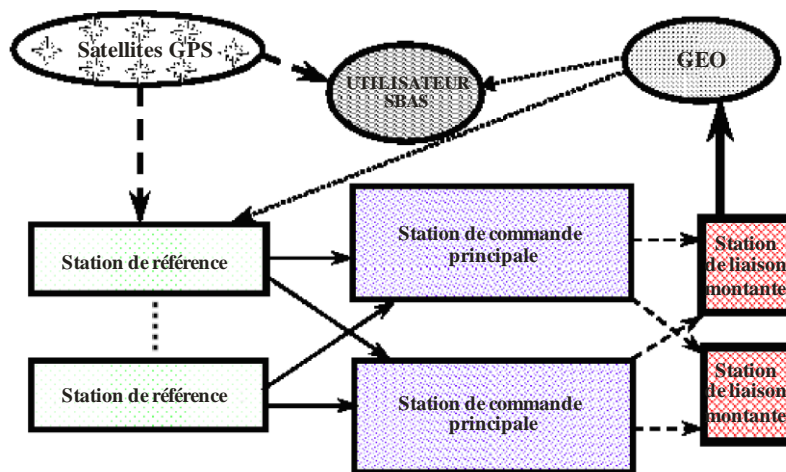
Chaque station WRS effectue les fonctions suivantes: collecte de données, contrôle de vraisemblance, traitement, enregistrement et transfert des données. Chacune de ces stations est composée d'un triple châssis redondant d'équipements de station de référence de zone étendue (WRE, *wide-area reference station equipment*). Ces équipements recueillent des jeux de données indépendants, parmi lesquels des données d'observation de satellites GPS et de satellites GEO, qu'elles transmettent à chaque station principale WAAS (WMS, *WAAS master station*) du système. L'indépendance des jeux de données est assurée par le recueil de paramètres observables via des ensembles matériels indépendants nécessaires à la vérification effectuée par la



station WMS. Les données sont acquises à un rythme correspondant à leur degré de variation prévisible; par exemple, lorsque les conditions météorologiques évoluent lentement, les données de météorologie sont collectées moins fréquemment que celle des satellites GPS. Chaque WRE contrôle la vraisemblance de ses données avant de les transmettre aux stations WMS. Le cas échéant, les données sont marquées comme ayant échoué au test de vraisemblance, puis envoyées vers les WMS. Pour s'assurer que les données parviennent effectivement à chaque station WMS, les WRS les transmettent via deux nœuds dorsaux indépendants appartenant au sous-système de communication de Terre (TCS, *terrestrial communications subsystem*).

FIGURE 3-1

## Vue d'ensemble simplifiée d'un système SBAS



Sat\_time\_freq-03-01

Chaque station WMS effectue les fonctions suivantes: traitement des corrections, détermination de l'orbite des satellites, détermination de l'intégrité, vérification, validation et création du message WAAS. Une fois par seconde, la station WMS collecte les données reçues de l'ensemble des stations WRS et les traite pour assurer ces fonctions. Ce traitement est effectué sur toutes les données WRS disponibles et aboutit à l'émission, une fois par seconde, d'un message formaté WAAS de 250 bits. Ces messages WAAS sont envoyés à tous les sous-systèmes de liaison montante géostationnaires (GUS, *geostationary uplink subsystem*).

La périodicité du traitement par les stations WMS est choisie de telle sorte que la diffusion du message WAAS par le satellite GEO coïncide avec l'époque du code C/A 1 s GPS suivante [Peck *et al.*, 1997]. Le système WAAS valide le signal émis dans l'espace (SIS, *signal-in-space*) en contrôlant que les messages réémis par les satellites GEO sont identiques à ceux qui leur ont été transmis et en comparant les solutions de l'équation de position de navigation issues de l'ensemble WAAS/GPS avec les emplacements des stations WRS faisant l'objet d'un relevé. Chaque station WMS comprend une console d'exploitation et de maintenance qui permet, via une interface homme-machine, de commander le système WAAS. Pour éviter les conflits, seule une station WMS du système WAAS peut jouer le rôle de station de commande à tout moment donné (console d'exploitation et de maintenance dite «active»).

Chaque système de communication géostationnaire (GCS, *geostationary communications system*) effectue les fonctions de diffusion et de mesure de distance. Chacun de ces systèmes est composé de deux sous-systèmes générateurs de signaux (SGS, *signal generator subsystem*), de deux sous-systèmes radiofréquences en liaison montante (RFU, *RF uplink*) et d'un satellite en orbite géostationnaire autour de la Terre (GEO, *geostationary Earth orbiting*). La combinaison d'un SGS et d'un RFU constitue une station GEO en liaison montante (GUS, *GEO uplink station*). La fonction de diffusion du GCS commence par la réception, une fois par seconde, des messages WAAS formatés de 250 bits émis par chacune des stations WMS du système. Pour améliorer la disponibilité des messages WAAS, chaque station GUS est connectée à deux nœuds dorsaux WAAS sur le sous-système TCS. La GUS choisit une station WMS comme sa source de messages et encode le message reçu

à l'aide d'un code convolutif de correction d'erreur directe de rendement 1/2. Le message résultant, de longueur 500 bits, est modulé sur un signal de type GPS et envoyé au satellite GEO. Chaque satellite GEO est desservi par deux stations GUS:

- la station de liaison montante primaire;
- la station de secours immédiat.

Les deux sous-systèmes GUS qui desservent un satellite GEO sont indépendants sur le plan opérationnel et situés dans des stations au sol (GES, *ground earth stations*) disséminées et distantes de 300 miles au minimum (482 km). Une station GES est un bâtiment hébergeant un ou plusieurs sous-systèmes GUS, auxquels elle apporte l'énergie et les services d'exploitation et de maintenance nécessaires. Le transpondeur «à guide d'ondes coudé» du satellite GEO déplace le signal en fréquence et le diffuse aux utilisateurs du système WAAS. Si nécessaire, la station GUS de secours remplace la station primaire pour que le signal WAAS émis dans l'espace soit toujours disponible.

La fonction de mesure de distance du système GCS s'effectue en émettant vers les utilisateurs un signal de fréquence GPS L1 contenant les informations suivantes:

- 1) un code de bruit pseudo-aléatoire (BPA) synchronisé avec précision, qui est assigné à chaque satellite GEO;
- 2) des éphémérides précises, qui sont contenues dans le message de navigation du satellite GEO envoyé périodiquement dans la fonction de diffusion.

Cette structure de signal est analogue à celle du GPS, si ce n'est que la synchronisation précise du code BPA est effectuée au sol et non sur les satellites GEO. Cette fonction permet aux utilisateurs de traiter les satellites GEO comme un satellite GPS supplémentaire, ce qui accroît la disponibilité globale du système.

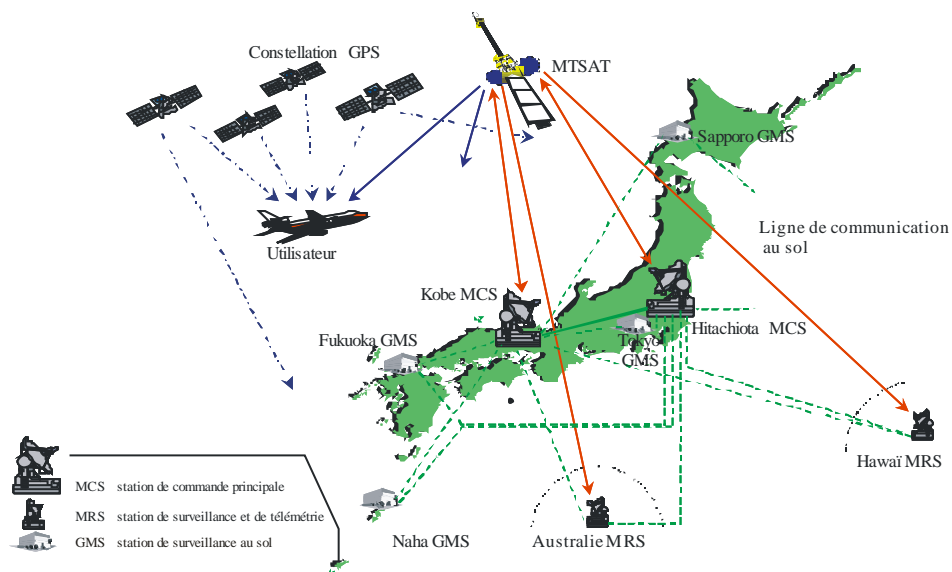
### 3.4 Description du système MSAS (Japon)

#### 3.4.1 Présentation générale

Le MSAS, système complémentaire par satellites MTSAT (*multi-function transport satellite/satellite de transport multifonctions*), se présente comme indiqué à la Figure 3-2. Les données des satellites du GPS sont reçues par des stations de surveillance au sol (GMS, *ground monitoring station*) installées sur quatre sites au Japon: Sapporo, Tokyo, Fukuoka et Naha. De plus, les données des satellites du GPS et le signal émis par les satellites géostationnaires MTSAT sont reçus par quatre stations de surveillance et de télémétrie (MRS, *monitoring and ranging station*) situées à Kobe, à Hitachiota, à Hawaï et en Australie. Les données reçues sont envoyées à des stations de commande principales (MCS, *master control station*) situées au Japon, l'une à Kobe, l'autre à Hitachiota.

FIGURE 3-2

## Configuration du système MSAS



Sat\_time\_freq-03-02

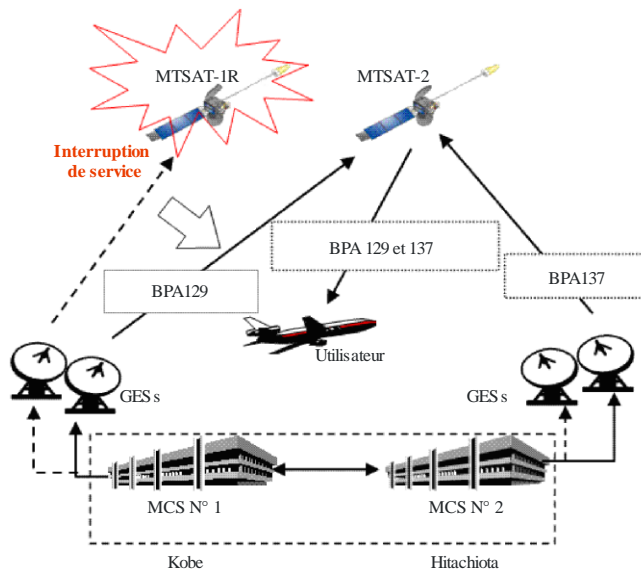
Dans les stations MCS, le sous-système CPF (*central processing facility*/équipement de traitement central) calcule les corrections applicables aux satellites et aux points de grille ionosphérique (IGP, *Iono Grid Point*) qui sont prédéfinis dans le système MSAS, et surveille l'intégrité du système. Le temps réseau du système MSAS (MNT), qui désigne le temps réseau interne du système, est maintenu à jour de sorte que son écart par rapport au temps du GPS reste dans des limites spécifiées. Le sous-système NES (*navigation earth station*/station terrienne de navigation) crée les messages MSAS à partir des données issues du sous-système CPF puis les module en bande Ku. Les messages MSAS sont envoyés au satellite MTSAT à partir d'une station terrienne au sol située au même endroit que la MCS, après amplification au moyen d'un amplificateur à grande puissance. En outre, la communication entre les différentes infrastructures au sol est assurée par le sous-système de communication du réseau (NCS, *network communications subsystem*).

Les installations au sol du système MSAS et le système WAAS ont de nombreux points communs. D'un autre côté, le système MSAS présente des caractéristiques bien spécifiques, à savoir une fonction BPA duale lui permettant de fonctionner avec deux types de BPA pour un seul et même satellite géostationnaire ainsi qu'une fonction de régulation de la puissance sur la liaison montante (UPC, *uplink power control*) permettant de corriger l'affaiblissement dû à la pluie dans la bande Ku.

### 3.4.2 Fonction de bruit pseudo aléatoire duale

En principe, le système MSAS fonctionne avec deux satellites géostationnaires MTSAT (MTSAT-1R et MTSAT-2) (voir la Figure 3-3). Des codes de bruit pseudo-aléatoire (BPA) différents sont envoyés séparément aux deux satellites géostationnaires MTSAT. Si l'une des deux stations MCS est indisponible en raison d'une panne affectant l'installation au sol ou de fortes précipitations, l'un des codes BPA continue d'être diffusé aux utilisateurs. En effet, ces derniers sont conçus pour recevoir des signaux MTSAT sur plusieurs canaux afin d'éviter une dégradation de la continuité et de la disponibilité. Si l'un des satellites géostationnaires MTSAT tombe en panne, le système MSAS peut passer en mode BPA dual.

FIGURE 3-3

**Fonctionnement en mode BPA dual**

Sat\_time\_freq-03-03

Dans le mode BPA dual, chaque station MCS envoie un code BPA différent à un seul des deux satellites géostationnaires. Les interruptions de la liaison montante dues à l'affaiblissement par la pluie constituent un ensemble de petits facteurs qui contribuent à la dégradation de la continuité dans le système MSAS. Mais en mode BPA dual, même si l'affaiblissement dans la bande Ku dû aux fortes précipitations dépasse la correction appliquée par l'UPC dans l'une ou l'autre des stations MCS, l'exploitation se poursuit grâce au code BPA qui est envoyé par l'autre MCS, sans qu'il soit nécessaire d'effectuer une quelconque commutation entre les deux stations.

**3.4.3 Régulation de la puissance sur la liaison montante**

En cas de précipitations, le système MSAS régule la puissance sur la liaison montante en commandant, en boucle fermée, la compensation de l'affaiblissement du signal montant en bande Ku de façon à stabiliser la liaison entre les satellites géostationnaires MTSAT et la station terrienne au sol. Le système de régulation de la puissance sur la liaison montante (UPC) utilise les données  $L1-C/N_0$  des satellites géostationnaires MTSAT captées par le récepteur UPC installé dans l'amplificateur HPA. La régulation en boucle fermée est réalisée en commandant l'affaiblisseur du HPA en fonction de la valeur  $L1-C/N_0$  mesurée et de la valeur cible prédéfinie du rapport  $C/N_0$ .

De plus, pour assurer la régulation, la valeur de  $C/N_0$  dans la bande Ku est également utilisée.

**3.5 Description du système EGNOS (Europe)**

A l'instar des systèmes WAAS et MSAS, le système EGNOS est composé de quatre segments: le segment au sol, le segment spatial, le segment utilisateur et l'ensemble des installations de soutien.

- 1) Le segment spatial EGNOS est composé des transpondeurs embarqués à bord de satellites GEO.
- 2) Le segment utilisateur EGNOS est composé des récepteurs standard GNSS développés conformément à la norme RTCA MOPS DO-229.
- 3) Le segment de soutien EGNOS contient certaines installations nécessaires au développement du système, à l'exploitation et à la qualification.

Enfin, le segment au sol EGNOS est tel que décrit au § 3.5.1.

### 3.5.1 Présentation générale du segment au sol du système EGNOS

Le segment au sol du système EGNOS est composé de stations de télémétrie et de surveillance de l'intégrité (RIMS, *ranging and integrity monitoring station*), qui sont reliées à un ensemble d'installations redondantes de commande et de traitement appelé «centre de commande de mission» (MCC, *mission control center*). Le MCC détermine l'intégrité, les éphémérides et les corrections différentielles d'horloge applicables à chaque satellite commandé ainsi que les temps de propagation ionosphérique, et produit les éphémérides des satellites GEO. Ces informations sont transmises dans un message à la station terrienne terrestre de navigation (NLES, *navigation land earth station*) pour être envoyées aux satellites GEO avec le signal de télémétrie GEO. Les satellites GEO renvoient ensuite ces données vers la Terre sur la fréquence de la liaison 1 (L1) du GPS au moyen d'une modulation et d'un système de codage analogue à celui du GPS. Tous les composants du segment au sol sont interconnectés via le réseau de communication étendu EGNOS (EWAN).

### 3.5.2 Le système EGNOS et la gestion du temps: vue d'ensemble

Les paragraphes suivants donnent, en regard des spécifications du système, une description des fonctions horaires et de leurs performances attendues. Cette description repose sur une analyse et sur des observations expérimentales.

Pour mesurer les distances récepteur-satellite, les systèmes GPS et GLONASS s'appuient sur la différence entre les instants d'arrivée des signaux (TDOA, *time difference of arrival*). La précision des horloges du récepteur et du satellite en jeu influe donc directement sur la précision de la mesure de distance. Les satellites GPS et GLONASS diffusent, dans leurs messages de navigation, des informations qui permettent aux utilisateurs de corriger les erreurs horaires des satellites, à savoir le décalage de l'horloge de chacun des satellites par rapport à l'échelle de temps nominale du système à satellites. La précision de ces corrections est de l'ordre de quelques nanosecondes.

Cela étant, dans le cas du système GPS, elles ne tiennent pas compte du décalage temporaire aléatoire lié à la disponibilité sélective (SA, *selective availability*), qui, s'il n'est pas évalué et éliminé, entraîne une dégradation de la qualité du radiopérage de l'utilisateur. Par ailleurs, dans le cas des applications à haute intégrité, il est souhaitable de produire des estimations des erreurs horaires des satellites qui soient indépendantes afin de surveiller les corrections diffusées par les satellites.

Pour estimer de façon très précise les erreurs horaires des satellites et les diffuser aux utilisateurs, le système EGNOS s'appuie sur trois fonctions horaires de base, qui sont exécutées dans le sous-système CPF:

- synchronisation horaire des stations RIMS et établissement du temps réseau EGNOS (ENT, *EGNOS Network Time*);
- asservissement du temps ENT sur le temps du GPS;
- calcul des décalages horaires des satellites par rapport au temps ENT.

La différence entre le temps ENT et le temps UTC est évaluée.

### 3.5.3 Synchronisation horaire des stations RIMS et établissement du temps ENT

La synchronisation horaire des stations RIMS est effectuée en appliquant la technique de l'*horloge composite*. Dans cette technique, le temps ENT est défini comme la moyenne d'ensemble implicite de toutes les horloges RIMS et le processus de synchronisation estime le décalage et la dérive de chaque horloge RIMS par rapport à cette moyenne. Ces estimations peuvent ensuite être utilisées pour dater toutes les mesures de pseudo-distance effectuées par les stations RIMS par rapport au temps ENT. Cette synchronisation est nécessaire pour pouvoir combiner plusieurs mesures de pseudo-distance observées simultanément par de multiples stations RIMS dans la fonction de calcul des erreurs horaires des satellites.

Une autre technique de synchronisation, plus simple, peut être appliquée: la technique de l'*horloge mère* (*master clock*). L'horloge d'une station RIMS désignée fournit alors le temps réseau, par rapport auquel toutes les autres horloges RIMS sont synchronisées. Par rapport à cette deuxième approche, la méthode de l'horloge composite offre deux avantages importants. Premièrement, la technique de l'horloge mère présente un point de vulnérabilité qui, à lui seul, peut rendre le principe inopérant: si l'horloge mère est perdue, le temps ENT l'est également. A l'inverse, le temps ENT à horloge composite subsiste tant que deux horloges sont opérationnelles. Deuxièmement, il va de soi que la stabilité du temps ENT fourni par la méthode de l'horloge mère dépend

exclusivement de la stabilité de l'horloge mère elle-même. En revanche, avec la technique de l'horloge composite, la stabilité du temps ENT est égale à la stabilité de la moyenne d'ensemble implicite de toutes les horloges des stations RIMS. Dans l'hypothèse d'un ensemble de  $n$  horloges identiques et indépendantes, on obtient une amélioration de la stabilité en  $\sqrt{n}$ . Cette dernière caractéristique de l'horloge composite présente un avantage secondaire important: une meilleure capacité du système à détecter et à isoler les horloges défaillantes.

L'algorithme de l'horloge composite est mis en œuvre par un filtre de Kalman. Les données de mesure du filtre constituent un ensemble linéairement indépendant d'observations *simultanées* (*common-view observations*) présentant une variance a priori minimale. Pour un couple de stations RIMS, une observation simultanée est obtenue en soustrayant des mesures de pseudo-distance par rapport à un satellite commun réalisées au même moment. Avant d'effectuer la soustraction, les pseudo-distances sont *prétraitées* pour supprimer les distances géométriques entre l'antenne RIMS et l'antenne du satellite et pour réduire les erreurs non désirées, notamment les temps de propagation par trajets multiples et le bruit thermique. Les observations simultanées résultant de ces calculs représentent les mesures directes des décalages horaires des stations RIMS auxquelles s'ajoutent les erreurs résiduelles.

Les états du filtre sont constitués par les décalages et les dérivées de chaque horloge de station RIMS par rapport à une échelle de temps fictive *idéale*. Par conséquent, le filtre fournit les décalages et les dérivées par rapport à la moyenne pondérée *implicite* de toutes les horloges des stations RIMS. Cette moyenne d'ensemble implicite définit fondamentalement l'échelle de temps EGNOS, à savoir le temps ENT. Si la pondération relative des différentes horloges utilisée dans le filtre dépend de plusieurs facteurs, elle est en fait largement déterminée par les modèles de bruit de processus associés à chaque horloge. Ces modèles caractérisent la stabilité des horloges des stations RIMS.

Etant donné que le filtre ne dispose que de mesures de différences horaires, son modèle comprend des éléments non observables qui sont à l'origine de tendances de croissance séculaire dans les matrices de covariance de l'erreur de l'état. Des mesures spéciales doivent être mises en œuvre pour éliminer ces tendances, faute de quoi elles engendrent à terme une instabilité numérique dans le filtre. On peut démontrer qu'après avoir éliminé de la matrice de covariance les tendances de croissance séculaire imputables aux éléments non observables du modèle, la covariance résultante décrit les erreurs des estimations de l'état du filtre *non plus* par rapport à l'échelle de temps idéale, mais par rapport à la moyenne d'ensemble implicite.

### 3.5.4 Asservissement du temps ENT sur le temps du GPS

Pour limiter la dynamique des corrections horaires des satellites et ainsi réduire la taille des messages horaires WAD (*wide area differential*/différentiel à zone étendue) et améliorer l'efficacité du processus de diffusion des messages, il est nécessaire d'asservir le temps ENT sur l'échelle de temps du GPS. Cet asservissement est réalisé à l'aide d'un filtre numérique passe-bas du second ordre. Le signal d'entrée du système d'asservissement est une estimation instantanée du décalage temps ENT-temps du GPS. Cette valeur est calculée à partir des décalages horaires estimés des satellites par rapport au temps ENT et des corrections horaires des satellites diffusées par le système GPS, lesquelles correspondent à des estimations des décalages horaires des satellites par rapport au temps du GPS. La fréquence de coupure du filtre est choisie de façon à réduire au minimum la disponibilité sélective (SA), tout en évitant d'importants retards dus au décalage relatif du temps ENT par rapport à l'échelle de temps du GPS. Plus le temps ENT est stable, plus la fréquence de coupure peut être fixée à une valeur basse et plus la réduction de la disponibilité sélective est importante.

Le système EGNOS de référence satisfait facilement à l'exigence d'asservissement du temps ENT sur le temps du GPS, exigence selon laquelle la différence entre les deux échelles de temps doit rester strictement inférieure à 50 ns. Les scénarios examinés, pour lesquels toutes les horloges étaient des horloges au césium, montrent qu'il est possible d'obtenir une précision d'asservissement strictement inférieure à 3 ns. Ces résultats doivent toutefois être maniés avec prudence, car ils reposent sur des jeux de données synthétiques couplés à des modèles idéalisés de disponibilité sélective et d'horloges RIMS. Cela étant, ils sont cohérents avec d'autres résultats, notamment ceux cités dans [Benedicto *et al.*, 1998].

Une précision d'asservissement strictement inférieure à 3 ns permettra de synchroniser de manière autonome les réalisations du temps ENT provenant de différents sous-systèmes CPF, sans qu'il soit nécessaire de disposer d'une fonction de synchronisation spécifique «ENT-A vers ENT-B». Cela étant, lorsqu'une telle fonction est

requis, les expériences effectuées avec des données réelles et des données synthétiques ont montré que la synchronisation des différents temps ENT pouvait être facilement obtenue avec une précision supérieure à 3 ns ( $2 \sigma$ ). Il s'agit de l'exigence système imposée pour rendre les changements de CPF transparents pour les utilisateurs du système EGNOS.

### 3.5.5 Corrections horaires des satellites

Les corrections horaires des satellites et les fréquences de ces corrections sont calculées à partir de l'ensemble des mesures de pseudo-distance et de décalage Doppler issues de la fonction de prétraitement. Les mesures sont datées par rapport au temps ENT au moyen des paramètres de synchronisation des stations RIMS puis regroupées par satellite. On calcule pour chaque satellite, par la méthode des moindres carrés pondérés, les estimations du décalage horaire et de la vitesse de variation de l'horloge par rapport au temps ENT. Les décalages sont ensuite séparés, par filtrage passe-bas (analogue à celui employé dans la fonction d'asservissement du temps ENT), en composantes lentes et composantes rapides, qui constituent les messages de correction horaire du satellite. Les estimations de la vitesse de variation servent à prévoir les corrections, pour une durée égale à la latence attendue du système.

### 3.5.6 Temps ENT diffusé au moyen des satellites géostationnaires en orbite autour de la Terre (GEO)

Les corrections lentes et rapides des satellites sont diffusées aux utilisateurs du système EGNOS dans des messages distincts via le satellite GEO. Le récepteur de l'utilisateur EGNOS décode ces messages, reconstitue les décalages horaires combinés par rapport au temps ENT pour chacun des satellites qu'il poursuit et applique ensuite ces décalages à ses pseudo-distances, en plus des autres corrections WAD fournies par le système EGNOS. En procédant ainsi, il remplace, dans sa solution de l'équation de navigation, l'échelle de temps du GPS ou du GLONASS par l'échelle de temps ENT. Ainsi le récepteur calcule-t-il non seulement une meilleure estimation de sa position grâce aux corrections WAD, mais également une valeur approchée de son décalage horaire interne par rapport au temps ENT.

Une fois disponible au sol, le temps ENT doit être transmis avec précision aux satellites GEO. En effet, le temps GEO est défini à la sortie de la charge utile du satellite, précisément au niveau du centre de phase de l'antenne L1. Cette fonction est assurée par le mécanisme d'asservissement appelé «longue boucle» (*Long-Loop*), qui repose sur la quasi-symétrie entre la liaison montante et la liaison descendante qui vont de la station NLES au satellite GEO.

### 3.5.7 Estimation de la différence entre le temps ENT et le temps UTC

Le temps UTC étant une moyenne théorique calculée à partir de nombreuses horloges réparties sur le globe, il n'est pas possible d'établir un lien direct entre le temps ENT et le temps UTC. Il est donc nécessaire d'utiliser l'une des horloges physiques qui contribuent à l'élaboration du temps UTC.

La différence horaire entre le temps ENT et le temps UTC peut dès lors être décomposée en deux termes:

$$\text{ENT} - \text{UTC} = [ \text{ENT} - \text{UTC}(k) ] + [ \text{UTC}(k) - \text{UTC} ] \quad (3-1)$$

où:

$k$  représente n'importe quel laboratoire européen contribuant à l'élaboration du temps UTC.

#### 3.5.7.1 UTC(k) – UTC

Les différences horaires ( $\text{UTC} - \text{UTC}(k)$ ), qui sont publiées tous les mois par le BIPM au moyen de la *Circulaire T*, sortent du champ d'application du système EGNOS.

Qualité de la différence horaire ( $\text{UTC} - \text{UTC}(k)$ ):

- La recommandation de l'UIT et du CDDS est de maintenir la différence ( $\text{UTC} - \text{UTC}(k)$ ) à une valeur inférieure à 100 ns ( $1 \sigma$ ).
- L'incertitude estimée des différences horaires ( $\text{UTC} - \text{UTC}(k)$ ) est actuellement de l'ordre de 10 ns ( $1 \sigma$ ); elle est fournie en temps différé au moyen de la *Circulaire T*.

- L'incertitude estimée d'une prévision de la différence horaire (UTC – UTC(k)) dépend du moment de la prévision et peut être de l'ordre de 20 ns (1  $\sigma$ ).

### 3.5.7.2 ENT – UTC(k)

Pour synchroniser le temps ENT et le temps UTC(OP), une station RIMS du système EGNOS sera installée à l'institut SYRTE de l'Observatoire de Paris; elle sera physiquement reliée à l'horloge atomique de ce dernier (au moyen d'interfaces à 10 MHz à des niveaux de 1 ips). Le module de synchronisation de la station RIMS calculera directement la différence horaire entre le temps ENT et la station RIMS(OP) avec une incertitude inférieure à 3 ns (2  $\sigma$ ). La différence horaire sera diffusée à l'aide d'un message de type 12, avec ce niveau d'incertitude. Voir l'Appendice A pour une brève description du contenu du message SBAS émis par un satellite géostationnaire SBAS.

### 3.5.8 Les systèmes SBAS et le temps

En matière de référence horaire, le principal avantage d'un système SBAS tient à son utilisation d'un satellite géostationnaire comme satellite de télémétrie complémentaire au GPS. Les spécifications des systèmes SBAS sont établies de sorte que les signaux provenant du satellite GEO soient synchronisés avec le temps du GPS à 50 ns près. Etant donné que le satellite GEO conserve la même position dans le ciel, un laboratoire de référence horaire peut utiliser, pour le poursuivre, une antenne fixe très directive, par exemple un cornet d'alimentation ou une parabole. Les antennes de ce type améliorent les rapports signal/bruit et contribuent à atténuer le phénomène des trajets multiples. Elles devraient aussi permettre d'atténuer les brouillages. De plus, il est possible de poursuivre le satellite GEO en continu le soir, lorsque l'activité ionosphérique est à son minimum, en particulier dans les régions de moyenne latitude où la scintillation est minimale.

De nombreuses expériences de référence horaire sont susceptibles de tirer profit d'un système SBAS: expériences d'étalonnage, expériences d'atténuation de la propagation par trajets multiples, comparaisons entre plusieurs laboratoires de référence horaire, comparaisons entre différents systèmes SBAS.

L'étalonnage, ou la mesure du temps de propagation à travers un système, est un point particulièrement pertinent pour le maintien des références horaires. Pour évaluer la différence entre deux horloges de façon précise, il est absolument essentiel de pouvoir estimer le temps de propagation à travers un système horaire. A cet égard, les expériences à ligne de base nulle (*zero-baseline*) [Brown, 1991] jouent un rôle important. Du fait de leur disponibilité permanente, les systèmes SBAS constituent des plates-formes bien adaptées aux mesures de longue durée dans ce domaine.

#### 3.5.8.1 Temps et stations de référence

Pour les systèmes SBAS, la datation des observations est une opération problématique. En effet, toutes les observations sont effectuées dans les stations de référence SBAS (SRS, *SBAS reference stations*), qui sont indépendantes. Pour disposer d'une base de temps uniforme au niveau de chaque SRS, une horloge reposant sur le temps du GPS est utilisée comme référence.

En règle générale, chaque SRS héberge plusieurs équipements de station de référence ou RSE (*reference station equipment*). Ces stations assurent la redondance nécessaire pour fournir des données à la station SBAS principale (SMS, *SBAS master station*) en cas de panne unique survenant dans la station SRS. En plus d'autres composants standard disponibles sur le marché, l'équipement RSE contient généralement une fréquence étalon à jet de césium (horloge atomique).

Cette fréquence étalon doit respecter certaines spécifications pour présenter un intérêt dans une architecture SBAS. Ces spécifications fonctionnelles concernent notamment:

- la précision;
- les possibilités de réglage;
- la stabilité;
- le bruit de phase en bande latérale unique;
- le temps de chauffe.



La précision doit être au moins égale à  $2 \times 10^{-12}$  sans vieillissement pendant la durée de vie du tube à césium, de façon à pouvoir régler l'appareil sur une fréquence spécifiée. L'étalon de fréquence fournit à chaque récepteur de station de référence un signal de référence sinusoïdal à 10 MHz, avec une stabilité minimale de  $2 \times 10^{-13}$  sur 24 h, qui permet de comparer précisément des signaux GEO au temps du GPS. Les étalons de fréquence des stations SRS ont besoin d'une interface de communication pour l'interrogation et l'ajustement des paramètres.

La sortie à 10 MHz de l'étalon de fréquence à jet de césium est parfois connectée à l'entrée d'un récepteur GPS qui fournit un signal de sortie à 1 ips utilisé comme époque des observations. Au démarrage, l'horloge du récepteur est réglée sur l'heure du GPS. Les récepteurs de la station SRS sont donc approximativement synchronisés à quelques microsecondes près. Le flux de données en sortie de chaque récepteur de la station SRS contient un paramètre qui fournit le décalage du récepteur 1 ips par rapport au temps du GPS. Ensuite, la sortie à 1 ips est cadencée par l'horloge à césium en entrée. En substance, la sortie du récepteur SRS est une horloge non asservie, condition nécessaire à l'établissement d'une échelle de temps indépendante.

### 3.5.8.2 Temps et station principale

La station SMS héberge des installations de traitement nécessaires à la production des corrections transmises par le satellite GEO et à leur vérification. Elle doit en outre exécuter des fonctions d'exploitation et de maintenance et disposer d'une horloge GPS pour la synchronisation avec le système GPS.

La station SMS assure plusieurs fonctions. Parmi celles qui font intervenir le temps, directement ou indirectement, on peut citer:

- a) la détermination des orbites des satellites GPS/GEO;
- b) la surveillance de la qualité du signal émis dans l'espace (SIS, *signal-in-space*);
- c) la production du temps du réseau SBAS (SNT, *SBAS Network Time*);
- d) la production du message de décalage SNT/UTC;
- e) la génération des messages SBAS.

Les données issues des équipements de chaque station SRS sont transmises au processeur de corrections de la station SMS et comparées. Les horloges sont comparées les unes aux autres pour déterminer si l'une d'entre elles présente un dysfonctionnement, c'est-à-dire un décalage important. Cette procédure constitue le début du processus d'établissement du temps SNT, qui fait l'objet du § 3.5.8.3.

### 3.5.8.3 Temps et réseau SBAS

Pour qu'un signal SBAS puisse venir compléter des signaux de navigation GPS, les émissions SBAS doivent être synchronisées avec ces signaux, c'est-à-dire avec le temps du GPS. Pour ce faire, le temps du réseau SBAS (SNT, *SBAS network time*) est pris comme temps de référence du système SBAS et asservi sur le temps du GPS. Des mesures effectuées au niveau de toutes les stations de référence SRS sont envoyées à chaque station principale, qui, à partir de ces mesures, calcule une échelle de temps SNT indépendante en appliquant un algorithme spécial. Toutes les horloges «fiabiles» participant à ces mesures servent à établir l'échelle de temps SNT. Cette échelle de temps est ensuite asservie sur les signaux GPS à l'aide du même algorithme. L'algorithme SNT, décrit ici dans ses grandes lignes, est mis en œuvre dans chaque station principale.

Les messages SBAS comprennent des corrections rapides et des corrections lentes qui sont émises par le satellite GEO. Les corrections rapides sont déterminées pour chaque engin spatial GPS. On utilise à cet effet le message de correction à long terme diffusé par un satellite GEO, et ce afin de retirer les horloges à long terme de la correction rapide extrapolée. A noter que le total des corrections à long terme et le total des corrections rapides doivent être additionnés.

On estime qu'un asservissement quotidien n'est pas suffisant pour maintenir le temps SNT proche du temps du GPS. L'asservissement matériel est donc complété par des messages de correction qui sont intégrés aux messages de navigation SBAS. Le satellite GEO émettra donc des messages de correction lente (messages de type 9) et un message de correction rapide (message de type 2-5). La correction lente sera actualisée toutes les deux minutes au minimum et constituera la majeure partie de la correction. Les corrections rapides seront émises au moins une fois par minute.

### 3.5.9 Temps et satellite GEO

La manière dont le temps influe sur le satellite GEO est illustrée en prenant comme exemple le système WAAS. L'horloge à césium du sous-système GUS est asservie sur le temps SNT. Une fois par jour, la station SMS émet des commandes d'asservissement de l'horloge du GUS afin de réduire l'éventuel décalage par rapport au temps du GPS. Cette horloge commande la synchronisation du message de navigation WAAS émis par le satellite GEO.

Le système de communication géostationnaire (GCS, *geostationary communications system*) est composé du sous-système générateur de signaux (SGS, *signal generator subsystem*), du sous-système radiofréquences en liaison montante (RFU, *RF Uplink*) et du satellite géostationnaire. Le SGS fournit au RFU un code de bruit blanc pseudo-aléatoire (BPA) de type C/A ainsi qu'un signal de message WAAS à une fréquence intermédiaire (FI) de 70 MHz. Le RFU convertit la fréquence FI vers la fréquence RF de la liaison montante (6 455,42 MHz), l'amplifie et émet le signal vers le satellite GEO INMARSAT-3.

La liaison montante en bande C reçue au niveau du satellite GEO est transposée en fréquence en vue de l'émission sur les liaisons descendantes de fréquence L1 et en bande C. Les liaisons descendantes sont diffusées vers les utilisateurs et vers le sous-système RFU dans des faisceaux à polarisation circulaire dextrogyre (RHCP) assurant une couverture mondiale. Le RFU reçoit les signaux de fréquence L1 et en bande C émis par le satellite GEO INMARSAT-3. Les signaux sont amplifiés et la bande C est convertie vers la fréquence L2. Le RFU fournit les signaux L1 et L2 au SGS.

Le récepteur du GUS reçoit les signaux acheminant le code BPA C/A aux fréquences L1 et L2 provenant du RFU. Il mesure les paramètres de pseudo-distance liés au code et à la phase de la porteuse pour les deux signaux en entrée. Ces informations sont ensuite envoyées aux processeurs et au générateur de signaux, dont les algorithmes et le matériel calculent des signaux retour de correction du temps, de la fréquence et de la phase. De plus, le processeur code le message WAAS au moyen d'un algorithme de correction d'erreur directe (CED).

Ces signaux de correction ajustent le temps, la fréquence et la phase du signal de code BPA C/A pour éliminer la distance de la liaison montante, la vitesse de variation de cette distance et les effets ionosphériques sur cette liaison. Le générateur de signaux combine les données du message WAAS codé CED avec ce code BPA C/A corrigé de liaison montante, qui est transmis au RFU sous forme de signal de fréquence intermédiaire FI. La fréquence étalon fournit des références de fréquence précises et stables à tous les convertisseurs, générateurs de signaux et récepteurs des sous-systèmes RFU et SGS.

Le décalage de fréquence des sorties à 5 et 10 MHz doit être réglable sur un intervalle de  $\pm 1 \times 10^{-9}$ . La possibilité de réglage est une exigence qui ne s'applique qu'à la fréquence étalon au niveau du sous-système SGS, car elle doit permettre de corriger tout décalage de l'oscillateur de transposition local du satellite GEO.

Le sous-système de radiofréquences en liaison montante (RFU) transmet au satellite GEO les signaux provenant du SGS, qui contiennent les données d'intégrité et de correction en même temps qu'un signal de télémétrie de type GPS. Etant donné que le RFU reçoit des signaux émis par les satellites GEO à des fréquences situées dans la bande C et dans la bande L, il régule, sur ordre du SGS, les niveaux de puissance de la liaison montante pour prévenir les brouillages ainsi que les variations de l'affaiblissement d'émission. Le RFU assure aussi la transposition du signal montant vers la bande C et celle du signal descendant de la bande C vers la fréquence L2.

Le sous-système à satellites GEO est composé d'un satellite en orbite géostationnaire INMARSAT-3 AOR-E situé à une longitude de 15,5° O. Le segment spatial INMARSAT-3 fournit les ressources nécessaires pour l'émission de signaux de navigation dans une largeur de bande de 2,2 MHz centrée sur 1 575,42 MHz.

#### 3.5.9.1 Systèmes SBAS et diffusion de l'heure

Les systèmes SBAS ont en général pour mission secondaire de diffuser l'heure. En principe, l'étalon de référence horaire d'un système SBAS est un temps universel coordonné (UTC) tenu à jour par une organisation nationale ou internationale. L'heure est diffusée aux utilisateurs dans un message de type 12 (MT12), qui contient le décalage horaire entre le temps réseau SBAS (SNT) et le temps UTC. Plusieurs laboratoires nationaux de référence horaire sont chargés de déterminer ce décalage. A cet effet, ils surveillent les satellites géostationnaires des systèmes SBAS qui sont visibles à leur niveau. Ils calculent la différence horaire entre la

valeur d'époque du début d'un message SBAS et le signal à 1 ips du laboratoire correspondant à la réalisation physique du temps UTC(lab). Les données sont ensuite envoyées aux stations principales SBAS (SMS) via une interface. A partir du décalage SNT/UTC reçu, les stations SMS créent un message MT12 puis l'envoient au sous-système de liaison montante géostationnaire (GUS), qui, à son tour, le transmet au satellite GEO. Le message MT12 a pour objet de fournir aux utilisateurs une source horaire précise dont la référence est le temps UTC.

Les systèmes SBAS s'annoncent comme la prochaine génération de système de transfert de signaux horaires au niveau mondial. De nombreux éléments viennent étayer ce point de vue. Premièrement, les satellites géostationnaires sont toujours visibles, ce qui permet de «verrouiller en phase» de multiples vues, et ce en continu. Il suffit pour cela que les vues se calent sur le signal du satellite commun. Deuxièmement, les émissions provenant des satellites géostationnaires peuvent être captées par des antennes directionnelles à gain élevé, qui produisent des signaux plus propres et sont moins sensibles aux brouillages et aux sauts de cycle. Les signaux des satellites géostationnaires sont produits et commandés par un réseau de récepteurs GPS à césium, qui fournissent une référence assez stable. Troisièmement, le message SBAS émis par les satellites géostationnaires fournit aussi des estimations en temps réel du retard des signaux GPS dû à la traversée de l'ionosphère; cette fonctionnalité s'appuie sur un modèle basé sur des observations de satellites du GPS réalisées en temps réel.

Les systèmes de navigation diffusent leur échelle de temps de référence et, parfois, des informations sur la relation entre cette échelle de référence et d'autres échelles de temps. Par exemple, le système GPS diffuse ce que l'on appelle le «temps du GPS» ainsi que la relation entre cette échelle et le temps universel coordonné UTC (USNO), qui est tenu à jour par l'Observatoire naval des Etats-Unis. Grâce au système GPS, un utilisateur peut caler donc une horloge locale sur le temps UTC (USNO), et en surveillant le système en continu, garder la trace de la qualité de fonctionnement de son horloge locale par rapport au temps UTC(USNO). A ce jour, du fait des secondes intercalaires, le temps du GPS et le temps UTC diffèrent de 15 s.

Le temps du réseau WAAS (WNT), le temps du réseau EGNOS (ENT) et le temps du réseau MSAS (MNT) sont tous des estimations SBAS du temps du GPS. L'utilisateur devrait être en mesure de déterminer le décalage de sa référence horaire locale par rapport au temps WNT ou au temps ENT. Dans leur configuration d'exploitation définitive, les systèmes SBAS fourniront chacun à l'utilisateur une estimation de la différence entre leur propre temps réseau SNT et le temps UTC. Les systèmes WAAS et EGNOS émettront des données de correction indiquant la différence entre le temps WNT ou ENT et le temps UTC. L'utilisateur pourra utiliser ces données pour caler une horloge sur le temps UTC. A noter qu'elles ne seront peut-être pas toujours disponibles aux premières étapes de développement.

### 3.5.9.2 Diffusion des données horaires au format CGGTTS

La communauté du temps a développé, dans le contexte d'un groupe de travail *ad hoc* appelé CGGTTS, un format visant à faciliter l'échange de données horaires GPS entre utilisateurs souhaitant disposer d'un transfert de signaux horaires de haute précision. Ces utilisateurs sont essentiellement les grands laboratoires mondiaux de référence horaire. Sans entrer dans les détails, il suffira d'indiquer ici que ce format comprend deux colonnes contenant des données ayant un rapport avec le processus de référence horaire. Ces deux colonnes sont reproduites au Tableau 3-1. La première ligne contient l'en-tête des colonnes et la seconde indique les données qui sont contenues dans la colonne correspondante. «Lab MC» désigne l'horloge principale (*Master Clock*) du laboratoire qui effectue et publie les mesures. SVN désigne l'horloge d'un satellite particulier, dont le numéro SVN est également indiqué dans le format du message. «Temps du GPS» désigne le temps du système GPS.

TABLEAU 3-1

#### Données pertinentes pour la conservation du temps

REFSV	REFSYS
Lab MC – SVN (pour le satellite GPS)	Lab MC – Temps du GPS

Etant donné que les messages provenant des satellites du système WAAS et les messages émis par les satellites du GPS diffèrent quant au format et au contenu, le format standard du message horaire CGGTTS a dû être modifié. C'est désormais la version modifiée du message, proposée par NovAtel, qui fait l'objet d'un examen minutieux de la part du CGGTTS. La modification proposée consiste à compléter les deux colonnes susmentionnées (voir le Tableau 3-2). Une troisième colonne contenant des informations horaires est ajoutée: la colonne libellée «GAT» («G» pour «satellite géostationnaire», «A» pour WAAS [ou «B» pour EGNOS] et «T» pour «temps»). Cette proposition de nouveau format a été pensée pour assurer une continuité avec la convention adoptée précédemment et pour continuer de prendre en compte la spécificité du message de navigation WAAS ainsi que la façon dont les corrections sont appliquées à la pseudo-distance (mesurée) observée. Le Tableau 3-2 indique la façon d'interpréter les données du format CGGTTS révisé lorsque celui-ci est appliqué à un satellite SBAS.

Dans le format CGGTTS proposé, la colonne REFSV contient l'écart entre l'horloge locale et l'instant d'émission du signal par le satellite géostationnaire. Cette colonne est analogue à celle applicable aux satellites du GPS. En référence au Tableau 3-1, la première case de la seconde ligne du Tableau 3-2 s'intitule «Lab MC-Geo». «Geo» ne correspond toujours pas au temps SNT du réseau SBAS, mais on s'en approche en appliquant les corrections horaires lentes figurant dans le message de type 9. La deuxième colonne s'intitule désormais «Lab MC-SBAS». «SBAS» ne correspond toujours pas au temps SNT, il est donc appelé «temps SBAS», par analogie au temps du GPS. Après avoir appliqué les corrections rapides figurant dans les messages de type 2 à 5, on obtient finalement le décalage de l'horloge locale par rapport au temps SNT.

TABLEAU 3-2

**Proposition de format CGGTTS révisé**

<b>REFSV</b>	<b>REFSYS</b>	<b>GAT</b>
Lab MC – Geo	Lab MC – SBAS	Lab MC – SNT
Pseudo-distance mesurée + iono + tropo + orbite	Corrections horaires lentes	Corrections horaires et orbitales rapides
Orbite Geo tirée de MT9	Horloge tirée de MT9	MT2 (corrections rapides)

Les transmissions WAAS sont surveillées au laboratoire USNO à l'aide d'un système corrélateur à bande étroite de NovAtel. Les informations sont traitées quotidiennement au moyen d'un programme qui produit des données en sortie conformément à la proposition de format CGGTTS révisé.

Le traitement appliqué fournit le décalage de l'horloge principale du laboratoire USNO par rapport au temps WNT. Cette information sera à terme utilisée pour construire un message MT12, qui sera émis par le système WAAS. Ce message, envoyé par les satellites géostationnaires SBAS, permettra aux utilisateurs de connaître la différence entre le temps SNT et le temps UTC (lab). Il convient de souligner que l'horloge principale du laboratoire USNO qui fournit le temps au corrélateur à bande étroite du système WAAS utilisé pour effectuer les mesures est une estimation en temps réel du temps UTC (USNO).

Pour cette analyse, on a choisi une durée de données de 40 jours (du jour julien modifié [JJM] 52167 au JJM 52207). Ce jeu de données n'est pas continu. Pour faciliter le transfert des données du laboratoire USNO vers un autre ordinateur via un modem téléphonique, plusieurs sous-ensembles des données ont été transmis pendant les périodes d'utilisation minimale.

Etant donné que le récepteur utilisé au cours de cette expérience n'a pas été étalonné dans l'absolu (temps de propagation mesurés à travers tous les composants du système), les valeurs obtenues pour USNO MC – Temps du GPS au moyen du récepteur WAAS ont été comparées avec celles obtenues au moyen des récepteurs étalonnés du laboratoire USNO. Une valeur moyenne des différences sur une journée a été calculée. Cette moyenne a été utilisée comme une valeur approchée des différences systématiques entre le récepteur NovAtel et le récepteur USNO utilisé pour transmettre les données GPS à la station de commande principale GPS.

La Figure 3-4 présente les données de la colonne REFSV qui sont produites conformément au format CGGTTS révisé. Elle montre la différence entre la station de commande principale USNO et le temps provenant du satellite géostationnaire WAAS après application des corrections liées aux temps de propagation dans l'ionosphère et la troposphère, des corrections de l'orbite du satellite géostationnaire figurant dans le message MT9, et des corrections des pseudo-distances mesurées.

Les corrections horaires contenues dans le message MT9 ont ensuite été appliquées aux données. Les résultats sont représentés à la Figure 3-5. On voit que les décalages ont été considérablement réduits. Il reste néanmoins un écart assez important à partir du JJM 52198 environ. Cet écart correspond à une perturbation ionosphérique relativement forte qui s'est produite vers le 13 octobre 2001.

L'application des corrections rapides figurant dans les messages MT2-5 se traduit par une amélioration supplémentaire, comme le montre la Figure 3-6.

Si les écarts UTC(USNO) – WNT ont certes été ramenés à des niveaux compatibles avec la spécification WAAS, ils sont toujours importants, en prévision d'une diffusion horaire, au regard des valeurs obtenues à l'aide du GPS. La Figure 3-7 présente des moyennes journalières calculées à partir des points individuels de la Figure 3-6. On observe un étalement des valeurs de 40 ns environ. Cet étalement important est probablement dû à des variations dans les procédures opératoires appliquées pendant les premières phases de la mise en œuvre du système WAAS.

FIGURE 3-4

## UTC (USNO) – GEO

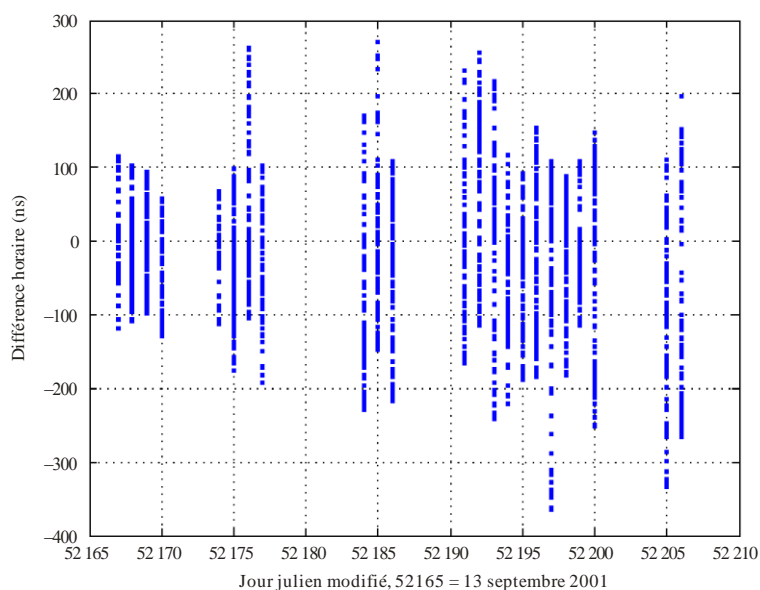
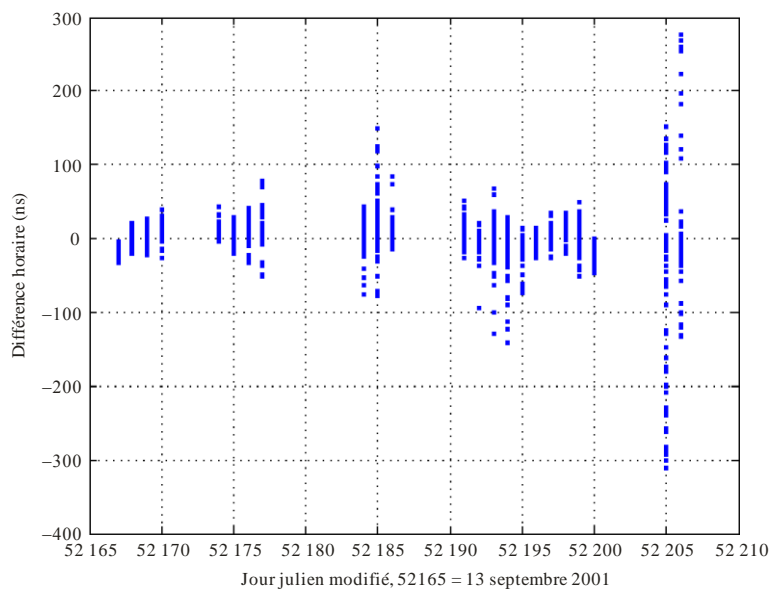


FIGURE 3-5

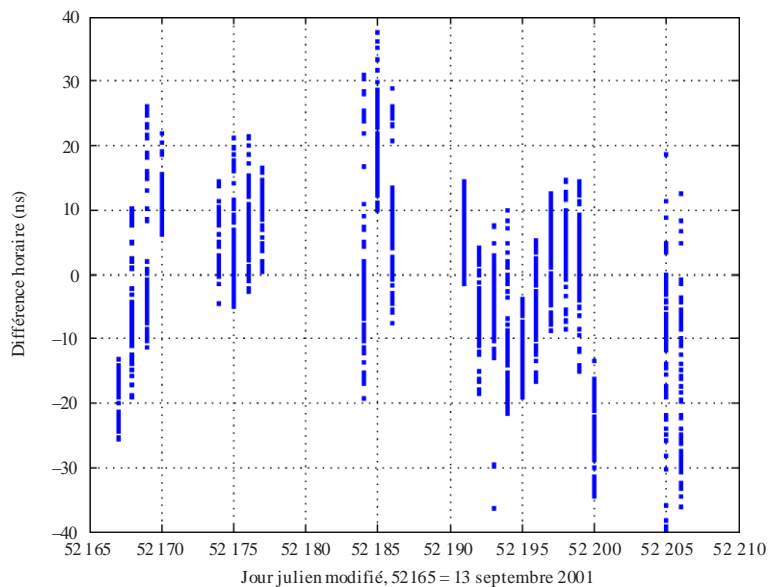
## UTC (USNO) – WAAS



Sat\_time\_freq-03-05

FIGURE 3-6

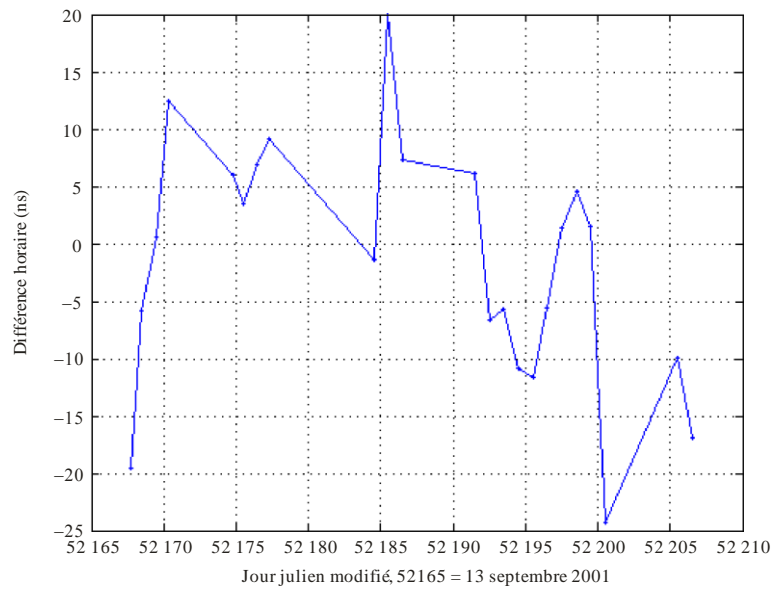
## UTC (USNO) – WNT



Sat\_time\_freq-03-06

FIGURE 3-7

**Moyennes journalières de UTC p(USNO) – WNT**

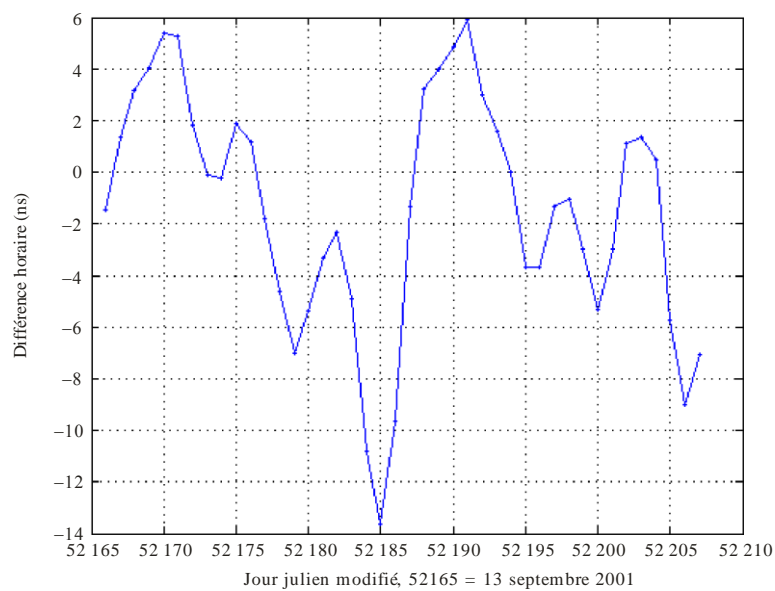


Sat\_time\_freq-03-07

La Figure 3-8 présente les moyennes sur deux jours des valeurs UTC (USNO) – temps du système GPS. Dans ce cas, l'étalement est de 20 ns environ.

FIGURE 3-8

**Moyennes sur deux jours des valeurs UTC (USNO) – Temps du GPS**



Sat\_time\_freq-03-08

### 3.5.9.3 Systèmes SBAS et diffusion de fréquences

Le transfert de signaux horaires au moyen de satellites du GPS est très couramment utilisé depuis de nombreuses années à des fins de comparaisons entre les laboratoires du temps du monde entier et pour le calcul du temps atomique international (TAI). Il suffit que deux stations observent simultanément le même satellite pour obtenir, par simple différence des données GPS acquises par chacune d'elles, le décalage horaire absolu entre les horloges qui alimentent les récepteurs GPS. Il est aussi nécessaire de connaître les temps de propagation internes de chaque station (antenne, câbles, récepteur, etc.). Si l'on considère que ces temps sont constants, on peut effectuer un transfert de fréquences entre les deux stations, ce qui donne accès aux variations du décalage horaire entre les deux horloges et donc à leur stabilité.

Les récepteurs GPS géodésiques sont aujourd'hui capables de traiter plusieurs canaux (ce qui permet d'observer plusieurs satellites en même temps) et deux fréquences (ce qui permet de supprimer le temps de propagation dans l'ionosphère). Ainsi, en utilisant toutes les mesures de code, on peut étendre la technique classique pour obtenir des résultats plus précis. Par ailleurs, ces récepteurs sont capables d'enregistrer les données observables de code et de phase de la porteuse. Or, cela est bien connu, ces dernières offrent des perspectives encourageantes en ce qui concerne le transfert de fréquences précises pour des périodes d'intégration comprises entre plusieurs heures et plusieurs jours.

Certains récepteurs GPS peuvent en outre poursuivre les signaux GEO, c'est-à-dire le message de type GPS provenant de la charge utile de navigation en bande L de satellites géostationnaires. Ces signaux additionnels présentent un avantage important pour le transfert de signaux horaires/de fréquence. Le satellite GEO étant toujours visible par définition, il est possible de se verrouiller en phase sur son signal en continu. Cette observabilité permanente devrait aussi permettre de simplifier le traitement des signaux. De plus, le signal GEO n'est pas exposé aux dégradations intentionnelles telles que la disponibilité sélective.

Cela étant, l'utilisation de satellites GEO pose certains problèmes. Tout d'abord, ils émettent sur une fréquence unique, ce qui empêche l'utilisation de la combinaison bien connue «ionosphere-free», qui permet d'éliminer les perturbations liées à l'ionosphère. L'effet de l'ionosphère peut être corrigé à partir des informations diffusées par les systèmes SBAS ou en calculant la différence code/phase. De fait, l'ionosphère fausse le code et la phase de façon identique, mais avec des signes opposés. La correction ionosphérique s'obtient donc facilement en calculant la moitié de la différence code/phase.

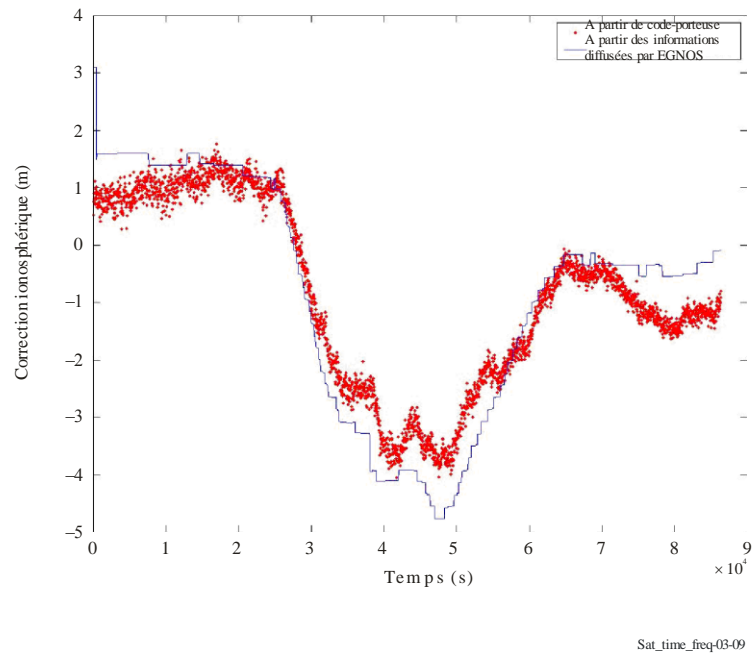
La Figure 3-9 présente les résultats obtenus sur une ligne de base BIPM/CNES (600 km environ) au moyen d'antennes paraboliques, les deux étant pointées vers le satellite INMARSAT AOR-E (EGNOS).

Dans un premier temps, nous pouvons comparer la correction ionosphérique calculée sur l'une des stations à partir de la différence code-porteuse par rapport à la correction diffusée par EGNOS.



FIGURE 3-9

**Corrections ionosphériques obtenues à partir de la différence code/phase d'une part et à partir des informations diffusées d'autre part**

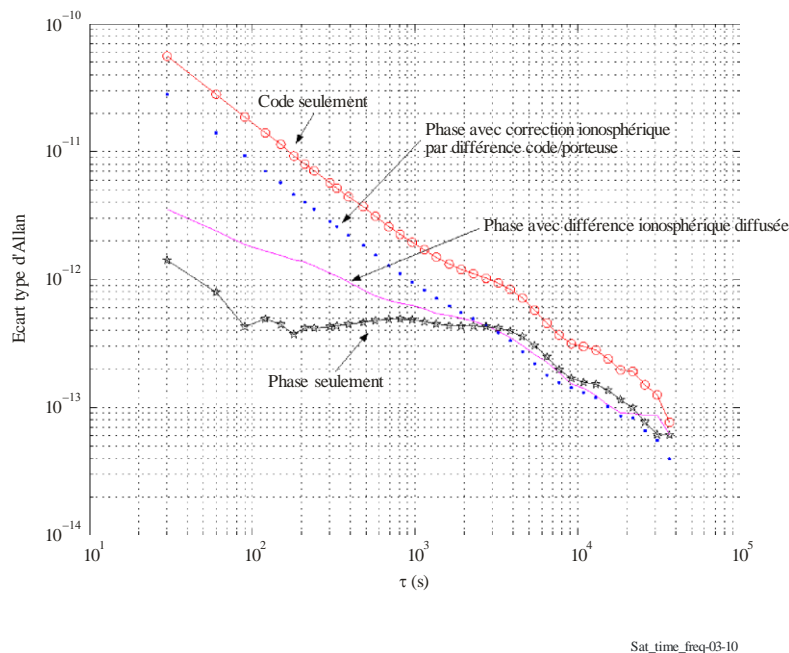


Il apparaît incontestablement que la correction ionosphérique calculée à partir de la différence code-porteuse est plus bruitée mais qu'elle est continue, contrairement aux informations diffusées par EGNOS qui présentent de nombreuses discontinuités (courbe en escalier).

La Figure 3-10 permet de comparer la stabilité de la solution de l'équation horaire avec correction ionosphérique (par les deux méthodes) et sans correction.

FIGURE 3-10

### Écart type d'Allan des différentes solutions de l'équation horaire



La solution horaire sans correction de la phase est à l'évidence la meilleure à court terme, mais à moyen terme, l'absence de correction ionosphérique a des répercussions sur la stabilité. La solution horaire utilisant la phase avec correction ionosphérique par différence code/porteuse est très bruitée à court terme en raison du bruit du code. Après un temps d'intégration d'une heure environ, la phase non corrigée et la phase intégrant l'une ou l'autre des corrections sont très proches.

Il ressort de ce qui précède que le rapport signal/bruit revêt une importance particulière. Il peut être amélioré par l'utilisation d'une antenne directionnelle de grande taille, ce qui devrait présenter un avantage considérable pour le verrouillage de phase continu (réduction du nombre de sauts de cycle) et pour la correction ionosphérique par différence code/phase.

#### 3.5.10 Systèmes SBAS et transfert du temps

Il est parfois utile de régler une horloge à distance pour la caler sur une échelle de temps donnée ou, simplement, de connaître la différence entre une horloge locale et une horloge distante. Pour ce faire, on peut utiliser la technique dite «technique des observations simultanées» (*common view technique*). Selon cette technique, deux stations observent simultanément le même satellite. Chacun des utilisateurs des deux stations doit enregistrer la différence par rapport à son horloge locale ou à sa référence horaire locale, au même instant, au moyen du même satellite. Cette opération est généralement réalisée à l'aide d'un récepteur de comparaison d'horloges GPS. Cela étant, cette fonctionnalité étant intégrée dans les récepteurs modernes, on pourra éventuellement réaliser cette opération au moyen d'un récepteur plus évolué.

L'utilisation d'un système SBAS pour le transfert du temps fait intervenir deux utilisateurs. Pour optimiser les résultats, ceux-ci doivent observer le même satellite au même instant et appliquer des techniques de réduction des données identiques lors du calcul du décalage entre leur horloge locale et le temps SNT. Cette procédure présente l'avantage de réduire de façon significative les effets liés à une éventuelle source d'erreur commune.

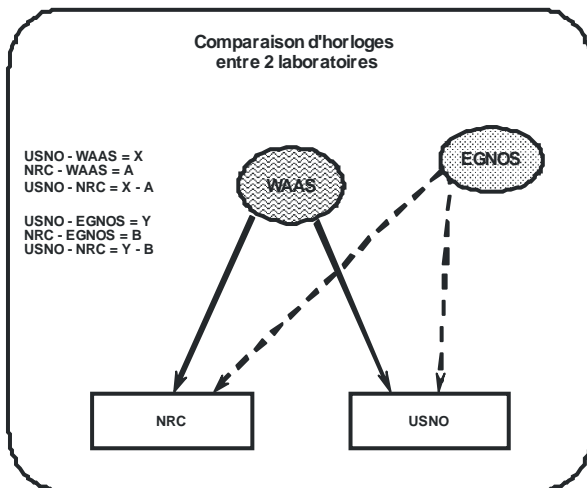
#### 3.5.11 Comparaison d'horloges entre deux laboratoires

Actuellement, les deux systèmes SBAS sont observables sur une vaste partie du globe, ce qui, en matière de comparaison d'horloges, offre quelques fonctionnalités supplémentaires. Le schéma de la Figure 3-11 montre comment deux laboratoires peuvent s'appuyer sur deux systèmes SBAS pour comparer leurs horloges. Chacun

des laboratoires observe les deux systèmes et les résultats obtenus à partir de l'un des systèmes servent à contrôler les résultats obtenus à partir de l'autre.

FIGURE 3-11

**Comparaison d'horloges entre deux laboratoires du temps mettant en jeu deux systèmes SBAS pour le calcul de la différence horaire entre les deux laboratoires (schéma synoptique)**



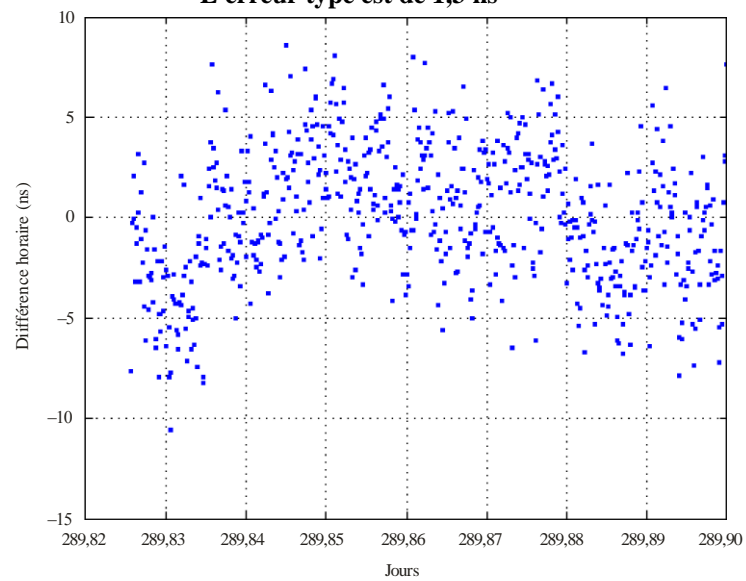
Sat\_time\_freq-03-11

Dans cet exemple, les observations sont réalisées au laboratoire USNO de Washington (Etats-Unis) et au NRC d'Ottawa (Canada) en s'appuyant sur les signaux horaires émis par le satellite GEO WAAS et le satellite GEO ESTB. La Figure 3-12 montre la différence entre les horloges principales des laboratoires USNO et NRC obtenue à partir du satellite GEO WAAS et la Figure 3-13 présente cette même différence obtenue au moyen du satellite GEO ESTB. Les récepteurs utilisés au cours de cette expérience n'ayant pas été étalonnés, un point zéro arbitraire a été retiré.

*Par conséquent, cet exemple ne donne qu'une indication de la précision susceptible d'être atteinte à l'heure actuelle au moyen de cette technique.* Une régression linéaire de chacun des ensembles de données donne une erreur type de 1,3 ns et 2,1 ns respectivement.

FIGURE 3-12

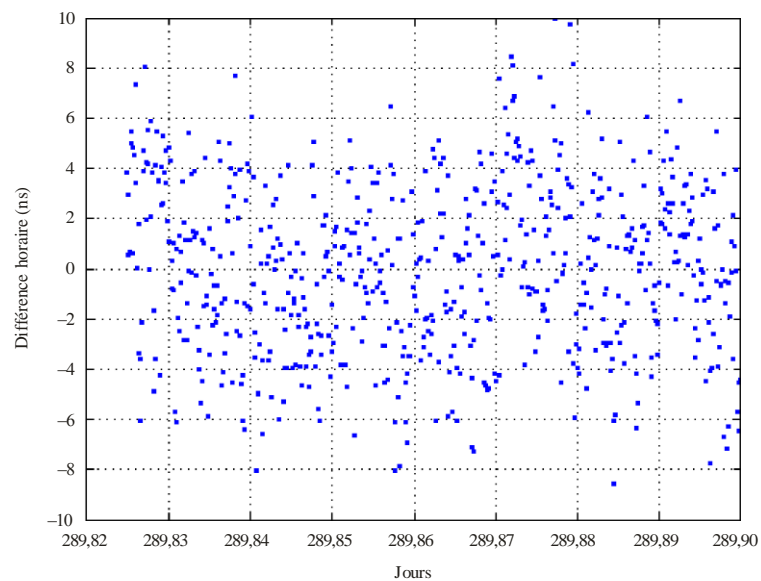
Différence entre les horloges de l'USNO et du NRC calculée au moyen du satellite GEO WAAS  
L'erreur type est de 1,3 ns



Sat\_time\_freq-03-12

FIGURE 3-13

Différence entre les horloges de l'USNO et du NRC calculée au moyen du satellite GEO EGNOS  
L'erreur type est de 2,1 ns



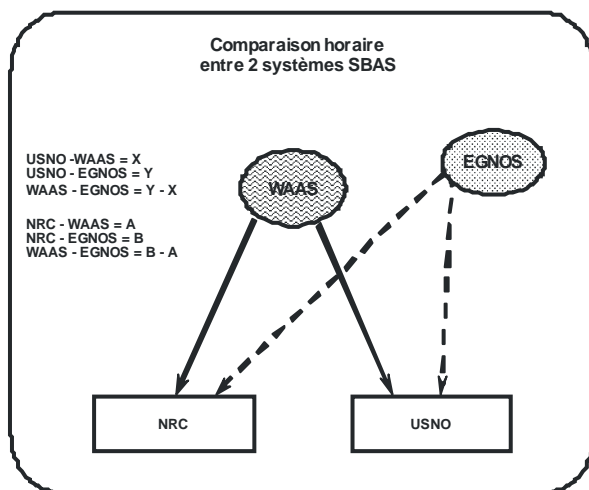
Sat\_time\_freq-03-13

### 3.5.12 Comparaison horaire entre deux systèmes SBAS

Le schéma de la Figure 3-14 montre comment deux laboratoires peuvent comparer la différence horaire entre deux systèmes SBAS. Chaque laboratoire se charge de contrôler l'autre.

FIGURE 3-14

**Comparaison d'horloges entre deux laboratoires du temps mettant en jeu deux systèmes SBAS pour le calcul de la différence horaire entre les deux systèmes (schéma synoptique)**



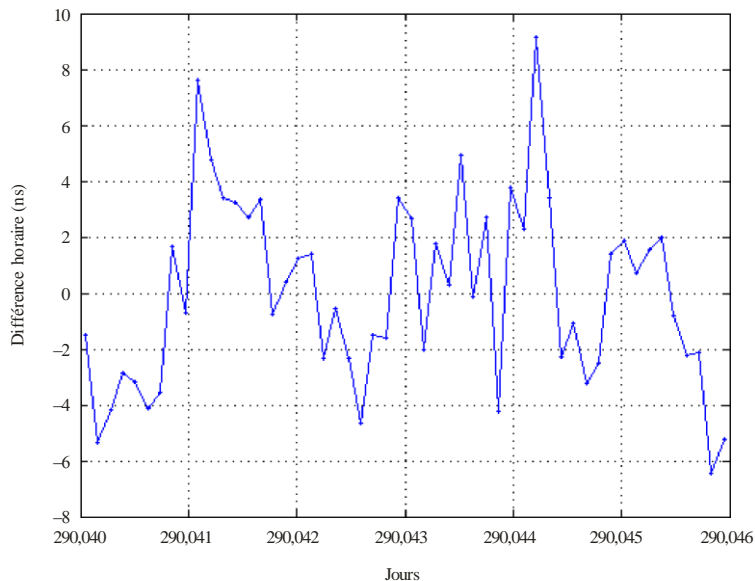
Sat\_time\_freq-03-14

La Figure 3-15 montre la différence entre le temps WNT et le temps ENT obtenue à l'observatoire USNO après régression linéaire appliquée aux données d'observation. Là encore, les récepteurs n'ayant pas été étalonnés, ce graphique donne à titre indicatif la précision susceptible d'être atteinte à l'heure actuelle au moyen de cette technique. L'erreur type d'une régression linéaire appliquée à ces données est de 1,2 ns.

La Figure 3-16 montre la différence entre le temps WNT et le temps ENT obtenue au NRC. L'erreur type d'une régression linéaire appliquée à ces données est quasiment identique à celle obtenue à l'observatoire USNO: elle est égale à 1,0 ns.

FIGURE 3-15

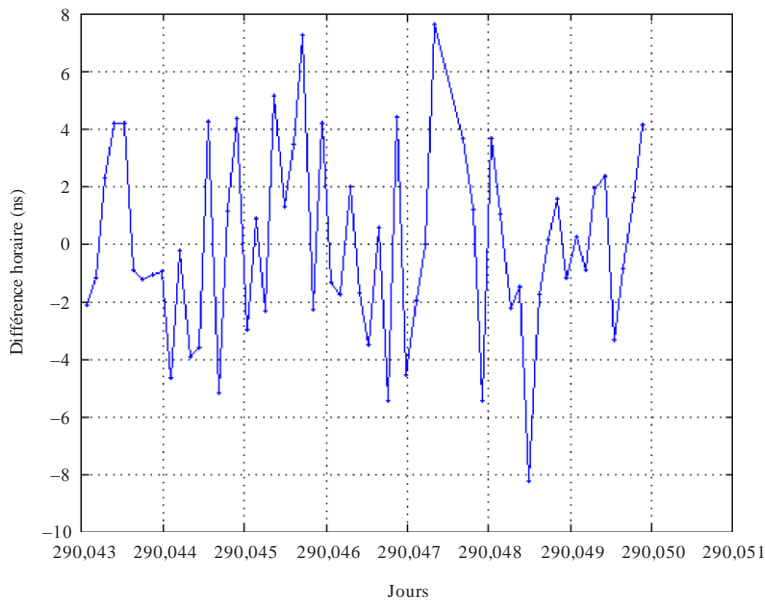
**Différence entre les systèmes WAAS et EGNOS obtenue à partir de mesures effectuées à l'USNO  
L'erreur type est égale à 1,2 ns**



Sat\_time\_freq-03-15

FIGURE 3-16

**Différence entre les systèmes WAAS et EGNOS obtenue à partir de mesures effectuées au NRC  
L'erreur type est égale à 1,0 ns**



Sat\_time\_freq-03-16

### 3.5.12.1 Systèmes SBAS et communauté du temps

Un système SBAS peut fournir (ou fournira) des signaux horaires partout dans le monde à des fins d'enregistrement des événements, quels qu'ils soient. Il fournira aussi, à l'usage de la communauté du temps (qui désigne l'ensemble des spécialistes des références horaires), un signal horaire très stable et non dégradé par la disponibilité sélective. La source se situant toujours approximativement en un même point dans le ciel, il est possible d'utiliser une antenne à gain élevé, qui fournit aux utilisateurs fixes un signal de très bonne qualité. Le décalage entre le temps SNT et le temps UTC est transmis dans le message de navigation SBAS. Ce signal sera disponible en permanence.

Ce type de signal offre aux spécialistes des références horaires des possibilités inhabituelles. Il devrait notamment permettre de *développer des systèmes horaires moins onéreux*. On peut aujourd'hui utiliser des cristaux bon marché dans les systèmes reposant sur des étalons atomiques pour leur servir de volant (*flywheel*) pendant qu'ils intègrent le temps GPS en vue de supprimer les effets de la disponibilité sélective. En l'absence de disponibilité sélective, il sera possible de *détecter quasi instantanément tout comportement anormal* dans les systèmes horaires, alors que dans le système GPS, il est nécessaire d'attendre pour savoir si les phénomènes transitoires sont dus à la disponibilité sélective ou à un comportement anormal de l'horloge. Si l'observateur se situe dans l'empreinte de deux satellites d'émission SBAS, il dispose d'un *contrôle de redondance immédiat*, qui peut servir à contrôler, de façon extrêmement robuste, de nombreux systèmes synchronisés.

## Références

- BENEDICTO J. *et al.* [1998], «EGNOS: the European Satellite Based Augmentation to GPS and GLONASS», *Proc. GNSS98*.
- BROWN K. R. [1991], «The theory of the GPS composite clock», *Proc. ION GPS-91*, p. 223-241 et GOUNI Ph. *et al.* [1997], «Time and Frequency aspects in EURIDIS», Forum Européen Fréquence et Temps 1997.
- BRUNET M. *et al.* [1998], «The role of time and frequency in EGNOS», PTTI 1998.
- FLAMENT D. *et al.*, [1998], «EGNOS: the European Satellite Based Augmentation to GPS and GLONASS-mission and system architecture», *Proc. GNSS98*.
- PECK S. *et al.* [1997], «WAAS network time performance and validation», *Proc. ION GPS97*, p. 1123-1131.
- PIEPLU J.-M. *et al.* [1998], «EGNOS algorithms performances status and experiment activities», *Proc. GNSS98*.

## APPENDICE A

**Brève description du contenu du message SBAS**

Type	Contenu
0	Ne pas utiliser ce GEO (réservé aux essais WAAS)
1	Assignations du masque BPA: jusqu'à 51 bits positionnables sur un total de 210.
de 2 à 5	Corrections rapides
6	Informations d'intégrité
7	Facteur de dégradation pour les corrections rapides
8	Réservé à de futurs messages
9	Message de navigation GEO (X, Y, Z, horaire, etc.)
10	Paramètres de dégradation
11	Réservé à de futurs messages
12	Temps réseau SBAS/paramètres de décalage UTC
de 13 à 16	Réservé à de futurs messages
17	Almanachs des satellites GEO
18	Masques des points de grille ionosphérique
de 19 à 23	Réservé à de futurs messages
24	Contient à la fois les corrections d'erreurs rapides et les corrections d'erreurs à long terme du satellite
25	Corrections d'erreurs à long terme du satellite
26	Corrections liées au temps de propagation dans l'ionosphère
27	Message de service SBAS
28	Matrice de covariance horloge-éphémérides
de 29 à 61	Réservé à de futurs messages
62	Message de test interne
63	Message Null



## CHAPITRE 4

**TEMPS DU SYSTÈME GPS**

	<i>Page</i>
4.1 Introduction .....	50
4.2 Mesures horaires de poursuite et calcul des éphémérides .....	50
4.3 Le temps du GPS.....	51
4.3.1 Mise en œuvre de la technique de l'horloge composite.....	52
4.3.2 Réduction de la covariance .....	52
4.3.3 Rapprochement des partitions .....	53
4.4 Le temps UTC(USNO) par rapport au temps du GPS .....	53
Références .....	53

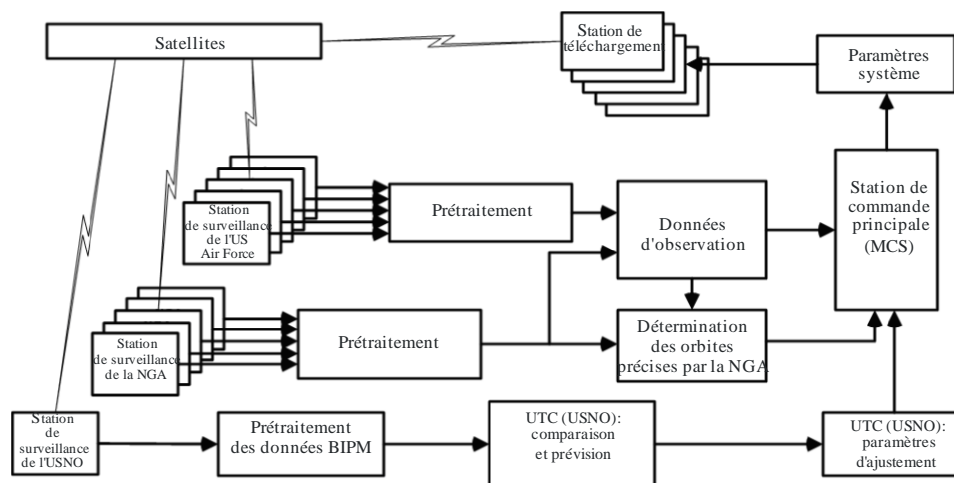
## 4.1 Introduction

Le GPS est un système d'information prédictif en temps réel. Les cinq stations de surveillance de l'armée de l'air des Etats-Unis (US Air Force) maintiennent des liaisons continues en temps réel vers la station MCS en vue de combiner les informations de statut et de poursuite à un instant donné avec celles provenant de stations de surveillance additionnelles mises en place par la NGA (National Intelligence and Geophysical Agency) pour élargir la couverture de la constellation des satellites GPS. Les données d'observation augmentées permettent de déterminer à l'avance de nouvelles variables système. Ces prévisions de la qualité de fonctionnement du système sont ensuite téléchargées vers les mémoires embarquées à bord des satellites en vue de leur émission dans les messages de navigation. Les erreurs systématiques dominantes (biais) sont éliminées et les erreurs restantes sont considérées comme aléatoires.

Le flux de données du segment de commande du système GPS est illustré à la Figure 4-1. Chaque satellite opérationnel de la série Block II/IIA GPS transporte deux horloges atomiques au césium (Cs) et deux horloges atomiques au rubidium (Rb). Chaque satellite de la série Block IIR transporte trois horloges au rubidium. La fréquence fondamentale des horloges est égale à 10,23 MHz. Les horloges des satellites et celles des stations de surveillance contribuent à l'établissement, selon des méthodes statistiques, d'un temps système continu appelé «temps du GPS». Selon le cahier des charges, le temps du GPS ne doit pas s'écarter du temps UTC de plus de 1  $\mu$ s, sachant qu'il n'intègre pas les secondes intercalaires. Après diverses corrections concernant les temps de propagation dans l'ionosphère et la troposphère, les effets de la relativité et l'incidence du matériel, le système GPS offre une référence horaire dont la précision est généralement inférieure ou égale à 25 ns. A noter néanmoins qu'en pratique, la précision peut atteindre 10 ns, voire mieux.

FIGURE 4-1

### Flux de données du segment de commande



Sat\_time\_freq-04-01

## 4.2 Mesures horaires de poursuite et calcul des éphémérides

Actuellement (2009), dans le système GPS, les mesures fondamentales comprennent les pseudo-distances et la pseudo-phase de la porteuse entre le satellite et les horloges des stations de surveillance. Le segment de commande opérationnel (OCS, *operation control segment*) compte cinq stations de surveillance, y compris la station de commande principale (MCS) de Colorado Springs, qui sont exploitées par l'armée de l'air des Etats-Unis. De nouvelles liaisons directes avec huit stations de surveillance exploitées par la NGA ont été mises en place pour compléter le segment OCS. Les pseudo-distances par rapport à tous les satellites sont mesurées par les stations de surveillance et traitées toutes les 15 min dans un filtre de Kalman contenant les constantes et les modèles correspondant aux coordonnées des stations, à la détermination des orbites et aux caractéristiques des horloges. Le filtre de Kalman permet de prévoir le temps système d'ensemble (temps du

GPS), les décalages horaires individuels des satellites et des stations de surveillance par rapport au temps du GPS ainsi que les paramètres orbitaux de chaque satellite par rapport au repère géodésique WGS84.

Les erreurs de mesure sont réparties sur les états estimés par le filtre de Kalman. Les horloges des satellites et des stations de surveillance sont estimées en fonction d'un modèle d'horloge et les erreurs sont exprimées par la matrice de covariance du modèle.

Pour calculer les orbites du système GPS, il est nécessaire de connaître la différence entre le temps UT1 et le temps UTC, et ce afin de déterminer l'orientation des orbites d'origine par rapport au repère inertiel géocentrique (ECI, *Earth-centered inertial*). Les équations de mouvement sont intégrées dans le repère ECI. Ces coordonnées sont transformées en coordonnées dans le repère géocentrique à axes fixes (ECEF, *Earth-centered Earth-fixed*) à l'aide de quatre matrices de rotation représentant le mouvement du pôle, la rotation variable, la nutation et la précession de la Terre. Les données provenant des stations de poursuite sont horodatées par rapport au temps du GPS. Dans la station MCS, un filtre de Kalman utilise les données des stations de surveillance pour produire des estimations actualisées des données horaires et de position des satellites et en fournit une prévision 14 jours à l'avance. Ces estimations sont ensuite formatées et téléchargées vers les satellites, qui se chargent de les envoyer aux utilisateurs via le message NAV-MSG, en même temps que les signaux de télémétrie. En règle générale, les téléchargements vers les satellites sont effectués toutes les 24 heures, éventuellement plus fréquemment en fonction de la dynamique et des données du système. Le message NAV-MSG contient les éphémérides des satellites, certaines données horaires, l'état du système et d'autres informations utiles à l'utilisateur [IS-GPS-2002 rev D, 2006]. La fonction essentielle du segment de commande est de prévoir les positions précises des satellites ainsi que les écarts types de leurs horloges par rapport à une base de temps commune. C'est grâce à cela que le concept GPS fonctionne dans la pratique.

### 4.3 Le temps du GPS

L'époque marquant le début du temps du GPS a été fixée à 00 h 00 de la nuit du 5 au 6 janvier 1980. Le temps du GPS est donc en retard par rapport au temps atomique international (TAI) d'une valeur constante de 19 s et, en juin 2009, il était en avance de 15 s par rapport au temps UTC. L'écart entre le temps UTC et le temps du GPS évolue chaque fois qu'une seconde intercalaire est insérée dans le temps UTC.

Alors que le GPS était en phase de développement, le concept retenu pour la synchronisation des composants du système fut celui de l'horloge principale (ou *master clock*), technique couramment utilisée dans les systèmes de télécommunication. Toutes les horloges du système devaient être référencées par rapport à une horloge unique située dans l'une des stations de surveillance. Or les systèmes de navigation par satellite nécessitent avant tout un système horaire uniforme, sans sauts ni discontinuités, capable d'assurer la cohérence de la synchronisation des différents éléments. Le service de navigation peut ainsi effectuer un radiorepérage précis et sans interruption. La première approche dite de l'«horloge principale» adoptée pour le GPS prévoyait que toutes les horloges du système soient référencées par rapport à une horloge unique située dans la station de commande principale (MCS) de Colorado Springs. Pour qu'une horloge principale soit toujours disponible, même en cas de panne, le logiciel du système pouvait, à tout moment, désigner n'importe quelle horloge des stations de surveillance comme horloge de référence principale. Lorsque cela se produisait, la commutation des horloges entraînait des modifications importantes, qui avaient des répercussions sur la qualité de fonctionnement globale de la fonction de navigation. Les écarts entre les horloges – qui étaient censées être parfaites puisque susceptibles de devenir l'horloge de référence – se répercutaient sur l'ensemble du système et dégradèrent la qualité de la navigation. Pour remédier à ces problèmes, une technique d'horloge composite a été mise au point et intégrée dans le filtre de Kalman du système.

Cette technique de l'horloge composite est analogue au concept traditionnel de combinaison d'un ensemble d'horloges, qui consiste à produire une «horloge papier» non tributaire d'un seul et unique dispositif [Stein et Filler, 1988]. La combinaison d'ensemble d'horloges est une technique bien connue, qui est utilisée pour le maintien des références horaires à long terme. Mais dans le cas de l'horloge composite, on a recours à une technique par estimateur de Kalman consistant à déterminer un temps de référence commun représentatif de la valeur moyenne des écarts horaires au sein du système, ce qui permet de produire un temps système synchronisé à court terme (moins de  $10^5$  s). Or les services de navigation ont précisément besoin d'une synchronisation cohérente à court terme. La base de temps interne commune, appelée «temps du GPS»,

constitue donc la base de synchronisation de toutes les horloges des segments GPS, en particulier des équipements d'utilisateur.

A l'origine, l'estimateur à base de filtre de Kalman destiné à calculer les paramètres système du GPS était conçu comme un filtre partitionné, pour des raisons essentiellement de capacités de calcul, mais aussi de fiabilité des estimations. Chaque partition du filtre était chargée d'estimer un sous-ensemble des horloges des satellites et des stations de surveillance. Lorsque la technique de l'horloge composite a été mise en œuvre dans le filtre, un état supplémentaire a été ajouté pour intégrer l'écart entre chaque horloge et la moyenne implicite des mesures, le calcul de la moyenne d'une horloge avec elle-même produisant, bien entendu, un résidu égal à zéro. Les estimations des états réels des horloges obtenues par cette méthode sont stables et se comportent comme prévu. Cela étant, du fait de la non-observabilité fondamentale du système, la covariance de la solution augmente de façon linéaire et sans limite. De plus, si une erreur systématique est introduite dans les états d'horloge, les résultats restent inchangés. Une pseudo-mesure a donc été ajoutée pour limiter l'augmentation de la covariance sans perturber les estimations. Mais comme les différentes partitions du filtre ne fournissent pas toutes un temps commun identique, il a été nécessaire d'harmoniser les estimations issues des partitions pour que le temps du GPS soit cohérent sur l'ensemble de la constellation de satellites.

#### 4.3.1 Mise en œuvre de la technique de l'horloge composite

Lorsque des états supplémentaires sont ajoutés au filtre de Kalman, ils se substituent à l'horloge principale d'une station de surveillance et le système GPS devient inobservable. Cela est dû au fait qu'un décalage systématique constant de tous les états d'horloge n'aurait pas d'incidence sur la pseudo-distance et que le filtre ne serait donc pas en mesure de l'observer. L'existence de cette composante d'état non observable se traduit par une augmentation linéaire de la covariance de la phase des horloges avec le temps, même si le système est parfaitement stable et que les gains du filtre sont bien définis. Voir Brown [Brown, 1991] pour un examen plus approfondi des caractéristiques. Une matrice de covariance de plus en plus grande posant à terme des problèmes numériques, une méthode de réduction de la matrice sans dégradation de la qualité du filtre a été mise en place. Il s'agit de la méthode de réduction par mise à jour des pseudo-mesures [Satin et Leondes, 1990].

#### 4.3.2 Réduction de la covariance

Cette mise à jour des pseudo-mesures prend la forme de Kalman standard:

$$P' = P - [PH^T (HPH^T + R)^{-1}]HP \quad (4-1)$$

où:

- P': matrice de covariance résultant de la mise à jour (matrice de covariance réduite)
- R: variance du bruit de la pseudo-mesure
- H: matrice de la mesure reliant la mesure au paramètre d'état.

Dans cette équation, la matrice P désigne la matrice de covariance  $n \times n$  complète de  $n$  éphémérides et états d'horloge pour les satellites et les stations de surveillance appartenant à une partition donnée. Toutes les partitions du filtre font l'objet de réductions de la covariance indépendantes sur le cycle de mise à jour du filtre. Le vecteur colonne  $H^T$ , de taille  $n \times 1$ , est construit en insérant chaque élément d'un vecteur colonne  $\hat{H}^T$ , de taille  $m \times 1$ , à l'endroit approprié dans un vecteur  $n \times 1$  rempli de zéros.

$\hat{H}^T$  est donné par la formule suivante:

$$\hat{H}^T = \frac{B^{-1}u}{u^{-1}Bu} \quad (4-2)$$

où:

- B: sous-matrice  $m \times m$  de P correspondant au vecteur colonne rempli de zéros, de taille  $m \times 1$ , contenant seulement les états de phase des horloges
- u: vecteur colonne, de taille  $m \times 1$ , rempli de 1.

Toutes les horloges d'une même partition sont ensuite affectées d'une pondération d'ensemble dans le vecteur colonne H (ordonné de la même façon que P), chaque état d'éphémérides ayant une pondération de zéro. La

somme des éléments de  $H$  est normalisée à 1. L'expression de  $\hat{H}^T$  attribue alors à chaque horloge un ensemble normalisé de valeurs de pondération de la phase et de la fréquence qui est inversement proportionnel à la valeur de la variance d'erreur d'estimation, les diagonales de  $B$ . Cela étant, en raison de la forme particulière de  $H^T$ , l'expression de la correction de mise à jour produit quelques états d'éphémérides différents de zéro. Cette technique de correction n'est donc pas totalement transparente pour les estimations d'éphémérides. Néanmoins, en pratique, la différence s'avère minime.

### 4.3.3 Rapprochement des partitions

Pour assurer la cohérence des temps d'horloge composite de chacune des partitions du filtre, il a été nécessaire de mettre en place un rapprochement des partitions. En effet, une divergence du temps obtenu dans les partitions se traduirait par une erreur de pseudo-mesure directe. Le temps de référence de chaque partition présenterait une erreur systématique différente; cette erreur pourrait être estimée sachant que les valeurs des horloges des stations de surveillance proviennent d'une partition différente. La meilleure solution au problème numérique dû aux partitions a été d'utiliser un filtre de partition unique de sorte que les estimations soient toutes calculées de la même manière. Pour le système GPS, il a donc été mis en place un filtre de partition unique. La technique de l'horloge unique est toujours utilisée pour déterminer le temps du GPS.

## 4.4 Le temps UTC (USNO) par rapport au temps du GPS

Les horloges atomiques des satellites du GPS ne sont pas asservies, la synchronisation du temps du GPS étant assurée par correction des données. Le temps du GPS n'est pas réalisé au sein du système en cela qu'il n'existe pas d'horloge physique qui servirait de référence pour cette échelle de temps. Le temps du GPS est réalisé à la sortie des récepteurs GPS et est donc surveillé par l'USNO. L'USNO compare ces données avec sa réalisation du temps UTC, UTC (USNO), et calcule les paramètres à transmettre à la station de commande principale GPS en vue de leur émission dans le message NAV-MSG des satellites [McKenzie *et al.*, 1989]. Le décalage estimé en temps réel entre le temps UTC réalisé à l'USNO et le temps du GPS se trouve dans la sous-trame 4, page 18, du message diffusé NAV-MSG.

## Références

- BROWN K. [septembre 1991], «The theory of the GPS composite clock», *Proc. Of ION GPS-91*, p. 223–241.
- McKENZIE C. H. *et al.* [28-30 novembre 1989], «GPS-UTC Time Synchronization», *Proc. of the 21<sup>st</sup> Annual PTTI Applications and Planning Meeting*.
- Navstar Global Positioning System Interface Specification IS-200 rev D [2006], *Navstar GPS Space Segment/ Navigation User Interfaces*, IRN-200D-001, ARINC Engineering Services, LLC, El Segundo, CA 90245.
- SATIN A. L. et LEONDES C. T. [janvier 1990], «Ensembling Clocks of the Global Positioning System (GPS)», *IEEE Trans Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 26, 1.
- STEIN S. et FILLER R. [juin 1988], «Kalman filter analysis for real time applications of clocks and oscillators», *Proc. of the 42nd Annual Symposium on Frequency Control*, p. 447-452.



## CHAPITRE 5

## SYSTÈME DE NAVIGATION PAR SATELLITE GLONASS

	<i>Page</i>
5.1 Introduction .....	56
5.2 Description générale et principes de fonctionnement .....	56
5.3 Architecture et évolution du système GLONASS.....	56
5.3.1 Segment spatial .....	57
5.3.2 Segment de commande.....	61
5.3.3 Segment utilisateur.....	62
5.4 Temps du GLONASS .....	63
5.5 Calcul des orbites (CO) et synchronisation horaire (SH) du système GLONASS.....	64
5.6 Les signaux GLONASS et le spectre radioélectrique .....	66
5.6.1 Besoins en fréquences .....	66
5.6.2 Puissance et spectre des signaux .....	67
5.7 Caractéristiques de l'utilisation conjointe des systèmes GLONASS et GPS .....	69
5.8 Conclusion.....	70
Références .....	71

## 5.1 Introduction

Le système mondial de navigation par satellite (GLONASS) est un système mondial de navigation par satellite (GNSS) gouvernemental, conçu pour fournir en continu, quelles que soient les conditions météorologiques, à un nombre illimité d'utilisateurs aéronautiques, maritimes, de Terre ou spatioportés un service d'**information horaire** et de positionnement très précis, en tout point de la Terre et dans l'espace extra-atmosphérique à proximité du globe.

Le système GLONASS est une infrastructure spatiale qui sert un double objectif et est utilisée pour résoudre divers problèmes scientifiques, industriels, économiques, sociaux, de défense, de sécurité et autres. L'Agence spatiale fédérale russe (ROSCOSMOS) et le Ministère russe de la défense sont tous deux clients du système GLONASS sur un pied d'égalité [Glotov *et al.*, 2006].

NOTE 1 – L'acronyme russe GLONASS signifie **GLO**bal'naya **NA**vigatsionnaya **S**putnikovaya **S**istema, c'est-à-dire «système mondial de navigation par satellite».

## 5.2 Description générale et principes de fonctionnement

Le système GLONASS, qui est entièrement déployé, se compose de 24 satellites tournant autour de la Terre sur trois plans orbitaux. Les plans orbitaux sont espacés de 120° (longitude). Sur chaque plan orbital, huit satellites sont espacés régulièrement tous les 45° (déphasage). De plus, les plans sont déphasés de 15° l'un par rapport à l'autre.

La période nominale de l'orbite d'un satellite est de 11 h 15 min 44 s, ce qui correspond à une altitude orbitale circulaire de 19 100 km. Cette période assure la récurrence de la poursuite des satellites à la surface de la Terre toutes les 17 orbites. Elle a été choisie dans le but de réduire l'incidence des effets de résonance dus au champ gravitationnel sur le mouvement des satellites, et ainsi d'éviter les manœuvres de commande des orbites des satellites pendant toute leur durée de vie. L'inclinaison orbitale nominale est égale à 64,8°. L'espacement des satellites permet d'offrir une couverture continue et mondiale de la surface de la Terre et de l'espace proche de la Terre ([GLONASS, 2008] et Recommandation UIT-R M.1787).

Le système GLONASS fonctionne sur le principe de la triangulation passive. L'équipement d'utilisateur du système mesure les pseudo-distances et les pseudo-vitesses radiales à partir de tous les satellites visibles et reçoit des informations sur les éphémérides et les paramètres horaires de ces satellites. Ces données permettent de calculer les trois coordonnées de la position de l'utilisateur et les trois composantes du vecteur vitesse et de corriger l'horloge de l'utilisateur ainsi que la fréquence (Recommandation UIT-R M.1787).

Chaque satellite émet des signaux de navigation dans une (GLONASS), deux (GLONASS-M) ou trois (GLONASS-K) bandes de fréquences: L1 (1,6 GHz), L2 (1,2 GHz) et L3 (1,1 GHz) ([Dvorking *et al.*, 2009] et Recommandation UIT-R M.1787).

Par ailleurs, les satellites de type GLONASS embarquent un système de rétroreflecteurs optiques, qui permet d'effectuer des mesures de télémétrie laser sur satellites. Il s'agit là d'une particularité unique. Ces réflecteurs sont utilisés pour la détermination précise des orbites et pour des travaux de recherche en géodésie [Dvorking *et al.*, 2009].

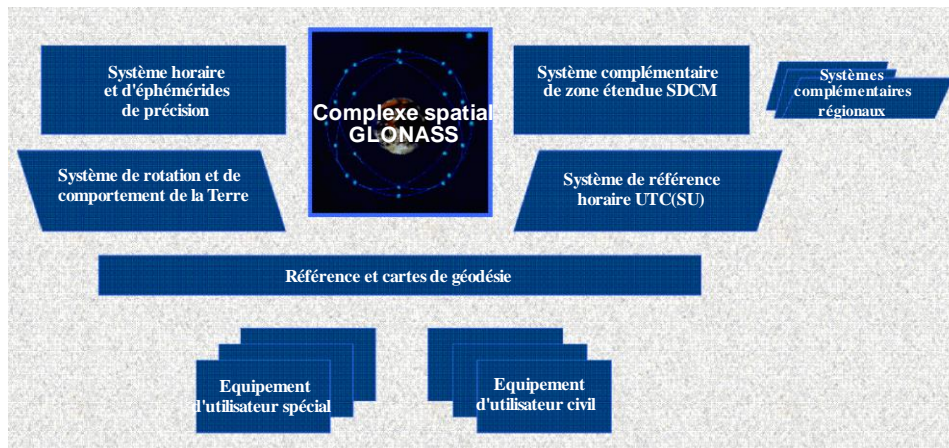
## 5.3 Architecture et évolution du système GLONASS

Pour assurer les fonctions requises, les sous-systèmes/éléments illustrés à la Figure 5-1 ont été intégrés dans le système GLONASS [Polischuk *et al.*, 2002].



FIGURE 5-1

## Architecture du système GLONASS



Sat\_time\_freq-05-01

Le système GLONASS est composé des segments suivants:

- constellation orbitale des satellites GLONASS (segment spatial);
- système de commande au sol;
- équipement d'utilisateur (segment utilisateur).

La mise en service et la maintenance de la constellation orbitale sont assurées par deux systèmes de fusées spatiales: l'un reposant sur le lanceur «Proton» et l'autre sur le lanceur «Soyouz» des bases de lancement de Baïkonour et de Plessetsk.

### 5.3.1 Segment spatial

Dans sa variante ordinaire, la constellation orbitale du système GLONASS (segment spatial) comprend 24 engins spatiaux opérationnels en orbite quasi circulaire autour de la Terre, à une altitude de 19 100 km, avec une inclinaison de  $64,8^\circ$  par rapport à l'équateur et une période orbitale de 11 h 15 min environ. Les satellites sont répartis uniformément sur trois plans orbitaux (espacés de  $45^\circ$  sur la longitude du nœud ascendant), chaque plan contenant huit satellites (espacés de  $45^\circ$  en latitude). Les satellites de navigation des plans orbitaux voisins présentent un décalage de  $15^\circ$  en latitude. La structure géométrique adoptée pour la constellation orbitale assure une couverture mondiale et continue de la surface de la Terre avec le domaine de la navigation, de sorte que l'utilisateur ne puisse pas voir moins de quatre satellites à tout instant et en tout point du globe (la meilleure configuration étant celle où un satellite se situe au zénith tandis que les trois autres sont au voisinage de l'horizon) [Dvorking *et al.*, 2009].

Le premier satellite GLONASS a été mis sur orbite en 1982. En 1993, le système, alors composé de 12 satellites, a été déclaré opérationnel.

Le système GLONASS a été mis en œuvre en trois étapes [Polischuk *et al.*, 2002]:

- Etape 1 (1983-1985): Essais expérimentaux. Affinement du concept de système. Constellation orbitale de 4-6 satellites.
- Etape 2 (1986-1993): Constellation orbitale de 12 satellites. Achèvement de l'essai en vol. Première exploitation du système.
- Etape 3 (1993-1995): Mise en service de la constellation orbitale nominale de 24 satellites. Exploitation du système.

En mars 1995, le Gouvernement de la Fédération de Russie a adopté une résolution autorisant les organisations internationales OACI et OMI à utiliser le système GLONASS de navigation par satellite à des fins civiles.

La mise en service complète du système a été achevée cette même année. En raison d'un financement insuffisant, le remplacement des satellites GLONASS n'a pas pu être effectué entre 1995 et 1998. Depuis 1998, il est limité à un lancement de trois satellites par an.

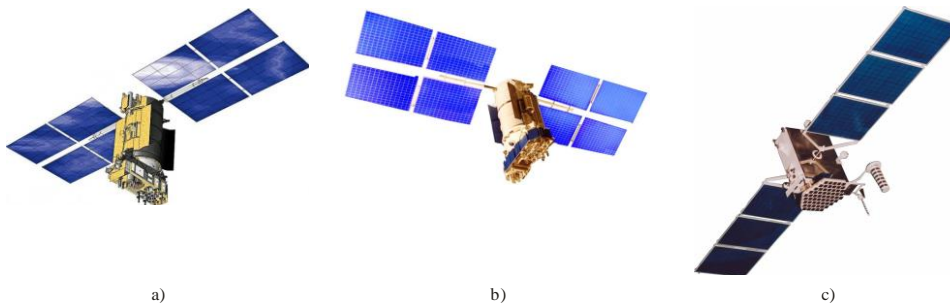
Au 4 août 2010, la constellation comptait 21 satellites opérationnels (l'état actuel figure sur le site web du Centre analytique d'information GLONASS de l'Agence spatiale fédérale russe, à l'adresse <http://www.glonass-ianc.rsa.ru/pls/htmldb/f?p=202:1:9296521002007641687>).

Depuis la fin des années 1970, la société JSC «Information Satellite Systems» Reshetnev Company a conçu trois générations de satellites GLONASS: GLONASS, GLONASS-M et GLONASS-K.

La Figure 5-2 donne un aperçu général de ces trois générations de satellites.

FIGURE 5-2

**Trois générations de satellites GLONASS:  
a) GLONASS, b) GLONASS-M, c) GLONASS-K**



Sat\_time\_freq-05-02

Les caractéristiques techniques des satellites GLONASS sont présentées dans le Tableau 5-1.

TABLEAU 5-1

**Comparaison des performances des satellites du système GLONASS**

	<b>GLONASS</b>	<b>GLONASS-M</b>	<b>GLONASS-K</b>
Premier lancement	1982	2003	Prévu pour 2010
Durée de vie (en années)	3	7	10–12
Masse (kg)	1 415	1 415	750
Masse de la charge utile de navigation (kg)	180	250	260
Nombre de satellites par lancement:			
– PROTON	3	3	6
– SOYOUZ	–	1	2
Puissance (W)	1 000	1 450	1 270
Consommation d'énergie de la charge utile de navigation (W)	600	580	750
Précision de navigation verticale en temps réel (95%) (m)	60	30	5-8 (de 40 à 60 cm, au moyen du système différentiel mondial)
Nombre de signaux civils	1	3	3
Nombre de signaux spéciaux	2	2	3
Stabilité des horloges embarquées	$5 \times 10^{-13}$	$1 \times 10^{-13}$	$1 \times 10^{-13}$
Erreur quadratique moyenne de la synchronisation mutuelle des signaux de navigation (ns)	15	8	3–4
Fonctions supplémentaires			Signal d'intégrité Diverses corrections Recherche et sauvetage

La conception du satellite GLONASS-K repose sur un boîtier non scellé, qui est divisé physiquement en un module «plate-forme» et un module «charge utile».

Les satellites de type GLONASS-M, qui remplacent les satellites GLONASS, affichent une meilleure qualité de fonctionnement et une capacité renforcée.

Principaux objectifs du niveau de qualité des satellites de type M:

- Utilisation d'une nouvelle bande de fréquences grâce à un signal de navigation modernisé:
  - La bande de fréquences est déplacée vers la gauche (pour désigner la fréquence, on n'utilisera plus les lettres K = 0 – 12, mais K = –7...+6).
  - Des octets qui étaient réservés à un usage ultérieur contiennent désormais des informations complémentaires, notamment l'écart entre les échelles de temps du GPS et du GLONASS, un fanion d'authenticité (validité) de la trame de navigation et l'âge des données de navigation.
  - Des filtres sont mis en place pour réduire les émissions hors bande.
  - Des signaux duaux sont transmis sur les deux fréquences L1 et L2; ils contiennent des données numériques et des codes de télémétrie utilisés pour les pseudo-mesures.
- Mise en place d'une liaison radioélectrique intersatellites pour les mesures de distance et les échanges de données entre satellites appartenant au même plan orbital ou à des plans orbitaux différents.

- Amélioration de la stabilité du signal de navigation jusqu'à  $1 \times 10^{-13}$  grâce à la stabilisation précise de la température des horloges au césium.
- Réduction de l'incertitude due à la pression de rayonnement solaire grâce à une meilleure précision du pointage des panneaux solaires.
- Allongement de la durée de vie du satellite jusqu'à 7 ans.

Un satellite GLONASS-M peut être mis sur orbite soit par lancement de plusieurs satellites par une seule et même fusée (*tandem launch*) (3 satellites sont placés sur orbite simultanément à partir de la base de lancement de Baïkonour via un lanceur Proton-M équipé d'un propulseur d'appoint Breeze-M) soit par lancement unique (à partir de la base de lancement de Plessetsk au moyen d'un lanceur Soyouz-2 équipé d'un propulseur d'appoint Fregat).

La partie principale de la structure d'un satellite GLONASS-M est constituée d'un conteneur scellé, dans lequel des conditions de température assurant une bonne sécurité sont maintenues (intervalle 0-40°C). Dans la zone où se trouvent les fréquences étalon, la température est stabilisée à  $\pm 1^\circ\text{C}$ .

En mode nominal, l'axe longitudinal du satellite pointe en permanence vers la Terre avec une précision de  $0,5^\circ$ , l'axe latéral du satellite coïncide avec un plan Soleil-satellite-Terre avec une précision de  $0,5^\circ$ , et les panneaux solaires pointent vers le Soleil avec une précision de  $\pm 2^\circ$ . Le pointage du satellite est assuré par des volants d'inertie, qui sont périodiquement désaturés au moyen de coupleurs magnétiques.

Le sous-système de propulsion, qui comprend des propulseurs à hydrazine (amidol), permet de générer des couples de commande qui servent à orienter le satellite pendant les premières phases et sur orbite.

Il est très important que les manœuvres de commande d'orientation ne soient effectuées que pendant le positionnement du satellite vers son créneau orbital désigné. Une grande précision du contrôle des paramètres orbitaux pendant la première phase de mise sur orbite et le recours à des orbites non résonantes pour la formation de la constellation orbitale permettent d'éviter les manœuvres de commande d'orientation pendant toute la durée de la mission du satellite.

Le sous-système électrique repose sur des accumulateurs Ni-H et des panneaux solaires en silicone. Le premier lancement d'un satellite GLONASS-M a eu lieu en décembre 2003. Ce satellite était fabriqué par la société NPO PM.

Les évolutions du système GLONASS sont définies dans le Programme fédéral spécial GLONASS (axé sur les missions), qui a été approuvé par le Gouvernement de la Fédération de Russie le 20 août 2001. Le programme de modernisation était motivé par:

- (s'agissant des utilisateurs civils) la nécessité d'améliorer la précision, la disponibilité et l'intégrité du système pour le rendre plus compétitif sur le marché mondial des services de navigation;
- (s'agissant des clients) réduction des coûts de maintenance de la constellation orbitale grâce à l'augmentation de la durée de vie des satellites et du nombre de satellites par lancement et à la diminution des coûts liée à l'automatisation du segment de commande au sol;
- (s'agissant de la coopération internationale) compatibilité et interopérabilité GLONASS/GPS.

Le programme, qui couvre la période 2002-2011, définit les principales activités suivantes:

- Création et développement du segment spatial et de l'infrastructure au sol du système de navigation par satellite.
- Remplacement des satellites et maintenance de la constellation à un niveau suffisant pour offrir des solutions de navigation tenant compte de l'intérêt des différents utilisateurs.
- Développement de la coopération internationale en matière de navigation par satellite (SATNAV).
- Conception et fabrication d'équipements d'utilisateur russes.

En application du Programme fédéral spécial GLONASS (axé sur les missions) et en parallèle de la maintenance du système au moyen de satellites GLONASS-M, il est envisagé de mettre au point une nouvelle génération de satellites GLONASS: GLONASS-K.

Par rapport aux satellites GLONASS-M, les satellites GLONASS-K présentent des caractéristiques spécifiques, notamment:

- a) mise en service d'une troisième fréquence en bande L pour améliorer la fiabilité et la précision des résultats de navigation pour l'utilisateur;
- b) allongement de la durée de vie des satellites jusqu'à 10 ans;
- c) réduction de la masse des satellites d'un facteur 2;
- d) installation, à bord des satellites, d'une charge utile pour la recherche et le sauvetage.

En 2010, NPO PM avait achevé la phase B et commençait la phase C. Un satellite GLONASS-K peut être lancé selon l'un des schémas suivants (lancement de plusieurs satellites par une seule et même fusée):

- 6 satellites lancés simultanément à partir de la base de Baïkonour au moyen d'un lanceur Proton-M équipé d'un propulseur Breeze-M;
- 2 satellites lancés simultanément à partir de la base de Plessetsk par un lanceur Soyouz-2 équipé d'un propulseur Fregat.

La conception du satellite GLONASS-K repose sur un boîtier non scellé, qui est divisé physiquement en un module «plate-forme» et un module «charge utile». En mode nominal, l'axe longitudinal du satellite pointe vers la Terre avec une précision de  $\pm 5^\circ$  et les panneaux solaires pointent vers le Soleil avec une précision de  $1^\circ$ .

La température des fréquences étalon est stabilisée localement à  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  près. Le reste de l'équipement est maintenu à une température comprise entre  $-10$  et  $+50^\circ\text{C}$ .

### 5.3.2 Segment de commande

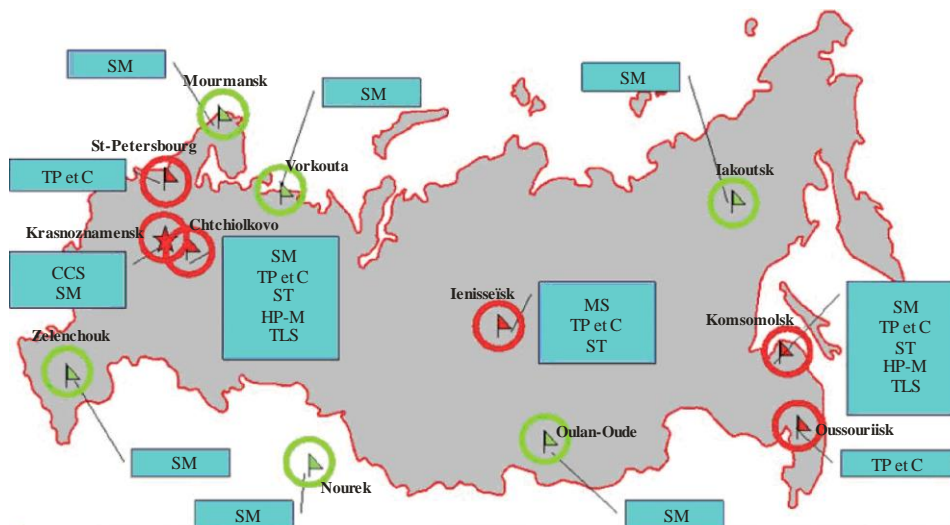
Le segment de commande est composé des éléments suivants:

- Centre de commande du système (CCS).
- Stations de télémétrie, de poursuite et de commande TP & C.
- Stations de surveillance unidirectionnelles.
- Stations de télémétrie laser sur satellites.



Les installations de commande au sol du système GLONASS sont présentées à la Figure 5-3 [Kosenko, 2009].

FIGURE 5-3

## Segment de commande du système GLONASS



Sat\_time\_freq-05-03

CCS	– Centre de commande du système	SM	– Station de surveillance et de mesure
TP et C	– Station de télémessure, de poursuite et de commande	HP	– Horloge principale
ST	– Station de téléchargement	TLS	– Station de télémétrie laser sur satellites
	– Nouvelle station (après 2010)		– Station opérationnelle

Les stations de surveillance mesurent les paramètres orbitaux des satellites et le décalage de l'horloge des satellites par rapport à l'horloge principale du système. Ces données sont communiquées au centre de commande du système, qui calcule les paramètres de correction des éphémérides et de l'horloge, puis télécharge quotidiennement les messages correspondants vers les satellites par l'intermédiaire des stations de surveillance.

### 5.3.3 Segment utilisateur

Le segment utilisateur consiste en un grand nombre de terminaux d'utilisateur de différents types. Un terminal d'utilisateur comprend une antenne, un récepteur, un processeur et un dispositif d'entrée/sortie. Cet équipement peut être combiné à d'autres dispositifs de navigation pour accroître la précision et la fiabilité de la navigation, ce qui peut présenter un réel intérêt pour les plates-formes très dynamiques.

L'équipement d'utilisateur effectue des mesures passives de pseudo-distance et de taux de variation des pseudo-distances par rapport à 4 (3) satellites GLONASS et reçoit et traite les messages de navigation acheminés par les signaux de navigation des satellites. Le message de navigation décrit la position des satellites dans l'espace et dans le temps. Le traitement combiné des mesures et des messages de navigation des 4 (3) satellites GLONASS permet à l'utilisateur de déterminer 3 (2) coordonnées de position, 3 (2) composantes du vecteur vitesse et de mettre en correspondance son échelle de temps avec la référence nationale du temps universel coordonné (UTC). Les données permettant la programmation des sessions pour les calculs de navigation, le choix de la «constellation» d'engins spatiaux opérationnelle et la détection des signaux hertziens émis par ces engins sont acheminées par le message de navigation.

Sur le plan fonctionnel, ces dispositifs sont intégrés dans le système GLONASS, tout comme les téléphones mobiles et les terminaux d'utilisateur sont intégrés dans les systèmes de télécommunication. La production à grande échelle de dispositifs de navigation grand public (DNGP) pour le système GPS a commencé à la fin des années 1980; aujourd'hui, plus de 100 entreprises produisent en série 500 types de récepteurs standard, donc deux récepteurs bisystème GPS/GLONASS. On notera que les DNGP destinés aux utilisateurs non gouvernementaux sont conçus et fabriqués par des entreprises privées. Cela s'explique notamment par le

montant des ventes annuelles mondiales des produits et services de ce secteur, qui dépasse 10 milliards USD. Cela étant, l'Etat soutient le développement des éléments de base nécessaires à la fabrication de modèles de DNGP compétitifs [GLONASS, 2008].

#### 5.4 Temps du GLONASS

A bord de chaque satellite, des étalons de temps et de fréquence au césium sont intégrés dans le système du dispositif de synchronisation embarqué, qui sert à calculer, à mémoriser et à produire l'échelle de temps locale ainsi que les signaux de navigation très stables émis dans les gammes de fréquences 1 600 MHz et 1 250 MHz. Les premiers lancements de satellites de nouvelle génération GLONASS-K (Figure 5-1c), dotés de caractéristiques améliorées, sont prévus pour 2010. Ces satellites ont une durée de vie garantie de 10 ans. Ils intègrent en outre le troisième signal civil, qui est émis dans la bande de fréquences L3 (1 198–1 212 MHz). Les étalons de temps et de fréquence sont les dispositifs de synchronisation embarqués qui déterminent, pour une large part, la durée de vie garantie des satellites de navigation [GLONASS, 2008; Dvorking *et al.*, 2009].

A l'instar du temps du GPS, le temps du GLONASS repose sur une échelle de temps atomique. Cette échelle est maintenue par la Russie (UTC (SU)). En revanche, contrairement au GPS, l'échelle de temps GLONASS n'est pas continue et doit être ajustée pour tenir compte des secondes intercalaires périodiques. Les secondes intercalaires sont appliquées à toutes les références de temps UTC, conformément aux spécifications du Service international de la rotation terrestre et des systèmes de référence (IERS). Elles visent à maintenir le temps UTC proche du temps solaire moyen. Ce dernier, qui repose sur la rotation de la Terre autour de son axe, n'est pas uniforme et sa vitesse de variation change en permanence en raison du frottement dû à l'effet des marées et à d'autres facteurs comme les mouvements animant la partie liquide du noyau de la Terre.

Le segment de commande veille à ce que le temps du GLONASS ne s'écarte pas du temps UTC (SU) de plus de 1 ms – pas plus de 1  $\mu$ s en règle générale –, la part restante du décalage étant transmise dans le message de navigation. En outre, Moscou avance le temps du GLONASS de trois heures par rapport au temps UTC (SU). Les informations de décalage entre le temps du GPS et le temps du GLONASS sont consignées dans le journal GLOCLOCK (voir le Manuel de référence du micrologiciel de la famille des produits OEMV).

Les satellites GLONASS sont équipés d'horloges (étalons de temps/fréquence) dont l'instabilité sur une journée n'est pas supérieure à  $5 \times 10^{-13}$  ( $1 \times 10^{-13}$  dans le cas des satellites GLONASS-M). La précision de la synchronisation mutuelle des échelles de temps des satellites est au pire de 20 ns (1  $\sigma$ ) pour les satellites GLONASS et de 8 ns (1  $\sigma$ ) pour les satellites GLONASS-M.

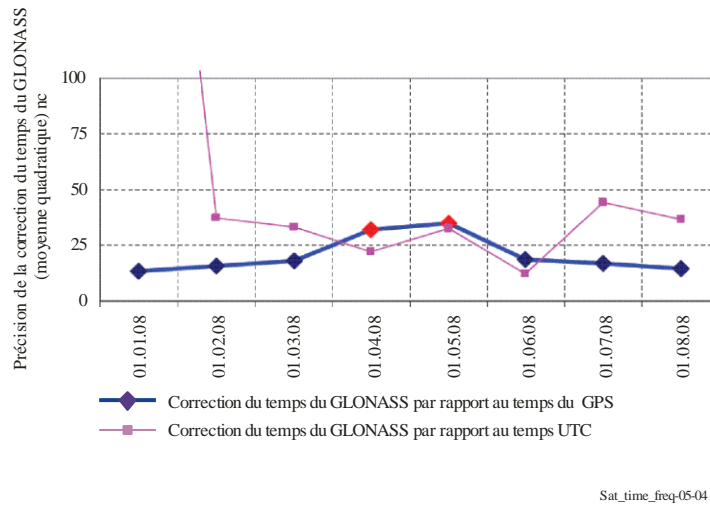
Le temps du GLONASS est produit à partir du temps du système de synchronisation central GLONASS (CS, *central synchronizer*). Sur une journée, l'instabilité des horloges à hydrogène de ce système est inférieure à  $2 \times 10^{-15}$ .

Les échelles de temps des satellites GLONASS sont comparées périodiquement à l'échelle de temps du système de synchronisation central. Les corrections à apporter à chaque échelle de temps embarquée au regard du temps du GLONASS et du temps UTC (SU) sont calculées et téléchargées vers les satellites par le segment de commande deux fois par jour. L'erreur d'un système utilisant l'échelle de temps UTC (SU) GLONASS ne doit dépasser 1  $\mu$ s.

L'échelle de temps du GLONASS est corrigée périodiquement d'un nombre entier de secondes, en même temps que les corrections apportées au temps UTC conformément à la notification du Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) (correction liée aux secondes intercalaires) (voir la Figure 5-3). En règle générale, ces corrections (1 s) sont effectuées une fois par an (ou tous les ans et demi) à minuit UTC (00 h 00 m 00 s) du 31 décembre au 1er janvier pour le premier trimestre (ou du 31 mars au 1er avril pour le deuxième trimestre, ou du 30 juin au 1er juillet pour le troisième trimestre, ou encore du 30 septembre au 1er octobre pour le quatrième trimestre), pour l'ensemble des utilisateurs du temps UTC.

FIGURE 5-4

**Comparaison de la précision des corrections du temps du GLONASS par rapport au temps UTC et au temps du GPS [Kosenko, 2009]**



Les utilisateurs du GLONASS sont avertis (au moins trois mois à l'avance) de ces prévisions de corrections au moyen de bulletins, de notifications, etc. A noter que les messages de navigation par satellite GLONASS ne contiennent aucune information concernant la correction du temps UTC par seconde intercalaire. Cela étant, le message de navigation émis par les satellites GLONASS-M prévient les utilisateurs des prochaines corrections du temps UTC par seconde intercalaire, de leur valeur et de leur signe (voir le § 4.5 dans [GLONASS, 2008]).

En raison de la correction par seconde intercalaire, il n'y a pas de différences en secondes entières entre le temps du GLONASS et le temps UTC(SU). Ces deux échelles de temps présentent néanmoins une différence constante de trois heures en raison des particularités du segment de commande GLONASS:

$$t_{\text{GLONASS}} = t_{\text{UTC (SU)}} + 03 \text{ h } 00 \text{ min} \quad (5-1)$$

où:

$t_{\text{GLONASS}}$ : temps du GLONASS;

$t_{\text{UTC (SU)}}$ : échelle nationale du temps universel coordonné (UTC (SU)).

Pour recalculer les éphémérides d'un satellite au moment où des mesures sont effectuées, en temps UTC (SU), il convient d'appliquer l'équation suivante:

$$t_{\text{UTC (SU)}} + 03 \text{ h } 00 \text{ min} = t + \tau_c + \tau_n(t_b) - \gamma_n(t_b) (t - t_b) \quad (5-2)$$

où:

$t$ : instant d'émission du signal de navigation donné par l'échelle de temps embarquée

$\tau_c, \tau_n, \gamma_n, t_b$ : paramètres d'éphémérides et d'almanach (indiqués aux § 4.4 et 4.5).

Les satellites GLONASS-M émettent également des coefficients spéciaux, B1 et B2, utilisés pour déterminer la différence entre le temps universel UT1 et le temps universel coordonné (UTC), ainsi que la différence entre le temps du GPS corrigé et le temps du GLONASS, qui ne doit pas dépasser 30 ns ( $\sigma$ ) [GLONASS, 2008].

## 5.5 Calcul des orbites (CO) et synchronisation horaire (SH) du système GLONASS

Lorsque le système GLONASS fonctionne en mode nominal, les corrections horaires et les paramètres orbitaux sont déterminés séparément. Les corrections horaires sont calculées deux fois par jour pour chaque satellite, au moyen de mesures unidirectionnelles et bidirectionnelles. La comparaison des distances calculées à partir des mesures unidirectionnelles et bidirectionnelles permet de déterminer facilement les corrections horaires



applicables aux horloges embarquées. Pour la détermination des éphémérides, seules les mesures bidirectionnelles sont utilisées.

Le système de prise en charge du temps et des fréquences est composé de stations de mesures radioélectriques avec requête et sans requête (NMS et QMS, *non-query and query measurement stations*) et du système de synchronisation central (situé à Chtchiolkovo, région de Moscou). Les mesures de pseudo-distance par rapport au satellite de navigation effectuées par les stations NMS et les mesures de distance effectuées par les stations QMS permettent de calculer les décalages de l'échelle de temps embarquée par rapport à l'échelle de temps du système. Le système de synchronisation central consiste en plusieurs fréquences étalon à hydrogène, très stables, dont l'instabilité sur une journée n'excède pas  $5 \times 10^{-14}$ . Il tient lieu d'horloge système: c'est par rapport à cette horloge que toutes les horloges des satellites sont synchronisées et que l'utilisateur compare sa propre horloge.

Par ailleurs, l'échelle de temps du système GLONASS est synchronisée avec l'Étalon national de temps et de fréquence (Mendelevevo, région de Moscou), appelé temps UTC (SU), qui est l'une des réalisations du temps universel coordonné (UTC). La correction de l'échelle de temps du système GLONASS par rapport au temps universel (UT1) est déterminée à partir de données de radio-interférométrie obtenues sur de très longues lignes de base et transmise à l'utilisateur dans un message de navigation [Dvorking *et al.*, 2009].

La mise en place d'infrastructures de mesures unidirectionnelles et l'achèvement des activités liées au champ gravitationnel de la Terre ont permis de commencer à valider une technique de calcul simultané des corrections horaires et des éphémérides à partir des seules mesures unidirectionnelles (situation en 2010).

Les éphémérides émises par les satellites du système GLONASS décrivent la position des satellites dans le repère géocentrique PZ-90. Les coordonnées des satellites peuvent être converties dans le système WGS-84 en vue d'une utilisation combinée des systèmes GLONASS et GPS; une matrice de correspondance a été établie à cet effet. L'erreur de conversion des coordonnées le long de chaque axe est inférieure à 1,5 m ( $1 \sigma$ ).

Certaines tâches de calcul des orbites et de synchronisation horaire (CO et SH) relatives aux satellites GLONASS-K sont aujourd'hui effectuées par un logiciel embarqué, ce qui améliore considérablement l'autonomie des satellites. Les principales tâches de CO et de SH effectuées à bord sont les suivantes:

- création et envoi de supertrames de navigation à l'émetteur de navigation;
- calcul préliminaire des mesures des distances intersatellites;
- calcul plus précis des éphémérides de référence du satellite à partir des mesures des distances intersatellites;
- calcul des corrections horaires par rapport à une échelle de temps de groupe;
- diffusion des données horaires et des éphémérides.

Pour le calcul plus précis des éphémérides de référence à partir des mesures intersatellites, trois méthodes ont été examinées:

- La méthode de la vue orthogonale: seules les composantes dans le sens de la trace sont affinées à partir de mesures mutuelles avec visibilité directe orthogonale au déplacement du satellite.
- La méthode reposant sur l'«utilisateur» principal: les éphémérides de référence de chaque satellite sont affinées en partant de l'hypothèse que les éphémérides de référence des autres satellites sont connues avec exactitude.
- La méthode consistant à affiner les paramètres orbitaux plans: la composante radiale et la composante le long de la trace sont affinées. Les éphémérides de chaque satellite et de tous les autres satellites visibles font l'objet d'un calcul plus précis à bord.

La troisième méthode est apparemment la plus efficace. Les éphémérides de référence et les corrections horaires déterminées à bord à partir des mesures intersatellites sont affinées séparément. Erreurs (moyenne quadratique) des éphémérides émises dans la trame de navigation:

- pour les satellites GLONASS: le long de la trace  $-20$  m, binormale  $-10$  m, radiale  $-5$  m;
- pour les satellites GLONASS-M: le long de la trace  $-7$  m, binormale  $-7$  m, radiale  $-1,5$  m.

Depuis 1999, en vertu d'un décret du Gouvernement russe, le système GLONASS sert un double objectif: il est destiné à la fois aux utilisateurs militaires et aux utilisateurs civils. De plus, il est ouvert à la coopération internationale en vue de la création d'un système de navigation international, que l'OACI et l'OMI envisagent d'utiliser. L'utilisation conjointe des systèmes GPS et GLONASS offrira aux utilisateurs des fonctions de navigation fiables, caractérisées par une grande précision et une disponibilité élevée, et facilitera le développement d'un marché mondial des services de navigation.

## 5.6 Les signaux GLONASS et le spectre radioélectrique

Contrairement au système GPS, dans lequel tous les satellites de navigation émettent des signaux avec répartition de canaux codés sur une seule et même fréquence porteuse, le système GLONASS utilise la répartition en fréquence, de sorte que chaque satellite émet un signal de navigation sur une fréquence porteuse qui lui est propre. Les deux méthodes présentent des avantages et des inconvénients. En particulier, la répartition de canaux codés simplifie la production en masse de dispositifs grand public et permet d'accroître indéfiniment le nombre de satellites. C'est pourquoi, pour ménager un équilibre entre, d'un côté, le développement du système GLONASS et, de l'autre, l'augmentation du nombre et l'amélioration de la qualité des services de navigation, il est prévu de mettre en service, sur les satellites GLONASS-K, de nouveaux signaux de navigation avec répartition en fréquence et répartition en phase.

### 5.6.1 Besoins en fréquences

Les besoins en fréquences du système GLONASS ont été établis sur la base des éléments suivants: transparence de l'ionosphère, bilan de liaison radioélectrique, simplicité des antennes d'utilisateur, suppression des signaux dus à la propagation par trajets multiples, coût des équipements et, enfin, dispositions du Règlement des radiocommunications (RR). Les fréquences porteuses varient d'un multiple entier de 0,5625 MHz dans la bande L1, de 0,4375 MHz dans la bande L2 et de 0,423 MHz dans la bande L3.

Depuis 2006, les nouveaux satellites du système GLONASS utilisent entre 14 et 20 fréquences porteuses dans les différentes bandes. Dans la bande L1, les fréquences porteuses sont comprises entre 1 598,0625 MHz (valeur inférieure) et 1 605,3750 MHz (valeur supérieure), dans la bande L2, elles sont comprises entre 1 242,9375 MHz (valeur inférieure) et 1 248,6250 MHz (valeur supérieure), et dans la bande L3, entre 1 201,7430 MHz (valeur inférieure) et 1 209,7800 MHz (valeur supérieure). Les valeurs nominales des fréquences porteuses des signaux de radionavigation utilisées dans le système GLONASS sont données dans le Tableau 5-1 (Recommandation UIT-R M.1787).

TABLEAU 5-1

#### Valeurs nominales des fréquences porteuses des signaux de radionavigation utilisées dans le système GLONASS

K (numéro de la fréquence porteuse)	$F_K^{L1}$ (MHz)	$F_K^{L2}$ (MHz)	$F_K^{L3}$ (MHz)
12	–	–	1 209,7800
11	–	–	1 209,3570
10	–	–	1 208,9340
09	–	–	1 208,5110
08	–	–	1 208,0880
07	–	–	1 207,6650
06	1 605,3750	1 248,6250	1 207,2420

TABLEAU 5-1 (*fin*)

K (numéro de la fréquence porteuse)	F <sub>K</sub> <sup>L1</sup> (MHz)	F <sub>K</sub> <sup>L2</sup> (MHz)	F <sub>K</sub> <sup>L3</sup> (MHz)
05	1 604,8125	1 248,1875	1 206,8190
04	1 604,2500	1 247,7500	1 206,3960
03	1 603,6875	1 247,3125	1 205,9730
02	1 603,1250	1 246,8750	1 205,5500
01	1 602,5625	1 246,4375	1 205,1270
00	1 602,0000	1 246,0000	1 204,7040
-01	1 601,4375	1 245,5625	1 204,2810
-02	1 600,8750	1 245,1250	1 203,8580
-03	1 600,3125	1 244,6875	1 203,4350
-04	1 599,7500	1 244,2500	1 203,0120
-05	1 599,1875	1 243,8125	1 202,5890
-06	1 598,6250	1 243,3750	1 202,1660
-07	1 598,0625	1 242,9375	1 201,7430

Deux signaux de navigation à modulation par déplacement de phase (de 180°), décalés de 90° (en quadrature), sont émis sur chaque fréquence porteuse: un signal de précision normale et un signal de haute précision.

Les satellites GLONASS et GLONASS-M émettent des signaux de navigation dans deux gammes de fréquences L1 (1,6 GHz) et L2 (1,2 GHz) et utilisent des porteuses différentes. Les satellites antipodaux situés dans le même plan utilisent les mêmes fréquences. Les porteuses nominales dans les bandes de fréquences L1 et L2 sont déterminées par les formules suivantes:

$$f_{K1} = f_{01} + K\Delta f_1 \quad (5-3)$$

$$f_{K2} = f_{02} + K\Delta f_2 \quad (5-4)$$

où:

K: numéro de la porteuse

$$f_{01} = 1\,602 \text{ MHz}$$

$$\Delta f_1 = 562,5 \text{ kHz}$$

$$f_{02} = 1\,246 \text{ MHz}$$

$$\Delta f_2 = 437,5 \text{ kHz.}$$

Avant 2005, les valeurs de K étaient des entiers compris entre 0 et 13; depuis 2005, elles sont comprises entre -7 et +6.

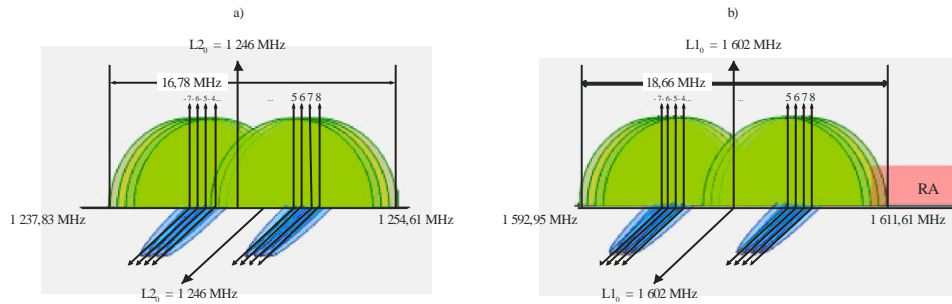
Une troisième fréquence, L3, a été mise en place pour les satellites GLONASS-K.

### 5.6.2 Puissance et spectre des signaux

Le spectre des signaux GLONASS dans les bandes L1 et L2 est présenté à la Figure 5-4; celui du signal GLONASS-K dans la bande L3 à la Figure 5-5 [Revnivkykh, 2005].

FIGURE 5-5

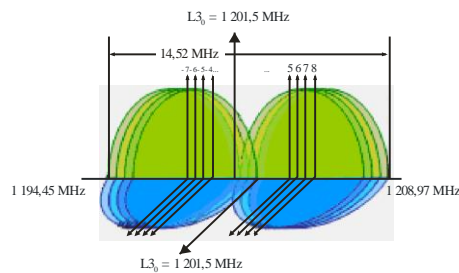
## Spectre GLONASS: b) bande L1, a) bande L2



Sat\_time\_freq-05-05

FIGURE 5-6

## Spectre GLONASS: signal L3 (GLONASS-K)



Sat\_time\_freq-05-06

Les signaux émis ont une polarisation elliptique dextrogyre, avec un facteur d'ellipticité au pire de 0,7 pour les bandes L1, L2 et L3. La puissance minimale garantie spécifiée pour un signal à l'entrée d'un récepteur (dans l'hypothèse d'un gain d'antenne de 0 dBi) est de  $-161$  dBW ( $-131$  dBm) tant pour le signal de précision normale que pour le signal de haute précision dans les bandes L1, L2 et L3 (Recommandation UIT-R M.1787).

Trois classes d'émission sont utilisées dans le système GLONASS: 8M19G7X, 1M02G7X, 10M2G7X. Les caractéristiques de ces signaux sont indiquées dans le Tableau 5-2.

TABLEAU 5-2  
Caractéristiques des signaux GLONASS

Gamme de fréquences	Classe d'émission <sup>(1)</sup>	Largeur de bande d'émission (MHz)	Puissance de crête maximale de l'émission (dBW)	Densité spectrale de puissance maximale (dB(W/Hz))	Gain d'antenne (dB)
L1	10M2G7X	10,2	15	-52	11
	1M02G7X	1,02	15	-42	
L2	10M2G7X	10,2	14	-53	10
	1M02G7X	1,02	14	-43	
L3 <sup>(2)</sup>	8M19G7X	8,2	15	-52,1	12
	8M19G7X	8,2	15	-52,1	

<sup>(1)</sup> Règlement des radiocommunications, Edition de 2008, Volume 2, Appendice 1.

<sup>(2)</sup> Deux signaux GLONASS L3 sont décalés l'un par rapport à l'autre de 90° (en quadrature).

L'enveloppe du spectre de puissance du signal de navigation est décrite par la fonction  $(\sin x/x)^2$ , où:

$$x = \pi(f - f_c) / f_t \quad (5-5)$$

avec:

- $f$ : fréquence considérée
- $f_c$ : fréquence porteuse du signal
- $f_t$ : débit d'éléments du signal.

Le lobe principal du spectre constitue le spectre opérationnel du signal. Il occupe une largeur de bande égale à  $2f_t$ . La largeur des lobes est égale à  $f_t$ .

## 5.7 Caractéristiques de l'utilisation conjointe des systèmes GLONASS et GPS

Il va de soi que la combinaison des systèmes GPS et GLONASS produira à terme un système à 48 satellites. Ainsi, du fait de la grande redondance des mesures, l'occultation des signaux provenant des satellites sera moins gênante.

Grâce aux méthodes modernes de traitement numérique du signal, les signaux GPS et GLONASS, malgré leurs différences, peuvent aujourd'hui être traités au moyen de la même architecture de récepteur. Leurs gammes de fréquences étant proches, il est possible d'utiliser, dans l'équipement de l'utilisateur, une antenne combinée et un préamplificateur d'entrée commun. Une conception optimale du récepteur et la mise en œuvre d'un logiciel adéquat de traitement du signal devraient permettre de mettre au point un récepteur combiné dont le coût n'excéderait que légèrement celui d'un récepteur GPS ou GLONASS. En ce qui concerne les informations d'éphémérides et les représentations des almanachs, les différences entre les deux systèmes ne sont pas un obstacle au fonctionnement des équipements d'utilisateur. Le logiciel de l'unité de traitement des données de navigation fournit les corrections voulues et permet le traitement des deux flux de données.

Les équipements d'utilisateur, qui constituent la partie la plus «souple» du système, se perfectionnent constamment. La plupart sont des récepteurs à canaux multiples, qui sont capables de traiter simultanément les pseudo-distances et les pseudo-vitesses pour plusieurs satellites en visibilité. Ils offrent par conséquent une précision et une intégrité maximales des observations de navigation. Les progrès techniques dans le domaine du traitement numérique du signal permettent d'obtenir un très haut degré d'intégration et ainsi d'effectuer une conversion discrète et un traitement numérique des signaux très en amont, dans un étage voisin de l'étage d'entrée.

L'utilisation conjointe des systèmes GLONASS et GPS offre d'importants avantages par rapport à l'utilisation en autonome de l'un quelconque de ces systèmes:

*Meilleure disponibilité:* Dans un environnement comportant des obstacles (relief montagneux ou «canyons» urbains par exemple), le doublement du nombre de satellites disponibles offre souvent une solution valide, alors qu'un récepteur exclusivement compatible GPS ou GLONASS est inutilisable.

*Précision améliorée:* La multiplication des satellites permet en général d'améliorer la configuration géométrique usager vers satellite (PDOP, *position dilution of precision*/dégradation géométrique de la précision).

*Démarrage à froid plus rapide:* Lorsqu'aucune information de position ou de temps n'est connue du récepteur, la probabilité d'acquérir des informations d'un satellite croît avec le nombre de satellites visibles, ce qui réduit la durée d'acquisition.

*Intégrité et robustesse du système:* La capacité à détecter et à isoler un satellite défectueux croît considérablement avec le nombre de satellites visibles. En outre, le recours à deux systèmes indépendants offre un niveau d'intégrité supplémentaire et assure une protection contre un éventuel dysfonctionnement général de l'un des systèmes.

On trouve dans le commerce des équipements conçus pour fonctionner simultanément avec les signaux des satellites de navigation GLONASS et GPS aux fins de relevés topologiques et géodésiques sur la terre ferme, en mer et dans les airs. En mode différentiel, ces équipements garantissent une précision de localisation géodésique des stations terriennes de  $1\text{-}3\text{ cm} + 10^{-6} L$  ( $L = 1\ 000\text{ km}$ ),  $L$  étant la distance entre les stations géodésiques, les véhicules automobiles, les aéronefs, les navires [Manuel UIT-R, 2002].

Reconnaissant les avantages susmentionnés de la combinaison GPS-GLONASS, des délégations des Etats-Unis d'Amérique et de la Fédération de Russie se sont rencontrées à Washington les 9 et 10 décembre 2004 et ont mis sur pied des groupes de travail chargés de réfléchir au développement et à l'utilisation des deux systèmes. L'un des tout premiers objectifs de cette coopération continue est de maintenir une compatibilité, en termes de fréquences radioélectriques, entre les signaux horaires et de navigation par satellite de chacun des deux systèmes. Les deux parties prenantes ont exprimé une nouvelle fois leur engagement à poursuivre les discussions et ont réaffirmé que les Etats-Unis d'Amérique et la Fédération de Russie ont l'intention de continuer à émettre les signaux civils GPS et GLONASS nécessaires à une utilisation commerciale, scientifique et en matière de sécurité des personnes, dans le monde entier et en continu, sans frais directs pour les utilisateurs. Depuis cette date, le Groupe de travail GPS-GLONASS se réunit régulièrement.

## 5.8 Conclusion

Sur la base des informations qui précèdent, les conclusions suivantes peuvent être tirées:

- GLONASS est un système mondial de navigation par satellite qui offre actuellement (2010) une couverture quasi mondiale (totale dans quelques années).
- Le système GLONASS est un système à utilisation duale (civile et militaire).
- Le système GLONASS est coordonné par l'agence ROSCOSMOS (Agence spatiale fédérale russe), qui intervient dans le domaine civil.
- L'utilisation du système GLONASS en conjonction avec le système GPS permettra d'améliorer la qualité de la navigation et des services de diffusion horaire de précision.
- Le système GLONASS est ouvert à la coopération internationale.

## Références

- DVORKING V. V., NOSENKO YU. I., URLICHICH YU. M. et FINKEL'STEIN A. M. [2009], «The Russian Global Navigation, Satellite Program», *Vestnik Rossiiskoi Akademii Nauk*, Vol. 79, 1, (<http://www.springerlink.com/content/180m3184w46747u5/fulltext.pdf>).
- GLOTOV V. D., REVNIVYKH S. G. et MITRIKAS V. V. [octobre 2006], *GLONASS status update. MCC activity in GLONASS program*, 15<sup>th</sup> International Workshop on Laser Ranging, Canberra, Australie, (<http://cdis.gsfc.nasa.gov/lw15/docs/papers/GLONASS%20Status%20Update%20and%20MCC%20Activity%20in%20GLONASS%20Program.pdf>).
- KOSENKO V. [3-9 mai 2009], «Satellite System GLONASS Status and Plans», *Proceedings of European Navigation Conference - Global Navigation Satellite Systems (ENC-GNSS)*, Naples, Italie, ([http://www.enc-gnss09.it/proceedingsPDF/04\\_Kosenko.pdf](http://www.enc-gnss09.it/proceedingsPDF/04_Kosenko.pdf)).
- POLISCHUK G. M., KOZLOV V. I., ILITCHOV V. V., KOZLOV A. G., BARTENEV V. A., KOSENKO V. E., ANPHIMOV N. A., REVNIVYKH S. G., PISAREV S. B. et TYULYAKOV A. E. [2002], *Global navigation satellite system GLONASS: development and usage in the 21st century*, 34<sup>th</sup> Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, Reston, Virginie, Etats-Unis d'Amérique, (<http://tycho.usno.navy.mil/ptti/ptti2002/paper13.pdf>).
- REILLY J. P. [2004], *A review of the evolution of the Russian GLONASS system*, [http://www.topconpositioning.com/uploads/tx\\_topconfilearchive/POB Magazine takes an in-depth look at GLONASS - Click here for article.pdf](http://www.topconpositioning.com/uploads/tx_topconfilearchive/POB_Magazine_takes_an_in-depth_look_at_GLONASS_-_Click_here_for_article.pdf).
- REVNIVYKH S. G. [14-15 mars 2005], «GLONASS: Status and Perspectives», Civil GPS Service Interface Committee International Information Subcommittee, Prague, République tchèque, (<http://radio.feld.cvut.cz/satnav/CGSIC/>).
- RISDE [2008], *Global Navigation Satellite System GLONASS Interface Control Document Navigational radio signals in bands L1, L2*, éd. 5.1, Russian Institute of Space Device Engineering (RISDE), (<http://rniikp.ru/en/pages/about/publ/ikd51en.pdf>).

### Textes UIT-R

- Manuel UIT-R sur le contrôle du spectre radioélectrique, Edition de 2002, (<http://www.itu.int/publ/R-HDB-23/fr>).
- Règlement des radiocommunications, Edition de 2008, Volume 2, Appendice 1 – Classification des émissions et des largeurs de bande nécessaires, 2008 (<http://www.itu.int/publ/R-REG-RR-2008/fr>).
- Recommandation UIT-R M.1787 – Description des systèmes et réseaux du service de radionavigation par satellite (espace vers Terre et espace-espace) et caractéristiques techniques des stations spatiales d'émission fonctionnant dans les bandes 1 164-1 215 MHz, 1 215-1 300 MHz et 1 559-1 610 MHz. (<http://www.itu.int/rec/R-REC-M.1787-0-200908-1/fr>).





## CHAPITRE 6

## SYSTÈMES DE COMMUNICATION PAR SATELLITE

	<i>Page</i>
6.1 Introduction .....	74
6.2 Charge utile destinée aux fonctions de communication .....	74
6.2.1 Architecture analogique à guide d'ondes coudé .....	74
6.2.2 Architecture de type régénérateur .....	76
6.2.3 Mise en œuvre numérique .....	76
6.2.4 Système de télémétrie, poursuite et commande .....	76
6.3 Base de temps et synchronisation pour l'exploitation des satellites .....	76
6.4 Incidence du bruit de la liaison et des imperfections du satellite dans les charges utiles à guide d'ondes coudé .....	77
6.4.1 Contribution du bruit blanc .....	77
6.5 Bruit de phase du satellite et erreurs systématiques .....	78
6.6 Conclusion.....	78
Références .....	79

## 6.1 Introduction

La fonction principale des satellites de communication est d'émettre des signaux radiofréquences à des fins de communication. Les opérations de transfert du temps et de fréquence via ce type de satellites s'effectuent donc généralement en se greffant sur les fonctions de communication. Certains systèmes à satellites, en particulier ceux qui utilisent l'accès multiple par répartition dans le temps (AMRT), doivent disposer d'informations horaires précises pour leur fonction de communication [Manuel UIT-R, 2002; Ha, 1990]. Dans la plupart des cas où intervient le multiplexage AMRT, le satellite se contente de retransmettre des signaux horaires précis provenant de la Terre, et sa charge utile n'a donc pas besoin d'une échelle de temps de précision. Le système de télémétrie, poursuite et commande de la plate-forme du satellite doit être doté d'une fonction de transfert du temps à des fins de mesure des distances et d'horodatage. Cela étant, en règle générale, cette partie du satellite n'est pas accessible aux utilisateurs ayant souscrit un contrat de location. En matière de précision et de stabilité en fréquence, les exigences applicables aux satellites commerciaux se limitent en principe au maintien des attributions de bandes de fréquences et à l'exécution des fonctions de télémétrie. Les satellites de communication gouvernementaux, qui sont aussi utilisés pour la navigation et d'autres fonctions nécessitant une échelle de temps de précision, disposent souvent de sources de fréquences embarquées beaucoup plus précises.

Dans les satellites de communication, deux éléments peuvent servir au transfert du temps: d'une part, la charge utile destinée aux fonctions de communication, d'autre part, le système de télémétrie, poursuite et commande (TTC) de la plate-forme. Les paragraphes suivants décrivent les principes de fonctionnement de chacun de ces éléments en mettant l'accent sur les questions de transfert du temps.

La structure et les principales caractéristiques techniques et opérationnelles des satellites de communication sont décrites dans [Manuel UIT-R, 2002].

## 6.2 Charge utile destinée aux fonctions de communication

Les satellites de communication sont utilisés pour divers services de communication. La communication s'effectue dans les bandes de fréquences de la liaison montante et de la liaison descendante via la charge utile du satellite. Ces bandes sont souvent subdivisées en sous-bandes, généralement appelées «canaux». La charge utile destinée aux fonctions de communication a pour rôle de recevoir des signaux acheminés par les bandes ou les canaux de la liaison montante, de les transposer vers de nouvelles fréquences et de leur appliquer des traitements supplémentaires, puis de réémettre les signaux ainsi traités dans les bandes ou les canaux de la liaison descendante.

Les bandes ou les canaux d'un satellite sont utilisés soit par un seul client en mode d'exploitation avec accès simple (AS) (application de diffusion par exemple) soit par de multiples clients dans divers modes d'exploitation avec accès multiple (AM). Les modes de type AM sont: l'accès multiple à répartition spatiale (AMRS), l'accès multiple par répartition dans le temps (AMRT), l'accès multiple par répartition en code (AMRC), l'accès multiple par répartition en fréquence (AMRF) et l'accès multiple aléatoire (AMA).

Ces modes AM sont souvent utilisés en combinaison pour augmenter la capacité de la bande ou du canal.

Les charges utiles destinées aux fonctions de communication se déclinent en deux types généraux d'architecture (guide d'ondes coudé ou régénérateur) et deux types de mise en œuvre (analogique ou numérique). Ces architectures et mises en œuvre sont examinées dans les paragraphes suivants.

### 6.2.1 Architecture analogique à guide d'ondes coudé

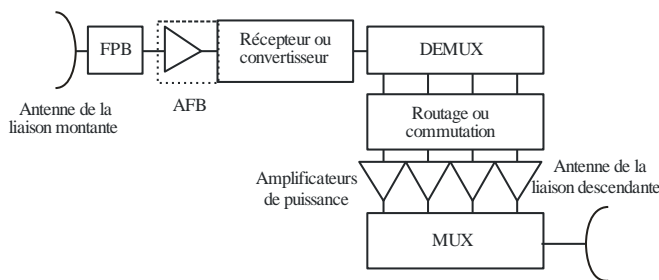
L'architecture de charge utile la plus fréquente est l'architecture analogique à guide d'ondes coudé. Dans cette architecture, de multiples transpondeurs à guide d'ondes coudé transposent simplement un ou plusieurs signaux reçus dans la bande de fréquences de la liaison montante vers une bande de fréquences de la liaison descendante, et rediffusent le signal composite dans cette bande. Il s'agit du type d'architecture le plus utile pour le transfert de signaux horaires, car le trajet des signaux y est relativement direct. En règle générale, les satellites commerciaux reposant sur cette architecture transposent les bandes de fréquences au moyen d'oscillateurs locaux (OL) individuels non asservis. Quant aux satellites gouvernementaux basés sur cette architecture, ils utilisent souvent des OL obtenus de manière cohérente à partir d'un unique oscillateur principal (OP) embarqué à bord du satellite. Dans certains cas, l'OP du satellite est verrouillé en phase sur une référence

située au sol, dans la station de commande du satellite. Les caractéristiques d'erreur de phase des OL utilisés pour effectuer la transposition de fréquences constituent un facteur limitatif important pour les applications de transfert de signaux horaires.

La Figure 6-1 présente le schéma synoptique d'une architecture type à guide d'ondes coudé [Manuel UIT-R, 2002; Ha, 1990]. Dans ce schéma, une antenne de liaison montante est connectée à un filtre passe-bande (FPB) à large bande et à un amplificateur à faible bruit (AFB) qui permettent de déterminer le rapport du gain de l'antenne à sa température de bruit (G/T); ce rapport constitue le facteur de qualité essentiel du satellite au regard de la liaison montante. Le signal reçu est ensuite amplifié et transposé en fréquence vers la bande de la liaison descendante au moyen d'un récepteur ou d'un convertisseur (qui intègre parfois l'AFB).

FIGURE 6-1

**Architecture type à guide d'ondes coudé**

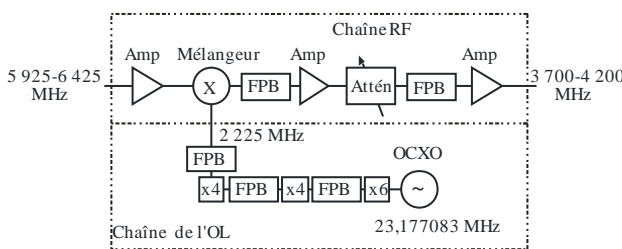


Sat\_time\_freq-06-01

Comme indiqué précédemment, en règle générale, les convertisseurs ou récepteurs commerciaux utilisent, comme oscillateurs locaux pour la transposition en fréquence, des oscillateurs à quartz individuels non asservis, tandis que les convertisseurs gouvernementaux utilisent des oscillateurs locaux à synthèse de fréquences qui sont cohérents en phase avec un oscillateur principal unique. La Figure 6-2 présente un récepteur commercial type [Ha, 1990]. On notera la chaîne multiplicatrice de l'oscillateur local, qui est tirée d'un oscillateur à quartz thermostaté (OCXO) non asservi.

FIGURE 6-2

**Récepteur commercial type en bande C**



Sat\_time\_freq-06-02

A la Figure 6-1, le convertisseur est suivi d'un démultiplexeur (DEMUX), qui sépare la bande de liaison montante complète en bandes ou canaux individuels. Dans certaines charges utiles, le démultiplexage est réalisé dans les convertisseurs au moyen d'oscillateurs locaux à synthèse de fréquences pour permettre la sélection individuelle des conversations sur les fréquences des canaux. Les canaux sont ensuite chacun dirigés vers des amplificateurs de puissance de sortie, un commutateur étant parfois utilisé pour sélectionner les trajets

de routage. Les signaux provenant des amplificateurs de puissance sont enfin combinés dans un multiplexeur en sortie (MUX) en vue de leur réémission par l'antenne de la liaison descendante.

L'exploitation de la plupart des charges utiles à guide d'ondes coudé ne nécessite pas d'échelle de temps précise, les exigences en matière de précision et de stabilité en fréquence étant limitées au respect des attributions des bandes. Cette remarque vaut également lorsque la commutation AMRT est effectuée par l'intermédiaire des stations au sol ou des stations terriennes [Manuel UIT-R, 2002]. A noter toutefois une exception: le mode AMRT avec commutation à bord du satellite (AMRT-CS), dans lequel la commutation entre le démultiplexeur et le multiplexeur contribue à l'opération AMRT. Dans ce cas, la précision horaire requise pour le commutateur peut être inférieure à la microseconde [Ha, 1990].

Les charges utiles employées pour la mesure des distances entre satellites et pour la communication exigent une précision et une stabilité en fréquence plus élevées. Elles reposent souvent sur des oscillateurs locaux à synthèse de fréquences asservis sur un oscillateur principal.

### 6.2.2 Architecture de type régénérateur

Les charges utiles de type régénérateur démodulent les signaux de la liaison montante pour produire des données en bande de base, qu'elles remodulent sur les porteuses de la liaison descendante. Etant donné qu'il n'y a pas de trajet direct entre la liaison montante et la liaison descendante, le transfert de signaux horaires à travers ce type de charge utile doit tenir compte de la latence des données dans le système de traitement numérique du satellite.

### 6.2.3 Mise en œuvre numérique

Certains systèmes à satellites de nouvelle génération, même à guide d'ondes coudé, utilisent le traitement numérique. Le transfert de signaux horaires à travers ces systèmes doit aussi tenir compte des latences des données numériques. Il est difficile de donner des informations générales sur les caractéristiques du transfert du temps de ce type de charges utiles; du reste, leurs spécifications détaillées sont souvent propres au constructeur. Le lecteur est donc invité à contacter le constructeur de la charge utile à l'étude.

### 6.2.4 Système de télémétrie, poursuite et commande

Le système de télémétrie, poursuite et commande (TTC) des satellites fait partie du module de service de la plate-forme. En règle générale, ses caractéristiques d'exploitation sont propres à chaque constructeur. Ce module utilise des codes horaires, cette fonctionnalité étant généralement limitée aux précisions requises à des fins d'horodatage diagnostique, sauf prise en charge du mode AMRT avec commutation à bord du satellite ou d'autres types de fonctions (navigation par exemple). Le système de poursuite vise à déterminer la position et l'orientation du satellite. Il se compose de systèmes de poursuite angulaire et de systèmes de mesure des distances, qui permettent de déterminer respectivement l'orientation et la position. Les systèmes de mesure des distances peuvent servir au transfert de signaux horaires. Ils utilisent des signaux cohérents à tonalités latérales (*side-tone ranging*) ou modulés par un code pseudo-aléatoire pour mesurer le temps d'un aller simple ou d'un aller-retour entre la station au sol et le satellite, de façon analogue à la technique utilisée dans le système GPS (mesure des distances par aller simple). Les données de télémétrie sont horodatées avec une précision suffisante pour effectuer des calculs d'orbite; la précision est donc également suffisante pour le transfert de signaux horaires de précision.

## 6.3 Base de temps et synchronisation pour l'exploitation des satellites

La question de la base de temps et de la synchronisation dans les satellites de communication commerciaux ne pose habituellement pas de problème particulier. Deux cas de figure se présentent: soit les oscillateurs principaux sont asservis manuellement de façon à les maintenir dans les limites de la tolérance en fréquence, soit ils ne sont pas asservis pendant la durée de la mission. Les oscillateurs locaux à transpondeurs indépendants utilisés dans les satellites commerciaux ne sont pas commandés en fréquence, mais, de par leur conception, ils sont suffisamment précis pour respecter les attributions des bandes de fréquences pendant toute la durée de vie du satellite. En règle générale, le système horaire est actualisé manuellement par commande depuis la Terre, s'il y a lieu. Les satellites gouvernementaux peuvent, quant à eux, utiliser des systèmes horaires plus perfectionnés, en raison d'exigences liées à la navigation ou autres. Leurs oscillateurs principaux sont

verrouillés sur des références au sol ou sont en fonctionnement libre, avec asservissement par mises à jour de la fréquence.

## 6.4 Incidence du bruit de la liaison et des imperfections du satellite dans les charges utiles à guide d'ondes coudé

Le bruit et les imperfections d'une liaison passant par une charge utile à guide d'ondes coudé ont des répercussions sur les possibilités de transfert du temps par satellite. Plusieurs facteurs contribuent au bruit et aux imperfections de la liaison: le bruit blanc, le bruit de phase et les variations de phase systématiques.

### 6.4.1 Contribution du bruit blanc

Les équations de base concernant le bruit de la liaison par satellite et les équations relatives aux erreurs horaires permettent d'établir une formule générale, qui donne la contribution du bruit blanc à l'erreur de transfert du temps par satellite. Si l'on utilise un signal de fréquence angulaire  $\omega$  (rad/s) pour le transfert du temps, l'erreur de lecture du transfert du temps,  $x$  (secondes), peut être reliée à l'erreur de phase du signal,  $\varphi$  (radians), par la formule bien connue:

$$x = \varphi / \omega \quad (6-1)$$

Le signal utilisé pour le transfert du temps peut être soit la porteuse elle-même, soit diverses composantes de modulation situées sur la porteuse. Pour un bruit blanc, la variance ordinaire de  $\varphi$  (pour une mesure de phase unique est donnée par la formule:

$$\sigma_{\varphi}^2 = P_{\text{bruit}} / P_{\text{signal}} \quad (6-2)$$

où:

$P_{\text{signal}}$ : puissance de signal reçue

$P_{\text{bruit}}$ : puissance de bruit reçue.

A partir des équations (6-1) et (6-2), on obtient l'expression suivante de la variance ordinaire de  $x$  (pour une mesure unique):

$$\sigma_{x\text{-std}}^2 = P_{\text{bruit}} / (P_{\text{signal}} \omega^2) \quad (6-3)$$

A partir des équations bien connues concernant la liaison et le bruit blanc [Manuel UIT-R, 2002], on tire la formule suivante, qui exprime le rapport entre le bruit blanc et le signal reçu (applicable à la liaison montante ou à la liaison descendante) en fonction des paramètres de base de la liaison:

$$P_{\text{bruit}} / P_{\text{signal}} = kB(2r\omega_{\text{por}} / (c\omega))^2 / P_{\text{pire}}(G/T) \quad (6-4)$$

où:

$P_{\text{pire}}$ : puissance isotrope rayonnée équivalente (p.i.r.e.) de l'émission

$G/T$ : rapport entre le gain et la température en réception

$B$ : largeur de bande limite (= plus petite) de la liaison

$\omega_{\text{por}}$ : fréquence angulaire de la porteuse pour la liaison

$k$ : constante de Boltzman;  $r$  désigne la distance et  $c$  la vitesse de la lumière.

Ainsi, pour l'une ou l'autre des liaisons:

$$\sigma_{x\text{-std}}^2 = kB(2r\omega_{\text{por}} / (c\omega))^2 / P_{\text{pire}}(G/T) \quad (6-5)$$

Les contributions du bruit blanc sur la liaison montante et sur la liaison descendante étant statistiquement indépendantes, la variance combinée pour les deux liaisons est donnée par:

$$\sigma_{x-std-tot}^2 = 4 kB(\omega_{por} / (c\omega))^2 [r_{montante}^2 / P_{pire-sol}(G/T)_{satellite} + r_{descendante}^2 / (P_{pire-satellite}(G/T)_{sol})] \quad (6-6)$$

où:

$B$ : largeur de bande limite pour l'ensemble de la liaison.

L'équation (6-6) représente l'erreur de lecture horaire pour une mesure de phase unique. On peut obtenir une estimation de la fréquence normée sur une durée d'intégration  $\tau$  en calculant la différence entre deux mesures de lecture horaire et en divisant par  $\tau$ . La variance ordinaire ou la variance d'Allan (identiques dans le cas du bruit blanc) des estimations de la fréquence normée pour cette durée d'intégration  $\tau$  est donc donnée par:

$$\sigma_y^2 = 8 kB(\omega_{por} / (c\omega))^2 [r_{montante}^2 / P_{pire-sol}(G/T)_{satellite} + r_{descendante}^2 / (P_{pire-satellite}(G/T)_{sol})] \quad (6-7)$$

La variance de la deuxième différence de l'erreur de lecture horaire sur la durée  $\tau$  est égale à:

$$\sigma_X^2 = \tau^2 \sigma_y^2 \quad (6-8)$$

et est donc donnée par la formule:

$$\sigma_x^2 = 8 kB(\omega_{por} / (c\omega))^2 [r_{montante}^2 / P_{pire-sol}(G/T)_{satellite} + r_{descendante}^2 / (P_{pire-satellite}(G/T)_{sol})] \quad (6-9)$$

Les équations (6-7) et (6-9) s'appliquent à la fois au transfert du temps par satellite unidirectionnel et bidirectionnel (pour chaque transfert) étant donné que les systèmes bidirectionnels ne suppriment pas le bruit blanc. Les équations ci-dessus représentent donc la solution optimale pour une liaison par satellite. On notera en outre que le transfert du temps utilisant la porteuse présente une gigue horaire inférieure à celle du transfert utilisant la modulation, car la fréquence de modulation est toujours inférieure à  $\omega_{por}$ .

## 6.5 Bruit de phase du satellite et erreurs systématiques

Les oscillateurs locaux des convertisseurs de fréquence ajoutent un bruit de phase au signal de communication. Le bruit de phase et les dérives de fréquence des oscillateurs ont un effet direct sur l'instabilité de la porteuse du transpondeur et de la phase de la modulation. Les dérives et le bruit quasiment en phase sont généralement supérieurs dans les transpondeurs commerciaux qui utilisent différents oscillateurs à quartz. Le temps de propagation de groupe et de phase et les variations du temps de propagation des filtres et des composants actifs du système ont une incidence sur la modulation et sur la phase de la porteuse, même si ces instabilités sont bornées. Ces instabilités sont essentiellement dues à des variations de la température, des tensions de la plate-forme et des niveaux de puissance le long des liaisons. Pour en connaître les valeurs précises, il convient de contacter le fournisseur de services par satellite.

Dans le cas d'un transfert du temps par aller et retour via le même transpondeur, on observe une annulation importante des dérives de l'oscillateur local et des variations des temps de propagation. Dans le cas d'un transfert de temps par aller et retour simultané effectué au moyen de deux fréquences différentes, le problème principal provient de la variation du temps de propagation dans la bande du canal, qui est due à la dispersion des fréquences. Pour ce qui concerne le transfert du temps par aller et retour séquentiel, la principale difficulté réside dans le changement de phase qui intervient dans les oscillateurs locaux pendant l'intervalle de temps entre les transferts.

## 6.6 Conclusion

Les systèmes de communication par satellite peuvent être utilisés pour le transfert du temps, mais il importe, pour ce faire, de bien comprendre la structure, le fonctionnement et les limites du système mis en œuvre. Divers types de systèmes de communication par satellite ont été utilisés avec succès à cette fin, grâce à l'application

de méthodes spécialement conçues pour mettre à profit les points forts de chaque système et réduire au minimum l'incidence de leurs points faibles.

### Références

HA T. T. [1990], *Digital Satellite Communications*, McGraw-Hill, 1990.

UIT-R [2002], *Manuel sur les communications par satellite*, 3ème édition, Union internationale des télécommunications, Wiley & Sons, Inc.

MORGAN W. L. et GORDON G. D. [1989], *Communications Satellite Handbook*, Wiley & Sons, Inc.





## CHAPITRE 7

## ÉCHELLES DE TEMPS

	<i>Page</i>
7.1 Introduction .....	82
7.2 Temps universel .....	82
7.3 Temps des éphémérides .....	83
7.4 Temps atomique .....	83
7.5 Echelles de temps relativistes.....	84
7.5.1 Temps terrestre .....	84
7.5.2 Temps-coordonnée géocentrique .....	84
7.5.3 Temps-coordonnée barycentrique .....	85
7.5.4 Temps dynamique barycentrique .....	87
7.6 Echelles de temps internationales .....	87
7.6.1 Le temps atomique international .....	88
7.6.2 Temps universel coordonné .....	91
Références .....	96

## 7.1 Introduction

Trois grandes méthodes de mesure du temps sont utilisées:

- 1) mesure du temps reposant sur la rotation de la Terre;
- 2) mesure du temps reposant sur les mouvements célestes de la Terre, de la Lune et des planètes;
- 3) mesure du temps reposant sur la mécanique quantique de l'atome.

Les techniques de mesure étant de plus en plus précises et perfectionnées, chacune de ces méthodes a fait l'objet de diverses améliorations.

Les définitions des échelles de temps et des termes associés figurent dans la Recommandation UIT-R TF.686-2 «Glossaire et définitions relatives aux fréquences étalon et aux signaux horaires».

## 7.2 Temps universel

Le temps mesuré à partir de la rotation de la Terre est appelé «temps solaire moyen». Lorsqu'il est estimé en prenant comme référence minuit sur le méridien de Greenwich, on parle de «temps universel (UT)». Le jour solaire moyen est défini, de façon formelle, comme l'intervalle de temps séparant deux passages successifs d'un soleil moyen fictif au-dessus d'un méridien donné. La seconde solaire moyenne est définie comme la fraction 1/86 400 d'un jour solaire moyen.

La mesure réelle de l'angle de rotation de la Terre par rapport au système de référence céleste correspond à la forme du temps UT appelée «UT1». En pratique, le temps UT1 n'est pas déterminé par la position du Soleil, mais par le mouvement diurne de l'équinoxe de printemps sur la sphère céleste, conformément à une relation conventionnelle exprimant UT1 sur la base de l'heure sidérale moyenne de Greenwich (GMST, *Greenwich Mean Sidereal Time*). Autrefois, le temps UT1 était mesuré à partir des transits stellaires. On utilise aujourd'hui des mesures de radiosources ponctuelles compactes par interférométrie à très grande ligne de base (VLBI, *Very Long Baseline Interferometry*), la télémétrie laser sur satellites (SLR, *satellite laser ranging*) et la poursuite des satellites du GPS.

Par définition, le temps UT1 est exprimé sur la base de l'heure GMST comme suit [Aoki *et al.*, 1982]:

$$\text{GMST} = 24\,110,548\,41 + 8640184,812\,866\,T + 0,093\,104\,T^2 - 0,000\,0062\,T^3 \quad (7-1)$$

où:

$T$ : temps universel écoulé depuis le 1er janvier 2000 à 12 h UT mesuré en siècles juliens de 36 525 jours.

Le système de référence céleste conventionnel adopté par l'Union astronomique internationale (UAI) [Assemblée générale, 1997], qui repose sur la position d'objets extragalactiques observés par interférométrie à très grande ligne de base, a modifié le principe de mesure du temps UT1 et supprimé la nécessité d'une référence à l'équinoxe.

En raison des irrégularités de la rotation de la Terre, le temps UT1 n'est pas uniforme. On distingue trois sources de variation: une augmentation constante de la longueur du jour causée par le frottement dû aux marées, une variation saisonnière périodique et des fluctuations aléatoires. Le temps UT2, qui correspond au temps UT1 corrigé de la variation saisonnière, est exprimé en secondes par la formule suivante [Seidelmann, 1992]:

$$\text{UT2} = \text{UT1} + 0,022 \sin 2\pi t - 0,012 \cos 2\pi t - 0,006 \sin 4\pi t + 0,007 \cos 4\pi t \quad (7-2)$$

où:

$t$ : fraction de l'année besselienne.

A noter que le temps UT2 n'est plus utilisé dans la pratique.

### 7.3 Temps des éphémérides

Le temps des éphémérides (ET, *ephemeris time*) est une échelle de temps uniforme définie par la théorie de la gravitation de Newton qui explique le mouvement de la Terre autour du Soleil, telle que représentée par les *Tables du Soleil* de Newcomb. D'après Newcomb, la longitude moyenne géométrique du Soleil pour l'époque 1900 est donnée par [NewComb, 1895]:

$$L = 279^{\circ}4'148,04 + 129\,602\,768,13 T + 1,089 T^2 \quad (7-3)$$

où:

$T$ : temps des éphémérides mesuré en nombre de siècles à partir de 1900.

Le coefficient linéaire de cette formule définit la seconde des éphémérides. Ainsi, l'année tropicale 1900 contenait  $[360 \times 60 \times 60 / 129\,602\,768,13] \times 36\,525 \times 86\,400 = 31\,556\,925,9747$  s.

En 1956, le Comité international des poids et mesures (CIPM) a défini la seconde de temps ET comme la fraction  $1/31\,556\,925,9747$  de l'année tropique pour 1900 janvier 0 à 12 heures de temps des éphémérides.

Cette définition a été ratifiée par la Conférence générale des poids et mesures (CGPM) en 1960.

La référence à l'année 1900 ne signifie pas qu'il s'agit de l'époque d'un jour solaire moyen de 86 400 s. Il s'agit plutôt de l'époque d'une année tropique de 31 556 925,9747 s.

Bien que défini en fonction de la position du Soleil, le temps des éphémérides était en fait réalisé indirectement par l'observation de la Lune. Ce temps peut être défini comme la variable indépendante qui fournit les positions des corps célestes déterminées à partir des lois dynamiques du mouvement de Newton, en accord avec les observations. Il repose donc seulement sur la mécanique newtonienne, qui postule un temps-coordonnée universel, la relativité n'étant pas prise en compte.

Le temps des éphémérides ET a remplacé le temps UT1 pour les éphémérides astronomiques en 1960.

### 7.4 Temps atomique

Le premier étalon atomique à jet de césium opérationnel a été mis en service au Laboratoire national de physique du Royaume-Uni en 1955. Des échelles de temps atomique ont été instaurées aux Etats-Unis d'Amérique par l'USNO (U.S. Naval Observatory) et le National Bureau of Standards en 1956, suivis, peu de temps après, par plusieurs autres observatoires et laboratoires. Sept ans seulement après l'adoption de la seconde des éphémérides en 1960, la CGPM a adopté la seconde atomique comme unité fondamentale de temps dans le Système international d'unités (SI). La seconde a été définie comme «la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133». Cette valeur a été déterminée en comparant le temps des éphémérides ET basé sur des observations de la Lune avec l'échelle de temps atomique.

Le temps atomique, sur lequel reposent désormais toutes les échelles de temps modernes, est conservé en permanence par divers laboratoires depuis 1955, bien qu'il n'ait été officiellement adopté comme échelle de temps internationale qu'en 1971. Depuis la création du Bureau international de l'heure (BIH) en 1920, à l'Observatoire de Paris (OP), les échelles de temps internationales reposaient entièrement sur des observations astronomiques. L'unité de temps était la seconde, qui était elle-même déterminée à partir de telles observations. L'arrivée et l'exploitation des étalons atomiques au césium dans les années 1950 et des systèmes de diffusion comme LORAN, qui permettaient de les comparer de façon précise à l'échelle mondiale, ont abouti à une première forme de ce qu'on appelle le «temps atomique» (TA).

La création du temps atomique international (TAI) a été recommandée par l'Union astronomique internationale (UAI) en 1967, l'Union radioscopique internationale (URSI) en 1969 et le Comité consultatif international des radiocommunications (CCIR) de l'UIT en 1970. La 14<sup>ème</sup> Conférence générale des poids et mesures (CGPM) a approuvé l'établissement du TAI en 1971 comme l'échelle de temps-coordonnée dont l'intervalle unitaire est la seconde du Système international d'unités (SI) produite sur le géoïde de rotation.

On trouvera des informations plus détaillées sur la mise en œuvre du temps atomique international (TAI) au § 7.6.1.

## 7.5 Echelles de temps relativistes

Le temps des éphémérides (ET) était une échelle de temps définie par les lois dynamiques du mouvement de Newton. Cependant, aucune distinction n'était faite entre les échelles de temps dynamiques définies par rapport à la surface de la Terre, au centre de la Terre ou au centre du système solaire. Il était donc nécessaire d'apporter des définitions plus précises pour les échelles relativistes, qui étaient traditionnellement établies à partir du temps des éphémérides. Ces nouvelles échelles de temps sont les arguments des éphémérides relativistes utilisées en astronomie et en mécanique céleste. Le chapitre 9 examine les effets relativistes dans le domaine du transfert et de la diffusion par satellite de signaux horaires et de fréquence.

En 1976, l'Union astronomique internationale a adopté des échelles de temps pour les éphémérides relativistes, qui ne diffèrent du temps TAI que par des termes périodiques [Muller *et al.* 1977]. En 1979, ces échelles de temps ont reçu le nom de «temps dynamique terrestre» (TDT) et «temps dynamique barycentrique» (TDB). En 1991, le TDT a été simplement renommé «temps terrestre» (TT). En outre, l'UAI a adopté de nouvelles échelles de temps qui ont toutes la seconde du SI comme unité. Le temps-coordonnée géocentrique (TCG) et le temps-coordonnée barycentrique (TCB) sont des échelles de temps applicables aux systèmes de coordonnées qui ont pour origine respectivement le centre de la Terre et le barycentre du système solaire [Bergeron, 1992]. Ces échelles de temps ont été précisées via des résolutions adoptées par l'UAI en 2000.

### 7.5.1 Temps terrestre

Le temps terrestre (TT) est la coordonnée temps qui est représentée par les lectures horaires des horloges sur le géoïde. En pratique, le temps TT est réalisé en termes de temps atomique international (TAI), dont l'unité est la seconde du Système international d'unités (SI). On peut considérer que le temps TT est équivalent au temps TDT, dont l'origine est fixée au 1er janvier 1977 0 h TAI et qui garantit la continuité avec le temps des éphémérides (ET). Le temps TDT a remplacé le temps ET en 1984 comme l'argument des tables des éphémérides géocentriques fondamentales.

Etant donné que le temps TT est une échelle théoriquement uniforme et que le temps TAI est une échelle atomique obtenue par une méthode statistique, les temps TT et TAI ne sont pas rigoureusement identiques. Cela dit, moyennant une tolérance de  $\pm 10 \mu\text{s}$  environ, leur différence reste constante. Une réalisation concrète du temps TT est donnée par la formule:

$$\text{TT} = \text{TAI} + 32,184 \text{ s} \quad (7-4)$$

Le décalage constant est une estimation de la différence entre les temps ET et UT1 à l'époque de définition du temps TAI le 1er janvier 1958. Le temps TT peut être vu comme une forme idéale du temps TAI.

### 7.5.2 Temps-coordonnée géocentrique

Le temps-coordonnée géocentrique (TCG) désigne l'échelle de temps-coordonnée applicable aux éphémérides par rapport au centre de la Terre, dont l'unité est la seconde du SI. Le temps-coordonnée  $\Delta t$  au géocentre TCG est lié au temps propre  $\Delta\tau$  sur le géoïde (TT) par la formule:

$$\Delta t = (1 + W_0 / c^2) \Delta\tau.$$

Le temps TCG diffère donc du temps TT d'un facteur d'échelle égal à:

$$\text{TCG} - \text{TT} = L_G \Delta T \quad (7-5)$$

où:

$$L_G = W_0 / c^2 = 6,969\ 290\ 134 \times 10^{-10} \text{ (environ } 60,2 \mu\text{s/d)}$$

$$\Delta T: \text{ temps écoulé depuis le 1er janvier 1977 0 h TAI (jour julien } 244\ 3144,5)$$

En 2000, l'UAI a redéfini le temps TT de sorte qu'il diffère du temps TCG avec un taux de variation constant égal à  $dTT / dTCG = 1 - L_G$ . La valeur de  $L_G$  était la meilleure estimation de  $(W_0 / c^2)$  en 2000, mais elle est aujourd'hui considérée comme une constante de définition non susceptible d'être révisée à l'avenir [Rickmand, 2001].

### 7.5.3 Temps-coordonnée barycentrique

Le temps-coordonnée barycentrique (TCB) désigne l'échelle de temps-coordonnée applicable aux éphémérides par rapport au système solaire, dont l'unité est la seconde du SI. Le temps-coordonnée  $\Delta t_B$  dans un système de coordonnées barycentrique correspondant au temps propre  $\Delta\tau$  conservé par une horloge sur le géoïde est donné par:

$$\Delta t_B = \int_{\tau_0}^{\tau} \left( 1 + \frac{1}{c^2} U(\mathbf{r}) + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} v^2 \right) d\tau \quad (7-6)$$

où:

- r** et **v**: position et vitesse barycentrique de l'horloge
- U(r)**: potentiel gravitationnel de l'ensemble des objets du système solaire (y compris la Terre), évalué sur le géoïde.

Le temps-coordonnée  $t_B$  est identifié au temps TCB et le temps propre  $\tau$  au temps TT.

L'intégrale dépend de la position et de la vitesse de l'horloge dans le système de coordonnées barycentrique. Il est donc souhaitable de séparer la partie dépendante de l'horloge et la partie indépendante de l'horloge.

Dans cette approximation, on peut exprimer **r** et **v** comme suit:

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_T + \mathbf{R} \quad \text{et} \quad \mathbf{v} = \mathbf{v}_T + \dot{\mathbf{R}}$$

où:

- r<sub>T</sub>** et **v<sub>T</sub>**: position et vitesse barycentriques du centre de masse de la Terre
- R** et  **$\dot{\mathbf{R}} = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{R}$** : position et vitesse géocentriques de l'horloge.

Le potentiel total est égal à:

$$U(\mathbf{r}) = U_T(\mathbf{r}) + U_{ext}(\mathbf{r})$$

où:

- U<sub>T</sub>**: potentiel newtonien de la Terre
- U<sub>ext</sub>**: potentiel newtonien externe de l'ensemble des objets du système solaire à l'exception de la Terre.

Par ailleurs,  $U_{ext}(\mathbf{r}) \approx U_{ext}(\mathbf{r}_T) + \nabla U_{ext} \cdot \mathbf{R}$  et  $\mathbf{v}_T \cdot \dot{\mathbf{R}} = (d / dt_B)(\mathbf{v}_T \cdot \mathbf{R}) - \mathbf{a}_T \cdot \mathbf{R}$

où:

$$\mathbf{a}_T = \nabla U_{ext} \quad \text{est l'accélération de la Terre.}$$

Par conséquent [Thomas, 1975; Moyer 1971 et 1981]:

$$\Delta t_B \approx \Delta\tau + \frac{1}{c^2} \int_{t_{B0}}^{t_B} \left( U_{ext}(\mathbf{r}_T) + \frac{1}{2} v_T^2 \right) dt_B + \frac{1}{c^2} W_0 \Delta\tau + \frac{1}{c^2} \mathbf{v}_T \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_T) \quad (7-7)$$

où:

- Le premier terme correspond au temps propre mesuré par une horloge sur le géoïde.

- Le deuxième terme est dû aux effets combinés du décalage vers le rouge et de la dilatation du temps, au géocentre, par rapport au barycentre, et est indépendant de l'horloge.
- Le troisième terme correspond à la différence horaire entre une horloge située au géocentre et une horloge située sur le géoïde.
- Le quatrième terme dépend de l'emplacement de l'horloge.

Dans le cas limite d'un espace-temps plat, il correspond à la correction de synchronisation de l'horloge, en relativité restreinte, dans le repère géocentrique en mouvement observé à partir du repère barycentrique. Pour une horloge située sur le géoïde, il présente des variations diurnes d'une amplitude de 2,1  $\mu$ s. L'annulation des deux termes d'accélération est une manifestation du *Principe d'équivalence* appliqué à un repère en chute libre.

L'intégrale peut être calculée par intégration numérique des éphémérides planétaires et lunaires ou représentée par une formule analytique. Elle s'exprime comme la somme d'un terme séculaire  $L_C \Delta T$  et des termes périodiques restants  $P$ .

La relation entre TCB et TT est donc (Recommandation UIT-R TF.686-2):

$$\begin{aligned} \text{TCB} - \text{TT} &= \frac{1}{c^2} \int_{t_{B_0}}^{t_B} \left( U_{ext}(\mathbf{r}_T) + \frac{1}{2} v_T^2 \right) dt_B + L_G \Delta T + \frac{1}{c^2} \mathbf{v}_T \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_T) \\ &= L_C \Delta T + P + L_G \Delta T + \frac{1}{c^2} \mathbf{v}_T \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_T) \end{aligned} \quad (7-8)$$

La relation entre TCB et TCG est donnée par:

$$\text{TCB} - \text{TCG} = (\text{TCB} - \text{TT}) - (\text{TCG} - \text{TT})$$

D'où:

$$\text{TCB} - \text{TCG} = \frac{1}{c^2} \int_{t_{B_0}}^{t_B} \left( U_{ext}(\mathbf{r}_T) + \frac{1}{2} v_T^2 \right) dt_B + \frac{1}{c^2} \mathbf{v}_T \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_T) = L_C \Delta T + P + \frac{1}{c^2} \mathbf{v}_T \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_T) \quad (7-9)$$

où:

$$L_C = 1,480\,826\,867\,41 \times 10^{-8} \text{ (environ } 1,28 \text{ ms/d) [Irwin et Fukushima, 1999].}$$

Plus de cent termes périodiques doivent être pris en compte pour obtenir une précision de 100 ns [Fairhead *et al.*, 1998]. En première approximation:

$$\frac{1}{c^2} \int_{t_{B_0}}^{t_B} \left( U_{ext}(\mathbf{r}_T) + \frac{1}{2} v_T^2 \right) dt_B \approx \frac{3}{2} \frac{1}{c^2} \frac{GM_S}{a_T} \Delta T + \frac{2}{c^2} \sqrt{GM_S a_T} e \sin E \quad (7-10)$$

où:

- $GM_S$ : constante de gravitation du Soleil
- $a_T$  et  $e$ : demi-grand axe et excentricité de l'orbite de la Terre.

Le premier terme est une valeur approchée de  $L_C \Delta T$ . Le second est le terme périodique principal  $P$ , dont l'amplitude est égale à 1,7 ms.

### 7.5.4 Temps dynamique barycentrique

Le temps dynamique barycentrique (TDB) est aussi un temps-coordonnée barycentrique. Cela étant, en vertu de la résolution de l'UAI de 1976, la différence entre le temps TDB et le temps TT (alors appelé TDT) ne doit contenir que des termes périodiques. La variation du temps-coordonnée est donc redimensionnée comme suit:

$$\Delta t'_B = (1 - L_B) \Delta t_B$$

où:

$\Delta t'_B$ : correspond à TDB

$\Delta t_B$ : correspond à TCB.

La relation entre TCB et TDT est donnée par:

$$\text{TCB} - \text{TDB} = L_B \Delta T \quad (7-11)$$

La relation entre TDB et TT est  $\text{TDB} - \text{TT} = (\text{TCB} - \text{TT}) - (\text{TCB} - \text{TDB})$ , d'où:

$$\begin{aligned} \text{TDB} - \text{TT} &= \frac{1}{c^2} \int_{t_{B_0}}^{t_B} \left( U_{ext}(\mathbf{r}_T) + \frac{1}{2} v_T^2 \right) dt_B + L_G \Delta T + \frac{1}{c^2} \mathbf{v}_T \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_T) - L_B \Delta T \\ &= L_C \Delta T + P + L_G \Delta T + \frac{1}{c^2} \mathbf{v}_T \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_T) - L_B \Delta T \end{aligned} \quad (7-12)$$

qui ne contient pas de termes séculaires si  $L_B \approx L_C + L_G$ . Le laboratoire JPL utilise une autre échelle de temps pour les éphémérides relativistes, appelée  $T_{eph}$ , qui est proche du temps TDB [Standish, 1998]. Si l'intégrale est calculée au moyen d'éphémérides planétaires exprimées en temps  $T_{eph}$  pour argument, elle doit être divisée par le facteur  $1 - L_B$ .

La vitesse de variation de TDB par rapport à TCB est égale à:

$$\left\langle \frac{dTDB}{dTCB} \right\rangle = \left\langle \frac{dTDB}{dT} \right\rangle \frac{dT}{dTCG} \left\langle \frac{dTCG}{dTCB} \right\rangle \quad (7-13)$$

où:

$\langle \rangle$  désigne la moyenne à long terme prise au géocentre;

la valeur de  $L_B$  est donnée par la formule:

$$1 - L_B = (1 - L_G)(1 - L_C)$$

puisque  $\langle dTDB/dTCB \rangle = 1 - L_B$

$$dT/dT_{CG} = 1 - L_G$$

$$\langle dT_{CG}/dTCB \rangle = 1 - L_C$$

$$\langle dTDB/dT \rangle = 1.$$

D'où:  $L_B = 1,550\,519\,767\,72 \times 10^{-8}$  (environ 1,34 ms/d).

Le facteur  $1 - L_B$  relie les unités de temps et de distance des éphémérides exprimées en temps TDB aux unités du SI correspondantes.

## 7.6 Echelles de temps internationales

Avec le développement des réseaux informatiques et de télécommunication de portée mondiale et, en particulier, des systèmes mondiaux électroniques de navigation, il est nécessaire de disposer d'échelles de temps internationales synchronisées de grande précision. Les organisations internationales compétentes ont donc élaboré et adopté les principales échelles de temps internationales suivantes:

- le temps atomique international (TAI);
- le temps universel coordonné (UTC).

### 7.6.1 Le temps atomique international

L'époque du temps atomique international (TAI) est fixée au 1er janvier 1958. Le temps TAI est défini comme l'échelle de temps atomique établie par le BIPM sur la base des indications de 400 horloges atomiques gérées dans une soixantaine de laboratoires. Elle est en outre spécifiée [BIPM, 1981] comme une échelle de temps-coordonnée définie dans un repère de référence géocentrique avec comme unité d'échelle la seconde du SI telle qu'elle est réalisée sur le géoïde en rotation. Le temps TAI était l'extension d'une échelle de temps atomique conservée par le BIH, dont l'existence remontait à 1955.

L'établissement du temps TAI a été recommandé par l'Union astronomique internationale (UAI) en 1967, l'Union radioscopique internationale (URSI) en 1969 et le Comité consultatif international des radiocommunications (CCIR) de l'UIT en 1970. La 14<sup>ème</sup> Conférence générale des poids et mesures (CGPM) a approuvé l'établissement du temps TAI en 1971.

Le temps TAI est l'échelle de temps établie à partir de données de comparaison d'horloges communiquées au BIPM par les laboratoires participants et d'un algorithme spécifique nommé ALGOS. Le temps TAI a en outre été défini comme une échelle de temps-coordonnée dans un repère de référence géocentrique avec comme unité d'échelle la seconde du SI telle qu'elle est réalisée sur le géoïde en rotation. C'est en 1980 que le Comité consultatif pour la définition de la seconde a établi que le temps TAI était une échelle de temps-coordonnée. Le CCDS, renommé Comité consultatif du temps et des fréquences (CCTF) en 1997, a apporté les informations de correction nécessaires à l'établissement du temps TAI en termes relativistes et à son utilisation dans des repères non terrestres. La précision du temps TAI joue un rôle fondamental dans la conservation de la seconde du SI et la garantie d'une échelle fiable sur le long terme. L'optimisation de la stabilité à long terme est obtenue aux dépens de l'accessibilité à court terme. Le calcul du temps TAI s'effectue à partir de données couvrant un grand laps de temps. Les données d'horloges sont communiquées au BIPM les jours correspondant à une date julienne modifiée se terminant par 4 et 9.

Deux techniques de transfert du temps sont mises en œuvre pour la comparaison d'horloges:

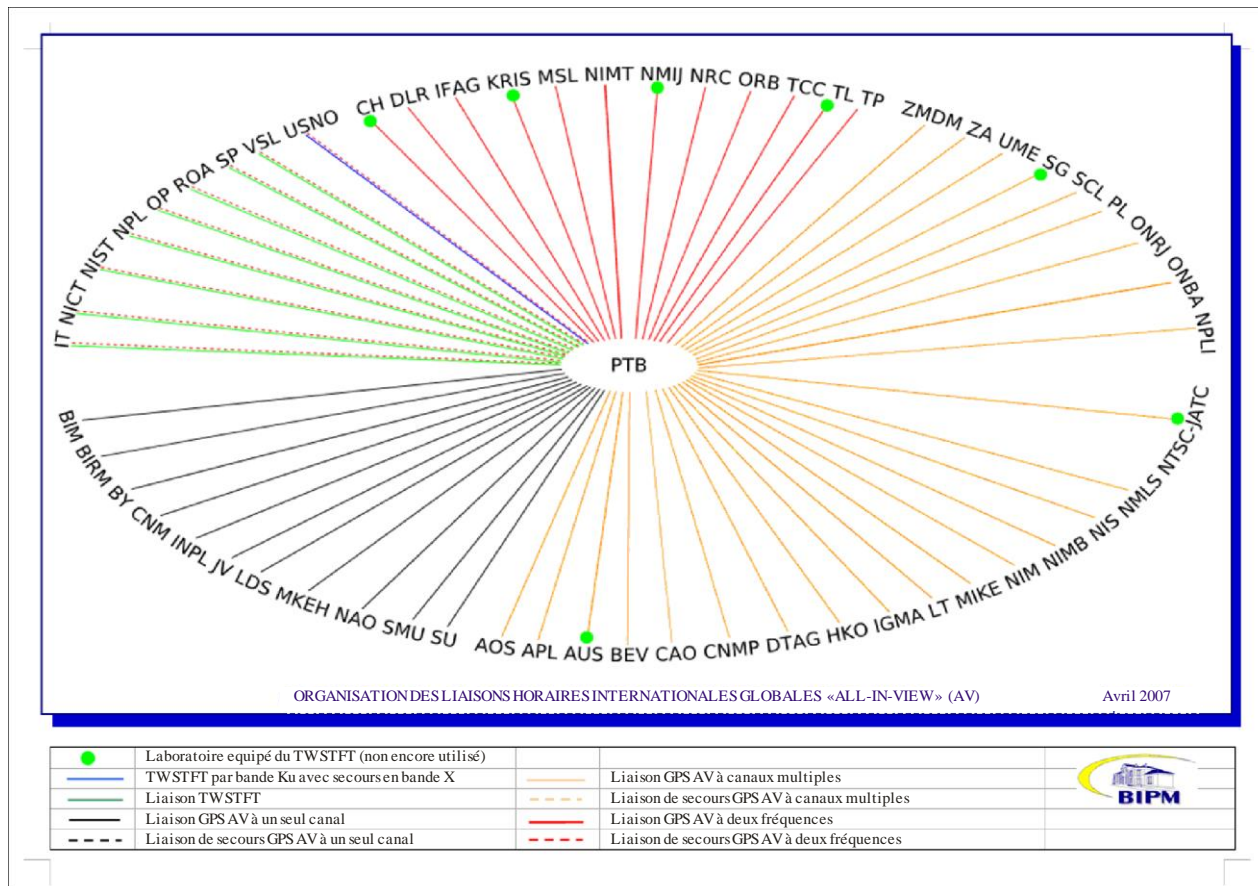
- a) comparaison, via la poursuite de satellites du GPS, du temps local UTC par rapport au temps du GPS, ou
- b) comparaison de deux temps locaux UTC (§ 7.6.2) par transfert TWSTFT.

Les liaisons horaires utilisées pour les comparaisons d'horloges sont organisées par le BIPM selon le schéma présenté à la Figure 7-1. Le calcul de l'échelle est effectué à partir de blocs de données couvrant 30 jours. La période de 30 jours a été choisie pour positionner le temps d'intégration effectif de l'échelle au niveau de la transition entre le palier de scintillation et la marche aléatoire de fréquence des horloges au césium. Ainsi, l'utilisation d'un temps d'intégration plus long n'améliorerait pas la stabilité. La période de 30 jours est suffisante pour lisser le bruit dû aux liaisons horaires ainsi que le bruit blanc de fréquence des horloges.



FIGURE 7-1

Liaisons horaires internationales entre les centres participants



Sat\_time\_freq-07-01

Pour déterminer le temps TAI, on procède en trois étapes:

*Etape 1:* Calcul, à l'aide d'une procédure itérative post-traitement, d'une échelle intermédiaire appelée «échelle atomique libre (EAL)», à partir des données de comparaison d'horloges et de l'algorithme ALGOS.

*Etape 2:* Evaluation de la durée de l'unité de l'échelle EAL à partir de données issues d'étalons primaires de fréquence et d'un filtre optimal.

*Etape 3:* Production du temps TAI à partir de l'échelle EAL en appliquant, si nécessaire, une correction à l'intervalle d'échelle de l'EAL de façon à obtenir une valeur aussi proche que possible de la seconde du SI. La correction de l'unité d'échelle, appelée «pilotage de fréquence», est effectuée, si cela est jugé nécessaire, tous les mois en appliquant une correction variable, avec un palier maximal d'un mois à l'autre inférieur ou égal à  $7 \times 10^{-16}$ .

La méthode d'élaboration du temps TAI est brièvement décrite ci-dessous. Voir [Azoubib *et al.*, 1977] pour des informations complémentaires.

1) *Structure du temps TAI:* Le temps,  $t$ , de l'échelle EAL  $f(t)$  est défini en fonction des observations  $h_i(t)$  d'un groupe de  $N$  horloges,  $H_i$ , par la formule:

$$\text{EAL}(t) = \frac{\sum_{i=1}^N p_i [h_i(t) + h'_i(t)]}{\sum_{i=1}^N p_i} \quad (7-14)$$

où:

- $p_i$  : pondération statistique assignée à l'horloge  $H_i$ ;  
 $h'_i(t)$  : correction horaire destinée à assurer la continuité de temps et de fréquence de l'échelle lorsque la pondération individuelle des horloges ou le nombre total d'horloges est modifié.

Cette formule ne peut pas être utilisée directement, car les quantités mesurées qui fournissent les données de base ne correspondent pas aux observations des horloges individuelles, mais aux résultats des comparaisons entre paires d'horloges. A l'instant  $t$ , les différences de variation lente  $\zeta_{ij}(t)$  entre les observations des horloges  $H_i$  et  $H_j$  sont écrites sous la forme:

$$\zeta_{ij}(t) = h_i(t) - h_j(t) \quad (7-15)$$

Le résultat produit par l'échelle EAL est alors un ensemble de  $N$  valeurs des différences  $x_i(t)$  définies par:

$$x_i(t) = \text{EAL}(t) - h_i(t) \quad (7-16)$$

où:

- $x_i$ : différences entre les observations des horloges individuelles et le temps défini par l'échelle EAL.

La différence peut alors s'exprimer comme suit:

$$x_i(t) - x_j(t) = -\zeta_{ij}(t) \quad (7-17)$$

et l'équation (7-14) donne, après transformation:

$$\sum_{i=1}^N p_i x_i(t) = \sum_{i=1}^N p_i h'_i(t) \quad (7-18)$$

En pratique, un système non redondant de  $N - 1$  liaisons horaires est utilisé pour résoudre ces deux dernières équations.

2) *Méthode de pondération*: Le poids assigné à chaque horloge est calculé de façon à privilégier la stabilité à long terme de l'échelle résultante et à réduire au minimum les fluctuations annuelles et la dérive de fréquence par rapport aux étalons primaires de fréquence. A noter une caractéristique importante de l'algorithme ALGOS: l'évaluation de la pondération de l'horloge, quoique reposant sur des données couvrant une année entière, prend en compte les 30 jours de données pour lesquels l'échelle EAL est calculée. Il est donc possible d'estimer la qualité de fonctionnement réelle des horloges sur l'intervalle de temps servant à l'élaboration de cette échelle. Il est aussi possible de prendre en compte tout comportement anormal d'une horloge en ajustant sa pondération, et en la fixant à zéro si nécessaire. Cette possibilité s'est souvent révélée utile.

La pondération est normalement déterminée à partir de la variance  $\sigma^2(\delta, \tau)$  de la vitesse de variation moyenne [Thomas et Azoubib, 1996] par rapport à l'échelle EAL calculée sur des échantillons d'un mois. Cette variance

a été préférée à la classique variance de paire (*pair variance*), car elle offre une réduction supérieure dans la pondération des horloges présentant une dérive de fréquence. Les facteurs de pondération sont obtenus directement à partir de la formule suivante:

$$p_i = \frac{1000}{\sigma_i^2(6, \tau)} \quad (7-19)$$

( $\sigma_i$  est exprimé en ns/jour) sous réserve que la période actuelle de 30 jours ne présente pas de comportement anormal. Si c'est le cas, on applique un coefficient de pondération égal à zéro. La pondération maximale est fixée à  $2,5/N$  ( $N$  étant le nombre d'horloges participantes pendant le mois du calcul). Elle est choisie de façon à privilégier largement, dans le calcul de l'échelle, les horloges les plus performantes, sans qu'aucune d'entre elles ne devienne prépondérante [Thomas et Azoubib, 1996].

3) *Prévision de la vitesse de variation*: Le terme de correction horaire  $h'_i(t)$  est composé de deux éléments:

$$h'_i(t) = a_i(t_0) + B_{ip}(t)(t - t_0) \quad (7-20)$$

où:

$a_i(t_0)$ : simples différences horaires entre l'horloge  $H_i$  et l'EAL à l'instant  $t_0$ , qui correspond au début de la période de 30 jours

$B_{ip}(t)$ : prévision de la différence de rythme entre  $H_i$  et l'EAL entre  $t_0$  et  $t$ , où le rythme de l'horloge  $H_i$  est défini par:

$$\text{rythme} = \frac{a_i(t_0 - t) - a_i(t_0)}{(t - t_0)} \quad (7-21)$$

$B_{ip}(t)$  est obtenu par prédiction linéaire à une étape, à partir de la valeur précédente. Cette approche est justifiée par le fait que, pendant la période de 30 jours, le bruit prédominant de l'horloge est de type «à marche aléatoire» et que dans ce cas, la valeur estimée la plus probable sur la période suivante est simplement celle de la période précédente.

Après avoir calculé la meilleure estimation de l'échelle EAL, la conversion vers le temps TAI est effectuée en déterminant si le rythme de l'EAL diffère suffisamment de celui des étalons primaires, ce qui justifie alors une correction de «pilotage». De 2005 à 2008, des changements de fréquence d'une valeur maximale de  $0,6 \times 10^{-15}$  chacun ont été appliqués quasiment tous les mois.

Enfin, le résultat de ce calcul est publié chaque mois dans la *Circulaire T*, qui est diffusée à l'ensemble des laboratoires participants. Un extrait de ce document est présenté à la Figure 7-2. Les valeurs de [UTC-UTC(k)] concernant les différents laboratoires participants  $k$  sont publiées tous les cinq jours; elles sont accompagnées des incertitudes respectives, dont les valeurs restent constantes pour un mois de calcul.

### 7.6.2 Temps universel coordonné

La mesure de temps universel fondée sur la seconde du SI définie par les propriétés de l'atome est appelée temps universel coordonné (UTC). La coordination des échelles de temps atomique internationales a été confiée au BIH en 1961. En 1988, ce rôle a été transféré du BIH au BIPM.

A l'origine, des décalages de rythme et des ajustements périodiques par paliers étaient appliqués aux signaux horaires radiodiffusés pour que le temps UTC ne s'écarte pas du temps UT2 de plus de 0,1 s. La forme actuelle du temps UTC a été mise en place en 1972, date à laquelle les décalages de rythme ont été arrêtés et les paliers de 100 ou 200 ms en vigueur, jugés trop fréquents et trop faibles, remplacés par des paliers entiers de «secondes intercalaires» [Nelson, 2001]. Le temps UTC va au même rythme que le temps TAI, mais il en diffère d'un nombre entier de secondes, de sorte qu'il ne s'écarte pas du temps UT1 de plus de 0,9 s.

FIGURE 7-2

## Extrait de la Circulaire T du BIPM

CIRCULAR T 208  
2005 MAY 12, 17h UTC

ISSN 1143-1393

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES  
ORGANISATION INTERGOUVERNEMENTALE DE LA CONVENTION DU METRE  
PAVILLON DE BRETEUIL F-92312 SEVRES CEDEX TEL. +33 1 45 07 70 70 FAX. +33 1 45 34 20 21 tai@bipm.org

1 - Coordinated Universal Time UTC and its local realizations UTC(k). Computed values of [UTC-UTC(k)].  
From 1999 January 1, 0h UTC, TAI-UTC = 32 s.

Date 2005	0h UTC	MAR 30	APR 4	APR 9	APR 14	APR 19	APR 24	APR 29	Uncertainty/ns			
MJD		53459	53464	53469	53474	53479	53484	53489				
Laboratory k		[UTC-UTC(k)]/ns							uA	uB	u	(1)
AOS (Borowiec)		8.2	12.1	17.1	22.7	19.0	16.0	16.8	1.6	5.2	5.4	
APL (Laurel)		-18.6	-23.3	-13.6	-2.0	4.6	39.3	26.5	1.6	5.3	5.5	(2)
AUS (Sydney)		-541.1	-547.9	-556.5	-561.7	-574.0	-590.8	-608.2	3.2	6.4	7.2	
BEV (Wien)		97.8	88.7	80.6	70.6	63.0	58.2	46.3	1.6	5.2	5.4	
BIRM (Beijing)		-145.0	-170.1	-192.3	-217.0	-238.1	-260.8	-288.4	2.8	20.4	20.6	
CAO (Cagliari)		-2890.4	-2883.7	-2871.8	-2865.4	-2845.1	-2819.2	-2794.1	1.6	7.2	7.4	
CH (Bern)		-21.7	-24.4	-24.6	-21.4	-14.6	-9.4	-0.7	0.8	5.2	5.3	
CNM (Queretaro)		36.7	44.2	47.2	52.2	52.6	59.5	78.3	5.0	20.3	20.9	
CNMP (Panama)		-2514.2	-2543.1	-2584.6	-2629.9	-2655.4	-2690.8	-2721.4	4.0	7.2	8.2	
CSIR (Pretoria)		-3393.0	-3468.5	-3548.2	-3628.6	-3718.2	-3800.9	-3891.4	3.0	20.1	20.3	
DLR (Oberpfaffenhofen)		-40.4	-46.1	-44.7	-46.1	-62.1	-62.9	-71.4	0.8	5.2	5.3	
DTAG (Darmstadt)		254.6	274.3	283.9	273.2	267.7	271.2	273.3	3.0	10.1	10.5	
HKO (Hong Kong)		93.7	71.6	68.9	55.1	45.9	45.2	51.0	3.2	6.4	7.2	
IEN (Torino)		-116.2	-116.2	-109.3	-104.5	-99.3	-98.1	-100.5	0.7	1.9	2.0	
IFAG (Wetzell)		-348.7	-340.9	-340.6	-340.4	-332.8	-324.9	-314.8	0.8	5.2	5.3	
IGMA (Buenos Aires)		351.7	353.5	346.2	354.1	361.3	366.9	367.4	5.0	19.9	20.5	
INPL (Jerusalem)		-264.7	-311.1	-347.5	-387.4	-432.2	-478.0	-523.6	4.0	10.1	10.9	
JATC (Lintong)		-10237.5	-10227.2	-10209.8	-10197.3	-10180.0	-10167.2	-10155.8	2.7	21.0	21.2	
JV (Kjeller)		-6316.2	-6310.2	-6252.7	-6243.4	-6219.6	-6173.5	-6177.2	5.0	20.1	20.7	
KRIS (Daejeon)		-3.8	-4.2	0.9	2.5	3.4	5.7	6.0	2.8	6.4	7.0	

Sat\_time\_freq-07-02

Ainsi, les signaux horaires fournissent aujourd'hui à la fois l'intervalle unitaire de la seconde du SI et une valeur approchée du temps UT1 dans la même émission. Une correction supplémentaire, DUT1, composée de multiples entiers de 0,1 s, peut être intégrée dans les signaux horaires diffusés, au moyen d'impulsions ou de tops doubles, de sorte qu'une fois ajoutés au temps UTC, on obtient une meilleure valeur approchée du temps UT1. Le temps UTC a été reconnu comme la base du temps civil défini dans des résolutions de diverses unions scientifiques et organisations régies par un traité, notamment la CGPM, l'UIT et l'UAI, et par la plupart des codes légaux nationaux.

La seconde du SI, qui est désormais définie par la période de transition de l'atome de césium, a été choisie pour correspondre à la seconde des éphémérides dans les limites de l'incertitude expérimentale. Cela étant, des études reposant sur des données d'éclipses très anciennes et sur des observations modernes par télescope indiquent que la durée du jour augmente lentement. Ainsi, sur les 1 000 dernières années, elle a augmenté à raison de 1,4 ms/jour environ chaque siècle. Aussi la seconde des éphémérides, basée sur les *Tables du Soleil* de Newcomb, était-elle en fait égale à la valeur moyennée de la seconde solaire moyenne sur les XVIIIe et XIXe siècles.

Selon la tendance à long terme, la seconde solaire moyenne était égale à la seconde du SI en 1820 environ [Stephenson, 1997]. Cette date correspond aussi à l'époque moyenne approximative des données analysées par Newcomb, qui couvre la période allant de 1750 à 1892. Depuis 1820, la durée du jour a augmenté de 2,5 ms environ. Le jour solaire moyen compte donc actuellement 86 400,0025 s environ, soit exactement 86 400 s de plus que le jour civil. Sur une année, la différence de 0,0025 s s'accumule pour atteindre à peu près une seconde entière, ce qui est compensé par l'insertion d'une seconde intercalaire. Cela étant, en raison des fluctuations aléatoires de la rotation de la Terre, il est impossible de prévoir le phénomène des secondes intercalaires; sa fréquence est donc variable.

Le temps UTC a été élaboré par le CCIR de l'UIT (le CCIR a été fusionné avec l'IFRB pour donner l'UIT-R), qui a recommandé son établissement en 1972 comme échelle de temps de compromis entre le temps UT et le temps TAI. Cette échelle de temps, qui sert à coordonner le temps local conservé par divers pays et centres du temps, fournit une valeur assez proche du temps UT1. Le développement de systèmes de navigation électroniques (LORAN par exemple) susceptibles de fournir des mesures horaires assez précises sur des distances à l'échelle de la planète a nécessité l'instauration d'une coordination. La définition précise du temps UTC figure dans la Recommandation UIT-R TF.460 intitulée «Emissions de fréquences étalon et de signaux horaires». Depuis son adoption, le temps UTC est de plus en plus utilisé dans le milieu des radiocommunications et des télécommunications, et ce pour deux raisons complémentaires: d'une part, le nombre croissant de systèmes de navigation et de communication électroniques capables d'effectuer des mesures horaires très précises dans le monde entier, d'autre part, la nécessité de fournir à ces systèmes un temps coordonné d'une extrême précision (Recommandations UIT-R TF.535-2 et UIT-R TF.767-2).

Le temps UTC a été reconnu comme la référence de temps internationale dans des résolutions de nombreuses unions scientifiques et organisations régies par un traité, notamment l'UAI, l'UIT, l'URSI et la CGPM, et de plusieurs organismes de normalisation comme l'ISO. En 1978, le CCIR a approuvé une nouvelle version de sa Recommandation 486 (aujourd'hui Recommandation UIT-R TF.486-2 «Utilisation de fréquence UTC comme référence dans les émissions de fréquences étalon et de signaux horaires»), et la CAMR-79 a décidé que le temps UTC devait être appliqué à la désignation de l'heure dans toutes les activités internationales relevant des télécommunications [Actes finals, 1980].

Le Règlement des radiocommunications (RR) (Edition de 2008) définit le temps UTC comme suit:

«**1.14** *Temps universel coordonné (UTC):* Echelle de temps fondée sur la seconde (SI), définie dans la Recommandation UIT-R TF.460-6. (CMR-03)

Pour la plupart des applications pratiques associées au Règlement des radiocommunications, le temps UTC est équivalent au temps solaire moyen au méridien d'origine (0° de longitude), exprimé antérieurement en TMG.»

Aujourd'hui, il est généralement admis que la référence applicable aux applications horaires et de fréquence par satellite est le temps UTC.

### 7.6.2.1 Réalisation du temps universel coordonné

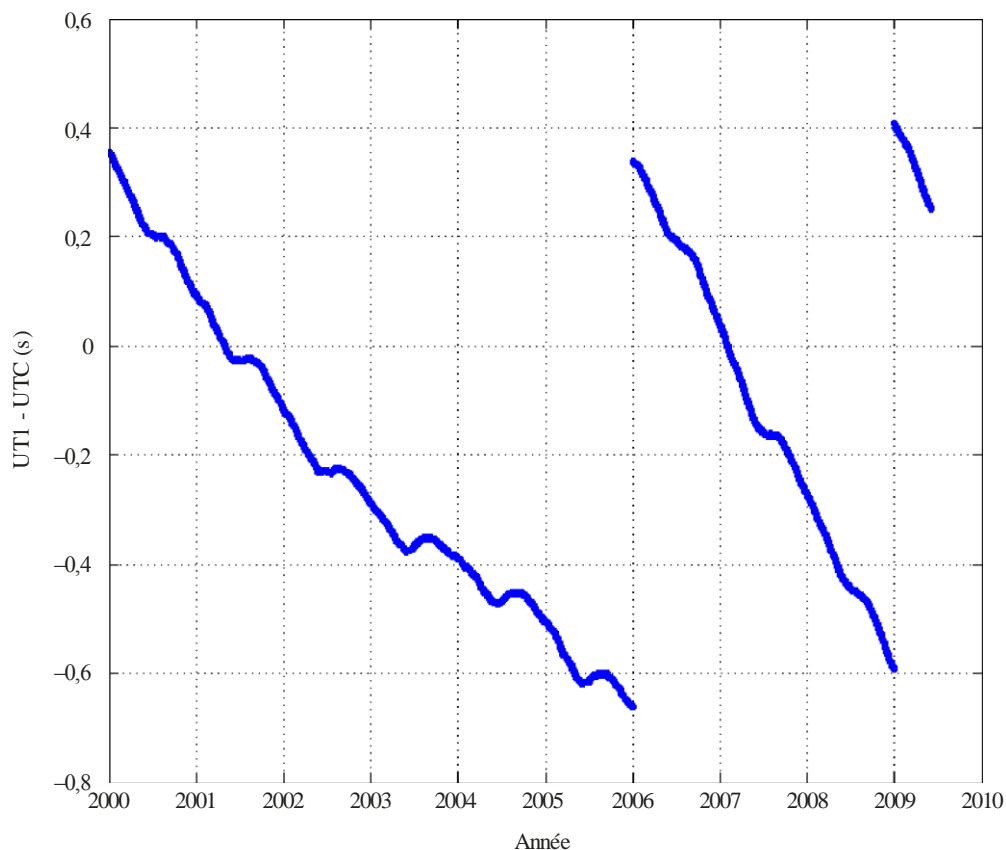
Le temps UTC est une version du temps TAI ajustée en ajoutant ou en retranchant des paliers d'une seconde appelés «secondes intercalaires». Pour maintenir une relation étroite entre le temps UTC et le temps UT1, comme illustré à la Figure 7-3, un ajustement appelé «DUT1» a dû être diffusé ou communiqué en même temps que le temps UTC. DUT1 a été défini comme la valeur *théorique* de la différence UT1 – UTC en multiples entiers de 0,1 s. Les utilisateurs du temps UT1 étaient alors en mesure d'ajuster une valeur diffusée du temps UTC vers le temps UT1 avec une précision strictement inférieure à 0,1 s. Le temps UT1 est une version du temps universel corrigée pour tenir compte du mouvement du pôle, qui résulte de la rotation irrégulière de la Terre. Autrefois, le temps UT1 était déterminé à partir du temps de transit des étoiles corrigé en fonction des variations saisonnières. Aujourd'hui, son calcul repose sur des techniques spatiales par satellite; il fournit une mesure de la vitesse de rotation de la Terre et met en relation l'orientation de la Terre avec l'heure du jour UT1. Pour des informations complémentaires sur l'histoire et l'élaboration de ces échelles de temps, voir l'article *The Leap Second: Its History and Possible Future* [Nelson et al., 2001].

En conséquence, le temps UTC est une échelle de temps atomique de même rythme que le temps TAI, mais qui en diffère d'un nombre entier de secondes. En juin 2008, le temps UTC était en retard de 33 s par rapport au temps TAI. La décision d'insérer une seconde intercalaire est déterminée par le changement de vitesse de rotation de la Terre, de sorte que l'erreur cumulative soit au maximum de 0,9 s. Le Service international de la rotation terrestre et des systèmes de référence (IERS) surveille la rotation de la Terre et détermine la date à laquelle le seuil sera dépassé; il notifie le BIPM, qui est chargé de conserver le temps UTC depuis 1988, année où il s'est vu confier la responsabilité du temps TAI, qui relevait jusqu'alors du BIH. La Figure 7-3 présente l'écart entre le temps UTC et le temps UT1 sur les dix dernières années. On notera l'insertion d'une seconde intercalaire fin 2005 et fin 2008.

La première forme du temps UTC, mise en œuvre avant 1972, consistait à rester proche du temps UT1 en ajustant le décalage de fréquence et en procédant, en même temps, à des ajustements par paliers de fractions de seconde de façon à assurer l'adéquation entre la diffusion des signaux horaires atomiques et la rotation de la Terre. Un couplage étroit avec la rotation de la Terre était jugé nécessaire pour aider la navigation céleste, mais il était difficile de coordonner les stations de diffusion et de fournir un temps de référence précis et uniforme. L'actuel système UTC avec intégration de paliers entiers de secondes intercalaires, sans décalages de fréquence, a été adopté pour fournir, à partir d'une échelle unique, une valeur approchée de l'époque du temps UT1 et de l'intervalle de la seconde du SI.

FIGURE 7-3

## Décalage UT1 – UTC sur la période 2000-2009



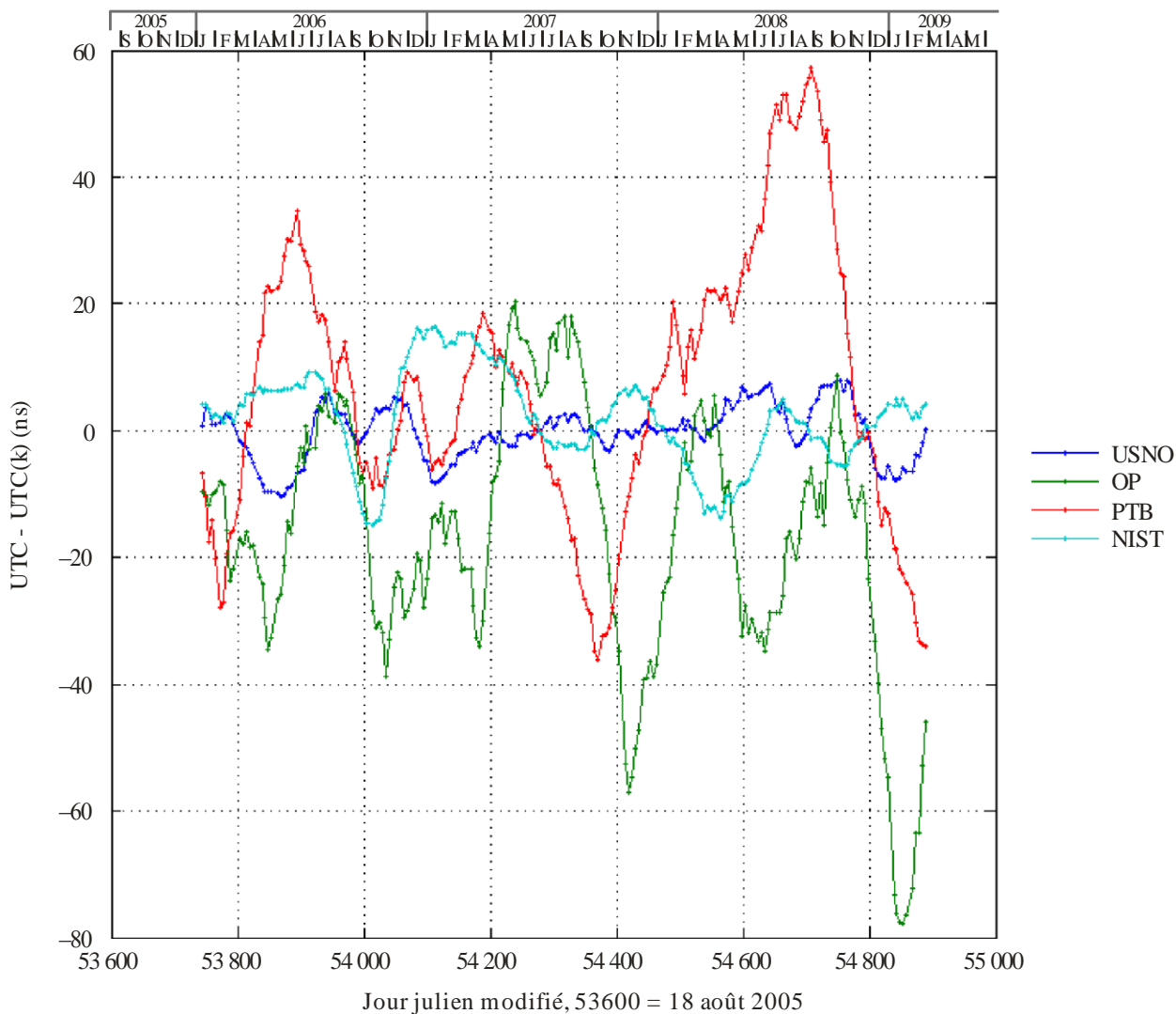
Etant donné que les services de radiodiffusion nécessitent la production et l'émission de signaux à partir des mêmes horloges et oscillateurs que ceux qui produisent les signaux de référence horaire, une échelle «temps réel» ou de temps immédiat s'impose. Pour répondre à ce besoin, les centres du temps peuvent produire une représentation locale du temps UTC, à condition que les mesures des signaux d'horloge soient communiquées au BIPM et examinées lors de la détermination de l'échelle de temps internationale. La notation UTC(k) est utilisée pour représenter cette approximation locale du temps UTC par un laboratoire «k», dont les données contribuent à l'établissement du temps TAI et du temps UTC au BIPM. Par exemple, le temps UTC (USNO) est la prévision en temps réel du temps UTC actuellement communiquée et conservée par l'USNO (U.S. Naval Observatory).

Des réalisations en temps réel analogues effectuées par d'autres centres du temps, par exemple l'Observatoire de Paris (OP), le Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) et le National Institute of Standards and Technology des États-Unis (NIST), contribuent aux mesures d'horloge pondérées utilisées par le BIPM [Quinn, 1991]. Le terme «UTC», non suivi de parenthèses, désigne la valeur internationale finale, qui est déterminée par le BIPM. Ces procédures et définitions sont décrites dans la Recommandation UIT-R TF.536-2 «Notations à utiliser pour désigner les échelles de temps». La détermination finale du temps UTC n'a pas de représentation

physique. Elle est disponible, après un délai de deux à quatre semaines, sous la forme d'un écart par rapport aux représentations conservées par les laboratoires participants. Les valeurs des temps TAI et UTC sont communiquées dans une publication mensuelle du BIPM: la *Circulaire T*. Les différences, figurant dans la *Circulaire T du BIPM*, entre les valeurs UTC(k) des instituts susmentionnés et le temps UTC sont présentées à la Figure 7-4.

FIGURE 7-4

Différence UTC - UTC(k) figurant dans la *Circulaire T du BIPM* (valeurs journalières)



## Références

- AOKI S., GUINOT B., KAPLAN G. H., KINISHITA H., MCCARTHY D. D. et SEIDELMANN P. K. [1982], «The New Definition of Universal Time», *Astron. Astrophys.* **105**, p. 359-361.
- AZOUBIB J. [2001], «A revised way of fixing an upper limit to clock weights in TAI computation», *Rapport de la 15<sup>e</sup> réunion du CCTF*, disponible sur demande auprès du BIPM.
- AZOUBIB J., GRANVEAUD M. et GUINOT B. [1977], «Estimation of the scale unit duration of time scales», *Metrologia*, Vol. 13, p. 87-93.
- BERGERON J. (dir.) [1992], *Trans. Int. Astron. Union, Vol. XXIB, Proc. 21<sup>st</sup> General Assembly*, Buenos Aires, 1991, Reidel, Dordrecht, p. 41-52.
- BIPM Com. Cons. Déf. Seconde* **9**, 15 (1980), *Metrologia* **17**, 70, 1981.
- FAIRHEAD L., BRETAGNON P. et LESTRADE J.-F. [1998], «The Time Transformation TB – TT: An Analytical Formula and Related Problem of Convention», in *The Earth's Rotation and Reference Frames for Geodesy and Geophysics*, dirigé par A. K. Babcock et G. A. Wilkins, Kluwer, Dordrecht, p. 419-426.
- FUKUSHIMA T. [1995], «Time Ephemeris», *Astron. Astrophys.* **294**, p. 895-906.
- IRWIN A. W. et FUKUSHIMA T. [1999], «A Numerical Time Ephemeris of the Earth», *Astron. Astrophys.* **348**, p. 642-652.
- MOYER T. D. [1971/1981], «Transformation from Proper Time on Earth to Coordinate Time in Solar System Barycentric Space-Time Frame of Reference», *Celestial Mech.* **23**, p. 33-68.
- MULLER E. A. et JAPPEL A. (dir.) [1977], *Trans. Int. Astron. Union, Vol. XVIB, Proc. 16th General Assembly*, Grenoble, 1976, Reidel, Dordrecht, p. 60.
- NELSON R. A., MCCARTHY D. D., MALYS S., LEVINE J., GUINOT B., FLIEGEL H. F., BEARD R. L. et BARTHOLOMEW T. R. [2001], «The Leap Second: Its History and Possible Future», *Metrologia* **38**, p. 509-529.
- NEWCOMB S. [1895], *Astronomical Papers Prepared for the Use of the American Ephemeris and Nautical Almanac*, Vol. VI, Part I: *Tables of the Sun*, U. S. Govt. Printing Office, Washington, D.C, p. 9.
- QUINN T. J. [juillet 1991], «The BIPM and the Accurate Measurement of Time», *Proc. IEEE*, 79(7), p. 894-905.
- RICKMAND H. (dir.) [2001], *Trans. Int. Astron. Union, Vol. XXIVB, Proc. 24th General Assembly*, Manchester, 2000, Astron. Soc. Pacific, San Francisco, p. 37-49.
- SEIDELMANN P. K. (dir.) [1992], *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac*, University Science Books, Mill Valley, CA.
- STANDISH E. M. [1998], «Time Scales in the JPL and CfA Ephemerides», *Astron. Astrophys.* **336**, p. 381-384.
- STEPHENSON F. R. [1997], *Historical Eclipses and Earth's Rotation*, Cambridge, New York, p. 28.
- The XXIII<sup>rd</sup> International Astronomical Union General Assembly [1997], *Resolution B2 On the International Celestial Reference System (ICRS)*, Kyoto, Japon.
- THOMAS C. et AZOUBIB J. [1996], «TAI computation: study of an alternative choice for implementing an upper limit of clock weights», *Metrologia*, **33**, p. 227-240.
- THOMAS J. B. [1975], «Reformulation of the Relativistic Conversion between Coordinate Time and Atomic Time», *Ap. J.* **80**, p. 405-411.

## Textes UIT-R

- UIT-R [1979], Actes finals de la Conférence administrative mondiale des radiocommunications (CAMR-79), Genève.
- Règlement des radiocommunications, Edition de 2008, Volume 1, Union internationale des télécommunications, 2008, (<http://www.itu.int/publ/R-REG-RR-2008/fr>).
- Recommandation UIT-R TF.458-3 – Comparaisons internationales d'échelles de temps atomique, (<http://www.itu.int/rec/R-REC-TF.458-3-199802-I/fr>).
- Recommandation UIT-R TF.460-6 – Emissions de fréquences étalon et de signaux horaires, (<http://www.itu.int/rec/R-REC-TF.460-6-200202-I/fr>).



Recommandation UIT-R TF.486-2 – Utilisation de fréquence UTC comme référence dans les émissions de fréquences étalon et de signaux horaires, (<http://www.itu.int/rec/R-REC-TF.486-2-199802-I/fr>).

Recommandation UIT-R TF.535-2 – Emploi du terme UTC, (<http://www.itu.int/rec/R-REC-TF.535-2-199802-I/fr>).

Recommandation UIT-R TF.536-2 – Notations à utiliser pour désigner les échelles de temps, (<http://www.itu.int/rec/R-REC-TF.536-2-200305-I/fr>).

Recommandation UIT-R TF.686-2 – Glossaire et définitions relatives aux fréquences étalon et aux signaux horaires, (<http://www.itu.int/rec/R-REC-TF.686-2-200202-I/fr>).

Recommandation UIT-R TF.767-2 – Utilisation des systèmes mondiaux de navigation par satellite pour le transfert de temps de haute précision, (<http://www.itu.int/rec/R-REC-TF.767-2-200103-I/fr>).



## CHAPITRE 8

## CENTRES NATIONAUX DU TEMPS

	<i>Page</i>
8.1 Introduction .....	100
8.2 Structure d'un laboratoire du temps.....	101
8.3 Système de mesure local .....	102
8.4 Traçabilité internationale.....	102
8.5 Services de diffusion du temps.....	103
Références .....	104

## 8.1 Introduction

Comme on l'a indiqué précédemment, le temps UTC est établi au BIPM en effectuant un calcul de post-traitement sur les données provenant de quelque 350 fréquences étalon atomiques conservées dans une soixantaine de laboratoires du temps répartis à travers le monde. Outre la réalisation locale de l'échelle de temps UTC, généralement reconnue comme la référence nationale du temps, ces laboratoires, souvent intégrés aux instituts nationaux de métrologie, mènent aussi des activités dans plusieurs des domaines suivants (parfois tous):

- mise au point d'horloges et d'étalons primaires de fréquence,
- participation à des expériences internationales de synchronisation,
- diffusion de signaux horaires et de fréquences étalon,
- développement de techniques de comparaison de temps et de fréquences de précision,
- travaux de recherche sur la caractérisation des horloges et les algorithmes d'échelles de temps,
- étalonnage des équipements de temps et de fréquence.

Tous les instituts nationaux de métrologie qui ont signé, depuis 1999, l'arrangement de reconnaissance mutuelle du CIPM (CIPM MRA, *Mutual Recognition Arrangement of the CIPM*) mènent au minimum deux de ces activités, à savoir la participation aux liaisons de synchronisation et l'activité de diffusion, pour respecter les termes de cet arrangement en ce qui concerne l'établissement du degré d'équivalence des étalons nationaux, et ce par leur participation aux comparaisons clés (KC, *key comparisons*) et par la reconnaissance mutuelle des certificats d'étalonnage et de mesurage établis [CIPM/BIPM/OIML, 1999].

La mission première des laboratoires nationaux de métrologie qui, avec leurs données d'horloge, contribuent à l'établissement du temps UTC au BIPM, est de conserver une représentation locale en temps réel de l'UTC, appelée UTC(k), qui est maintenue en concordance étroite avec le temps UTC, par exemple sur la base de l'observation d'une horloge principale ou d'un ensemble d'horloges. Deuxièmement, pour pouvoir participer à l'établissement du temps UTC et aux comparaisons clés identifiées par le CCTF [CCTF Report, 2001; CCTF Report, 2006], chaque laboratoire du temps doit exploiter au minimum un système de synchronisation, au premier chef un système GPS, de façon à fournir régulièrement au BIPM les données ( $UTC(k) - \text{temps du GPS}$ ) qui seront utilisées pour la réalisation des références internationales de temps et de fréquence (TAI et UTC); la *Circulaire T* fournit tous les mois les valeurs de  $[UTC - UTC(k)]$  que le BIPM prévoit de publier dans la base de données sur les comparaisons clés aux fins de l'équivalence des étalons nationaux. Un aspect important de cette activité consiste à évaluer la précision de l'incertitude des liaisons de synchronisation utilisées, activité pour laquelle des équipements GPS, GLONASS ou TWSTFT étalonnés circulent régulièrement. Le BIPM organise périodiquement des campagnes d'étalonnage des équipements GPS dans les laboratoires participants.

Outre les équipements nécessaires à ces activités fondamentales, tout laboratoire de référence du temps et des fréquences doit disposer d'appareils destinés à l'établissement et à la surveillance des signaux étalons de temps et de fréquence qui doivent être diffusés localement ou à des utilisateurs distants par divers moyens: émissions spéciales dans les bandes d'ondes kilométriques, décamétriques ou dans la bande attribuée à la télévision, lignes téléphoniques, réseaux informatiques, etc. Ces appareils, ainsi que les instruments servant à l'étalonnage des dispositifs de temps et de fréquence au regard de leurs spécifications (temps, fréquences et dérivées, stabilité de fréquence), viennent compléter la chaîne de traçabilité prévue dans l'arrangement de reconnaissance mutuelle du CIPM.

Dans les pays qui ont mis en place un système de laboratoires d'étalonnage accrédités, l'institut national de météorologie apporte en outre son expertise à l'organisme d'accréditation et peut être associé à l'organisation de comparaisons nationales et internationales entre laboratoires; ces comparaisons contribuent à l'évaluation des capacités de mesure des laboratoires d'étalonnage secondaires, qui constituent le dernier niveau de la chaîne de traçabilité définie par l'arrangement de reconnaissance mutuelle du CIPM.

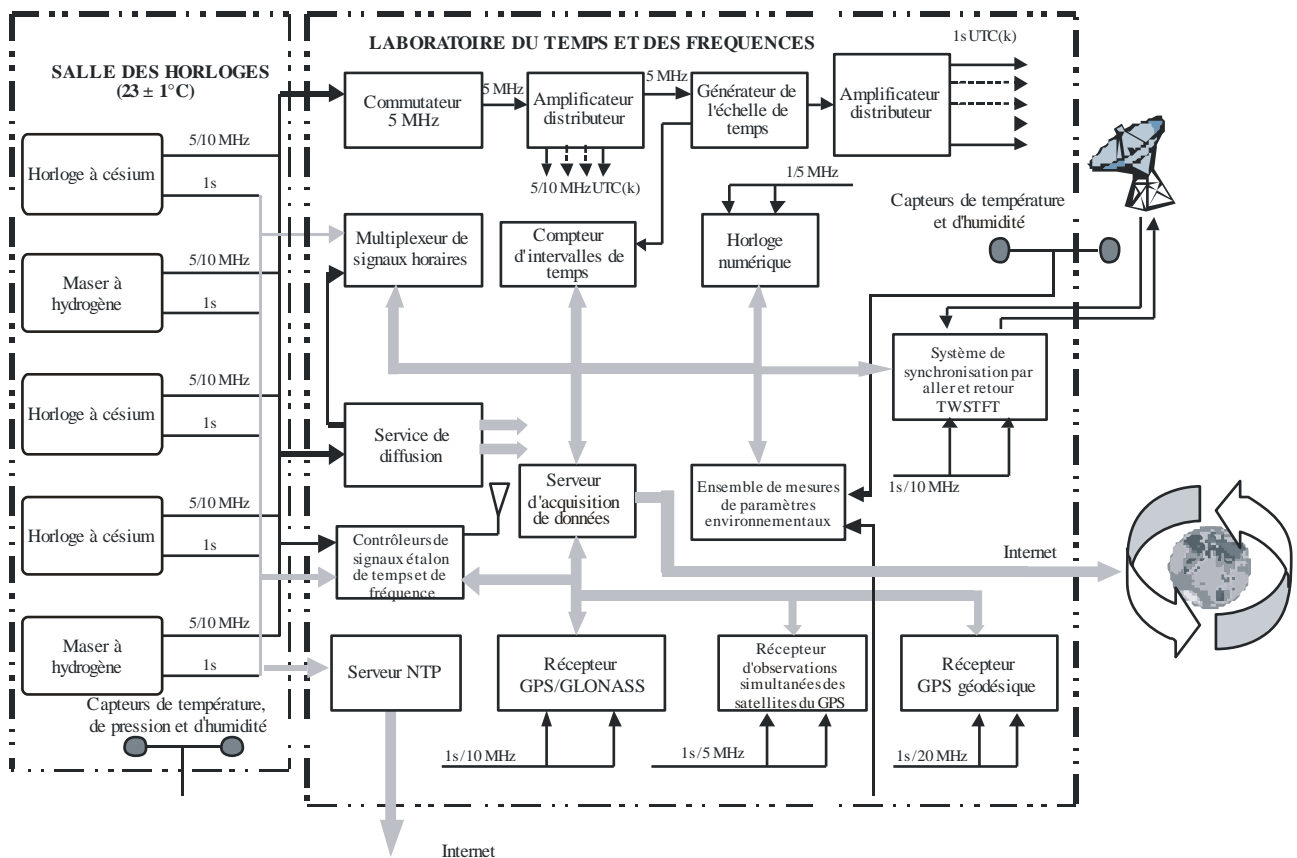
### 8.2 Structure d'un laboratoire du temps

La Figure 8-1 présente un exemple type de mise en œuvre des activités fondamentales susmentionnées. A noter que ni les équipements consacrés aux travaux de recherche sur les sources de fréquences étalon et sur les étalons à césium, ni les installations d'étalonnage n'ont été représentés. Tous les équipements, à l'exception des antennes de réception utilisées pour les systèmes de synchronisation, sont installés dans des salles à température et hygrométrie contrôlées et sont reliés à un système redondant assurant une continuité de la puissance électrique (non représenté ici); cette installation est de la plus haute importance pour la fiabilité des activités de métrologie.

Dans la partie gauche figure une salle séparée abritant l'ensemble des horloges, dont la température est généralement réglée sur  $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$ ; cette solution est recommandée si l'on veut obtenir la meilleure qualité de fonctionnement des horloges à césium, compte tenu des variations de l'environnement, sachant que l'installation des horloges dans de petites chambres étroitement contrôlées en humidité et en température ( $\pm 0,1^\circ\text{C}$ ) fournit des résultats encore meilleurs. Cette solution est particulièrement adaptée au maser à hydrogène, car elle permet d'obtenir la stabilité de fréquence maximale pour l'établissement des échelles de temps ou lorsque le maser est utilisé comme oscillateur local pour un étalon primaire à césium.

FIGURE 8-1

Structure type d'un centre du temps



Sat\_time\_freq-08-01

L'architecture proposée préconise l'utilisation de quatre horloges atomiques pour la réalisation d'un temps local UTC robuste; cette configuration permet en outre d'établir une échelle de temps «papier», ce qui améliore le

comportement de l'échelle à long terme ainsi que sa fiabilité. Cela étant, le plus souvent, une seule horloge est sélectionnée dans cet ensemble pour sa précision et sa stabilité, et utilisée comme horloge principale pour l'établissement d'UTC(k) en temps réel. Pour améliorer la fiabilité de l'échelle de temps produite, un commutateur automatique (à 5 MHz par exemple) peut être inséré entre les horloges à césium et le générateur de l'échelle de temps. Ce commutateur reçoit en entrée l'ensemble des étalons de fréquence disponibles et contrôle leur amplitude et leurs variations de phase pour détecter d'éventuelles anomalies et ainsi éviter les discontinuités dans l'échelle de temps.

L'observation de certains paramètres physiques transmis par les ports série des horloges à césium peut fournir des informations sur les éventuelles anomalies en entrée; il est alors conseillé de mettre en œuvre, dans le serveur du laboratoire, un processus de surveillance de certaines de ces observations.

Pour respecter les recommandations du Comité consultatif du temps et des fréquences (CCTF), qui préconise un écart maximal de 100 ns dans la réalisation locale du temps UTC par rapport au temps UTC (*Rapport du CCDS*, 1993), il convient d'insérer un échelonneur microphase entre l'horloge principale et le générateur de l'échelle de temps pour ajuster la fréquence de ce dernier au temps UTC, conformément aux corrections publiées dans la *Circulaire T du BIPM* ou par évaluation de la précision par rapport à un étalon primaire de laboratoire. A noter que certains étalons à césium intègrent une fonction d'échelonneur microphase, auquel cas aucun dispositif additionnel n'est requis dans la chaîne d'établissement de l'échelle de temps.

Les signaux étalon fournis par les horloges de référence sont distribués dans le laboratoire du temps et des fréquences au moyen de câbles coaxiaux de qualité ou de lignes à fibres optiques.

Il est également nécessaire de prévoir des amplificateurs distributeurs pour les étalons de fréquence UTC(k) et pour les signaux à 1 s afin d'assurer la traçabilité des mesures au sein du laboratoire.

### 8.3 Système de mesure local

Les laboratoires du temps et des fréquences hébergent l'équipement spécialisé servant à l'établissement de l'échelle de temps et à la comparaison des horloges, ainsi que les services de diffusion, les récepteurs par satellite, les systèmes d'acquisition de données et l'équipement de surveillance auxiliaire.

Le système de mesure local mis en service et exploité au sein du laboratoire fournit des données d'horloge qui servent un double objectif: d'une part, effectuer le calcul de l'échelle de temps, d'autre part, réaliser des comparaisons internes de temps et de fréquence entre l'UTC(k) et l'ensemble des horloges et étalons de fréquence conservés dans le laboratoire. En règle générale, des systèmes de mesure spécialisés sont nécessaires pour effectuer les mesures de routine sur les satellites du GPS ou sur d'autres systèmes de synchronisation imposés par les procédures de traçabilité internationale.

Le système de mesure local est composé d'un compteur d'intervalles de temps à haute résolution, qui mesure, toutes les secondes, les différences entre les horloges pendant un laps de temps approprié. Ce cycle de mesures est répété toutes les heures. La fréquence optimale des mesures dépend fortement des activités effectuées dans le laboratoire. La précision des mesures étant liée à la base de temps, la fréquence de référence externe du temps UTC(k) est fournie au compteur d'intervalles. D'autres facteurs contribuent à l'incertitude associée aux comparaisons d'horloges, notamment l'instant de déclenchement, l'erreur de quantification et le retard différentiel entre le canal de début et le canal de fin. Il convient donc d'effectuer régulièrement un étalonnage précis pour évaluer la stabilité du système de mesure. Les mesures effectuées par le compteur d'intervalles doivent toutes être comparées au temps UTC(k), tandis que les signaux de «fin» provenant des diverses horloges sont envoyés via un multiplexeur de signaux horaires. Une horloge numérique fournit l'horodatage nécessaire à chaque mesure. Les cycles de mesure sont commandés par un ordinateur, qui mémorise tous les résultats du compteur d'intervalles de temps, des systèmes de synchronisation et de la surveillance de l'environnement. La connexion externe au BIPM et à d'autres instituts nationaux de métrologie peut aussi être gérée via un serveur de réseau spécialisé offrant un accès sécurisé à l'internet.

### 8.4 Traçabilité internationale

Les liaisons de comparaison horaire couramment utilisées dans les laboratoires du temps pour assurer la traçabilité du temps UTC(k) aux références internationales de temps et de fréquence UTC et TAI s'appuient

sur des récepteurs GPS mis en œuvre conformément aux exigences fixées par le BIPM et sur la technique de comparaison de temps et de fréquence par aller et retour sur satellite (TWSTFT), au moyen de satellites de communication. C'est la même liaison de mesure qui permet aux horloges atomiques conservées dans chaque laboratoire de contribuer au calcul de ces références. Dans la plupart des laboratoires, les équipements utilisés pour la comparaison des horloges ont été modernisés et l'on remplace aujourd'hui la méthode GPS de base par d'autres techniques de synchronisation: réception de signaux GPS et GLONASS au moyen de récepteurs à canaux multiples (souvent, réception de deux fréquences), amélioration de la technique TWSTFT, mesures de la phase des porteuses GPS au moyen de récepteurs géodésiques, etc. Ces deux dernières techniques présentent un grand intérêt lorsque la comparaison de temps et de fréquence doit satisfaire à des exigences particulièrement strictes, y compris dans le cas des lignes de base intercontinentales. Tous ces instruments doivent recevoir des références horaires et de fréquence UTC(k) externes et il convient d'attacher une attention particulière au choix de l'emplacement de leur système d'antennes et à la réalisation des connexions des signaux avec le laboratoire de temps et de fréquence.

Dans le cas des dispositifs GPS et GLONASS, les mesures sont généralement mémorisées dans les récepteurs et transférées ultérieurement de façon automatique dans le système d'acquisition de données, tandis que la technique TWSTFT peut nécessiter un système de mesure auxiliaire.

Pour évaluer la précision des liaisons de synchronisation, le récepteur de référence de chaque laboratoire du temps doit participer aux campagnes d'évaluation périodiques organisées soit par le BIPM, soit par les organisations régionales de métrologie. Dans le cadre de ces campagnes, un récepteur GPS étalonné, envoyé tour à tour dans les différents laboratoires, est utilisé pour surveiller la stabilité dans le temps du délai de propagation dans les récepteurs locaux. Dans le cas de la technique TWSTFT, cette évaluation peut aussi être réalisée à l'aide d'une microstation portable et d'un simulateur de satellite. Les caractéristiques complètes de l'incertitude des liaisons utilisées pour établir le temps UTC ainsi que les informations concernant leur étalonnage sont publiées dans la *Circulaire T du BIPM*. On trouvera à la Figure 7-2 du chapitre précédent un extrait de la table contenant ces informations. A ce jour, le degré d'incertitude susceptible d'être atteint est de l'ordre de quelques nanosecondes.

## 8.5 Services de diffusion du temps

Pour répondre aux besoins de la communauté scientifique et du secteur industriel et mettre les informations horaires légales à la disposition des habitants, les centres nationaux du temps peuvent offrir des services horaires et de diffusion. Ces services sont acheminés sur des liaisons spéciales de radiodiffusion: bandes des ondes myriamétriques, kilométriques et décimétriques et bande attribuée à la télévision, satellite, réseaux téléphoniques, internet.

On trouvera, dans le manuel UIT-R «Sélection et utilisation des systèmes de fréquence et de temps de précision», des informations très détaillées concernant les techniques utilisées et les degrés d'incertitude susceptibles d'être atteints au niveau des utilisateurs. En outre, une liste actualisée des émissions de signaux horaires et des étalons de fréquence figure dans les Recommandations UIT-R de la Série TF (<http://www.itu.int/rec/R-REC-TF/fr>). Le *Rapport annuel du BIPM sur les activités du temps* fournit aussi une description des signaux horaires et des services de diffusion du temps.

Dans le schéma synoptique de la Figure 8-1, les activités de ce type ont été représentées à l'aide de deux blocs: «Services de diffusion» et «serveur NTP». Pour informer les utilisateurs de la traçabilité de ces services au temps UTC(k), le laboratoire doit mettre en œuvre certains systèmes de surveillance. En outre, les écarts de temps et de fréquence ainsi que les incertitudes associées aux signaux horaires et de fréquence diffusés doivent être régulièrement communiqués au public sous forme papier ou électronique.

Autre solution: le centre du temps communique la traçabilité à un étalon national en publiant les résultats des mesures effectuées sur le système GPS (qui peut être considéré comme un étalon de transfert), permettant ainsi aux laboratoires secondaires de comparer leur étalon local (le plus souvent un oscillateur asservi sur les signaux GPS) aux références horaires internationales.

### Références

*BIPM Annual Report on Time Activities*, Bureau International des Poids et Mesures, disponible sur simple demande auprès du BIPM.

CCDS – *Rapport de la 14ème réunion*, 1993.

CCTF – *Rapport de la 15ème réunion*, juin 2001 (<http://www.bipm.org/cc/AllowedDocuments.jsp>).

CCTF – *Rapport de la 17ème réunion*, 2006 (<http://www.bipm.org/utis/common/pdf/CCTF17.pdf>).

CIPM/BIPM/OIML – Reconnaissance mutuelle des étalons nationaux de mesure et des certificats d'étalonnage et de mesurage émis par les laboratoires nationaux de métrologie, Paris, octobre 1999.



## CHAPITRE 9

**TRANSFERT ET DIFFUSION PAR SATELLITE DE SIGNAUX HORAIRE  
ET DE FRÉQUENCE: EFFETS RELATIVISTES**

	<i>Page</i>
9.1 L'intervalle d'espace-temps .....	106
9.2 Le principe de relativité.....	106
9.2.1 Le tenseur métrique.....	107
9.2.2 Le potentiel gravitationnel de la Terre .....	109
9.2.3 Dilatation du temps .....	111
9.2.4 Décalage gravitationnel vers le rouge .....	112
9.2.5 Transfert du temps par transport d'horloges .....	113
9.2.6 Système de coordonnées inertiel géocentrique .....	114
9.2.7 Système de coordonnées géocentrique à axes fixes .....	115
9.3 Horloge à bord d'un satellite .....	118
9.4 Transfert du temps par signal électromagnétique.....	121
9.4.1 Système de coordonnées inertiel géocentrique .....	123
9.4.2 Système de coordonnées géocentrique à axes fixes .....	125
9.4.3 Liaison intersatellite .....	127
9.4.4 Décalage Doppler relativiste .....	128
9.5 Conclusion.....	130
Références .....	130

## 9.1 L'intervalle d'espace-temps

Selon la relativité générale, la théorie de l'espace, du temps et de la gravitation repose sur la notion d'un intervalle d'espace-temps Riemannien invariant de la forme:

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = g_{00} c^2 dt^2 + 2 g_{0j} c dt dx^j + g_{ij} dx^i dx^j \quad (9-1)$$

où:

les indices grecs peuvent prendre les valeurs 0, 1, 2, 3

les indices latins peuvent prendre les valeurs 1, 2, 3.

La répétition d'un indice (l'un en position haute et l'autre en position basse) signifie une somme sur cet indice. L'objet mathématique fondamental est le tenseur métrique  $g_{\mu\nu}$ , dont les composantes sont des fonctions des coordonnées  $x^\alpha = (c t, x^i)$ ; les tenseurs sont symétriques par rapport aux indices  $\mu, \nu$  (autrement dit,  $g_{\mu\nu} = g_{\nu\mu}$ ). Le tenseur métrique inverse  $g^{\mu\nu}$  est défini par la relation  $g^{\mu\alpha} g_{\alpha\nu} = \delta^\mu_\nu$ , où  $\delta^\mu_\nu$  est le delta de Kronecker ( $\delta^\mu_\nu = 1$  si  $\mu = \nu$ , 0 sinon). Selon la convention de signe adoptée ici,  $-g_{00} > 0$ .

Dans la mesure de la distance et du temps, le temps est la seule quantité fondamentale, la longueur étant un concept dérivé. Les horloges et les signaux lumineux sont donc les seuls éléments fondamentaux de la mesure. On distingue deux méthodes de comparaison de l'heure indiquée par deux horloges distantes:

- 1) le transport d'une horloge portable intermédiaire;
- 2) un signal électromagnétique.

Dans le cas de la comparaison horaire relativiste, il est nécessaire de distinguer temps-coordonnée et temps propre. Le temps-coordonnée  $t$  d'un événement est le même dans tout le système de coordonnées espace-temps. Le temps propre  $\tau$  désigne l'heure lue sur une horloge dans son référentiel de repos. Il dépend de l'état de mouvement de l'horloge et de sa position dans le potentiel gravitationnel. Pour une horloge transportée, l'intervalle d'espace-temps est égal à:

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu \equiv -c^2 d\tau^2 \quad (9-2)$$

Pour un signal électromagnétique, l'intervalle d'espace-temps satisfait à la condition suivante:

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = 0 \quad (9-3)$$

## 9.2 Le principe de relativité

Conformément à la théorie de la relativité restreinte formulée par Einstein en 1905, les lois de la physique devraient avoir la même forme dans tous les référentiels inertiels. Ce postulat est connu sous le nom de «principe de relativité». Ainsi, outre les lois de la mécanique, les équations de Maxwell qui régissent l'électromagnétisme devaient être valides dans tous les référentiels inertiels. L'un des résultats fondamentaux prévus par les équations de Maxwell est l'existence d'ondes électromagnétiques qui se propagent dans le vide à la vitesse de la lumière, dont l'expression unique est donnée par:

$$c = 1/\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}$$

où:

$\mu_0$  et  $\varepsilon_0$ : constantes électriques représentant respectivement la perméabilité et la permittivité de l'espace libre.

La vitesse de la lumière  $c$  doit donc être la même dans tous les référentiels inertiels.

En 1908, Minkowski a établi que ces propriétés pouvaient s'exprimer par l'invariance d'un intervalle d'espace-temps à quatre dimensions de la forme:

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 = -c^2 dt'^2 + dx'^2 + dy'^2 + dz'^2 \quad (9-4)$$

de sorte que pour un signal lumineux, l'équation  $ds^2 = 0$  représente un front d'onde sphérique en expansion dans le référentiel inertiel  $S(ct, x, y, z)$  ou dans le référentiel inertiel  $S'(ct', x', y', z')$ . Les coefficients des différentielles de coordonnées sont donnés par la métrique de Minkowski,  $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} \equiv \text{diag}(-1, 1, 1, 1)$ .

La transformation de coordonnées qui préserve l'invariance de cette expression est la transformation de Lorentz. Si  $S'$  se déplace avec une vitesse  $V$  le long de l'axe des  $x$  de  $S$ , la transformation de Lorentz s'écrit:

$$x = \gamma(x' + V t'); \quad y = y'; \quad z = z' \quad (9-5)$$

$$t = \gamma(t' + V x' / c^2)$$

où:

$$\gamma \equiv (1 - V^2 / c^2)^{-1/2}$$

Deux événements sont simultanés si leurs temps-coordonnée sont égaux. Ainsi, le second terme de la transformation du temps-coordonnée implique que la simultanéité est une notion relative: des événements simultanés dans le référentiel  $S$  ne le sont pas nécessairement dans le référentiel  $S'$ .

Le principe fondamental de la relativité générale énoncé par Einstein en 1916 est que «les lois de la physique doivent être d'une nature telle qu'elles s'appliquent aux systèmes de référence quel que soit leur mouvement». Par conséquent, en relativité générale, la transformation des coordonnées entre deux référentiels quelconques est arbitraire et l'intervalle d'espace-temps prend par hypothèse une forme différentielle quadratique dont les composantes métriques sont fonction des coordonnées. Du fait de son invariance sous une transformation de coordonnées arbitraire  $x^\alpha \rightarrow x'^\alpha(x'^0, x'^1, x'^2, x'^3)$ , l'intervalle d'espace-temps est donné par:

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = g'_{\alpha\beta} dx'^\alpha dx'^\beta \quad (9-6)$$

La transformation des différentielles de coordonnées est fournie par:

$$dx^\mu = \frac{\partial x^\mu}{\partial x'^\alpha} dx'^\alpha \quad (9-7)$$

Ainsi, après substitution de cette expression dans  $ds^2$ , il ressort que la transformation de la métrique est égale à:

$$g'_{\alpha\beta} = \frac{\partial x^\mu}{\partial x'^\alpha} \frac{\partial x^\nu}{\partial x'^\beta} g_{\mu\nu} \quad (9-8)$$

Les différentiels de coordonnées et la métrique sont des exemples de quantités appelées «tenseur». Dans tout système de coordonnées, un tenseur est caractérisé par sa loi de transformation vers un autre système de coordonnées. La transformation est linéaire et homogène, de sorte que si une équation de tenseur est valide dans un système de coordonnées, elle l'est également dans tout autre système de coordonnées. Ainsi, en relativité générale, l'invariance de référentiel des lois de la physique est réalisée en exprimant les équations sous forme de tenseurs.

### 9.2.1 Le tenseur métrique

Les propriétés géométriques de l'espace-temps sont déterminées par le tenseur de Riemann  $R^\alpha_{\beta\gamma\delta}$ , qui est entièrement construit à partir du tenseur métrique et de ses dérivées première et seconde. Une transformation de coordonnées permettant d'exprimer une métrique donnée  $g_{\mu\nu}$  sous la forme de la métrique de Minkowski

$\eta_{\mu\nu}$  de la relativité restreinte existe si et seulement si le tenseur de Riemann est égal à zéro. Dans ce cas, l'espace-temps est plat. En présence de matière, l'espace-temps est courbe et la métrique ne peut être réduite à la métrique de Minkowski sur l'ensemble de l'espace-temps par quelque transformation de coordonnées que ce soit. Cela étant, il est toujours possible de trouver un système de coordonnées, représenté par un référentiel en chute libre, dans lequel les premières dérivées de la métrique disparaissent en un point choisi, la métrique étant fournie par la métrique de Minkowski au voisinage de ce point. Cette propriété est contenue dans le *Principe d'équivalence*, selon lequel un référentiel en chute libre est localement équivalent à un référentiel inertiel en l'absence de gravitation. Inversement, ce principe énonce qu'un référentiel non inertiel est localement impossible à distinguer d'un référentiel au repos dans un champ de gravitation. Le *Principe d'équivalence* repose sur l'observation expérimentale suivante: tous les corps tombent en subissant la même accélération, quelles que soient leur composition et leur structure interne. Dans la théorie newtonienne de la gravitation, il s'exprime par l'équivalence de la masse inertielle et de la masse gravitationnelle.

Pour une distribution donnée de la matière, le tenseur métrique est déterminé par l'équation de champ d'Einstein:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \quad (9-9)$$

où:

- $R_{\mu\nu} = R^{\alpha}_{\mu\alpha\nu}$ : tenseur de Ricci, obtenu par réduction (sommation) du tenseur riemannien sur ses premier et troisième indices
- $R = g^{\mu\nu} R_{\mu\nu}$ : courbure scalaire P
- $T_{\mu\nu}$ : tenseur énergie-impulsion, et  $G$  = constante de gravitation de Newton. Dans l'espace libre, l'équation de champ se réduit à  $R_{\mu\nu} = 0$ .

Cela étant, cette équation n'implique pas la condition plus forte  $R^{\alpha}_{\beta\gamma\delta} = 0$ , qui indique que l'espace-temps est plat.

En première approximation, d'ordre  $1/c^2$ , l'équation de champ d'Einstein se réduit à l'équation de Poisson,  $\nabla^2 U = -4\pi G \rho$ , où  $U$  est le potentiel gravitationnel de Newton et  $\rho$  la densité de la matière.

En espace libre, l'équation de champ devient l'équation de Laplace,  $\nabla^2 U = 0$ .

Pour l'analyse du transport d'une horloge selon cette approximation, la métrique dans un repère inertiel géocentrique (ECI, *Earth-Centered Inertial*) est égale à:

$$-g_{00} = 1 - 2U/c^2, \quad g_{0j} = 0, \quad g_{ij} = \delta_{ij} \quad (9-10)$$

où:

$\delta_{ij}$ : delta de Kronecker.

En effectuant une transformation des coordonnées, la métrique dans un repère géocentrique à axes fixes (ECEF, *Earth Centered Earth-Fixed*) en rotation devient:

$$-g_{00} = 1 - 2U/c^2 - (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2/c^2 = 1 - 2W/c^2, \quad g_{0j} = (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})_j/c, \quad g_{ij} = \delta_{ij} \quad (9-11)$$

où:

$\boldsymbol{\omega}$ : vitesse angulaire de rotation de la Terre

$W \equiv U + \frac{1}{2} (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2$ : géopotential de la Terre.

Pour l'analyse de signaux lumineux, il est nécessaire d'intégrer des termes en  $g_{ij}$  au même ordre que les termes en  $g_{00}$ . Ainsi, pour des signaux lumineux dans un référentiel inertiel:

$$-g_{00} = 1 - 2U/c^2, \quad g_{0j} = 0, \quad g_{ij} = (1 + 2U/c^2) \delta_{ij} \quad (9-12)$$

et dans un référentiel en rotation:

$$-g_{00} = 1 - 2U/c^2 - (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2/c^2 = 1 - 2W/c^2, \quad g_{0j} = (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})_j/c, \quad g_{ij} = (1 + 2U/c^2) \delta_{ij} \quad (9-13)$$

Ces approximations des composantes du tenseur métrique sont suffisantes pour les problèmes pratiques mettant en jeu des horloges et des signaux lumineux.

NOTE 1 – En vertu d'une recommandation de l'UAI, le signe du potentiel gravitationnel de Newton est positif.

### 9.2.2 Le potentiel gravitationnel de la Terre

Le potentiel gravitationnel de la Terre  $U$  à une distance radiale  $r$ , une latitude géocentrique  $\phi$  et une longitude  $\lambda$  est une solution de l'équation de Laplace,  $\nabla^2 U = 0$ , qui peut s'exprimer sous forme du développement en série d'harmoniques sphériques:

$$U(r, \phi, \lambda) = \frac{GM}{r} \left\{ 1 + \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left( \frac{R}{r} \right)^n P_{nm}(\sin \phi) (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) \right\}$$

$$= \frac{GM}{r} \left\{ 1 - \sum_{n=2}^{\infty} J_n \left( \frac{R}{r} \right)^n P_n(\sin \phi) - \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=1}^n \left( \frac{R}{r} \right)^n P_{nm}(\sin \phi) (J_{mn} \cos m\lambda + K_{mn} \sin m\lambda) \right\} \quad (9-14)$$

où:

- $G$ : constante de gravitation
- $M$ : masse de la Terre
- $R$ : rayon équatorial de la Terre
- $P_n(\sin \phi)$ : polynômes de Legendre de degré  $n$
- $P_{nm}(\sin \phi)$ : fonctions de Legendre associées de degré  $n$  et d'ordre  $m$ .

Le premier terme correspond au potentiel pour une Terre sphérique. Les termes figurant dans la somme simple, appelés harmoniques zonales, sont liés à l'aplatissement de la Terre. Les termes figurant dans la somme double, appelés harmoniques tesserales, sont liés à la forme elliptique de l'équateur terrestre. Lorsqu'il est suffisant de ne prendre en compte que la première harmonique liée à l'aplatissement, une valeur approchée du potentiel gravitationnel est donnée par la formule:

$$U(r, \phi) = \frac{GM}{r} \left[ 1 + \frac{1}{2} J_2 \left( \frac{R}{r} \right)^2 (1 - 3 \sin^2 \phi) \right] \quad (9-15)$$

où:

- $J_2$ : coefficient d'aplatissement de plus faible degré
- $P_2(x) = \frac{1}{2} (3x^2 - 1)$ .

Pour les mesures terrestres, il est nécessaire de tenir compte à la fois du potentiel gravitationnel de la Terre et de la rotation de la Terre. La somme du potentiel gravitationnel  $U$  et du potentiel rotationnel  $\frac{1}{2} (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2 = \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \cos^2 \phi$  correspond au géopotential:

$$W = U + \frac{1}{2} (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2 = U + \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \cos^2 \phi \quad (9-16)$$

qui est une solution de l'équation  $\nabla^2 W = -4\pi G \rho + 2\omega^2$ , où  $\boldsymbol{\omega}$  est la vitesse angulaire de la rotation de la Terre. En ne retenant que la première correction d'aplatissement, on peut exprimer le géopotential comme suit:

$$W(r, \phi) \approx \frac{GM}{r} \left[ 1 + \frac{1}{2} J_2 \left( \frac{R}{r} \right)^2 (1 - 3 \sin^2 \phi) \right] + \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \cos^2 \phi \quad (9-17)$$

La surface à géopotential constant est appelée le géoïde; le niveau moyen de la mer en donne une très bonne approximation. Etant donné que le géopotential  $W_0$  à la surface du géoïde est constant, il peut être évalué sur l'équateur, ce qui donne:

$$W_0 \equiv U_0 + \frac{1}{2} (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{R})^2 \approx \frac{GM}{R} \left( 1 + \frac{1}{2} J_2 \right) + \frac{1}{2} \omega^2 R^2 \quad (9-18)$$

où:

$U_0$ : potentiel gravitationnel de Newton sur le géoïde à la position  $\mathbf{R}$ .

Dans le modèle de la Terre WGS-84 (*NIMA Technical Report*, 1997), la constante gravitationnelle de la Terre est égale à:

$$GM = 3,986\,004\,418 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$$

le rayon de l'équateur terrestre est  $R = 6\,378\,137,0$  m, et

la vitesse angulaire de rotation de la Terre est  $\omega = 7,292\,1150 \times 10^{-5}$  rad/s.

Par ailleurs, la vitesse de la lumière est exactement égale à 299 792 458 m/s.

NOTE 1 – Cette valeur définit le mètre dans le Système international d'unités (SI). La permittivité de l'espace libre est  $\varepsilon_0 = 1/(\mu_0 c^2)$ , expression dans laquelle  $\mu_0 \equiv 4\pi \times 10^{-7}$  N/A<sup>2</sup> est la perméabilité de l'espace libre par définition de l'ampère. Ainsi,  $c$  et  $\varepsilon_0$  étant désormais des constantes définies, elles ne sont plus subordonnées à la mesure expérimentale.

Le coefficient d'aplatissement de la Terre du second degré est à peu près égal à  $J_2 = 0,001\,0826$ .

d'où:  $W_0 = 6,2637 \times 10^7$  m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup> et  $W_0 / c^2 = 6,9693 \times 10^{-10}$  approximativement.

L'accélération locale de la gravité  $\mathbf{g}$  correspond au gradient du géopotential, d'où:

$$\mathbf{g} = \nabla W = \nabla U - \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \quad (9-19)$$

La différence de géopotential sur une hauteur  $h$  est égale à  $\Delta W \approx \mathbf{g} \cdot \Delta \mathbf{r} = -g h$  environ.

L'amplitude de l'accélération de la gravité sur une Terre aplatie en rotation est donnée, sous forme analytique, par la formule de Somigliana [Heiskanen et Moritz, 1967]:

$$g = g_0 \frac{1 + k \sin^2 \phi'}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi'}} \quad (9-20)$$

où:

$\phi'$ : latitude géodésique

$e^2 = 2f - f^2$ : carré de la première excentricité

$f$ : aplatissement

$g_0$ : valeur de  $g$  au niveau de l'équateur.

La latitude géodésique  $\phi'$  et la latitude géocentrique  $\phi$  sont liées par l'équation exacte:

$$\tan \phi = (1 - f)^2 \tan \phi' = (1 - e^2) \tan \phi'.$$

Dans le modèle de la Terre WGS-84:

- $k = 0,001\ 931\ 852\ 652\ 41$
- $f = 1/298,257\ 223\ 563$
- $e^2 = 0,006\ 694\ 379\ 990\ 14$ , et
- $g_0 = 9,780\ 325\ 3359\ \text{m/s}^2$ .

NOTE 1 – Par convention,  $\Delta W$  est négatif lorsque l'horloge est située au-dessus du géoïde.

### 9.2.3 Dilatation du temps

En relativité restreinte, l'intervalle espace-temps pour une horloge se déplaçant à une vitesse  $v$  par rapport à un référentiel inertiel est donné par:

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + \delta_{ij} dx^i dx^j = -c^2 (1 - v^2/c^2) dt^2 = -c^2 d\tau^2 \quad (9-21)$$

où:

$v^2 = \delta_{ij} (dx^i/dt)(dx^j/dt)$ . Pour deux horloges de vitesse  $v_1$  et  $v_2$

$$d\tau_1 = \sqrt{1 - v_1^2/c^2} dt \quad (9-22)$$

et

$$d\tau_2 = \sqrt{1 - v_2^2/c^2} dt \quad (9-23)$$

Etant donné que les intervalles de temps propre  $d\tau_1$  et  $d\tau_2$  correspondent au même intervalle de temps-coordonnée  $dt$ :

$$\frac{d\tau_2}{d\tau_1} = \sqrt{\frac{1 - v_2^2/c^2}{1 - v_1^2/c^2}} \approx 1 - \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} (v_2^2 - v_1^2) \quad (9-24)$$

Par conséquent, une horloge se déplaçant à une vitesse donnée par rapport à un référentiel inertiel avancera plus lentement qu'une horloge se déplaçant à une vitesse inférieure par rapport à ce référentiel.

Si  $v_1 = 0$ , alors  $d\tau_2 = \sqrt{1 - v_2^2/c^2} d\tau_1$  et, par conséquent,  $d\tau_1 = d\tau_2 / \sqrt{1 - v_2^2/c^2}$ .

Ainsi l'intervalle de temps propre  $d\tau_1$  enregistré par l'horloge stationnaire est-il plus long que l'intervalle de temps propre  $d\tau_2$  enregistré par l'horloge en déplacement. Cette propriété est appelée «dilatation du temps».

L'effet de la dilatation du temps a été vérifié de façon très poussée grâce à la mesure des durées de vie des particules élémentaires. Par exemple, les muons à grande vitesse produits par les rayons cosmiques dans la haute atmosphère semblent vivre plus longtemps, si l'on en juge par la longueur de leur trajet avant leur désintégration, que les muons au repos dont on mesure la durée de vie propre en laboratoire [Frish et Smith, 1963].

La dilatation du temps s'observe aussi dans le transport des horloges. Soit la différence entre le temps propre  $\tau_2$  enregistré par une horloge transportée à une vitesse relative  $v'$  le long de l'équateur de la Terre en rotation et le temps propre  $\tau_1$  d'une horloge de référence qui reste immobile en un point de l'équateur. Par rapport à un référentiel inertiel, la vitesse de l'horloge de référence est égale à:

$$v_1 = \omega R, \text{ et}$$

la vitesse de l'horloge transportée est:

$$v_2 = \omega R + v'$$

où:

- $\omega$ : vitesse angulaire de rotation de la Terre  
 $R$ : rayon équatorial de la Terre.

La différence entre les temps propres (horloge transportée – horloge de référence) a pour valeur approchée:

$$\tau_2 - \tau_1 \approx -\frac{1}{2} \frac{1}{c^2} (v_2^2 - v_1^2) \tau_1 = -\frac{1}{c^2} \left( \frac{1}{2} v'^2 + \omega R v' \right) \tau_1 = -\frac{2 \pi R}{c^2} \left( \frac{1}{2} |v'| \pm \omega R \right) \quad (9-25)$$

Pour un voyage vers l'est, la vitesse relative  $v'$  est positive et les deux termes s'additionnent; pour un voyage vers l'ouest en revanche, la vitesse relative est négative et les deux termes tendent à s'annuler. Dans le référentiel en rotation de la Terre, le deuxième terme de droite représente l'effet Sagnac. En 1971, les physiciens Joseph Hafele et Richard Keating [Pound et Rebka, 1960] ont démontré la dilatation du temps au moyen d'horloges atomiques macroscopiques pour la première fois. Ils ont pour cela transporté quatre horloges à césium autour du monde dans des avions commerciaux à réaction, une fois vers l'est, l'autre fois vers l'ouest; ils ont ainsi pu vérifier de façon quantitative l'asymétrie des différences d'horloges entre les vols vers l'est et ceux vers l'ouest.

#### 9.2.4 Décalage gravitationnel vers le rouge

En relativité générale, l'intervalle d'espace-temps pour une horloge est donné par:

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = g_{00} c^2 dt^2 + 2 g_{0j} c dt dx^j + g_{ij} dx^i dx^j = -c^2 d\tau^2 \quad (9-26)$$

Dans le cas particulier d'une horloge au repos,  $dx^i = 0$  et  $d\tau = \sqrt{-g_{00}} dt$ .

Pour deux horloges  $A$  et  $B$  au repos dans un potentiel gravitationnel aux points  $x_A$  et  $x_B$ , les intervalles de temps propres sont:

$$d\tau_A = \sqrt{-g_{00}(x_A)} dt \quad (9-27)$$

et

$$d\tau_B = \sqrt{-g_{00}(x_B)} dt \quad (9-28)$$

Etant donné que les intervalles de temps propre  $d\tau_A$  et  $d\tau_B$  correspondent au même intervalle de temps-coordonnée  $dt$ :

$$\frac{d\tau_B}{d\tau_A} = \frac{\sqrt{-g_{00}(x_B)}}{\sqrt{-g_{00}(x_A)}} \quad (9-29)$$

Si les horloges sont distantes d'une hauteur  $h = r_B - r_A$  dans le champ gravitationnel de la Terre en rotation, alors:

$$-g_{00} = 1 - 2U/c^2 - (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2 / c^2 = 1 - 2W/c^2 \text{ et} \quad (9-30)$$

$$\frac{d\tau_B}{d\tau_A} \approx \frac{1 - W_B/c^2}{1 - W_A/c^2} \approx 1 - \frac{1}{c^2} (W_B - W_A) = 1 - \frac{\Delta W}{c^2} \approx 1 + \frac{g h}{c^2} \quad (9-31)$$

où:

- $W$ : le géopotential,  $g$ , est l'accélération locale de la gravité;  
 $\Delta W \approx -g h$ .



La différence des observations des horloges en temps propre est donc:

$$\tau_B - \tau_A = -\frac{1}{c^2} \Delta W \quad \tau_A \approx \frac{1}{c^2} g h \tau_A \quad (9-32)$$

Par conséquent, en raison de la différence de potentiel gravitationnel, le temps propre enregistré par l'horloge  $B$  à une altitude plus élevée (c'est-à-dire dans un champ gravitationnel plus faible) est supérieur au temps propre enregistré par l'horloge  $A$  située à une altitude plus basse (c'est-à-dire dans un champ gravitationnel plus fort). Si l'horloge  $A$  émet un signal périodique vers le haut, qui est reçu par l'horloge  $B$ , la différence relative en fréquence est égale à:

$$\frac{f_B - f_A}{f_A} = \frac{f_B}{f_A} - 1 = \frac{d\tau_A}{d\tau_B} - 1 = -\frac{gh}{c^2} \quad (9-33)$$

La fréquence reçue  $f_B$  mesurée par l'horloge  $B$  est donc inférieure à la fréquence émise  $f_A$  mesurée par l'horloge  $A$ . Autrement dit, un même nombre d'impulsions de signal est observé sur un intervalle de temps propre plus long<sup>1</sup>. Cet effet est appelé décalage gravitationnel vers le rouge. (En pratique, le terme «décalage vers le rouge» est un terme générique qui s'applique à un changement de fréquence positif ou négatif.)

Le décalage gravitationnel vers le rouge a été directement mesuré pour la première fois lors d'une expérience menée par Robert Pound et Glen Rebka [Pound et Rebka, 1960] à l'Université Harvard en 1960. Ils ont mesuré avec précision le changement relatif en fréquence extrêmement faible de photons de rayonnement gamma s'élevant ou tombant sur une distance verticale connue. Dans cette expérience, un émetteur  $\text{Fe}^{57}$  est déplacé très lentement pour produire un décalage Doppler qui compense très exactement le décalage gravitationnel vers le rouge et ainsi permettre l'absorption par résonance sur une étroite bande de fréquences par un absorbeur  $\text{Fe}^{57}$  immobile. Une telle précision a été rendue possible grâce à un effet récemment découvert appelé «effet Mössbauer». Il s'agit d'un phénomène d'émission et d'absorption sans recul, qui se produit lorsque l'isotope est intégré dans un cristal approprié.

En 1975, un groupe de recherche dirigé par Carroll Alley [Alley, 1983] de l'Université du Maryland a effectué une série d'expériences à base d'horloges atomiques embarquées dans des avions. Ces expériences, conçues pour tester le décalage gravitationnel vers le rouge à trois altitudes différentes, ont parfaitement conforté la théorie. L'effet du potentiel gravitationnel de la Terre a également été mesuré en 1971 dans le cadre de l'expérience de Hafele-Keating, qui mettait en œuvre des horloges atomiques embarquées dans des avions faisant le tour du monde.

A ce jour, la vérification du décalage vers le rouge la plus précise a été réalisée en 1976 par Robert Vessot [Vessot et Levine *et al*, 1980] de l'observatoire d'astrophysique de la Smithsonian Institution, au moyen d'un maser à hydrogène porté à une altitude de 10 000 km par une fusée Scout D. Au cours de cette expérience, un signal bidirectionnel réémis par la charge utile de communication de la fusée a été mélangé à un signal unidirectionnel pour extraire la variation de fréquence relativiste. L'effet gravitationnel s'annule très exactement sur la liaison montante et sur la liaison descendante, de sorte que le signal réémis subit deux fois l'effet Doppler alors que le signal unidirectionnel subit à la fois l'effet gravitationnel et l'effet Doppler. Les résultats de cette expérience sont en accord avec la théorie, dans une limite de 0,01%.

NOTE 1 – Du point de vue de la mécanique quantique, l'énergie cinétique d'un photon est  $E = hf$ , où  $h$  est la constante de Planck. A mesure que le photon s'élève, il perd de l'énergie cinétique et la fréquence observée décroît.

### 9.2.5 Transfert du temps par transport d'horloges

Pour une horloge transportée, l'intervalle d'espace-temps est égal à:

$$ds^2 = g_{00} c^2 dt^2 + 2 g_{0j} c dt dx^j + g_{ij} dx^i dx^j = -c^2 d\tau^2 \quad (9-34)$$

Le temps-coordonnée est défini par le temps propre d'une horloge étalon au repos à l'infini, car:

$$\text{si } dx^i = 0 \text{ et } -g_{00} = 1 \text{ alors } dt = d\tau.$$

Il s'agit d'une équation polynomiale du second degré de  $dt$ .

Ainsi, le temps-coordonnée écoulé pendant le transport d'une horloge en fonction du temps propre mesuré est donné par:

$$\Delta t = \pm \int_{\text{trajet}} \frac{1}{\sqrt{-g_{00}}} \sqrt{1 + \frac{1}{c^2} \left( g_{ij} + \frac{g_{0i} g_{0j}}{-g_{00}} \right) \frac{dx^i}{d\tau} \frac{dx^j}{d\tau}} d\tau + \frac{1}{c} \int_{\text{trajet}} \frac{g_{0j}}{-g_{00}} \frac{dx^j}{d\tau} d\tau \quad (9-35)$$

Par conséquent, lors du transfert du temps d'un point  $A$  à un point  $B$  au moyen d'une horloge portable intermédiaire, le temps-coordonnée écoulé est égal, en première approximation, à:

$$\Delta t = \int_A^B \left[ 1 - \frac{1}{2}(-g_{00} - 1) + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} g_{ij} \frac{dx^i}{dt} \frac{dx^j}{dt} \right] dt + \frac{1}{c} \int_A^B g_{0j} \frac{dx^j}{dt} dt \quad (9-36)$$

Le second terme correspond à l'effet Sagnac pour l'horloge transportée. Dans un référentiel inertiel,  $g_{0j} = 0$ , et ce terme n'apparaît donc pas.

### 9.2.6 Système de coordonnées inertiel géocentrique

Exprimées en termes d'ordre  $1/c^2$ , les composantes du tenseur métrique dans un système de coordonnées inertiel géocentrique sont données par:

$$-g_{00} = 1 - 2U/c^2, \quad g_{0j} = 0 \quad \text{et} \quad g_{ij} = \delta_{ij}.$$

A cet ordre, l'intervalle d'espace-temps est égal à:

$$ds^2 = - \left( 1 - \frac{2U}{c^2} \right) c^2 dt^2 + \delta_{ij} dx^i dx^j = -c^2 \left( 1 - \frac{2U}{c^2} - \frac{1}{c^2} v^2 \right) dt^2 = -c^2 dt^2 \quad (9-37)$$

où:

- $U$ : potentiel gravitationnel à l'emplacement de l'horloge
- $v$ : vitesse de l'horloge par rapport au référentiel inertiel.

Par conséquent, le temps-coordonnée écoulé pendant le déplacement de l'horloge est égal à:

$$\Delta t = \int_A^B \left( 1 + \frac{1}{c^2} U + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} v^2 \right) dt \quad (9-38)$$

Les corrections figurant sous l'intégrale correspondent aux effets du décalage gravitationnel vers le rouge, qui est dû au potentiel de la Terre et à la dilatation du temps causée par la vitesse de l'horloge. Le temps-coordonnée  $t$  représenté par cette prescription est le temps-coordonnée géocentrique (TCG), qui correspond à l'échelle de temps-coordonnée géocentrique telle que réalisée par rapport à un système de coordonnées inertiel géocentrique dont l'unité est la seconde du SI.

Pour une horloge au repos située à la position  $\mathbf{R}$  sur le géoïde en rotation, dans un potentiel gravitationnel  $U_0$  et avec une vitesse  $\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{R}$  par rapport au référentiel de coordonnées inertiel géocentrique, le temps-coordonnée écoulé est donné par:

$$\Delta t = \int_A^B \left\{ 1 + \frac{1}{c^2} U_0 + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{R})^2 \right\} dt = (1 + W_0/c^2) \Delta t \quad (9-39)$$

où:

- $W_0$ : géopotential à la surface du géoïde.

Etant donné que  $W_0$  est une constante, tandis que le temps-coordonnée  $t$  est une coordonnée globale, les horloges situées en un point quelconque du géoïde conservent le même temps propre  $\Delta\tau$ . Le temps-coordonnée peut être rendu égal au temps propre d'une horloge située sur le géoïde en le redimensionnant comme suit:

$$\Delta t' \equiv \left(1 - W_0 / c^2\right) \Delta t = \Delta\tau \quad (9-40)$$

En conséquence, le temps-coordonnée écoulé, tel que mesuré par le temps propre d'une horloge de référence située sur le géoïde, qui correspond au temps propre d'une horloge située dans un potentiel  $U$  et dotée d'une vitesse  $v$  par rapport au référentiel de coordonnées inertiel géocentrique, est donné par:

$$\Delta t' = \int_A^B \left\{ 1 + \frac{1}{c^2} (U - W_0) + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} v^2 \right\} d\tau \quad (9-41)$$

On notera que  $W_0$  tient compte de l'effet de la rotation de la Terre, ce qui n'est pas le cas de  $U$ . Cette équation peut être utilisée pour des horloges situées à proximité de la surface de la Terre ainsi que pour des horloges embarquées à bord de satellites, jusqu'à l'altitude de l'orbite géostationnaire (35 786 km). Le temps-coordonnée  $t'$  représenté par cette prescription correspond à TT, qui est défini comme l'échelle de temps-coordonnée telle que réalisée par des horloges situées sur le géoïde en rotation et dont l'unité est la seconde du SI.

Par conséquent,  $t' \equiv TT$  diffère de  $t \equiv TCG$  uniquement d'une marche constante telle que  $dTT / dTCG = 1 - L_G$ ;

où:

$$L_G \equiv W_0 / c^2 = 6,969\,290\,134 \times 10^{-10} \text{ (environ } 60,2 \text{ } \mu\text{s/j).}$$

TT est une forme idéale de l'échelle TAI.

### 9.2.7 Système de coordonnées géocentrique à axes fixes

Exprimées en termes d'ordre  $1 / c^2$ , les composantes du tenseur métrique dans le système de coordonnées géocentrique à axes fixes en rotation (ECEF, *Earth-Centered Earth-Fixed*) sont données par:

$$-g_{00} = 1 - 2U / c^2 - (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2 / c^2 = 1 - 2W / c^2, \quad g_{0j} = (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})_j / c \quad \text{et} \quad g_{ij} = \delta_{ij}.$$

A cet ordre, l'intervalle d'espace-temps est égal à:

$$ds^2 = - \left[ 1 - 2 \frac{1}{c^2} U - \frac{1}{c^2} (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2 \right] c^2 dt^2 + 2 (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})_j dx^j c dt + \delta_{ij} dx^i dx^j = -c^2 d\tau^2 \quad (9-42)$$

Le temps-coordonnée écoulé est donc donné par:

$$\Delta t = \int_A^B \left\{ 1 + U / c^2 + \frac{1}{2} (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2 / c^2 + (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \cdot \mathbf{v}' / c + \frac{1}{2} v'^2 / c^2 \right\} d\tau \quad (9-43)$$

où:

$\mathbf{v}'$ : vitesse de l'horloge par rapport à la Terre en rotation. Ce résultat découle aussi de l'équation donnant  $\Delta t$  par rapport à un référentiel inertiel par substitution  $\mathbf{v} = \mathbf{v}' + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}$  à la même approximation.

Pour faire correspondre ce temps-coordonnée au temps propre enregistré par une horloge au repos sur le géoïde, il est multiplié par le facteur d'échelle  $1 - W_0 / c^2$ , d'où:

$$\Delta t' = \left(1 - \frac{1}{c^2} W_0\right) \Delta t = \int_A^B \left\{ 1 + \frac{1}{c^2} \left[ U + \frac{1}{2} (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2 - W_0 \right] + \frac{1}{2} v'^2 \right\} d\tau + \int_A^B (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \cdot \mathbf{v}' dt \quad (9-44)$$

L'expression entre crochets figurant dans la première intégrale peut s'exprimer comme suit:

$$U + \frac{1}{2}(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2 - W_0 = W - W_0 = \Delta W = -g h \quad (9-45)$$

d'où:

- $W$ : géopotential à l'altitude  $h$
- $W_0$ : géopotential à la surface du géoïde
- $g$ : accélération locale de la gravité.

En conséquence, le temps-coordonnée écoulé devient:

$$\Delta t' = \int_A^B \left( 1 - \frac{1}{c^2} g h + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} v'^2 \right) d\tau + \frac{1}{c^2} \int_A^B (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \cdot \mathbf{v}' d\tau \quad (9-46)$$

La seconde intégrale correspond à l'effet Sagnac pour l'horloge transportée. L'effet Sagnac est une propriété cinématique intrinsèque au référentiel en rotation. Ce terme peut s'exprimer sous la forme:

$$\Delta t_{Sagnac} = \frac{1}{c^2} \int_A^B (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \cdot \mathbf{v}' d\tau = \frac{1}{c^2} \int_A^B \boldsymbol{\omega} \cdot (\mathbf{r} \times d\mathbf{r}) = 2 \frac{1}{c^2} \int_A^B \boldsymbol{\omega} \cdot d\mathbf{A} = \frac{2\omega A}{c^2} \quad (9-47)$$

où:

- $A$ : aire balayée par le vecteur position par rapport au centre de la Terre projetée sur le plan équatorial (positive vers l'est et négative vers l'ouest).

L'effet Sagnac peut aussi s'exprimer sous la forme:

$$\Delta t_{Sagnac} = \frac{1}{c^2} \int_A^B (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \cdot \mathbf{v}' d\tau = \frac{1}{c^2} \int_A^B (\omega R \cos \phi)(v' \cos \theta) d\tau \frac{\omega}{c^2} \int_A^B R^2 \cos^2 \phi d\lambda \quad (9-48)$$

où:

- $R$ : rayon de la Terre;  $\phi$  est la latitude
- $\lambda$ : longitude
- $v' \cos \theta$ : composante d'orientation vers l'est de la vitesse. Le cap  $\theta$ , mesuré par rapport à l'est, est le complément de l'azimut  $A_z$ , mesuré par rapport au nord, de sorte que  $\cos \theta = \sin A_z$ .

La correction de l'effet Sagnac apportée au temps-coordonnée écoulé est positive pour une horloge se déplaçant vers l'est et négative pour une horloge se déplaçant vers l'ouest; elle est nulle pour une horloge se déplaçant vers le nord ou vers le sud.

Par conséquent, lors du transfert du temps d'un point  $A$  à un point  $B$  au moyen d'une horloge portable, le temps-coordonnée écoulé est donné par:

$$\Delta t' = \int_A^B \left( 1 - \frac{1}{c^2} g h + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} v'^2 \right) d\tau + \frac{\omega}{c^2} \int_A^B R^2 \cos^2 \phi d\lambda \quad (9-49)$$

D'après cette formule, trois effets relativistes sont à prendre en compte. Les corrections figurant sous la première intégrale sont les expressions du décalage gravitationnel vers le rouge et de la dilatation du temps. La correction apportée par la seconde intégrale est l'effet Sagnac. De façon générale, le temps-coordonnée doit être intégré numériquement sur le trajet spécifié.

Dans le cas d'une horloge transportée autour de l'équateur dans la direction de l'est et revenant à son point de départ, la correction liée à l'effet Sagnac est égale à 207,4 ns.

Pour un trajet fermé délimitant une petite aire  $S$  à la surface de la Terre, on a :

$$A \approx S \sin \bar{\phi}, \text{ où } \bar{\phi} \text{ est la latitude moyenne évaluée au centre de } S.$$

Si une horloge effectue un aller-retour entre deux points en suivant le même trajet, les corrections liées à l'effet Sagnac s'annulent et l'effet Sagnac net est égal à zéro.

Si le trajet est un grand cercle, alors  $\cos \phi \cos \theta = \cos i$ , qui est une valeur constante,  $i$  étant l'inclinaison du plan du grand cercle par rapport à l'équateur.

L'aire projetée est donnée par  $A = \frac{1}{2} R^2 \gamma \cos i$ , où  $\gamma$  correspond à l'arc du grand cercle entre le point 1 et le point 2 au début et à la fin du trajet.

La correction de l'effet Sagnac est donc :

$$\Delta t_{Sagnac} = \frac{2\omega A}{c^2} = \frac{\omega R^2}{c^2} \gamma \cos i \quad (9-50)$$

Par trigonométrie sphérique,  $\gamma$  est donné par :

$$\cos \gamma = \sin \phi_1 \sin \phi_2 + \cos \phi_1 \cos \phi_2 \cos(\lambda_2 - \lambda_1) \quad (9-51)$$

où :

$\phi$  et  $\lambda$  : latitude et longitude de chaque point.

L'inclinaison du plan du grand cercle est donnée par :

$$\tan i = \begin{cases} \tan \phi_1 \csc \beta, & \beta \neq 0, \phi_1 \neq 0 \\ \tan \phi_2 \csc(\lambda_2 - \lambda_1), & \beta = \phi_1 = 0 \end{cases} \quad (9-52)$$

en considérant que le point 1 est à l'ouest du point 2. L'angle  $\beta$ , qui est la différence de longitude entre, d'une part, le point d'intersection du grand cercle avec l'équateur et, d'autre part, le point 1, est donné par :

$$\cot \beta = \frac{\tan \phi_2}{\tan \phi_1} \csc(\lambda_2 - \lambda_1) - \cot(\lambda_2 - \lambda_1) \quad (9-53)$$

En tout point du grand cercle, la latitude peut s'exprimer en fonction de la longitude comme suit :

$$\tan \phi = \tan i \sin(\lambda_2 - \lambda_1 + \beta) \quad (9-54)$$

A partir de cette expression et de l'identité  $\cos^2 \phi = 1 / (1 + \tan^2 \phi)$ , sachant en outre que  $\tan(\lambda_2 - \lambda_1 + \beta) = \cos i \tan(\gamma + \psi)$  et  $\tan \beta = \cos i \tan \psi$  où  $\psi$  est l'arc du grand cercle délimité par le point d'intersection avec l'équateur et le point 1, on peut, d'une autre manière, montrer que :

$$\Delta t_{Sagnac} = \frac{\omega}{c^2} \int_A^B R^2 \cos^2 \phi d\lambda = \frac{\omega R^2}{c^2} \gamma \cos i \quad (9-55)$$

comme ci-dessus.

A titre d'exemple, considérons la mesure du transfert du temps entre le Laboratoire national de physique du Royaume-Uni (NPL) et l'Observatoire naval des Etats-Unis (USNO) au moyen du transport d'une horloge atomique. Supposons que l'horloge soit transportée à bord d'un avion le long d'une route formant un grand cercle, de Londres à Washington, à une altitude moyenne de 10 000 m et à une vitesse moyenne de 220 m/s, la durée du vol étant de 7,5 h environ. L'intervalle de temps propre mesuré par l'horloge embarquée est  $\Delta \tau$  et

l'intervalle de temps propre mesuré par une horloge de référence située sur le géoïde est  $\Delta\tau' = \Delta t'$ . Alors, la différence de temps propre  $\Delta\tau - \Delta\tau'$  (horloge embarquée – horloge de référence) est de +29 ns en raison du décalage gravitationnel vers le rouge et de –7 ns en raison de la dilatation du temps. Pour le vol en direction de l'ouest, l'effet Sagnac est de +18 ns. L'horloge embarquée gagnerait donc au total 40 ns par rapport à l'horloge de référence.

D'un autre côté, pour un vol vers l'est, de Washington à Londres, l'effet Sagnac est de –18 ns et l'horloge embarquée ne gagnerait que 4 ns en valeur nette. Pour le vol aller-retour, si les routes empruntées par l'avion sont identiques, les corrections liées à l'effet Sagnac s'annulent. La variation nette résultante est de +44 ns ( $= 2 \times 29 \text{ ns} - 2 \times 7 \text{ ns}$ ); elle est exclusivement due au décalage gravitationnel vers le rouge et à la dilatation du temps.

### 9.3 Horloge à bord d'un satellite

Pour une horloge à bord d'un satellite, le temps-coordonnée écoulé par rapport à un référentiel inertiel géocentrique est donné par:

$$\Delta t = \int_A^B \left( 1 + \frac{1}{c^2} U + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} v^2 \right) d\tau \quad (9-56)$$

Si le satellite suit une orbite képlérienne non perturbée, le potentiel gravitationnel est égal à:

$$U = \frac{GM}{r} \quad (9-57)$$

et la vitesse du satellite est donnée par la conservation de l'énergie  $E$  (par unité de masse):

$$E = \frac{1}{2} v^2 - U = \frac{1}{2} v^2 - \frac{GM}{r} = -\frac{GM}{2a} \quad (9-58)$$

où:

$a$ : demi-grand axe de l'orbite.

En conséquence, le temps-coordonnée écoulé est donné par:

$$\Delta t = \int_{\text{orbite}} \left( 1 - \frac{1}{c^2} \frac{GM}{2a} + \frac{1}{c^2} \frac{2GM}{r} \right) d\tau = \left( 1 - \frac{1}{c^2} \frac{GM}{2a} \right) \Delta\tau + \frac{2GM}{c^2} \int_{\tau_0}^{\tau} \frac{1}{r} d\tau \quad (9-59)$$

Pour une orbite képlérienne, la distance radiale est égale à:

$$r = a (1 - e \cos E)$$

où:

$e$ : excentricité de l'orbite

$E$ : anomalie excentrique.

Ainsi, d'après l'équation de Kepler:

$$M \equiv n (\tau - \tau_0) = E - e \sin E$$

où:

$M$ : anomalie moyenne

$n \equiv 2\pi/T = \sqrt{GM/a^3}$ : mouvement moyen

$T$ : période orbitale

$\tau_0$ : instant du périhélie.

L'intégrale devient donc:

$$\int_{\tau_0}^{\tau} \frac{1}{r} d\tau = \frac{1}{na} E = \frac{1}{a} \Delta\tau + \sqrt{\frac{a}{GM}} e \sin E \quad (9-60)$$

où:

$$\Delta\tau = \tau - \tau_0.$$

D'où:

$$\Delta t = \left( 1 + \frac{3}{2} \frac{1}{c^2} \frac{GM}{a} \right) \Delta\tau + \frac{2}{c^2} \sqrt{GM a} e \sin E \quad (9-61)$$

Il est commode d'appliquer le changement d'échelle suivant:

$$\Delta t' = \left( 1 - \frac{1}{c^2} W_0 \right) \Delta t = \int_A^B \left\{ 1 + \frac{1}{c^2} (U - W_0) + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} v^2 \right\} d\tau \quad (9-62)$$

de sorte que le temps-coordonnée corresponde au temps propre enregistré par des horloges situées sur le géoïde. Ainsi, une horloge sur le géoïde devient une horloge coordonnée. Le temps-coordonnée écoulé est alors donné par:

$$\Delta t' = \left( 1 + \frac{3}{2} \frac{1}{c^2} \frac{GM}{a} - \frac{1}{c^2} W_0 \right) \Delta\tau + \frac{2}{c^2} \sqrt{GM a} e \sin E \quad (9-63)$$

Le premier terme représente un décalage de marche constant entre l'horloge embarquée sur le satellite et l'horloge située sur le géoïde. La correction apportée à l'intervalle de temps propre de l'horloge du satellite est égale à:

$$k \equiv 1 + \frac{3}{2} \frac{1}{c^2} \frac{GM}{a} - \frac{1}{c^2} W_0 = \frac{3}{2} \frac{1}{c^2} \frac{GM}{a} - \frac{1}{c^2} \frac{GM}{R} \left( 1 + \frac{1}{2} J_2 \right) - \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} \omega^2 R^2 \quad (9-64)$$

$k$  est nul pour un demi-grand axe de 9 545 km environ.

A cette distance, les effets dus au décalage gravitationnel vers le rouge et à la dilatation du temps s'annulent. Pour une orbite basse, la dilatation du temps est supérieure et  $k$  est positif, tandis que pour une orbite haute, le décalage gravitationnel vers le rouge est supérieur et  $k$  est négatif.

Le deuxième terme correspond à une faible correction relativiste due à l'excentricité de l'orbite; il peut s'exprimer, sans approximation, sous la forme:

$$\Delta t_r = \frac{2}{c^2} \sqrt{GM a} e \sin E = \frac{2 \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}}{c^2} \quad (9-65)$$

où:

$\mathbf{r}$  et  $\mathbf{v}$ : position et vitesse du satellite.

Etant donné que  $\mathbf{r} \cdot \mathbf{v}$  est un scalaire, il peut être évalué dans le système de coordonnées inertiel géocentrique ou dans le système de coordonnées géocentrique à axes fixes. L'intervalle de temps-coordonnée peut donc s'exprimer sous la forme:

$$\Delta t' = (1 + k) \Delta\tau + \Delta t_r.$$

Le temps propre de l'horloge à bord du satellite est donné par:

$$\Delta\tau = (1 - k) \Delta t' + \Delta t_r$$

où:

la correction apportée au temps propre est l'opposé de la correction apportée aux temps-coordonnée,  
 $\Delta\tau_r \equiv -\Delta t_r$ .

En ajustant le rythme de l'horloge embarquée sur le satellite conformément à  $\Delta\tau' = (1 + k) \Delta\tau$ , on peut faire en sorte que cette horloge évolue au même rythme moyen qu'une horloge située sur le géoïde. Par conséquent, le temps propre devient:

$$\Delta\tau' = \Delta t' + \Delta\tau_r.$$

Et donc, hormis une faible correction périodique, l'horloge à bord du satellite devient une horloge coordonnée.

Pour un satellite GPS dont le demi-grand axe orbital est de 26 562 km, le décalage de rythme séculaire est:

$$k = -4,464\,733 \times 10^{-10} = -38,575\,293 \text{ } \mu\text{s/j.}$$

Par conséquent, l'horloge d'un satellite GPS tourne plus vite à raison de 38  $\mu\text{s/jour}$  environ par rapport à une horloge étalon située sur le géoïde: 45  $\mu\text{s/jour}$  plus vite en raison de la différence de potentiel gravitationnel et 7  $\mu\text{s/jour}$  plus lentement en raison de la différence de vitesse.

Cet effet est substantiel par comparaison avec la précision nominale d'horloge de 10 ns sur quelques heures. Pour corriger la différence de rythme, l'horloge d'un satellite GPS se voit appliquer un décalage relatif avant le lancement égal à  $\Delta f / f = -4,464\,733 \times 10^{-10}$ , qui équivaut à un changement du rythme de l'horloge à 10,23 MHz égal à  $\Delta f = -0,004\,5674 \text{ Hz}$ .

La fréquence résultante est égale à 10 229 999,995 4326 Hz, de sorte que, vue par un observateur situé sur le géoïde, la fréquence reste inchangée. Si l'excentricité orbitale maximale est égale à 0,02, le terme périodique  $\Delta\tau_r$  possède une amplitude de 46 ns à la période orbitale de 11,967 heures. Cette correction relativiste est appliquée dans le récepteur de l'utilisateur.

La différence de rythme a été mesurée pour la première fois dans des signaux reçus d'un satellite GPS prototype NTS-2 en 1977; la concordance avec la théorie de la relativité générale était dans la limite de 0,7% [Buisson *et al.*, 1977]. Des paliers de fréquence relativistes ont également été observés lors de manœuvres de repositionnement sur orbite [Epstein *et al.*, 2001]. Pour une orbite fortement elliptique, l'amplitude du terme périodique peut être significative. Par exemple, sur une orbite de Molniya de période égale à 12 h et d'excentricité 0,722, l'amplitude est de 1,7  $\mu\text{s}$ .

Ces corrections relativistes sont suffisantes pour mesurer le temps avec une précision de l'ordre de la nanoseconde. Pour des mesures inférieures à la nanoseconde, le facteur le plus important à prendre ensuite en compte est la contribution au décalage gravitationnel vers le rouge de la perturbation liée à l'aplatissement  $J_2$  de la Terre dans le potentiel  $U(r, \phi)$  indiqué ci-dessus. Le demi-grand axe  $a$  et la distance radiale  $r$  perturbés sont donnés par [Kozai, 1959]:

$$a = \bar{a} \left[ 1 + \frac{3}{2} J_2 \left( \frac{R}{\bar{a}} \right)^2 \sin^2 i \cos(2u) \right] \quad (9-66)$$

et

$$r = \bar{a} \left[ 1 - e \cos E + \frac{1}{4} J_2 \left( \frac{R}{\bar{a}} \right)^2 \sin^2 i \cos(2u) \right] \quad (9-67)$$

où:

- $\bar{a}$ : demi-grand axe moyen
- $e$ : excentricité (supposée faible)
- $E$ : anomalie excentrique



- $i$ : inclinaison  
 $u$ : argument de latitude.

Le demi-grand axe perturbé  $a$  est donc une fonction périodique de  $u$ . L'énergie totale  $E$  (que l'on peut voir comme une définition de  $a$ ) est égale à:

$$E = \frac{1}{2}v^2 - U(r, \phi) = \left( \frac{GM}{r} - \frac{GM}{2a} \right) - U(r, \phi) = -\frac{GM}{2a} \left[ 1 + J_2 \left( \frac{R}{a} \right)^2 \left( 1 - \frac{3}{2} \sin^2 i \right) \right] \quad (9-68)$$

et, comme requis, elle est constante.

Par conséquent, en substituant  $\frac{1}{2}v^2$  et  $U(r, \phi)$  dans l'expression donnant le temps-coordonnée écoulé  $\Delta t'$ , sachant que  $\sin \phi = \sin i \sin u$  et  $u \approx n \Delta \tau$  où  $\Delta \tau$  est le temps propre du nœud ascendant tel que mesuré par l'horloge du satellite, on déduit (*NIMA Technical Report*, 1997):

$$\Delta t_{\text{aplatissement}} = \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} \frac{GM}{a} J_2 \left( \frac{R}{a} \right)^2 \left[ \left( 1 - \frac{3}{2} \sin^2 i \right) \Delta \tau + \frac{\sin^2 i}{n} \sin(2n \Delta \tau) \right] \quad (9-69)$$

Pour une orbite GPS d'inclinaison  $55^\circ$ , le terme périodique présente une amplitude de 24 ps.

Conformément au *Principe d'équivalence*, les potentiels gravitationnels de la Lune et du Soleil n'ont pas d'incidence directe sur une horloge embarquée à bord d'un satellite en orbite autour de la Terre, car, dans ces potentiels, cette dernière constitue un référentiel en chute libre.

Au lieu de cela, ils apparaissent donc comme des effets dus aux marées. Le potentiel de marées dû à un troisième objet externe est donné par la formule approchée suivante:

$$U_{\text{marées}} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 U_{\text{ext}}}{\partial x^i \partial x^j} x^i x^j \approx \frac{GM_{\text{ext}}}{r_T^3} (r_S - r_T)^2 \quad (9-70)$$

où:

$r_S$  et  $r_T$ : distance du troisième objet au satellite et à la Terre respectivement.

$$r_S - r_T \approx r \cos i \sin(n \Delta \tau)$$

où:

$r$ : rayon orbital

$i$ : inclinaison orbitale par rapport au troisième objet, qui est variable.

La correction apportée à l'intervalle de temps-coordonnée est donc égale à:

$$\Delta t_{\text{marées}} \approx \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} \frac{GM_{\text{ext}}}{r_T} \left( \frac{r}{r_T} \right)^2 \cos^2 i \left[ \Delta \tau - \frac{1}{2n} \sin(2n \Delta \tau) \right] \quad (9-71)$$

Les effets des marées sur une horloge GPS sont faibles. Outre le facteur d'inclinaison, pour la Lune, la vitesse de dérive séculaire est égale à 15 ps par révolution et l'amplitude du terme périodique est de 1 ps. Pour le Soleil, les valeurs sont respectivement de 7 ps par révolution et de 0,5 ps. Bien que le Soleil possède une masse 30 millions de fois supérieure environ à celle de la Lune, il se situe à une distance 400 fois supérieure environ. Etant donné que le potentiel de marées varie inversement au cube de la distance, l'effet de marées du Soleil est inférieur à celui de la Lune dans un rapport 1/2 environ.

#### 9.4 Transfert du temps par signal électromagnétique

En relativité restreinte, l'équation de la propagation de la lumière dans un référentiel inertiel est donnée par:

$$ds^2 = \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 = 0 \quad (9-72)$$

où:

$\eta_{\mu\nu}$ : métrique de Minkowski.

Le temps de propagation entre deux points  $A$  et  $B$  s'exprime simplement:

$$\Delta t_{AB} = \Delta t_{BA} = \frac{1}{c} \int_A^B \sqrt{\delta_{ij} dx^i dx^j} = \frac{1}{c} \int_A^B \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2} \quad (9-73)$$

La prescription d'Einstein est une convention de la relativité restreinte utilisée pour synchroniser des horloges dans un référentiel inertiel via un signal électromagnétique, par exemple une impulsion lumineuse ou une impulsion radar. Soit un signal émis en un point  $A$  et reçu en un point  $B$ , d'où il est réémis par réflexion vers un récepteur situé au point  $A$ . Si l'on désigne respectivement par  $t_1$ ,  $t_2$  et  $t_3$  les instants-coordonnée de l'émission, de la réflexion et de la réception mesurés par des horloges situées en  $A$  et  $B$ , alors, par définition, les horloges sont synchronisées si  $t_2 - t_1 = t_3 - t_2$ . Etant donné que  $\Delta t_{AB} = t_2 - t_1$  et  $\Delta t_{BA} = t_3 - t_2$ , on a:

$$t_2 \equiv \frac{1}{2} [(t_1 + \Delta t_{AB}) + (t_3 - \Delta t_{BA})] = \frac{1}{2} (t_1 + t_3) \quad (9-74)$$

Ainsi, l'instant-coordonnée de réflexion  $t_2$  est identifié comme étant la mi-distance temporelle entre  $t_1$  et  $t_3$ . L'horloge  $A$  se voit attribuer les temps propres  $\tau_1 = t_1$  et  $\tau_3 = t_3$ , tandis que l'horloge  $B$  se voit attribuer le temps propre  $\tau_2 = t_2$ . On peut, par cette méthode, établir une échelle de temps-coordonnée à partir des observations d'un réseau d'horloges étalon réparties dans l'espace. Si l'horloge  $A$  est synchronisée avec l'horloge  $B$  et que l'horloge  $B$  est synchronisée avec l'horloge  $C$ , alors l'horloge  $A$  est aussi synchronisée avec l'horloge  $C$ .

En relativité générale, l'équation de propagation de la lumière est donnée par:

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = g_{ij} dx^i dx^j + 2 g_{0j} dx^j c dt + g_{00} c^2 dt^2 = 0 \quad (9-75)$$

Il s'agit d'une équation du second degré en  $dt$ , incrément de temps-coordonnée. En conséquence, le temps-coordonnée de propagation écoulé est égal à:

$$\Delta t = \pm \frac{1}{c} \int_{\text{trajet}} \frac{1}{-g_{00}} \sqrt{(-g_{00} g_{ij} + g_{0i} g_{0j}) dx^i dx^j} + \frac{1}{c} \int_{\text{trajet}} \frac{g_{0j}}{-g_{00}} dx^j \quad (9-76)$$

Les deux racines correspondent à la propagation de la lumière dans les sens aller et retour. En conséquence, si l'on désigne par  $\Delta t_{AB}$  et  $\Delta t_{BA}$  les temps de propagation dans chaque direction (avec pour limites d'intégration  $A$  et  $B$  et  $B$  et  $A$  respectivement), on obtient:

$$\Delta t_{AB} = \frac{1}{c} \int_A^B \frac{1}{\sqrt{-g_{00}}} \sqrt{\left(g_{ij} + \frac{g_{0i} g_{0j}}{-g_{00}}\right) dx^i dx^j} + \frac{1}{c} \int_A^B \frac{g_{0j}}{-g_{00}} dx^j \quad (9-77)$$

et

$$\Delta t_{BA} = -\frac{1}{c} \int_B^A \frac{1}{\sqrt{-g_{00}}} \sqrt{\left(g_{ij} + \frac{g_{0i} g_{0j}}{-g_{00}}\right) dx^i dx^j} + \frac{1}{c} \int_B^A \frac{g_{0j}}{-g_{00}} dx^j \quad (9-78)$$

Le premier terme correspond au temps de propagation sur le trajet avec un intervalle spatial  $dp^2 \equiv \gamma_{ij} dx^i dx^j$ , où  $\gamma_{ij} \equiv g_{ij} + g_{0i} g_{0j}/(-g_{00})$  désigne la métrique à trois dimensions. Le second terme correspond à l'effet Sagnac.

Supposons qu'une impulsion soit émise à l'instant  $t_1$  par une horloge de référence située au point  $A$ , qu'elle soit réfléchi à l'instant  $t_2$  par une horloge distante située au point  $B$ , et reçue à l'instant  $t_3$  par l'horloge de référence située au point  $A$ . L'instant-coordonnée de réflexion au point  $B$  est donné par:

$$t_2 = \frac{1}{2}[(t_1 + \Delta t_{AB}) + (t_3 - \Delta t_{BA})] = \frac{1}{2}(t_1 + t_3) + \frac{1}{c} \int_A^B \frac{g_{0j}}{-g_{00}} dx^j \quad (9-79)$$

En général, l'instant-coordonnée de réflexion dépend des composantes de la métrique  $g_{0j}$  et  $-g_{00}$  et du trajet de la lumière de  $A$  vers  $B$ . Par conséquent, lorsque  $g_{0j}$  est non nul, il n'est pas possible de synchroniser les horloges au sens d'Einstein exclusivement. C'est notamment le cas dans un référentiel en rotation, où il existe un effet Sagnac, dont la valeur est donnée par le second terme.

#### 9.4.1 Système de coordonnées inertiel géocentrique

En première approximation, on peut négliger le potentiel gravitationnel. Ainsi, dans un système de coordonnées inertiel géocentrique, la métrique devient  $-g_{00} \approx 1$ ,  $g_{0j} = 0$  et  $g_{ij} \approx \delta_{ij}$ .

En intégrant l'équation  $ds^2 = 0$  le long du trajet, on obtient le temps de propagation du signal:

$$\Delta t = \frac{1}{c} \int_{\text{trajet}} \sqrt{\delta_{ij} dx^i dx^j} = \frac{\rho}{c} \quad (9-80)$$

où:

$\rho$ : longueur du trajet de propagation dans le référentiel inertiel géocentrique.

Il s'agit simplement du temps de propagation non relativiste sur un trajet d'intervalle spatial euclidien  $d\rho^2 \approx \delta_{ij} dx^i dx^j$ .

Si un signal est émis à partir d'un satellite à l'instant-coordonnée  $t_E$  vers un récepteur en mouvement à l'instant-coordonnée  $t_R$ , le temps-coordonnée écoulé sur la longueur du trajet dans le référentiel inertiel géocentrique est donné par:

$$\Delta t = \frac{\rho}{c} = \frac{1}{c} |\mathbf{r}_R(t_R) - \mathbf{r}_E(t_E)| = \frac{1}{c} |\Delta \mathbf{r} + \mathbf{v}_R (t_R - t_E)| \approx \frac{1}{c} |\Delta \mathbf{r}| + \frac{1}{c^2} \Delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}_R \quad (9-81)$$

où:

$\Delta \mathbf{r} \equiv \mathbf{r}_R(t_E) - \mathbf{r}_E(t_E)$ : différence entre la position du récepteur et le satellite à l'instant-coordonnée d'émission  $t_E$ ;  $\mathbf{v}_R$  désigne la vitesse du récepteur dans le référentiel inertiel géocentrique.

Ainsi, la correction apportée au temps-coordonnée en raison de la vitesse du récepteur est égale à:

$$\Delta t_v \approx \Delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}_R / c^2 \quad (9-82)$$

Si le récepteur est en position  $\mathbf{R}$  et qu'il est animé d'une vitesse  $\mathbf{v}'_R$  par rapport au géoïde en rotation,  $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{R}(t_E) - \mathbf{r}_E(t_E)$  et  $\mathbf{v}_R = \mathbf{v}'_R + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{R}$ .

Alors la correction de vitesse du récepteur devient la somme de deux termes:

$$\Delta t_v = \Delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}'_R / c^2 + \boldsymbol{\omega} \cdot [\mathbf{r}_E(t_E) \times \mathbf{R}(t_E)] / c^2 = |\Delta \mathbf{r}| v'_R \cos \theta / c^2 + 2 \boldsymbol{\omega} A / c^2 \quad (9-83)$$

où:

$|\Delta \mathbf{r}|$ : distance

$\theta$ : angle entre la vitesse du récepteur et la ligne joignant le satellite et le récepteur;  $A$  désigne l'aire du triangle ayant pour sommets le satellite, le récepteur et le centre de la Terre projetée sur le plan équatorial à l'instant-coordonnée d'émission  $t_E$ .

Dans le référentiel en rotation de la Terre, le premier terme est une correction liée à la vitesse de variation de la distance ou au décalage Doppler intégré, et le second terme est la correction liée à l'effet Sagnac.

Le temps de propagation  $\Delta t$  est le temps mesuré par une horloge étalon au repos à l'infini. Pour déterminer le temps de propagation par rapport à une horloge située à la surface de la Terre, il convient d'intégrer l'effet du géopotentiel. Ainsi, en appliquant le changement d'échelle  $\Delta t' = (1 - W_0 / c^2) \Delta t$ , le temps de propagation devient  $\Delta t' = (1 - W_0 / c^2) \rho / c$ .

Pour un satellite GPS, le temps de propagation maximal du signal est de 86 ms et la correction de  $-60$  ps.

Pour étudier l'effet du potentiel gravitationnel  $U$  sur le signal lumineux, il est nécessaire de prendre en compte le potentiel à la fois dans la composante spatiale et dans la composante temporelle de la métrique. Les composantes du tenseur métrique sont:

$$-g_{00} = 1 - 2U/c^2, \quad g_{0j} = 0 \quad \text{et} \quad g_{ij} = (1 + 2U/c^2) \delta_{ij}.$$

Donc, d'après l'équation  $ds^2 = 0$ , le temps-coordonnée de propagation écoulé, tel que mesuré par une horloge à l'infini, est donné par:

$$\Delta t = \frac{1}{c} \int_{path} \sqrt{\frac{g_{ij}}{-g_{00}}} dx^i dx^j \approx \frac{1}{c} \int_{path} (1 + 2U/c^2) \sqrt{\delta_{ij}} dx^i dx^j = \frac{\rho}{c} + \frac{2}{c^3} \int_{path} U d\rho \quad (9-84)$$

où:

le potentiel gravitationnel:  $U = GM / r$ .

Le premier terme est le temps de propagation euclidien et le second terme le retard gravitationnel  $\Delta t_{retard}$ . Pour un trajet en ligne droite dans la direction radiale, on obtient:

$$\Delta t_{retard} = \frac{2}{c^3} \int_R^r \frac{GM}{r} dr = \frac{2GM}{c^3} \ln \frac{r}{R} \quad (9-85)$$

Toutefois, en règle générale, la distance  $\rho$ , l'angle d'élévation  $\theta$  et la distance radiale  $r$  sont liés par la relation des cosinus  $r^2 = R^2 + \rho^2 + 2R\rho \sin \theta$ .

La distance peut s'exprimer en fonction de l'angle d'élévation comme suit:

$$\rho = \sqrt{r^2 - (R \cos \theta)^2} - R \sin \theta$$

Par conséquent, le retard gravitationnel est égal à:

$$\Delta t_{retard} = \frac{2}{c^3} \int_0^\rho \frac{GM}{\sqrt{R^2 + \rho^2 + 2R\rho \sin \theta}} d\rho = \frac{2GM}{c^3} \ln \left[ \frac{r + \sqrt{r^2 - (R \cos \theta)^2}}{R(1 + \sin \theta)} \right] \quad (9-86)$$

On peut obtenir une autre formule mettant en jeu les distances  $r$ ,  $R$  et  $\rho$  de façon symétrique. Etant donné que  $\sqrt{r^2 - (R \cos \theta)^2} = \rho + R \sin \theta$  et  $R \sin \theta = (r^2 - R^2 - \rho^2) / 2\rho$ , l'argument du logarithme est égal à:

$$\frac{2r\rho + \rho^2 + r^2 - R^2}{2R\rho + r^2 - R^2 - \rho^2} = \frac{(r + \rho)^2 - R^2}{r^2 - (\rho - R)^2} = \frac{(r + \rho + R)(r + \rho - R)}{(r + \rho - R)(r - \rho + R)} = \frac{R + r + \rho}{R + r - \rho} \quad (9-87)$$

On peut donc exprimer le retard gravitationnel par rapport à une horloge située à l'infini comme suit:

$$\Delta t_{\text{retard}} = \frac{2GM}{c^3} \ln \left( \frac{R+r+\rho}{R+r-\rho} \right) \quad (9-88)$$

Lorsque  $\rho = r - R$ , cette équation se réduit à celle donnant le retard pour un trajet en ligne droite.

La correction relativiste totale par rapport à une horloge située sur le géoïde est donc:

$$\Delta t'_{\text{retard}} = -\frac{W_0 \rho}{c^3} + \frac{2GM}{c^3} \ln \left( \frac{R+r+\rho}{R+r-\rho} \right) \quad (9-89)$$

Le premier terme correspond à la contribution du géopotential due au changement d'échelle et le second est le retard gravitationnel. Ces termes ont tendance à s'annuler au voisinage de la Terre.

Le retard gravitationnel théorique a été vérifié par Irwin Shapiro [Shapiro, 1980] en 1967 et 1971 par détermination par radar de la distance aux planètes Mercure et Vénus. Les temps de propagation aller-retour en conjonction supérieure sont respectivement de 240  $\mu\text{s}$  et 180  $\mu\text{s}$  environ. Une mesure de la distance au module d'atterrissage Viking sur la planète Mars en conjonction supérieure a fourni un retard gravitationnel de 250  $\mu\text{s}$  environ.

Dans le cas d'un satellite GPS dont le rayon orbital est de 26 562 km et l'élévation de 40°, le temps de propagation relativiste est égal à 48 ps par rapport à une horloge située à l'infini et à -3 ps par rapport à une horloge située sur le géoïde. Dans le cas du satellite LAGEOS, qui présente un rayon orbital de 12 270 km, le temps de propagation maximal est égal à 38 ps par rapport à une horloge située à l'infini et à 14 ps par rapport à une horloge située sur le géoïde. Pour un signal émis depuis l'équateur vers un satellite géostationnaire de rayon orbital 42 164 km, la correction est égale à 56 ps par rapport à une horloge située à l'infini et à -27 ps par rapport à une horloge située sur le géoïde.

#### 9.4.2 Système de coordonnées géocentrique à axes fixes

Dans le système de coordonnées géocentrique à axes fixes en rotation, le temps-coordonnée de propagation d'un signal électromagnétique est donné par:

$$\Delta t = \frac{\rho'}{c} + \frac{1}{c} \int_{\text{trajet}} \frac{g_{0j}}{-g_{00}} dx^j \quad (9-90)$$

où:

$\rho'$ : longueur du trajet de propagation dans le référentiel géocentrique à axes fixes.

Si le récepteur est animé d'une vitesse  $\mathbf{v}'_R$ , alors  $\rho' = |\mathbf{R}(t_R) - \mathbf{r}_E(t_E)| \approx |\Delta \mathbf{r}| + \Delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}'_R / c$  et il y a une correction de la vitesse de variation  $\Delta t_{v'} = \Delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}'_R / c^2$ , où  $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{R}(t_E) - \mathbf{r}_E(t_E)$ .

L'intégrale figurant dans l'équation donnant  $\Delta t$  est l'effet Sagnac.

Les composantes de la métrique sont:

$$-g_{00} \approx 1, g_{0j} = (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})_j / c \text{ et } g_{ij} \approx \delta_{ij}$$

L'effet Sagnac est donc égal à:

$$\Delta t_{\text{Sagnac}} \approx \frac{1}{c^2} \int_A^B (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \cdot d\mathbf{r} = \frac{1}{c^2} \int_A^B \boldsymbol{\omega} \cdot (\mathbf{r} \times d\mathbf{r}) = 2 \frac{1}{c^2} \int_A^B \boldsymbol{\omega} \cdot d\mathbf{A} = \frac{2\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{A}}{c^2} \quad (9-91)$$

où:

A: projection perpendiculaire de l'aire formée par le centre de rotation et les extrémités du trajet lumineux.

Vu du référentiel en rotation, le trajet est approximativement une ligne droite. Pour des extrémités de coordonnées  $(x_A, y_A)$  et  $(x_B, y_B)$ , l'effet Sagnac s'exprime sous la forme suivante:

$$\Delta t_{Sagnac} = \frac{2\omega A}{c^2} = \boldsymbol{\omega} \cdot (\mathbf{r}_A \times \mathbf{r}_B) = \frac{\omega}{c^2} (x_A y_B - y_A x_B) \quad (9-92)$$

Dans le cas d'un récepteur au repos sur la Terre, un observateur du référentiel géocentrique à axes fixes voit le récepteur immobile et applique une correction liée à l'effet Sagnac, alors qu'un observateur dans le référentiel inertiel géocentrique voit que le récepteur s'est déplacé du fait de la rotation de la Terre et applique, contrairement au premier, une correction de la vitesse. Le temps total de propagation est égal à:

$$\Delta t = |\Delta \mathbf{r}| / c + \Delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}'_R / c^2 + 2\omega A / c^2 = |\mathbf{r}_R(t_R) - \mathbf{r}_E(t_E)| / c$$

NOTE 1 – L'expression «effet Sagnac» fait partie du vocabulaire de l'observateur appartenant au référentiel en rotation seulement. La correction correspondante appliquée par l'observateur du référentiel inertiel doit être désignée sous l'expression «correction de la vitesse».

Comme indiqué dans la documentation GPS [Navstar GPS, 2000], la correction du temps total de propagation applicable à un signal GPS s'effectue dans le récepteur de l'utilisateur. L'effet Sagnac maximal est égal à 133 ns, ce qui se produit lorsque le récepteur est situé sur l'équateur et le satellite à l'horizon. Du point de vue d'un observateur inertiel, cette correction est due au mouvement du récepteur animé d'une vitesse de 465 m/s par rapport au référentiel inertiel géocentrique pendant le temps de propagation du signal de 86 ms. L'autocoherence de cette correction a été démontrée par fermeture de mesures GPS réalisées au moyen de la technique des observations simultanées entre plusieurs couples de centres du temps répartis à travers le monde [Allen *et al.*, 1985].

L'effet Sagnac doit aussi être pris en compte pour la comparaison d'horloges au moyen d'un signal électromagnétique transmis par un satellite géostationnaire. Cette propriété a été régulièrement confirmée par comparaison avec synchronisation par transport d'horloge [Saburi, 1976]. Plaçons-nous dans l'hypothèse où la Terre est une sphère de rayon  $R$  et où l'orbite du satellite est strictement circulaire et de rayon  $r$  dans le plan équatorial. Les coordonnées d'une station terrienne à la latitude  $\phi_T$  et à la longitude est  $\lambda_E$  sont:

$$x_T = R \cos \phi_T \cos \lambda_T \text{ et } y_T = R \cos \phi_T \sin \lambda_T$$

où:

$$R = 6\,371 \text{ km est le rayon moyen de la Terre.}$$

Les coordonnées du satellite sont:

$$x_S = r \cos \lambda_S \text{ et } y_S = r \sin \lambda_S$$

où:

$$r = 42\,164 \text{ km est le rayon de l'orbite géostationnaire.}$$

Alors, pour le trajet d'un signal en liaison montante, dans la direction de l'est, de la station terrienne  $A$  vers le satellite:

$$\Delta t_1 = \frac{\omega}{c^2} (x_{TA} y_S - y_{TA} x_S) = \frac{\omega}{c^2} R r \cos \phi_{TA} \sin (\lambda_S - \lambda_{TA}) \quad (9-93)$$

De même, pour le trajet d'un signal en liaison descendante, dans la direction de l'est, du satellite vers la station terrienne  $B$ :

$$\Delta t_2 = \frac{\omega}{c^2} (x_S y_{TB} - y_S x_{TB}) = \frac{\omega}{c^2} R r \cos \phi_{TB} \sin (\lambda_{TB} - \lambda_S) \quad (9-94)$$

La correction totale liée à l'effet Sagnac est égale à la somme de ces deux termes,  $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2$ . Pour un signal dans la direction de l'ouest, la correction est de même amplitude mais de signe opposé.

Considérons par exemple une mesure de comparaison d'horloges par aller et retour sur satellite (TWSTT, *two-way satellite time transfer*) au moyen d'un signal émis par le National Institute of Standards and Technology de Boulder, Colorado (latitude  $40,0^\circ$ , longitude  $105,3^\circ$  O) et reçu par l'U. S. Naval Observatory de Washington (latitude  $38,9^\circ$ , longitude  $77,1^\circ$  O) via un satellite géostationnaire situé à  $97,0^\circ$  O. Les corrections liées à l'effet Sagnac sont égales à  $24,1$  ns pour la liaison montante et à  $57,7$  ns pour la liaison descendante, et la valeur totale de la correction est de  $81,8$  ns. Quant au signal émis dans le sens opposé, la correction est de  $-81,8$  ns.

Cela étant, dans la pratique, la Terre n'est pas une sphère parfaite. De plus, l'orbite du satellite est perturbée, de sorte qu'elle n'est ni parfaitement circulaire ni exactement située dans le plan équatorial. L'erreur entachant la correction liée à l'effet Sagnac est de  $0,1$  ns environ pour une erreur de  $300$  m sur la position de la station terrienne, une erreur de  $1^\circ$  sur la longitude du satellite, ou une erreur de  $0,2^\circ$  sur sa latitude. Pour effectuer des calculs plus précis, il faut évaluer les coordonnées de la station terrienne et du satellite en tenant compte des chiffres des éléments orbitaux de la Terre et du satellite.

### 9.4.3 Liaison intersatellite

L'analyse des signaux électromagnétiques utilisés en télémétrie intersatellite, des comparaisons d'horloges entre satellites et stations terriennes et de l'interopérabilité entre constellations de satellites passe par trois étapes:

- 1) transformation relativiste de la lecture du temps propre sur l'horloge située au niveau de l'émetteur vers le temps-coordonnée de l'émission dans le système de coordonnées adopté;
- 2) calcul du temps-coordonnée de la propagation du signal, comprenant à la fois les effets relativistes et non relativistes;
- 3) transformation relativiste du temps-coordonnée de la réception dans le système de coordonnées adopté vers la lecture du temps propre sur l'horloge située au niveau du récepteur.

De plus, tous les temps propres doivent être corrigés pour tenir compte des effets «matériels», notamment ceux liés au bruit de traitement et à l'environnement des horloges.

Examinons le cas de la comparaison relativiste, au moyen d'une liaison intersatellite, entre deux horloges atomiques  $A$  et  $B$  embarquées à bord de deux satellites. Supposons que le temps propre  $\tau$  de chaque horloge ait été ajusté par la prescription  $\Delta\tau' = (1 + k) \Delta\tau$ , de sorte que le temps propre résultant  $\tau'$  soit en moyenne égal au temps-coordonnée  $t'$  tel que réalisé par des horloges atomiques situées sur le géoïde. Si chaque horloge est en position  $\mathbf{r}$  et animée d'une vitesse  $\mathbf{v}$  dans un référentiel inertiel géocentrique, alors  $\Delta\tau' = \Delta t' + \Delta t_r$ , où la correction relativiste est égale à:

$$\Delta t_r = -2 \frac{1}{c^2} \sqrt{GM a} e \sin E = -\frac{2 \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}}{c^2} \quad (9-95)$$

Ainsi, le temps propre de l'horloge  $A$  à l'instant-coordonnée d'émission est:

$$\tau'_E = t'_E - 2 \mathbf{r}_E \cdot \mathbf{v}_E / c^2$$

et le temps propre de l'horloge  $B$  à l'instant-coordonnée de réception est:

$$\tau'_R = t'_R - 2 \mathbf{r}_R \cdot \mathbf{v}_R / c^2 + \Delta\tau_R$$

où:

$\Delta\tau_R$ : décalage de synchronisation de l'horloge  $B$  par rapport à l'horloge  $A$ .

Le temps-coordonnée de propagation du signal mesuré par une horloge à l'infini est donné par:

$$t_R - t_E = \frac{\rho}{c} + \Delta t_{retard} \quad (9-96)$$

où:

$\rho$ : distance du trajet entre le premier satellite à l'instant d'émission et le second satellite à l'instant de réception;

$\Delta t_{\text{retard}}$ : retard gravitationnel.

La distance du trajet est égale à:

$$\rho = | \mathbf{r}_R(t_R) - \mathbf{r}_E(t_E) | = | \Delta \mathbf{r} + \mathbf{v}_R (t_R - t_E) | \approx | \Delta \mathbf{r} | + \frac{1}{c} \Delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}_R \quad (9-97)$$

où:

$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_R - \mathbf{r}_E$ : distance entre les deux satellites à l'instant-coordonnée d'émission.

Le retard gravitationnel est égal à:

$$\Delta t_{\text{retard}} = \frac{2GM}{c^3} \ln \left( \frac{r_E + r_R + \rho}{r_E + r_R - \rho} \right) \quad (9-98)$$

Le temps-coordonnée de propagation du signal mesuré par des horloges situées sur le géoïde est donné par:

$$t'_R - t'_E = (1 - W_0 / c^2)(t_R - t_E)$$

Par conséquent, la différence des temps-propres dans le cas idéal est:

$$\tau'_R - \tau'_E = \Delta \tau_R + \frac{|\Delta \mathbf{r}|}{c} + \frac{\Delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}_R}{c^2} - \frac{2 \mathbf{r}_R \cdot \mathbf{v}_R}{c^2} + \frac{2 \mathbf{r}_E \cdot \mathbf{v}_E}{c^2} - \frac{W_0 |\Delta \mathbf{r}|}{c^3} + \frac{2GM}{c^3} \ln \left( \frac{r_E + r_R + \rho}{r_E + r_R - \rho} \right) \quad (9-99)$$

Les observations effectives des horloges sont des temps propres «matériels», qui sont entachés d'erreurs systématiques liées au bruit et à l'environnement. Il peut aussi exister un temps de propagation non relativiste dû à l'atmosphère résiduelle.

#### 9.4.4 Décalage Doppler relativiste

Considérons un émetteur de position  $\mathbf{r}_E$  et de vitesse  $\mathbf{v}_E$  émettant un signal électromagnétique à l'instant-coordonnée  $t_E$  et une station terrienne de position  $\mathbf{r}_R$  et de vitesse  $\mathbf{v}_R$  qui reçoit ce signal à l'instant-coordonnée  $t_R$  par rapport à un référentiel inertiel géocentrique. Le rapport de la fréquence propre  $f_E$  du signal émis à la fréquence propre  $f_R$  du signal reçu est inversement proportionnel au rapport des périodes propres.

D'où:

$$\frac{f_R}{f_E} = \frac{d\tau_E}{d\tau_R} \quad (9-100)$$

Cette expression peut être écrite en termes d'incrément de temps-coordonnée:

$$\frac{f_R}{f_E} = \frac{(dt_R / d\tau_R) dt_E}{(dt_E / d\tau_E) dt_R} \quad (9-101)$$

La distance entre l'émetteur et le récepteur est donnée par:

$$\rho \equiv \mathbf{r}_R(t_R) - \mathbf{r}_E(t_E)$$

La différence, en temps-coordonnée, entre la réception et l'émission est égale à:

$$t_R - t_E = \rho / c = | \mathbf{r}_R(t_R) - \mathbf{r}_E(t_E) | / c$$

En effectuant la différence des deux côtés par rapport à  $t_R$ , on obtient:

$$1 - \frac{dt_E}{dt_R} = \frac{1}{c} \left( \frac{\partial \rho}{\partial t_R} + \frac{\partial \rho}{\partial t_E} \frac{dt_E}{dt_R} \right) = \frac{1}{c} \left( \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_R - \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_E \frac{dt_E}{dt_R} \right) \quad (9-102)$$



où le vecteur normal unitaire dans la direction de propagation de l'émetteur vers le récepteur est donné par:

$$\mathbf{n} \equiv \frac{1}{\rho} \boldsymbol{\rho} = \frac{\mathbf{r}_R - \mathbf{r}_E}{|\mathbf{r}_R - \mathbf{r}_E|} \quad (9-103)$$

D'où:

$$\frac{dt_E}{dt_R} = \frac{1 - \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_R / c}{1 - \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_E / c} \quad (9-104)$$

Pour des mesures analysées dans un référentiel inertiel géocentrique de potentiel gravitationnel  $U$ , les composantes du tenseur métrique sont:

$-g_{00} = 1 - 2U/c^2$ ,  $g_{0j} = 0$  et  $g_{ij} = \delta_{ij}$  et l'intervalle d'espace temps:

$$ds^2 = -c^2 (1 - 2U/c^2 - v^2/c^2) dt^2 = -c^2 d\tau^2.$$

D'où:

$$\frac{dt_R}{d\tau_R} = \frac{1}{\sqrt{1 - 2U_R/c^2 - v_R^2/c^2}} \quad (9-105)$$

et

$$\frac{dt_E}{d\tau_E} = \frac{1}{\sqrt{1 - 2U_E/c^2 - v_E^2/c^2}} \quad (9-106)$$

Par conséquent

$$\frac{f_R}{f_E} = \frac{\sqrt{1 - 2U_E/c^2 - v_E^2/c^2}}{\sqrt{1 - 2U_R/c^2 - v_R^2/c^2}} \frac{(1 - \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_R / c)}{(1 - \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_E / c)} \quad (9-107)$$

Il s'agit de l'équation de l'effet Doppler relativiste. Le premier facteur est la correction relativiste et le second l'effet Doppler classique. En développant les termes jusqu'à l'ordre  $v^2/c^2$ , on obtient:

$$\frac{\Delta f}{f_E} = \frac{1}{c} \left( 1 + \frac{1}{c} \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_E \right) [\mathbf{n} \cdot (\mathbf{v}_E - \mathbf{v}_R)] + \frac{1}{c^2} (U_R - U_E) + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} (v_R^2 - v_E^2) \quad (9-108)$$

où:

$$\Delta f \equiv f_R - f_E$$

Cette équation possède deux propriétés qu'il convient de noter. D'une part, elle présente un terme d'ordre  $v^2/c^2$  dont l'origine n'est pas relativiste. D'autre part, elle ne contient pas de termes mixtes du type  $\mathbf{v}_E \cdot \mathbf{v}_R / c^2$ .

La configuration dans laquelle l'émetteur est embarqué sur un satellite et le récepteur est situé sur la Terre en rotation présente un intérêt particulier. La vitesse du satellite par rapport au référentiel inertiel géocentrique est donnée par l'équation de la force vive et la coordonnée radiale est égale à:

$$r = a (1 - e^2) / (1 + e \cos \nu)$$

où:

$a$  et  $e$  sont le demi-grand axe et l'excentricité de l'orbite, et  
 $\nu$  est l'anomalie vraie.

En outre, la vitesse du récepteur à la latitude  $\phi_R$  est:

$$v_R = \omega R \cos \phi_R.$$

Le potentiel gravitationnel à l'endroit de l'émetteur du satellite est  $U_E = GM / r$  et le potentiel gravitationnel à l'endroit du récepteur de la station terrienne est  $U_R = GM / R$ .

Par conséquent, en négligeant les termes d'ordre  $e^2$ :

$$\frac{\Delta f}{f_E} = \frac{1}{c} \left( 1 + \frac{1}{c} \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_E \right) \left[ \mathbf{n} \cdot (\mathbf{v}_E - \mathbf{v}_R) \right] + \frac{GM}{c^2} \left( \frac{1}{R} - \frac{3}{2a} \right) - \frac{2GM}{c^2 a} e \cos v + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} \omega^2 R^2 \cos^2 \phi_R \quad (9-109)$$

Le premier terme correspond au décalage Doppler classique. Le deuxième terme est la partie séculaire des effets combinés de la dilatation du temps et du décalage gravitationnel vers le rouge. Le troisième terme est un effet périodique relativiste résiduel. La première preuve de cet effet a été publiée par R. E. Jenkins [Jenkins, 1969] en 1969. Le quatrième terme est dû à la vitesse de la station terrienne. Pour un satellite GPS présentant une excentricité orbitale de 0,02, l'amplitude de l'effet périodique est égale à  $6,7 \times 10^{-12}$ . Il en ressort que la fréquence porteuse GPS L1 de 1,57542 GHz subirait, en raison de la relativité, une modulation d'amplitude 0,011 Hz et de période égale à la période orbitale du satellite de 11,967 h.

## 9.5 Conclusion

La théorie générale de la relativité jette les fondations des concepts modernes d'espace, de temps et de gravitation. Au cours des quarante dernières années, maintes expériences reposant sur des mesures de précision sont venues confirmer les prévisions riches et variées de cette théorie. Ainsi la relativité est-elle devenue un aspect important des systèmes de référence horaire de précision, dans les domaines de l'ingénierie, de la physique et de l'astronomie.

Les trois effets principaux liés à la relativité sont la dilatation du temps, le décalage gravitationnel vers le rouge et l'effet Sagnac. Le système mondial de repérage GPS est un exemple de système d'ingénierie sur lequel ces effets ont des conséquences majeures. L'effet combiné de la dilatation du temps et du décalage vers le rouge produit un décalage de rythme séculaire de 38  $\mu$ s par jour et une variation périodique résiduelle dont l'amplitude peut aller jusqu'à 46 ns, tandis que l'effet Sagnac est habituellement de l'ordre de 100 ns. Le système GPS a servi de laboratoire pour les mesures de temps relativiste de l'ordre de 1 à 10 ns. L'application de la relativité aux mesures de temps et de position dans le système GPS a été rendue possible grâce à la précision opérationnelle de ce système et aux nombreuses expériences conçues pour vérifier chacun de ces effets dans des conditions très diverses. S'agissant de la mesure du temps avec une précision de l'ordre de la picoseconde par des horloges spatioportées, il sera nécessaire de prendre en compte d'autres effets, notamment la contribution de l'aplatissement de la Terre au décalage vers le rouge, les potentiels de marées du Soleil et de la Lune, ainsi que l'incidence de la gravitation sur la vitesse de propagation de la lumière.

Les corrections imposées par la théorie générale de la relativité ne présentent pas seulement un intérêt scientifique théorique, tant s'en faut. Elles sont aussi essentielles à la cohérence des mesures et de la diffusion d'un temps de précision par des horloges atomiques de Terre ou spatioportées.

## Références

- ALLEY C.O. [1983], «Proper Time Experiments in Gravitational Fields With Atomic Clocks, Aircraft, and Laser Light Pulses», *Quantum Optics, Experimental Gravitation, and Measurement Theory*, dirigé par P. Meystre et M. O. Scully, Plenum, New York, p. 363-427.
- ALLEN D. W., WEISS M. A. et ASHBY N. [1985], «Around-the-World Relativistic Sagnac Experiment», *Science* **228**, p. 69-70.
- ASHBY N. [2001], «Relativistic Effects on SV Clocks Due to Orbit Changes, and Due to Earth's Oblateness», *Proc. 33rd Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting*, U. S. Naval Observatory, Washington, D.C, p. 509-524.
- BUISSON J. A., EASTON R. L. et MCCASKILL T. B. [1977], «Initial Results of the Navstar GPS NTS-2 Satellite», *Proc. 9th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting*, U. S. Naval Observatory, Washington, D.C, p. 177-200.

- DEPARTMENT of DEFENSE WGS 84 [1997], *NIMA Tech. Rep. TR8350.2, 3<sup>rd</sup> edition*, National Imagery and Mapping Agency, Bethesda, MD.
- EPSTEIN M., STOLL E. et FINE J. [2001], «Observable Relativistic Frequency Steps Induced by GPS Orbit Changes», *Proc. 33rd Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting*, U. S. Naval Observatory, Washington, D.C, p. 493-508.
- FRISCH D. H. et SMITH J. H. [1963], «Measurement of the Relativistic Time Dilation Using  $\mu$ -Mesons», *Am. J. Phys.* **31**, p. 342-355.
- HAFELE J. C. et KEATING R. E. [1972], «Around-the-World Atomic Clocks: Predicted Relativistic Time Gains; Observed Relativistic Time Gains», *Science* **177**, p. 166-170.
- HEISKANEN W. A. et MORITZ H. [1967], *Physical Geodesy*, Freeman, San Francisco, p. 70.
- JENKINS R. E. [1969], «A Satellite Observation of the Relativistic Doppler Shift», *Astron. J.* **74**, p. 960-963.
- KOZAI Y. [1959], «The Motion of a Close Earth Satellite», *Astron. J.* **64**, p. 367-377.
- NAVSTAR GPS Space Segment/Navigation User Interfaces, ICD-GPS-200C-004 [2000], Arinc Research Corporation, El Segundo, CA.
- POUND R. V. et REBKA Jr. G. A. [1960], «Apparent Weight of Photons», *Phys. Rev. Lett.* **4**, 337-341.
- SABURI Y. [1976], «Observed Time Discontinuity of Clock Synchronization in Rotating Frame of the Earth», *J. Radio Research Laboratories* **23**, p. 255-265.
- SHAPIRO I. I. [1980], *Experimental Tests of General Relativity, in General Relativity and Gravitation*, dirigé par A. Held, Plenum, New York, Vol. II, p. 469-489.
- VESSOT R. F. C., LEVINE M. W. *et al.* [1980], «Tests of Relativistic Gravitation With a Space-Borne Hydrogen Maser», *Phys. Rev. Lett.* **45**, p. 2081-2084.



CHAPITRE 10

**ORIENTATION DE LA TERRE ET SYSTÈME GÉODÉSIQUE**

	<i>Page</i>
10.1 Introduction .....	134
10.2 Orientation de la Terre .....	134
10.2.1 Précession/nutation .....	136
10.2.2 Mouvement du pôle.....	136
10.3 Temps universel (UT) .....	137
10.4 Systèmes géodésiques .....	138
10.5 Surfaces de référence .....	138
10.5.1 Géoïde .....	138
10.5.2 Ellipsoïde.....	138
10.5.3 Types de coordonnées .....	138
Références .....	141

## 10.1 Introduction

Les systèmes de référence sont composés:

1. d'une origine déterminée;
2. des directions des axes fondamentaux;
3. d'un ensemble de modèles et de procédures conventionnels qui servent à réaliser le système.

On appelle «repère» la réalisation d'un système de référence au moyen d'une liste de coordonnées qui ont été affectées aux éléments de définition. L'orientation de la Terre renvoie à la procédure et aux modèles utilisés pour relier un système de référence géodésique terrestres à un système céleste.

On trouvera des informations rigoureuses dans les conventions du Service international de la rotation terrestre et des systèmes de référence (IERS), disponibles au format électronique à l'adresse <http://www.iers.org/iers/products/conv/>.

Les systèmes de référence célestes sont spécifiés par des astronomes. On considère que la plupart des systèmes modernes ont généralement pour origine le barycentre du système solaire et que leurs axes polaires sont liés, d'une façon ou d'une autre, à l'axe de la Terre. Le troisième axe se trouve dans le plan équatorial perpendiculaire à l'axe polaire et il est dirigé vers un point de centrage (*fiducial point*) de ce plan. Les repères célestes sont composés de la liste des positions et des éventuels mouvements des objets astronomiques. L'Union astronomique internationale a défini un système et un repère de référence célestes normalisés appelés «Système de référence céleste international» (ICRS, *International Celestial Reference System*) et «Repère de référence céleste international» (ICRF, *International Celestial Reference Frame*). L'ICRF est composé des positions désignées de radiosources.

De façon analogue, les systèmes de référence terrestres ont généralement leur origine au centre de la masse de la Terre et leurs axes polaires sont liés à la direction d'un axe fixe par rapport à la croûte terrestre. L'origine des longitudes dans le plan équatorial fournit la troisième direction. A l'instar des repères célestes, les repères terrestres sont composés d'une liste de coordonnées de sites et d'éventuels mouvements. Le Système international de référence terrestre (ITRS, *International Terrestrial Reference System*) et le Repère international de référence terrestre (ITRF, *International Terrestrial Reference Frame*) maintenus par l'IERS sont communément admis comme des normes internationales.

## 10.2 Orientation de la Terre

L'orientation de la Terre est déterminée par cinq angles. En principe, trois angles devraient suffire, mais on en utilise cinq afin de décrire les processus physiques qui sont en jeu et de faciliter l'application des transformations.

Les changements de direction de l'axe de la Terre dans un système céleste conventionnel sont modélisés par deux angles. Cet axe est appelé «pôle céleste intermédiaire» (CIP, *Celestial Intermediate Pole*). Son mouvement est dû à la précession et à la nutation de la Terre, phénomènes résultant de l'attraction gravitationnelle des objets du système solaire, essentiellement le Soleil et la Lune, et de la non-sphéricité de la Terre. La précession désigne la partie aperiodique du mouvement et la nutation sa partie périodique. Ces mouvements dépendent des positions des corps du système solaire et de la structure interne de la Terre; ils peuvent toutefois être modélisés avec une assez bonne précision.

Deux angles supplémentaires sont utilisés pour décrire le mouvement du CIP sur la croûte terrestre. Ce phénomène, appelé «mouvement du pôle», est dû à des variations géophysiques et météorologiques de la Terre et de son atmosphère. Ses composantes principales sont une dérive linéaire et deux mouvements périodiques de période 365 et 435 jours. Le mouvement du pôle n'est pas facilement modélisable, car les forces qui en sont à l'origine sont difficiles à prévoir. Ces angles doivent donc être observés par des moyens astronomiques et régulièrement communiqués aux utilisateurs.

Le CIP est un pôle défini par convention en séparant en deux parties le mouvement du pôle du système de référence terrestre (TRS, *terrestrial reference system*) dans le système de référence céleste (CRS, *celestial reference system*): d'un côté, le mouvement céleste du CIP (précession/nutation), de l'autre, le mouvement terrestre du CIP (mouvement du pôle). Le mouvement céleste du CIP comprend tous les termes de période

supérieure à 2 jours dans le CRS (fréquences comprises entre -0,5 cycle par jour sidéral (cpsd) [dans la communauté T+F – à l'UIT, l'emploi de valeurs de fréquence négatives est inhabituel et doit faire l'objet d'une explication] et +0,5 cpsd); le mouvement terrestre du CIP comprend tous les termes situés en dehors de la bande rétrograde diurne dans le TRS (fréquences inférieures à -1,5 cpsd ou supérieures à -0,5 cpsd).

Le dernier des cinq angles caractérise l'angle de rotation de la Terre; il est exprimé comme la différence horaire [UT1 - UTC], où UT1 est un temps astronomique déterminé par des observations de radiosources distantes et UTC l'échelle de temps uniforme «temps universel coordonné». Parmi les principales variations de la vitesse de rotation de la Terre, citons: une décélération constante causée par la décélération due aux marées et par la déglaciation, des variations décennales dues à des modifications de la répartition interne de la masse terrestre, des variations essentiellement dues à des phénomènes météorologiques saisonniers et des variations périodiques causées par les marées. A l'instar du mouvement du pôle, la différence UT1 - UTC est difficile à modéliser et à prévoir et doit être observée par des moyens astronomiques et communiquée régulièrement aux utilisateurs.

La Résolution B1.8, adoptée par la XXIV<sup>e</sup> Assemblée générale de l'Union astronomique internationale en août 2000, recommande l'usage de l'«origine non tournante» [Guinot, 1979] pour le Système de référence céleste géocentrique (GCRS, *geocentric celestial reference system*) et pour le système ITRS, ces points étant appelés respectivement «origine céleste des éphémérides» (CEO, *celestial ephemeris origin*) et «origine terrestre des éphémérides» (TEO, *terrestrial ephemeris origin*). L'angle de rotation de la Terre est, par définition, l'angle mesuré le long de l'équateur du CIP entre le CEO et le TEO. Cette Résolution recommande par ailleurs que le temps UT1 soit linéairement proportionnel à l'angle de rotation de la Terre et que la transformation entre le système ITRS et le système GCRS soit définie par la position du CIP dans le GCRS, la position du CIP dans l'ITRS et l'angle de rotation de la Terre.

La procédure de transformation du système TRS vers le système CRS à l'époque  $t$  est donnée par la formule mathématique suivante:

$$[CRS(t)] = Q(t) R(t) W(t) [TRS(t)] \quad (10-1)$$

où  $Q(t)$ ,  $R(t)$  et  $W(t)$  sont les matrices de transformation décrivant respectivement le mouvement du pôle céleste dans le système céleste (précession/nutation), la rotation de la Terre autour de l'axe du pôle et le mouvement du pôle. Le paramètre  $t$  utilisé dans cette formule et dans toutes les suivantes est défini par:

$$t = [\text{TT} - 2000 \text{ janvier } 1, 12\text{h TT} - \text{en jours}] / 36525 \quad (10-2)$$

A noter que 2000 janvier 1,5 TT = jour julien 2451545,0 TT.

Dans l'analyse qui suit concernant les matrices de rotation à utiliser dans les transformations, nous employons la notation  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  pour indiquer respectivement les rotations autour des axes x, y et z du système de référence. Soit:

$$R_1(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (10-3)$$

$$R_2(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (10-4)$$

$$R_3(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10-5)$$

### 10.2.1 Précession/nutation

Les corps du système solaire exercent sur la Terre non sphérique des forces de gravitation, qui modifient sa direction dans le système de référence céleste. En 26 000 ans, le mouvement de l'axe a décrit un cône dans l'espace. Ce mouvement est appelé précession. Au mouvement de précession s'ajoute un balancement périodique de l'axe, d'amplitude beaucoup plus faible, appelé nutation. La période principale du mouvement de nutation est de 18,6 années. L'UAI a recommandé, pour décrire ce mouvement, d'utiliser à partir du 1<sup>er</sup> janvier 2003 le modèle de précession-nutation UAI 2000A ou sa version abrégée UAI 2000B pour les utilisateurs recherchant un modèle d'une précision de l'ordre de 1 milliseconde d'arc (mas).

A partir de l'équation (10-1), la matrice précession/nutation  $Q(t)$  peut s'écrire:

$$Q(t) = \begin{bmatrix} 1 - aX^2 & -aXY & X \\ -aXY & 1 - aY^2 & Y \\ -X & -Y & 1 - a(X^2 + Y^2) \end{bmatrix} \bullet R_3(s) \quad (10-6)$$

avec

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{8}(X^2 + Y^2)$$

où:

$X$  et  $Y$ : sont les «coordonnées» du CIP dans le CRS fournies par les modèles conventionnels UAI 2000A ou UAI 2000B, qui reposent sur les théories de la géophysique et de l'astronomie.

Cette formule modélise le mouvement du pôle dû aux mouvements luni-solaires et planétaires. Elle n'intègre pas ce que la littérature scientifique appelle «précession planétaire», qui désigne le mouvement de l'écliptique (mouvement de l'orbite du trajet de la Terre) causé par la gravitation planétaire. Avant l'adoption de cette procédure par l'UAI en 2000 pour décrire la précession et la nutation de la Terre, l'écliptique était utilisé comme plan de référence fondamental et son mouvement était décrit au moyen d'une expression conventionnelle reposant sur la théorie de l'astronomie. La combinaison de la précession/nutation du pôle de la Terre et de l'écliptique était appelée précession générale.

La grandeur  $s$  définit la position de l'origine céleste des éphémérides sur l'équateur du pôle céleste intermédiaire. Elle est donnée par:

$$s = -XY/2 + \sum_{i=0}^{i=3} c_i t^i + \sum_k C_k \sin \alpha_k + 1,71t \sin \Omega + 3,57t \cos 2\Omega \\ + 743,53t^2 \sin \Omega + 56,91t^2 \sin(2F - 2D + 2\Omega) + 9,84t^2 \sin(2F + 2\Omega) - 8,85t^2 \sin 2\Omega \quad (10-7)$$

Les tables et logiciels permettant de mettre en œuvre l'algorithme décrit ci-dessus figurent dans les conventions de l'IERS [McCarthy et Petit, 2003].

### 10.2.2 Mouvement du pôle

Le CIP se déplace également dans le TRF, mais ce mouvement n'étant pas modélisable, il doit être observé et pris en compte de façon appropriée dans la transformation entre systèmes de coordonnées. Il est représenté en coordonnées polaires  $x$  et  $y$ , exprimées en unités d'angle.  $x$  est orienté selon la longitude  $0^\circ$  et  $y$  selon la longitude  $90^\circ$  ouest. Le système de longitude est défini de façon implicite par les positions adoptées des sites dans le TRF.

Le mouvement du pôle se compose essentiellement d'une dérive approximativement linéaire à laquelle s'ajoute deux termes périodiques. Le premier est un mouvement libre du pôle appelé «oscillation de Chandler», d'après Seth C. Chandler qui l'a découvert. Sa période de 435 jours correspond au mouvement libre d'une Terre non rigide qui, à l'origine, a été calculé par L. Euler en 1758 pour une Terre rigide. La seconde composante



principale du mouvement du pôle est un mouvement annuel dû à la redistribution saisonnière de la masse atmosphérique terrestre.

L'amplitude de ces mouvements est faible. Cela étant, son incidence sur une transformation de précision entre repères de référence est très significative. La dérive linéaire est de quelques centimètres par an dans la direction 75° de longitude ouest. Les mouvements périodiques provoquent un déplacement du CIP de quelques dizaines de mètres.

En appliquant de nouveau l'équation (10-1), on peut exprimer mathématiquement cette rotation par:

$$W(t) = R_3(-s')R_1(y)R_2(x) \quad (10-8)$$

Les informations concernant les coordonnées du pôle doivent être observées et communiquées. Elles peuvent être obtenues auprès du Service international de la rotation terrestre et des systèmes de référence (IERS), qui met à disposition un ensemble de fichiers contenant les dernières données et les prévisions. Voir <http://www.iers.org/iers/products>.

Pour le XXI<sup>e</sup> siècle, la formule ci-dessous donne une valeur approchée de  $s'$  en fonction du temps:

$$s' = -47 \mu\text{as } t \quad (10-9)$$

### 10.3 Temps universel (UT)

Le temps solaire est déterminé à partir de la rotation de la Terre par rapport au Soleil. Le temps solaire moyen a été défini en vue d'éliminer les irrégularités du temps solaire dues à l'obliquité de l'écliptique et aux variations de la vitesse de la Terre sur son orbite autour du Soleil. Il correspond à l'angle horaire d'un point fictif se déplaçant de façon uniforme le long de l'équateur céleste à la même vitesse que la vitesse moyenne du Soleil le long de l'écliptique. En pratique, il s'agit d'intervalles de temps sidéral directement observés par des méthodes astronomiques, puis convertis en intervalles de temps solaire moyen en effectuant une division par 1,00273790935.

Le temps solaire moyen déterminé pour le méridien de longitude 0° est appelé UT1. Des observations astronomiques sont réalisées pour calculer la différence entre ce temps et le temps universel coordonné (UTC). Les observations brutes, appelées UT0, doivent être corrigées du mouvement du pôle terrestre afin d'obtenir le temps UT1. L'effet du mouvement du pôle peut atteindre plusieurs centièmes de seconde. L'IERS reçoit ces données et conserve une échelle de temps UT1.

Ces observations montrent que les variations de la rotation de la Terre peuvent être classées en trois catégories: séculaires, irrégulières et périodiques. La variation séculaire correspond à l'augmentation apparemment linéaire de la durée du jour, qui est essentiellement due au frottement des marées. Ce phénomène provoque un ralentissement de la vitesse de rotation de la Terre, qui se traduit par un allongement du jour compris entre 0,0005 et 0,0035 s/siècle environ. Les variations irrégulières de la vitesse semblent être le résultat d'accélération aléatoires; il est néanmoins possible d'établir une corrélation entre ces variations et des processus physiques survenant à la surface ou à l'intérieur de la Terre. Elles comprennent notamment des fluctuations décennales dont les périodes caractéristiques sont comprises entre 5 et 10 ans ainsi que des variations survenant sur des échelles de temps plus courtes.

Les variations périodiques sont liées à des processus physiques qui ont une incidence sur la Terre et qui se répètent périodiquement. Les marées dites «terrestres» provoquées par la Lune et par le Soleil dans le solide terrestre produisent des variations périodiques de la durée du jour de l'ordre de 0,0005 s, avec des périodes de 1 an, 1/2 an, 27,55 jours et 13,66 jours.

En appliquant de nouveau l'équation (10-1), on déduit que cette rotation est égale à:

$$R(t) = R_3(-\theta) \quad (10-10)$$

$\theta$  étant l'angle de rotation de la Terre entre le CEO et le TEO à la date  $t$  sur l'équateur du CIP. Cet angle s'obtient à partir de la relation classique en fonction du temps UT1 [Capitaine *et al.*, 2000]:

$$\theta(T_u) = 2\pi(0,7790572732640 + 1,00273781191135448T_u) \quad (10-11)$$

où:

$T_u = (\text{date UT1 julienne} - 2451545,0)$ , et  $UT1 = UTC + (UT1 - UTC)$ , ou, de façon équivalente

$$\theta(T_u) = 2\pi(\text{Nombre de jours julien UT1 écoulés depuis } 2451545,0 + 0,7790572732640 + 1,00273781191135448T_u)$$

NOTE 1 – Voir les informations détaillées au Chapitre 7 – Echelles de temps.

## 10.4 Systèmes géodésiques

Comme indiqué plus haut, les systèmes de référence terrestres ont leur origine au centre de la masse de la Terre et leurs axes polaires sont liés à la direction d'un axe fixe par rapport à la croûte terrestre. L'origine des longitudes dans le plan équatorial fournit la troisième direction. Les repères terrestres sont composés d'une liste de coordonnées de sites et d'éventuels mouvements. Ces coordonnées peuvent s'exprimer sous la forme d'un ensemble de coordonnées cartésiennes  $(x, y, z)$  d'un site. Souvent, elles sont décrites par la latitude, la longitude et l'altitude de l'emplacement au-dessus d'une surface de référence. Cette surface peut être un ellipsoïde de référence ou une surface géopotentielle.

## 10.5 Surfaces de référence

### 10.5.1 Géoïde

On peut considérer que la Terre est constituée d'un ensemble de surfaces qui présentent toutes le même potentiel de pesanteur. Ce potentiel intègre non seulement le potentiel gravitationnel, mais aussi le potentiel dû à la force centrifuge. Ces surfaces sont appelées «surfaces géopotentielles» (*geops*) et l'on nomme «géoïde» celle qui se rapproche au mieux de la surface moyenne de la mer. Sachant qu'un fil à plomb est perpendiculaire à cette surface et qu'il est facile de mesurer les hauteurs le long d'un tel dispositif, le géoïde est, en toute logique, une surface de référence. Le géoïde est la surface que l'on appelle généralement niveau moyen de la mer. Il est défini par sa hauteur au-dessus d'un ellipsoïde de référence, appelée ondulation du géoïde, le long de la ligne perpendiculaire à l'ellipsoïde.

La hauteur de la topographie de la surface au-dessus du géoïde mesurée le long d'un fil à plomb est appelée altitude par rapport au niveau moyen de la mer ou altitude orthométrique.

### 10.5.2 Ellipsoïde

A des fins de référence, on utilise un ellipsoïde de référence comme approximation de la forme de la Terre. Cet ellipsoïde est défini par un demi-grand axe (rayon de l'équateur) et un coefficient d'aplatissement (relation entre le rayon équatorial et le rayon du pôle). Le coefficient d'aplatissement est défini par:

$$f = \frac{a-b}{a} \quad (10-12)$$

où:

$a$  et  $b$ : rayon de l'équateur et rayon du pôle respectivement.

La hauteur de la topographie de la surface au-dessus de l'ellipsoïde le long de la ligne perpendiculaire à ce dernier est appelée hauteur ellipsoïdale. Par exemple, pour l'ellipsoïde du système WGS 84, on a  $a = 6378137,0$  m et  $f = 1,0/298,2572235630$ .

### 10.5.3 Types de coordonnées

#### 10.5.3.1 Coordonnées géocentriques

Les coordonnées géocentriques sont mesurées par rapport au centre de la Terre. Elles peuvent être exprimées sous forme vectorielle, à savoir les coordonnées cartésiennes  $(x, y, z)$  d'un site, ou par la latitude  $\phi'$  et la longitude  $\lambda$  géocentriques. La relation entre ces deux modes de représentation est donnée par la formule:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} \cos \phi' \cos \lambda \\ \cos \phi' \sin \lambda \\ \sin \phi' \end{bmatrix} \quad (10-13)$$

La latitude géocentrique d'un emplacement correspond à l'angle formé par l'équateur d'un ellipsoïde de référence et une ligne reliant le centre de l'ellipsoïde à cet emplacement. La longitude géocentrique correspond à l'angle formé par le méridien de référence de l'ellipsoïde et le méridien de l'emplacement.

### 10.5.3.2 Coordonnées géodésiques

Les coordonnées géodésiques sont déterminées à partir d'un ellipsoïde de référence. Elles sont généralement exprimées en termes de latitude géodésique  $\phi$  et de longitude géodésique  $\lambda$ . La latitude géodésique est l'angle formé par l'équateur de l'ellipsoïde et la normale à l'ellipsoïde qui passe par le site. La différence entre la latitude géocentrique et la latitude géodésique est illustrée à la Figure 10-1. La longitude géodésique correspond à l'angle formé par le méridien de référence de l'ellipsoïde et le méridien du site. Elle est identique à la longitude géocentrique lorsque les ellipsoïdes de référence ont les mêmes axes et le même méridien de référence. La relation entre les coordonnées cartésiennes géocentriques et les coordonnées géodésiques est donnée par:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} (N_\phi + h) \cos \phi \cos \lambda \\ (N_\phi + h) \cos \phi \sin \lambda \\ \left[ (1 - e^2) N_\phi + h \right] \sin \phi \end{bmatrix} \quad (10-14)$$

où:

$h$ : hauteur ellipsoïdale

$e$ : excentricité de l'ellipsoïde donnée par:

$$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} = \sqrt{2f - f^2}$$

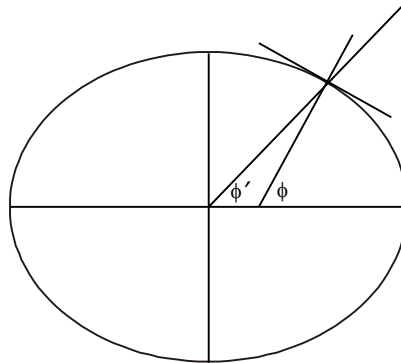
$N_\phi$ : rayon de courbure de l'ellipsoïde dans la direction du méridien donné par:

$$N_\phi = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}} \quad (10-15)$$

La hauteur est définie par la hauteur ellipsoïdale,  $h$ , qui correspond à la distance du site au-dessus de l'ellipsoïde de référence mesurée le long de la ligne passant par le site et perpendiculaire à l'ellipsoïde.

FIGURE 10-1

**Différence entre la latitude géocentrique  $\phi'$  et la latitude géodésique  $\phi$**



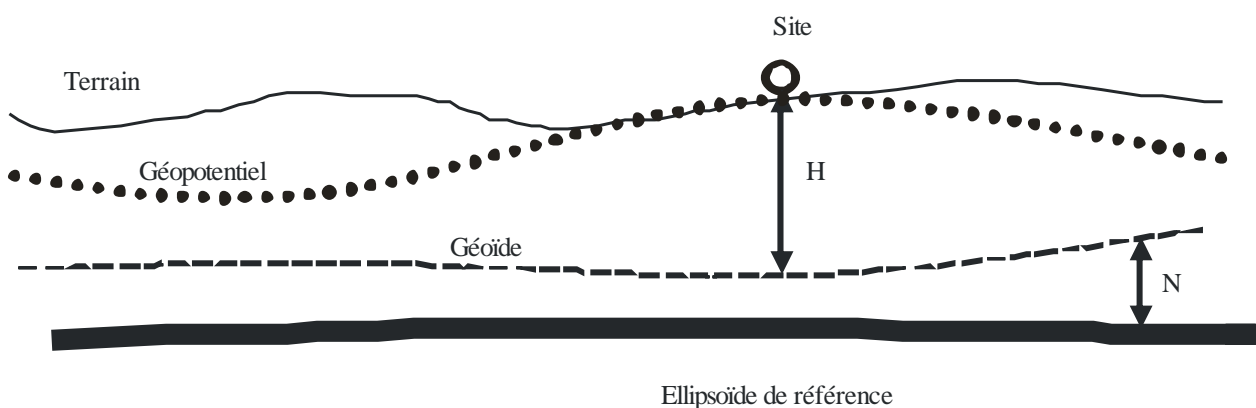
Sat\_time\_freq-10-01

### 10.5.3.3 Coordonnées astronomiques

Les coordonnées astronomiques sont mesurées par rapport à la direction de la verticale locale ou ligne du fil à plomb. La verticale locale est perpendiculaire à la surface équipotentielle de gravitation au niveau du site. Ces surfaces sont appelées «surfaces géopotentiels» (*geops*) et la surface géopotentielle ayant le potentiel de la Terre au niveau de la mer est appelée géoïde. La latitude astronomique est alors l'angle formé par la direction de la verticale et le plan de l'équateur terrestre. La longitude astronomique est l'angle formé entre le plan contenant la verticale et le plan du méridien de référence. La déviation de la verticale, qui désigne l'angle formé par la normale à l'ellipsoïde et la verticale, est décrite en spécifiant les composantes angulaires dans la direction nord-sud et dans les directions est-ouest. La hauteur du site au-dessus du géoïde est appelée altitude par rapport au niveau moyen de la mer ou altitude orthométrique,  $H$ . Elle est mesurée le long de la direction de la verticale. La hauteur du géoïde au-dessus d'un ellipsoïde de référence, appelée ondulation du géoïde,  $N$ , est mesurée le long de la normale à l'ellipsoïde.

FIGURE 10-2

**Surfaces de référence géodésiques**



Sat\_time\_freq-10-02

### 10.5.3.4 Systèmes géodésiques

Un système géodésique a pour objet de fournir un modèle géodésique général de la Terre. Traditionnellement, il est défini par un ellipsoïde de référence et par la spécification d'un point d'origine. La géodésie spatiale moderne offre aujourd'hui un système de référence directement lié au centre de la Terre sans utiliser d'ellipsoïde de référence. Ces observations servent souvent à fournir un système consistant en un ensemble de paramètres et de coordonnées de sites de définition. Cet ensemble peut être utilisé pour étendre le système au moyen de mesures différentielles par rapport aux sites de définition. On peut exprimer les transformations entre systèmes à l'aide de la formule suivante:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_2 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_1 - \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} D & -R_3 & R_2 \\ R_3 & D & -R_1 \\ -R_2 & R_1 & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_1 \quad (10-16)$$

où:

les paramètres de translation ( $T_1, T_2, T_3$ ), les paramètres de rotation ( $R_1, R_2, R_3$ ) et le paramètre d'échelle sont déterminés de façon empirique en comparant les coordonnées des sites dans deux systèmes différents.

### 10.5.3.5 Repère international de référence terrestre

Le Service international de la rotation terrestre et des systèmes de référence (IERS) met à disposition la norme internationale appelée Système international de référence terrestre (ITRS). Ce système a pour origine le géocentre de la masse terrestre, y compris les océans et l'atmosphère. Par définition, il ne présente pas de rotation résiduelle globale par rapport aux mouvements horizontaux qui se produisent à la surface de la Terre. Son unité de longueur est le mètre (SI), qui fournit une échelle cohérente avec le Temps-coordonnée géocentrique TCG pour un repère local géocentrique, conformément aux recommandations internationales.

La réalisation du système ITRS produite par le Centre Produit ITRS IERS est appelée Repère international de référence terrestre (ITRF). Il est obtenu à partir d'observations géodésiques de l'espace. Actuellement, les solutions du repère ITRF sont publiées presque chaque année par le Centre Produit ITRS dans les notes techniques de l'IERS. Les chiffres (yy) qui suivent la désignation «ITRF» spécifient la dernière année des données ayant servi à produire le repère. Ainsi, ITRF97 désigne le repère des positions et vitesses des stations qui a été élaboré en 1997 à partir de toutes les données de l'IERS disponibles jusqu'en 1998.

Le rapport du groupe de travail de l'IERS sur le repère ITRF (*IERS Working Group on the ITRF Datum*) [Ray *et al.*, 1999] contient des informations pertinentes sur l'histoire de la définition de ce repère. Il décrit également l'incidence des techniques utilisées sur certains paramètres de la définition du repère, en particulier l'origine et l'échelle.

## Références

- CAPITAINE N., GUINOT B. et MCCARTHY D. D. [2000], *Astronomy & Astrophysics*, p. 355-398.
- GUINOT B. [1979], *Time and the Earths Rotation, IAU Symp. 82*, dir. D. D. McCarthy et J. D. H. Pilkington, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, 7.
- MCCARTHY D. D. et PETIT G. (dir.) [2003], *IERS Conventions (2003), IERS Technical Note 32*, International Earth Rotation Service.
- RAY J. , BLEWITT G., BOUCHER C., EANES R., FEISSEL M., HEFLIN M., HERRING T., KOUBA J., MA C., MONTAG H., WILLIS P., ALTAMIMI Z., EUBANKS T. M., GAMBIS D., PETIT G., RIES J., SCHERNECK H. G., SILLARD P. et P. [1999], *Report of the Working Group on ITRF Datum*.



## CHAPITRE 11

**PROPAGATION ET FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX**

	<i>Page</i>
11.1 Introduction .....	144
11.2 Comparaison des temps de propagation dans la troposphère et dans l'ionosphère de la Terre	144
11.3 Modélisation du temps de propagation dans la troposphère terrestre .....	145
11.3.1 Variabilité du retard ionosphérique et du retard troposphérique.....	147
11.4 Retard de propagation dans l'ionosphère: comportement à l'échelle mondiale, variabilité quotidienne et fluctuation selon les cycles solaires.....	147
11.4.1 Méthodes de correction du retard de propagation dans l'ionosphère, modèles moyens mensuels, modèles actualisés, utilisation de données ionosphériques en temps réel SBAS/WAAS/IGS, corrections à deux fréquences .....	150
11.4.2 Effets ionosphériques d'ordre supérieur sur le retard de propagation .....	151
11.4.3 Effets de scintillation.....	151
11.5 Conclusion.....	152
Références .....	153

## 11.1 Introduction

Dans le domaine du transfert du temps de précision par satellite, les retards de propagation dans l'atmosphère neutre et dans l'ionosphère de la Terre constituent la source d'erreur potentielle la plus importante. Le présent chapitre décrit ces retards de propagation ainsi que diverses techniques visant à les corriger. Les temps de propagation dans la troposphère et dans l'ionosphère diffèrent par plusieurs aspects importants. Le temps de propagation dans la troposphère terrestre n'est pas dispersif; autrement dit, il ne dépend pas de la fréquence, tout du moins pas dans la gamme habituelle des fréquences radioélectriques utilisée pour calculer la distance des satellites artificiels de la Terre. En revanche, le temps de propagation dans l'ionosphère est dispersif; il varie inversement à la fréquence. Ainsi, en mesurant le temps de propagation relatif à deux fréquences judicieusement espacées, il est possible de calculer directement le temps de propagation absolu le long du trajet allant du satellite vers l'utilisateur. Le temps de propagation dans la troposphère terrestre ne peut pas être mesuré directement, mais plusieurs modèles ou techniques de mesure indirectes peuvent être utilisés pour déterminer la contribution du retard de propagation dans la troposphère dans le contexte de la comparaison d'horloges par satellite avec une grande précision.

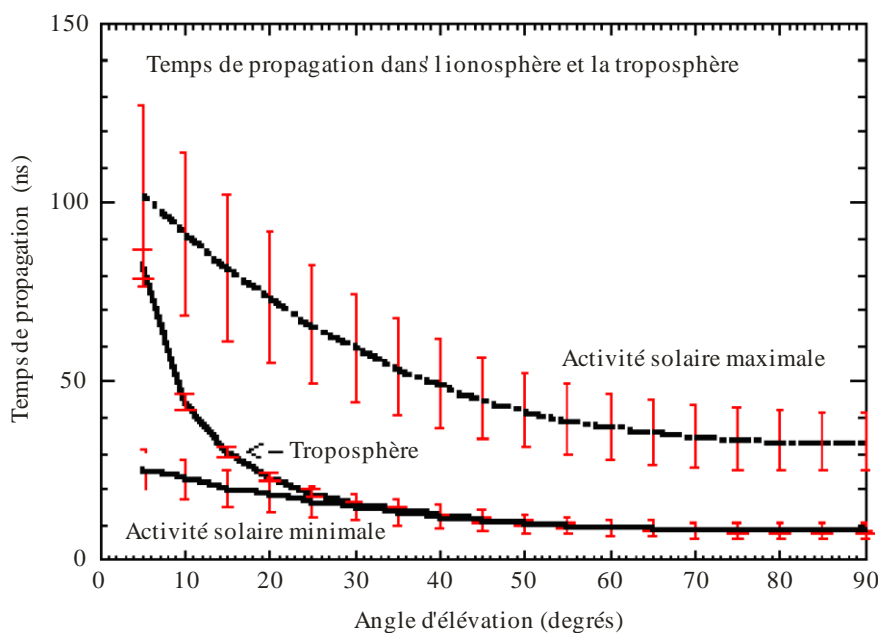
## 11.2 Comparaison des temps de propagation dans la troposphère et dans l'ionosphère de la Terre

La Figure 11-1 illustre des valeurs types de temps de propagation en fonction de l'angle d'élévation pour la troposphère terrestre et pour l'ionosphère à une latitude moyenne, à la fréquence GPS L1, dans différentes conditions d'activité solaire. Cette figure apporte plusieurs informations importantes. Tout d'abord, dans des conditions d'activité solaire minimale, le temps de propagation dans la troposphère à des angles d'élévation élevés est comparable au temps de propagation dans l'ionosphère à une latitude moyenne. En outre, l'évolution du temps de propagation en fonction de l'angle d'élévation, entre le zénith et 5° d'élévation, varie d'un facteur 3 environ pour l'ionosphère et d'un facteur supérieur à 10 pour la troposphère. Ce phénomène est, de toute évidence, dû au fait que la troposphère est beaucoup plus proche de la surface de la Terre que l'ionosphère, et qu'à des angles d'élévation faibles, elle est vue de façon plus oblique que ne l'est l'ionosphère, celle-ci étant située à une altitude supérieure.



FIGURE 11-1

**Comparaison du temps de propagation dans la troposphère et dans l'ionosphère à une latitude moyenne en fonction de l'angle d'élévation**



Sat\_time\_freq-11-01

Enfin, on notera dans la Figure 11-1 les valeurs approchées des fourchettes d'erreur à  $1\sigma$ . Pour le temps de propagation moyen dans l'ionosphère, les erreurs présentent un écart de  $\pm 25\%$  environ, quelles que soient les conditions d'activité solaire, tandis que les fourchettes d'erreur à  $1\sigma$  liées à la troposphère sont inférieures à  $\pm 5\%$  environ. De plus, le temps de propagation dû à la troposphère est nettement plus constant: il varie de moins de 20% sur la totalité de la Terre. La raison en est qu'environ 90% du temps de propagation dans la troposphère est dû à la «composante sèche» de cette couche atmosphérique, qui est proportionnelle à la pression absolue et à la température absolue, lesquelles, fort heureusement pour les habitants de la Terre, ne s'écartent normalement pas des valeurs nominales de plus de quelques points de pourcentage. Etant donné que l'effet de la troposphère est essentiellement dû à la «composante sèche», le temps de propagation dans cette couche est plus facile à modéliser que son équivalent dans l'ionosphère.

### 11.3 Modélisation du temps de propagation dans la troposphère terrestre

Il existe de nombreux modèles de la troposphère terrestre, dont certains ont été étudiés par Spilker [1996]. La plupart de ces modèles reposent simplement sur une fonction de l'angle d'élévation qui lie le temps de propagation au zénith au temps de propagation à des angles d'élévation inférieurs. Si chacune de ces fonctions a ses particularités, pour la majorité d'entre elles, il suffit de renseigner le temps de propagation au zénith; celui-ci est ensuite multiplié par un nombre qui dépend de l'angle d'élévation et l'on obtient ainsi le temps de propagation correspondant à l'angle d'observation du satellite. Le temps de propagation à la verticale peut être déterminé par des méthodes de climatologie ou par d'autres méthodes qui en donnent une valeur réelle à partir de mesures effectuées en quasi-temps réel; ces dernières s'appuient sur des données précises à deux fréquences issues de plusieurs satellites GPS situés à des angles d'élévation différents et ajustent le temps de propagation à la fonction de l'angle d'élévation qui correspond le mieux à l'heure d'observation. Cette technique d'ajustement de courbe permettrait d'obtenir une correction du retard de propagation avec une précision de 1 à 2 cm environ.

Le retard de distance verticale dû à la troposphère est donné par la formule approchée suivante:

$$\Delta r = 10^{-6} c \int N(h) dl \quad (11-1)$$

où:

$c$ : vitesse de la lumière en m/s

$N(h)dl$ : coïndice total de réfraction de la troposphère exprimé en unités de coïndice.

Ci-dessous figure l'une des nombreuses formules donnant le retard de distance au zénith, dans laquelle le terme sec ou hydrostatique et le terme dit «humide» sont séparés et où la température, la pression et la vapeur d'eau au niveau local sont pris en compte:

$$\Delta r_{Vtotal} = \Delta r_{sec} + \Delta r_{humide} \quad (11-2)$$

$$\Delta r_{sec} = \frac{0,62 \times P_{millibars}}{T_{Kelvin}} \quad (m) \quad (11-3)$$

où:

$P$ : pression totale, en millibars.

$$\Delta r_{humide} = \frac{8,3 \times 10^2 \times P_{WV}}{T^2} \quad (m) \quad (11-4)$$

où:

$P_{WV}$ : pression partielle de la vapeur d'eau.

En prenant des valeurs types pour la pression (1 013 millibars) et pour la température (15° Centigrade ou 288° K) et une pression partielle de vapeur d'eau équivalente à 8,5 millibars, soit 50% d'humidité relative, le retard de distance troposphérique total à la verticale est égal à:

$$\Delta r_{Vtotal} = 2,18 + 0,08 = 2,26 \quad (m) \quad (11-5)$$

Dans ce cas classique, la composante «humide» due à la vapeur d'eau dans l'atmosphère est seulement égale à  $0,08/2,26 = 3,5\%$  du retard de distance troposphérique total à la verticale.

Les utilisateurs qui peuvent se contenter d'un retard de distance troposphérique moyen à diverses latitudes peuvent appliquer une valeur constante unique, valable dans le monde entier, dont une valeur approchée est:

$$\Delta r = \frac{2,47}{\sin E + 0,0121} \quad (m) \quad (11-6)$$

où:

$E$ : angle d'élévation.

Une fonction de correspondance simplifiée est donnée par:

$$m(E) = \frac{1,0121}{\sin E + 0,0121} \quad (11-7)$$

Collins et Langley ont développé un modèle climatologique de retard de distance troposphérique, qui a été abondamment comparé à des données réelles de radiosondes provenant de nombreuses stations d'Amérique du Nord [Collins et Langley, 1999]. Ils décrivent leurs résultats en termes de déviations par rapport à des écarts résiduels de distribution normale ou gaussienne. Leur modèle appelé UNB3 suit étroitement une distribution gaussienne entre les points à  $-5 \sigma$  et à  $+4 \sigma$  environ, et fournit des résultats impressionnants pour un modèle climatologique sans apport de données en temps réel. Les facteurs limitatifs de ce modèle sont décrits dans [Collins et Langley, 1996].

### 11.3.1 Variabilité du retard ionosphérique et du retard troposphérique

Comme on l'a vu précédemment, la variabilité du retard troposphérique terrestre est essentiellement due à la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère. Cela étant, le retard dû à la vapeur d'eau présente une amplitude absolue au zénith de l'ordre de quelques centimètres seulement et, même à de faibles angles d'élévation, il peut ne pas avoir une incidence majeure sur l'erreur de distance globale. Le retard ionosphérique présente en revanche une variabilité absolue beaucoup plus grande, mais il peut être presque entièrement éliminé au moyen d'un récepteur GPS à double fréquence (voir ci-après).

Les utilisateurs qui ont besoin de corriger à la fois le retard ionosphérique et le retard troposphérique avec une précision maximale devraient d'abord appliquer une correction à double fréquence pour éliminer le retard ionosphérique du premier ordre, puis envisager d'appliquer l'une des fonctions d'«ajustement» aux erreurs de distance résiduelles selon l'angle d'élévation pour déterminer indépendamment le retard troposphérique. S'ils ne disposent que d'un récepteur GPS à fréquence unique, il y a toutes les chances pour que, même après avoir appliqué l'une des nombreuses méthodes de correction ionosphérique, le retard ionosphérique résiduel soit toujours supérieur au retard troposphérique résiduel, même lorsque celui-ci a été déterminé à partir d'un modèle climatologique (modèle UNB3 par exemple).

### 11.4 Retard de propagation dans l'ionosphère: comportement à l'échelle mondiale, variabilité quotidienne et fluctuation selon les cycles solaires

Le retard ionosphérique est dispersif; autrement dit, il varie inversement par rapport à la fréquence, selon la formule suivante:

$$\Delta t = \frac{40,3}{cf^2} \int_0^{Sat.} Ndl \quad (s) \quad (11-8)$$

où:

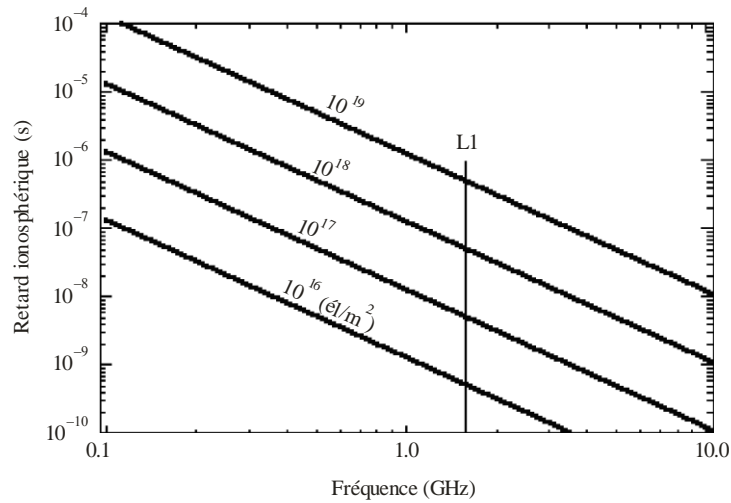
- $\int_0^{Sat.} Ndl$ : intégration du nombre d'électrons libres le long du trajet de l'onde radioélectrique séparant le point de mesure au sol et le satellite, appelée communément «contenu électronique total» (CET) oblique le long de ce trajet
- $c$ : vitesse de la lumière en m/s
- $f$ : fréquence d'exploitation du système (Hz).

Le retard de distance ionosphérique étant fonction de la fréquence, la meilleure méthode pour corriger ses effets sur le transfert de signaux horaires consiste tout simplement à le mesurer à deux fréquences suffisamment espacées et ainsi de mesurer directement le retard de propagation dans l'ionosphère. Les autres méthodes sont toutes moins directes et donc nécessairement moins précises.

Les valeurs types du CET de l'ionosphère terrestre varient de  $10^{16}$  à  $10^{19}$  el / m<sup>2</sup> dans la colonne . Les valeurs correspondantes du retard de propagation unidirectionnel dans l'ionosphère en fonction de la fréquence, pour des valeurs du CET comprises entre  $10^{16}$  et  $10^{19}$  el/m<sup>2</sup> dans la colonne, sont illustrées à la Figure 11-2. La fréquence GPS L1 de 1,57542 GHz est matérialisée par une ligne verticale. La grande variation du CET, de trois ordres de grandeur environ, tient à de nombreux facteurs, parmi lesquels l'heure du jour, la saison, l'emplacement de la station et le flux ionisant des rayons ultraviolets en provenance du Soleil.

FIGURE 11-2

**Retard ionosphérique unidirectionnel en fonction de la fréquence  
pour différentes valeurs du CET comprises entre  $10^{16}$  et  $10^{19}$   $\text{él}/\text{m}^2$  dans la colonne.  
La fréquence GPS L1 est matérialisée par une ligne verticale à 1,575 GHz**

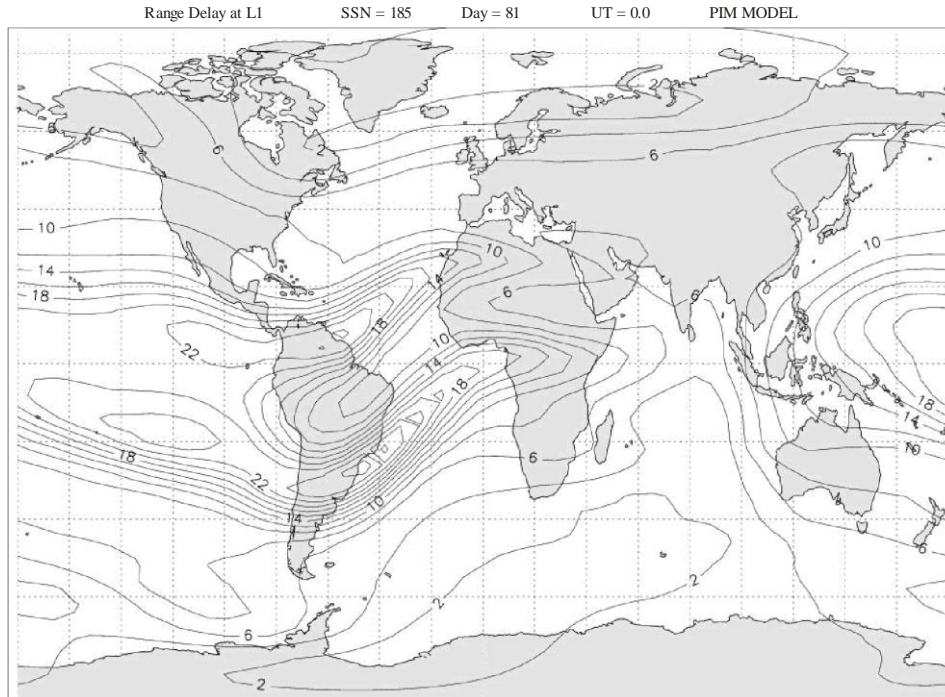


Sat\_time\_freq-11-02

La Figure 11-3 illustre le retard ionosphérique vertical moyen mensuel dans le monde, en unités de mètres, à la fréquence GPS L1, pour des conditions d'équinoxe avec activité solaire maximale. On notera que les valeurs maximales de retard ne se produisent pas au niveau de l'équateur géographique, mais à des latitudes de  $\pm 15^\circ$  environ de part et d'autre de l'équateur magnétique. Si ce modèle des conditions de distance moyenne, tel qu'il est représenté, montre des valeurs maximales de 24 m seulement à la fréquence L1, les valeurs absolues peuvent être beaucoup plus grandes et la variabilité quotidienne aussi est en général élevée.

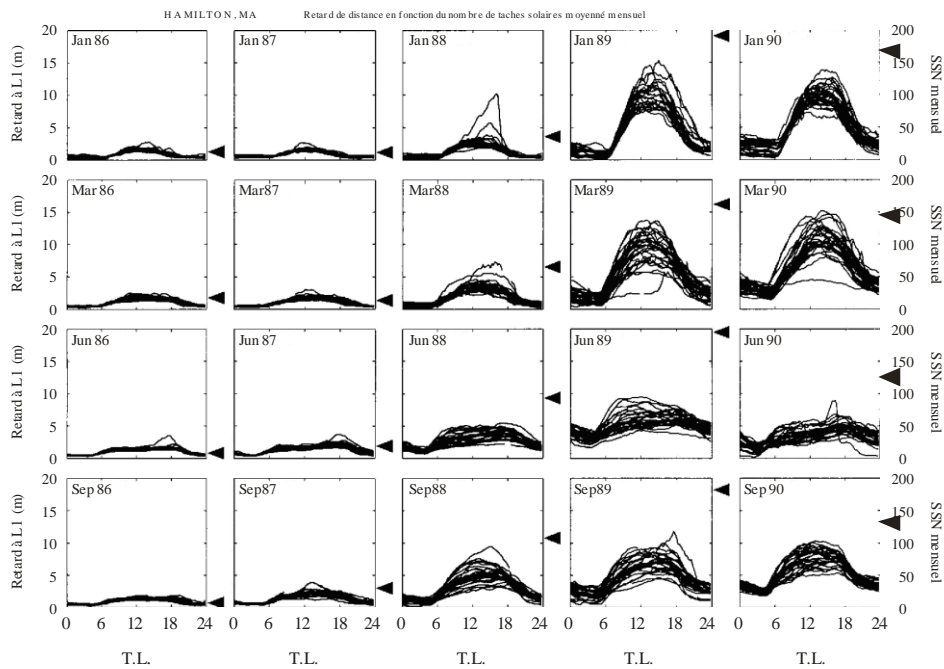
La Figure 11-4 illustre la variabilité – quotidienne, saisonnière et en fonction du cycle solaire – des effets de l'ionosphère à une latitude nord moyenne: les courbes représentent les valeurs de retard de distance relevées par une station située près de Boston (Massachusetts), pour chaque jour des mois de janvier, mars, juin et septembre, entre 1986 et 1990, période d'activité croissante du cycle solaire qui a connu son apogée en 1989/1990. On notera l'importante variabilité d'un jour à l'autre sur les courbes mensuelles de retard diurne, et ce quel que soit le mois considéré, ainsi que les effets saisonniers, les mois d'équinoxe présentant des valeurs absolues supérieures à celles des mois de solstice, avec des valeurs particulièrement faibles en juin. On notera aussi que les valeurs de retard absolu présentent de grandes variations à mesure que progresse le cycle solaire, de 1986 à 1989 et en 1990. Les modèles de retard ionosphérique qui ne sont pas actualisés au moyen d'une mesure locale rapide ne peuvent que reproduire le retard mensuel moyen; la variabilité quotidienne résiduelle de ce retard, qui est de 25% environ en valeur quadratique moyenne, n'est donc pas corrigée.

**FIGURE 11-3**  
**Retard ionosphérique moyen dans le monde, en unités de mètres, à la fréquence GPS L1, pour des conditions d'équinoxe avec activité solaire maximale**



Sat\_time\_freq-11-03

**FIGURE 11-4**  
**Superposition mensuelle de courbes diurnes du retard ionosphérique vertical équivalent, à la fréquence GPS L1, pour quatre mois de cinq années d'accroissement de l'activité solaire. Le nombre de taches solaires moyenné (SSN) mensuel est indiqué pour chaque mois au moyen d'une flèche à droite du schéma correspondant**



Sat\_time\_freq-11-04

#### 11.4.1 Méthodes de correction du retard de propagation dans l'ionosphère, modèles moyens mensuels, modèles actualisés, utilisation de données ionosphériques en temps réel SBAS/WAAS/IGS, corrections à deux fréquences

Si elles ne sont pas corrigées, les erreurs de pseudo-distance verticale types pour le système GPS dues au CET peuvent être de l'ordre de 10 à 25 m. En fait, le retard ionosphérique *vertical* immédiatement au sud de la partie continentale sud-est des Etats-Unis d'Amérique a atteint plus de 40 m lors de deux gros orages géomagnétiques récents, alors que cette région présente habituellement des valeurs de retard *vertical* moyennes mensuelles de l'ordre de 10 m seulement. Il existe heureusement plusieurs méthodes permettant de corriger les effets de l'ionosphère sur le transfert de signaux horaires. Elles sont indiquées ci-dessous, depuis le cas (trivial) où aucune correction n'est apportée jusqu'à la technique de correction à double fréquence, qui offre le meilleur résultat – moyennant toutefois une augmentation modérée du coût de l'équipement initial – et qui élimine l'ionosphère des calculs, au moins jusqu'à un niveau de correction de quelques centimètres.

On compte au moins cinq méthodes de correction des effets du retard ionosphérique. Chacune est examinée, y compris sous l'angle de la difficulté relative de sa mise en œuvre. Ces méthodes apportent les niveaux approchés de correction suivants:

- 0%** – Aucune correction du retard ionosphérique. Ce cas, trivial, est mentionné par souci de complétude. Même l'application d'une correction «constante» pour toutes les «saisons» et tous les emplacements et indépendante du moment de la journée constituerait une amélioration considérable par rapport à cette solution consistant à ne rien faire.
- 50%** – Application de l'algorithme de correction ionosphérique (ICA, *Ionospheric Correction Algorithm*) conçu pour corriger environ la moitié (valeur quadratique moyenne) du retard ionosphérique. Il s'agit de la correction standard utilisée par la quasi-totalité des récepteurs GPS à fréquence unique. Les coefficients de l'algorithme ICA sont transmis dans le message diffusé par les satellites et actualisés au moins une fois tous les dix jours par la station de commande principale du système GPS, ou plus souvent si le flux radioélectrique solaire moyen sur cinq jours d'affilée varie de façon significative pendant cette période de dix jours. En raison de la longueur limitée des messages GPS, l'algorithme ICA ne compte que 8 coefficients [Klobuchar, 1987].
- 75%** – Application d'un modèle ionosphérique des plus récents. Ce modèle nécessite plusieurs milliers de coefficients, mais permet de suivre le comportement moyen mensuel du retard ionosphérique dans la limite d'une erreur systématique résiduelle de 10% environ. Parmi les modèles de ce type, citons les classiques «modèle d'ionosphère de référence internationale (IRI)» [Bilitza, 2000] et «modèle de Bent», qui sont, tous deux, disponibles sur internet. L'application de ces modèles ne règle pas totalement le problème de l'utilisateur du GPS, qui est toujours confronté à la variabilité journalière restante de 20 à 25% environ, soit une erreur à  $1\sigma$  de 22 à 27% environ en tenant compte de l'erreur systématique liée à la connaissance de la moyenne mensuelle. On notera qu'ici encore, ce niveau de correction est obtenu sans aucun apport de données en quasi-temps réel, mais qu'il repose sur un modèle de pointe visant à décrire le comportement moyen mensuel de l'ionosphère plus précisément que ne le fait l'algorithme ICA à 8 coefficients seulement. Ainsi, en augmentant le nombre de coefficients de 8 à plusieurs milliers, on passe d'un niveau de correction de 50% environ à 75% environ (valeurs quadratiques moyennes).
- 90%** – Utilisation des corrections ionosphériques des systèmes complémentaires à satellite (SBAS), qui sont transmises dans les messages complémentaires de ces systèmes. Ces messages sont émis notamment par les systèmes WAAS et EGNOS, comme cela est décrit au Chapitre 2 consacré aux systèmes complémentaires. Cette correction très améliorée fournit des données de retard ionosphérique en quasi-temps réel; ces données sont obtenues à partir d'un réseau de stations de référence SBAS utilisées pour produire une grille de corrections du retard ionosphérique équivalent en des points de la région couverte espacés de  $5^\circ$  en latitude et en longitude. Il va de soi que cette technique de correction n'est applicable que dans les régions dotées d'un système SBAS et de stations de référence au sol capables de mesurer les retards ionosphériques. Mais pour bénéficier de l'amélioration obtenue grâce aux données ionosphériques réelles quasi instantanées, il faut disposer d'un récepteur GPS à une seule fréquence capable de recevoir le message SBAS. Avec le système WAAS, par exemple, bien qu'on utilise des données de retard quasi instantanées, la correction estimée ne dépasse pas 90%, car il est nécessaire d'interpoler les valeurs de la grille de retard ionosphérique vertical, dont la

résolution est de 5° par 5°, pour déterminer les retards obliques équivalents le long de la ligne de visibilité de chacun des satellites du GPS surveillés par l'utilisateur.

**99%** – Utilisation d'un récepteur à double fréquence, tel que décrit au Chapitre 1 sur le système GPS et dans les Chapitres consacrés au transfert de signaux horaires, en vue d'éliminer la quasi-totalité du retard ionosphérique le long du trajet reliant le récepteur à chacun des satellites du GPS surveillés. Cette méthode consiste à mesurer directement le retard ionosphérique oblique en visibilité directe le long du trajet vers chaque satellite du GPS. Elle ne met en jeu aucun calcul basé sur un modèle ni aucune interpolation à partir de valeurs de retard mesurées le long d'un autre trajet. Cette technique de correction, qui est de loin la meilleure, devrait devenir la norme pour tous les utilisateurs civils du GPS, une fois pleinement mise en service la nouvelle fréquence L5 sur les futurs satellites GPS et GALILEO, vraisemblablement au début des années 2010.

Les méthodes permettant d'obtenir les pourcentages de correction indiqués ci-dessus sont toutes plus ou moins pénalisantes. La correction zéro a pour défaut manifeste de produire les erreurs les plus grandes, tandis que la correction à 99%, qui nécessite un récepteur GPS à double fréquence, affiche à l'évidence le coût le plus élevé. L'utilisation de l'algorithme ICA pour corriger 50% environ (valeur quadratique moyenne) de l'erreur de retard ionosphérique n'est que peu pénalisante; en effet, les équations à mettre en œuvre figurent dans un document de contrôle des interfaces intitulé *Interface Control Document ICD-200* et cette méthode constitue la procédure standard appliquée dans les récepteurs d'utilisateur GPS à fréquence unique.

#### 11.4.2 Effets ionosphériques d'ordre supérieur sur le retard de propagation

L'équation 11-1 reliant le retard ionosphérique au CET utilise le développement au premier ordre de l'indice de réfraction de l'ionosphère. Or l'expression complète de cet indice, abstraction faite des termes dont l'amplitude est inférieure à  $10^{-9}$  [Brunner et Gu, 1991], contient plusieurs termes supplémentaires, notamment:

$$n = 1 - (X/2) \pm (XY/2) \cos\theta - (X^2/8) \quad (11-9)$$

où:

- 1: terme de l'espace libre
- $X/2$ : terme de premier ordre, proportionnel à  $1/f^2$
- $XY/2 \cos\theta$ : proportionnel à  $1/f^3$
- $X^2/8$ : proportionnel à  $1/f^4$ .

Si l'on nomme ces termes respectivement A, B, C et D, les termes d'ordre supérieur aux fréquences GPS, dans des conditions ionosphériques mondiales maximales, ont pour amplitude:

$$B \approx 2 \times 10^{-4}, C \approx 2 \times 10^{-7}, D \approx 2 \times 10^{-8}$$

Les rapports des termes d'ordre supérieur, C et D, au terme du premier ordre, B, toujours dans les conditions ionosphériques les plus défavorables, sont:

$$C/B \approx 10^{-3}, D/B \approx 10^{-4}$$

Ces termes d'ordre supérieur représentent donc, aux fréquences GPS, 0,1% et 0,01% du terme du premier ordre, même pour l'ionosphère extrêmement élevée considérée ici. Des conclusions analogues ont été tirées par Ioannides et Strangeways dans [Ioannides et Strangeways, 2002], étude dans laquelle la contribution maximale aux termes d'ordre supérieur n'était que de quelques centimètres.

#### 11.4.3 Effets de scintillation

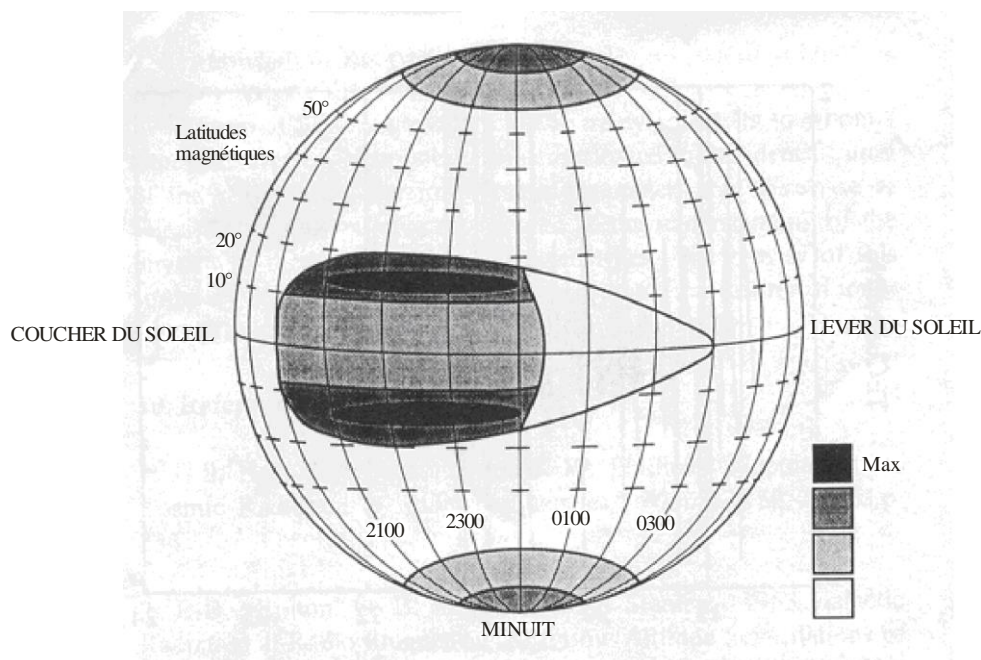
Tant la scintillation de l'amplitude que celle de la phase peuvent influencer sur la qualité de fonctionnement à court terme de divers récepteurs GPS. Cela étant, dans les régions de moyenne latitude, il est très rare d'observer des effets significatifs d'évanouissement par scintillation ou de «gigue» par scintillation de la phase. Même dans les régions proches de l'équateur, où l'on effectue une intégration du signal dans le temps, les effets de scintillation ne devraient pas poser problème. Dans la région équatoriale, les effets d'évanouissement profond ne se produisent, en règle générale, que pendant les heures suivant le coucher du soleil et jusqu'à



minuit heure locale, puis seulement pendant les mois d'équinoxe des années où l'activité solaire est relativement élevée. La Figure 11-5 illustre, sous forme d'image, les heures et les régions du monde présentant différents niveaux de scintillation. Plusieurs études portant sur les effets de scintillation ont été réalisées. Citons notamment celle de Goodman et Aarons [Goodman et Aarons, 1990], qui décrit la morphologie de la scintillation de l'amplitude pour diverses fréquences couramment utilisées dans la communication par satellite et le transfert de signaux horaires. Si la scintillation peut être contraignante pour le transfert de signaux horaires de précision par satellite, ses effets peuvent être réduits au minimum en évitant simplement les heures et les moments de la journée où elle apparaît habituellement. Par exemple, il est rare que l'évanouissement profond entraîne des interruptions de signal sur les fréquences GPS aux latitudes aurorales, mais on évitera si possible d'effectuer des comparaisons d'horloges pendant les périodes de perturbation magnétique. De même, on évitera ce type d'opération après le coucher du soleil (heure locale) dans les régions proches de l'équateur, tout particulièrement pendant les années de forte activité solaire. Enfin, il est toujours préférable de surveiller en temps réel le rapport porteuse/densité de bruit  $C/N_0$  du récepteur pour chaque satellite du GPS, et ce afin de disposer en permanence d'une méthode fiable pour déterminer si un phénomène de scintillation profonde a pu perturber le signal reçu.

FIGURE 11-5

**Carte du monde en coordonnées magnétiques et heure locale, montrant où se situent habituellement les régions de scintillation**



Sat\_time\_freq-11-05

## 11.5 Conclusion

S'agissant des effets du retard ionosphérique sur la comparaison d'horloges, le meilleur conseil que l'on puisse donner aux spécialistes du transfert du temps est d'acquérir, au plus vite, deux récepteurs GPS à double fréquence, un pour chaque extrémité de la liaison de transfert par satellite. En effet, l'utilisation de ce type de récepteur est la meilleure façon de garantir que plus de 99% du retard ionosphérique sera automatiquement éliminé de tous les trajets par satellite. S'il n'est pas possible d'utiliser un récepteur GPS à double fréquence, on obtiendra les valeurs de retard ionosphérique en appliquant les corrections ionosphériques fournies par un système SBAS (WASS, EGNOS), à condition que les régions où le transfert de signaux horaires doit être effectué soient desservies par un tel système. A défaut, les valeurs de CET fournies par une station de l'IGS voisine devraient apporter une meilleure correction que n'importe quel modèle ionosphérique non actualisé.



### Références

- BILITZA D. [2001], «The International Reference Ionosphere 2000», *Radio Science*, Vol. 236, p. 261-275.
- BRUNNER F. K. et GU M. [1991], « An Improved Model for the Dual Frequency Ionospheric Correction of GPS Observations », *Manuscripta Geodaetica*, Vol.16, p. 205-214.
- COLLINS P. et LANGLEY R. B. [juillet 1999], «Tropospheric Delay Prediction for the WAAS User», *GPS World*, p. 52-58.
- COLLINS P., LANGLEY R. et LAMANCE J. [19-21 juin 1996], *Limiting Factors in Tropospheric Propagation Delay Error Modelling for GPS Airborne Navigation*. Présenté à 52<sup>e</sup> réunion annuelle de l'Institute of Navigation, Cambridge, Massachusetts, Etats-Unis d'Amérique.
- GOODMAN J. M. et AARONS J. [1990], « Ionospheric Effects on Modern Electronic Systems », *Proc. of the IEEE*, Vol. 78, p. 512-528.
- IOANNIDES R. T. et STRANGEWAYS H. J. [août 2002], « Improved Ionospheric Correction for Dual Frequency GPS », *Proceedings of the XXVIIth General Assembly of URSI*, Maastricht, Pays-Bas.
- KLOBUCHAR J. A. [mai 1987], « Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users », *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. AES-23, n° 3, p. 325-331.
- SPIPKER Jr. J. J. [1996], *Tropospheric Effects on GPS, Chapter 12 in Global Positioning System: Theory and Applications*, dirigé par B. W. Parkinson et J. J. Spilker Jr., publié par the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., Washington, DC. Vol. 1, p. 517-546.



## CHAPITRE 12

**SYSTÈMES MONDIAUX DE NAVIGATION PAR SATELLITE –  
PREMIERS OUTILS DE TRANSFERT DU TEMPS**

	<i>Page</i>
12.1 Introduction .....	156
12.2 Le système GPS et le temps .....	157
12.2.1 Comment le GPS diffuse-t-il l'heure? .....	157
12.2.2 Comment le système GPS permet-il de synchroniser des horloges sur de grandes distances? .....	158
12.3 Applications du transfert de signaux horaires par GPS.....	158
12.3.1 Comparaison d'horloges par observations simultanées du code C/A des satellites du GPS à un seul canal.....	160
12.3.2 Comparaisons sur site (ligne de base nulle) .....	160
12.3.3 Etalonnage différentiel du système GPS .....	161
12.3.4 Principe de la fermeture autour du globe .....	161
12.4 Comparaison entre le GPS et d'autres techniques de transfert du temps.....	162
12.4.1 Comparaison avec la technique TWSTFT (comparaison de temps et de fréquence par aller et retour sur satellite).....	162
12.4.2 Comparaison avec le transfert de temps par lien laser .....	163
12.5 Transfert du temps par GPS: évolutions récentes .....	164
12.5.1 Transfert du temps par observations simultanées des satellites du GPS à canaux multiples ...	164
12.5.2 Antennes stabilisées en température .....	167
12.5.3 Utilisation de la phase de la porteuse GPS.....	168
12.6 Utilisation du système GLONASS.....	168
12.7 Conclusion.....	169
Références .....	170

### 12.1 Introduction

Les horloges qui nous servent à conserver le temps sont devenues au fil des ans non seulement plus précises, mais aussi plus exactes. La Figure 12-1 illustre la qualité de fonctionnement de différents types d'horloge sur une large gamme d'intervalles de temps. On observe une progression: en haut du graphique, les horloges les moins exactes, en bas, les plus horloges les plus exactes, qui sont aussi les plus récentes. Nous sommes aujourd'hui sur le point d'utiliser des horloges dont l'exactitude en fréquence atteint  $1 \times 10^{-16}$ . De telles horloges sont capables de maintenir un niveau de qualité de 10 ps/jour.

FIGURE 12-1

Capacité de conservation du temps de différentes horloges (reproduit avec l'aimable autorisation de D. W. Allan)

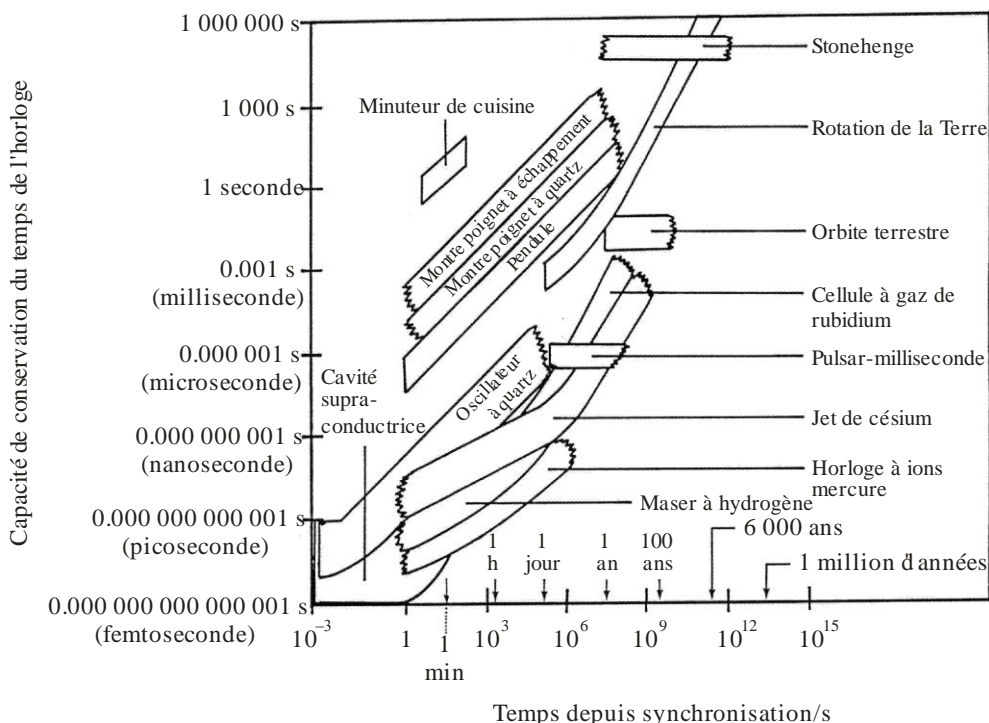


Figure 12-1

Au fil des ans, les spécialistes des références horaires ont eu recours à de nombreuses techniques et systèmes pour synchroniser ou comparer les horloges. La Figure 12-2 illustre la qualité de fonctionnement de certains de ces systèmes, parmi lesquels:

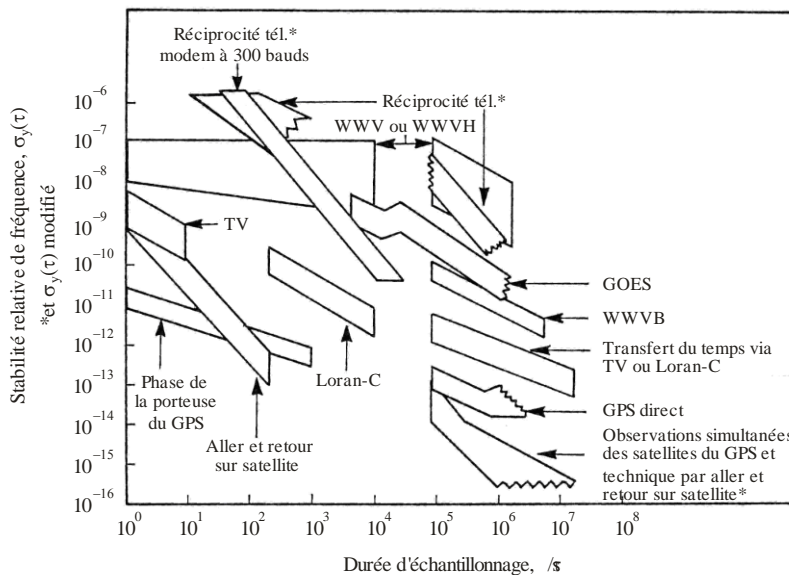
- les systèmes de communication de Terre, tels que la télévision et les téléphones (MODEMS);
- les systèmes de radiodiffusion directe (WWV et WWVH);
- les systèmes de navigation, tels que LORAN-C et GPS;
- les systèmes de communication par satellite, comme la comparaison de temps et de fréquence par aller et retour sur satellite (TWSTFT).

A mesure que les horloges sont devenues plus précises et plus exactes, les spécialistes des références horaires ont recherché des systèmes plus précis et plus stables à des fins de synchronisation. Ils ont trouvé dans le

système GPS, source de temps éprouvée et système fiable de transfert de signaux horaires, un bon moyen de les aider à résoudre les problèmes classiques de conservation du temps.

FIGURE 12-2

**Qualité de différentes techniques de transfert de signaux horaires  
(reproduit avec l'aimable autorisation de D. W. Allan)**



Sur le fig. 12-2

**12.2 Le système GPS et le temps**

Le système de navigation GPS s'est imposé comme une source fiable de radiorepérage à la fois à usage militaire et civil. Il présente aussi un grand intérêt – mais cela est moins connu – pour les spécialistes des références horaires [Klepczynski *et al.*, 1996]. Le système GPS est en effet un outil polyvalent de portée mondiale, qui permet de diffuser l'heure à un nombre arbitraire d'utilisateurs et de synchroniser des horloges sur de grandes distances avec une très bonne précision et une grande exactitude. Les paragraphes qui suivent examinent brièvement comment les spécialistes des références horaires utilisent le GPS à ces fins et mettent en avant les découvertes les plus récentes dans ce domaine.

**12.2.1 Comment le GPS diffuse-t-il l'heure?**

L'ordinateur du récepteur GPS peut calculer la différence entre sa propre horloge et le temps du GPS ou le temps de référence du système GPS, à savoir le temps UTC(USNO) (temps UTC conservé par l'U.S. Naval Observatory). Cette fonctionnalité fait partie de la solution de l'équation de navigation du récepteur. L'horloge intégrée au récepteur d'utilisateur GPS est en général une horloge à quartz. Toutefois, certains récepteurs sont reliés à une horloge externe (fréquence étalon au rubidium ou à jet de césium notamment), qui leur sert de référence locale. Le récepteur local peut être programmé pour afficher le temps UTC(USNO) tel que diffusé par le système GPS, ou bien le temps du GPS, étant donné que la solution de l'équation de navigation fournit la différence entre l'horloge locale du récepteur et le temps du GPS. Il convient de noter que le temps UTC(USNO) est asservi sur le temps UTC conservé par le BIPM. Habituellement, le temps UTC(USNO) correspond au temps UTC à 10 ns près environ.

S'agissant du nombre de satellites GPS nécessaires, la communauté du temps est avantagée par rapport à la communauté de la navigation. En effet, pour se repérer, les navigateurs ont besoin de quatre satellites: trois pour connaître leur position et un pour calculer le décalage de leur horloge locale par rapport au temps du GPS. En revanche, les spécialistes des références horaires, qui ne se déplacent pas et connaissent donc leur position,

n'ont besoin que d'un seul satellite du GPS pour connaître le décalage entre leur horloge locale et le temps du GPS. En conséquence, ils ont modifié les algorithmes de leurs récepteurs de références horaires pour tirer parti de cette spécificité.

### 12.2.2 Comment le système GPS permet-il de synchroniser des horloges sur de grandes distances?

La synchronisation des horloges sur de grandes distances s'effectue grâce à la technique dite des observations simultanées des satellites du GPS (*GPS Common View*). Deux stations observent simultanément le même satellite du GPS. Chacun des utilisateurs des deux stations doit enregistrer la différence entre son horloge locale (T) ou sa référence horaire locale et le temps du GPS, au même instant, au moyen du même satellite, et ce en utilisant un récepteur GPS appelé «unité de comparaison d'horloges GPS» ou TTU (*GPS Time Transfer Unit*). Un TTU est un récepteur GPS spécial, programmé pour calculer et afficher des informations présentant un intérêt pour les spécialistes des références horaires.

$$\text{L'utilisateur A observe: } A = T_a - \text{temps du GPS} \quad (12-1a)$$

$$\text{L'utilisateur B observe: } B = T_b - \text{temps du GPS} \quad (12-1b)$$

Il est primordial que les deux utilisateurs observent le même satellite au même instant afin de réduire au minimum les effets de certaines erreurs [Allan et Weiss, 1980]. En effectuant la différence entre les deux jeux de mesures, on obtient:

$$A - B = (T_a - \text{temps du GPS}) - (T_b - \text{temps du GPS}) = T_a - T_b \quad (12-2)$$

Les différences entre les deux horloges locales se calculent ainsi facilement par élimination de l'horloge GPS commune. Cette procédure, très simple, est aussi très puissante, car elle est indépendante du temps du GPS.

La précision et l'exactitude des fonctions de diffusion de signaux horaires et de synchronisation des horloges par GPS se sont considérablement améliorées au fil des ans. On atteint actuellement un niveau de 10-25 ns pour la diffusion unidirectionnelle à l'aide d'un récepteur à code d'acquisition grossière (C/A) et de 2-15 ns pour la synchronisation horaire. Ces estimations sont données sous forme d'intervalle de valeurs, car l'expérience montre que la qualité susceptible d'être atteinte dépend de l'utilisateur et de l'emplacement. Elles sont représentatives des résultats obtenus dans différents domaines comme les télécommunications et la métrologie.

## 12.3 Applications du transfert de signaux horaires par GPS

Les nœuds principaux d'un réseau de télécommunication doivent être synchronisés [Butterline, 1993]. Cette opération peut être effectuée en interne (au moyen d'impulsions de synchronisation) ou en externe (par synchronisation). Le système GPS permet d'effectuer facilement une synchronisation externe des horloges situées au niveau des nœuds principaux d'un réseau avec une précision supérieure à 100 ns en temps et  $1 \times 10^{-13}$  en fréquence. Pour l'industrie des télécommunications, ce niveau de précision satisfait aux exigences applicables aux nœuds de stratum 1, à savoir 1 ms en temps et  $1 \times 10^{-11}$  en fréquence.

Dans certains *réseaux de télécommunication*, le temps et en particulier la fréquence sont conservés par un ensemble d'horloges atomiques, notamment des fréquences étalon au rubidium, qui sont asservies sur le temps UTC par GPS. En règle générale, la cadence de chaque horloge au rubidium par rapport au temps UTC est déterminée en effectuant la moyenne des observations GPS sur un certain intervalle de temps. L'intervalle choisi dépend des prescriptions relatives à chaque système. Il est nécessaire de connaître la différence entre la cadence de chaque horloge au rubidium et le temps UTC avec la meilleure précision et la meilleure exactitude possibles afin de garantir qu'en cas de perte de contact avec le système GPS pour une raison ou une autre, le décalage de cadence de l'horloge au rubidium par rapport au temps UTC pourra être extrapolé à partir des dernières valeurs observées, jusqu'à ce que le contact avec le GPS soit rétabli. La perte de contact peut, mais pas nécessairement, poser un problème immédiat au système de télécommunication. Tout dépend du laps de temps au terme duquel la synchronisation entre les nœuds sera dégradée au point qu'ils ne puissent plus communiquer de façon cohérente. Cela peut prendre entre une heure et plusieurs semaines selon les systèmes.

Le *secteur de l'énergie électrique* dépend de plus en plus du système GPS pour ce qui a trait au temps. Les compagnies d'électricité utilisent aujourd'hui le GPS pour synchroniser les horloges de leurs stations de surveillance, et ce pour localiser les dysfonctionnements de service dans la zone dont elles ont la charge. La

source d'un dysfonctionnement (rupture d'un câble électrique) est déterminée par triangulation, à partir de la connaissance de l'instant d'apparition du problème au niveau de trois stations dont les horloges sont synchronisées. Dans ce secteur, il est aussi nécessaire de synchroniser les horloges des différents prestataires de services régionaux. La synchronisation joue un rôle important dans le transfert efficace de l'énergie électrique d'un réseau à l'autre. De fait, tout transfert déphasé réduit la puissance totale disponible.

Dans le domaine de la *métrologie du temps*, les signaux GPS ont commencé à être utilisés il y a une quinzaine d'années au National Bureau of Standards (NBS, aujourd'hui National Institute of Standards and Technology, NIST). Un système reposant sur des observations simultanées des satellites du GPS pour le transfert de signaux horaires et de fréquence de précision a été proposé [Allan et Weiss, 1980] et des récepteurs spécialement conçus à cet effet ont été construits, d'abord au NBS, puis par plusieurs sociétés commerciales. Il s'agissait de récepteurs à code C/A, à une fréquence et à un seul canal, capables de poursuivre un seul satellite à la fois. Leur mise en œuvre passait nécessairement par la programmation périodique d'observations simultanées. La méthode des observations simultanées était à la fois judicieuse et ambitieuse: elle permettait non seulement de réduire certaines incertitudes d'origine physique, mais aussi d'annuler la dégradation intentionnelle du temps du GPS mise en place en 1990 sous le nom de «disponibilité sélective» (SA, *Selective Availability*) [Lewandowski et Thomas, 1991].

La mise en place du système GPS a largement contribué à améliorer le transfert de signaux horaires et de fréquence. Pendant les premiers temps de l'utilisation du GPS, les niveaux d'incertitude, compris entre 10 et 20 ns pour les comparaisons horaires, rendaient possibles, pour la première fois, la comparaison des meilleurs étalons atomiques du monde à leur niveau maximal de performance, sur la base d'un temps d'intégration d'une dizaine de jours environ. Plusieurs améliorations ont été apportées depuis lors, notamment l'utilisation de coordonnées d'antenne ultra-précises, d'éphémérides de précision et de mesures ionosphériques [Lewandowski et Thomas, 1991]. Ces améliorations ont permis d'atteindre, au début des années 90, des incertitudes de comparaison horaire de l'ordre de 3 ns. Parallèlement à ces évolutions, les étalons atomiques ont connu des améliorations d'un ordre de grandeur et il a été possible de comparer les nouvelles horloges (par exemple les fréquences étalon à jet de césium HP5071A) à leur niveau maximal de performance sur des temps d'intégration de plusieurs jours.

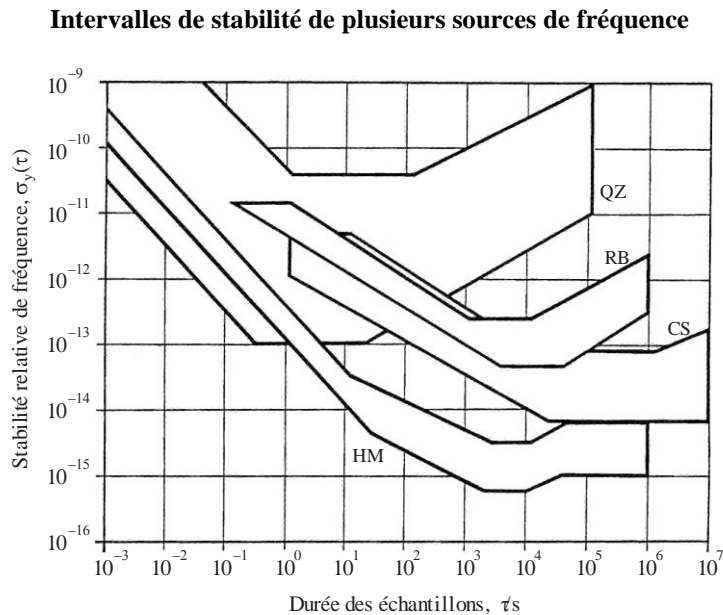
Dans le domaine de la métrologie, plusieurs étalons de fréquence, nouveaux et novateurs, voient aujourd'hui le jour. Il semble que ces nouveaux dispositifs tendent vers une précision de  $1 \times 10^{-15}$  et une instabilité à court terme de  $1 \times 10^{-16}$ . Très souvent, la qualité de fonctionnement d'un étalon de fréquence est décrite en termes de variances de ses variations de fréquence sur une large gamme d'intervalles de temps allant d'une seconde à plusieurs mois. Les formules statistiques utilisées pour décrire la qualité de fonctionnement d'une horloge présentent de nombreuses variantes mathématiques. La Figure 12-3 illustre l'une d'entre elles:  $\sigma_y^2(\tau)$ , ou, comme on l'appelle parfois, «variance d'Allan» [1987], pour différents types d'étalon de fréquence (à quartz [QZ], au rubidium [RB], à jet de césium [CS], maser à hydrogène [HM]). Ce type de graphique, qui représente la qualité de fonctionnement d'une fréquence étalon, montre différentes caractéristiques qui dépendent des processus de bruit agissant dans l'étalon de fréquence. En fait, la pente de la courbe peut servir à identifier le type de bruit. Une pente de zéro, ou une courbe parallèle à l'axe des ordonnées, indique que la performance limite en termes de stabilité de l'étalon a été atteinte (palier de scintillation). Le type de bruit identifié au moyen de cette méthode est la scintillation de fréquence.

Etant donné que les dispositifs de dernière génération ne sont pas transportables et qu'ils ne fonctionnent pas en continu, il est important de pouvoir les comparer en un temps raisonnable pour déterminer s'ils présentent ou non, entre eux, des différences systématiques. Une mesure d'une précision de 1 ns sur une période de 24 heures correspond à  $1 \times 10^{-14}$  en fréquence. Par conséquent, compte tenu des niveaux actuels, il faudrait des semaines pour comparer deux de ces dispositifs. C'est pourquoi il importe d'élaborer et d'améliorer des méthodes de comparaison d'horloges permettant d'effectuer ces comparaisons sur une durée raisonnable.

Les échelles de temps TAI et UTC reposent sur des données provenant de quelque 220 horloges atomiques situées dans une cinquantaine de laboratoires du temps répartis à travers le monde. C'est la section du temps du BIPM qui est chargée de calculer ces échelles. La seule méthode opérationnelle de comparaison de ces horloges est la technique des observations simultanées des satellites du GPS qui repose sur des mesures de code C/A à un seul canal. C'est pourquoi la communauté du temps œuvre à l'élaboration de nouvelles méthodes de comparaison du temps et des fréquences. Parmi elles, des techniques fondées sur des mesures de code C/A

GPS à canaux multiples, des mesures de phase de la porteuse GPS, des antennes stabilisées en température et la normalisation du logiciel des récepteurs. En outre, d'autres travaux s'appuient sur des mesures de code C/A et de code P GLONASS. Le présent chapitre porte essentiellement sur les progrès rendus possibles par l'utilisation d'observations GPS à canaux multiples et, en particulier, d'antennes de récepteur protégées. Il met aussi en avant certaines difficultés rencontrées avec d'autres techniques actuelles. Il décrit les instabilités du temps de propagation dans les récepteurs de temps du GPS et propose une comparaison du transfert de signaux horaires GPS à code C/A avec d'autres techniques de comparaison d'horloges par satellite.

FIGURE 12-3



Sat\_time\_freq-12-03

### 12.3.1 Comparaison d'horloges par observations simultanées du code C/A des satellites du GPS à un seul canal

Pour synchroniser leurs horloges, de nombreux utilisateurs ont recours à un récepteur (code C/A) à une seule fréquence, qui poursuit un seul satellite (canal unique) en appliquant la technique des observations simultanées OPS. Ces quinze dernières années, les résultats obtenus par cette technique ont été améliorés d'un ordre de grandeur. A ce jour, l'incertitude d'une comparaison horaire opérationnelle par code C/A GPS à un seul canal est estimée à 7 ns environ pour une seule observation simultanée et à 3 ns environ pour une moyenne journalière, soit quelques multiples de  $10^{-14}$  en termes de comparaison de fréquence. Pour la comparaison des horloges atomiques actuelles, ce niveau de qualité est à peine suffisant. La technique doit donc être améliorée rapidement pour satisfaire aux exigences des horloges de dernière génération. Sur les quarante-cinq dernières années, la qualité des horloges atomiques a progressé d'un ordre de grandeur tous les sept ans en moyenne. Actuellement, la stabilité du TAI et de l'UTC, échelles de temps internationales de référence, égale environ  $2 \times 10^{-15}$  sur une durée de quelques semaines. Il est donc raisonnable de penser que d'ici à 2005, la stabilité des échelles de temps TAI et UTC atteindra quelques multiples de  $10^{-16}$ .

### 12.3.2 Comparaisons sur site (ligne de base nulle)

Les comparaisons sur site désignent des comparaisons pour lesquelles les observations simultanées sont effectuées entre deux systèmes de réception de temps GPS situés en un même site et connectés à la même horloge, les antennes étant distantes de quelques mètres au maximum. Les comparaisons effectuées à de courtes distances permettent d'annuler les erreurs d'horloges communes ainsi qu'un certain nombre d'autres erreurs. Si les récepteurs comparés utilisent le même logiciel, il n'y a en principe pas d'erreur due aux éphémérides diffusées par les satellites, aux coordonnées des antennes ou à une modélisation imparfaite de



l'ionosphère et de la troposphère. Toute erreur systématique constante mesurée provient de différences de temps de propagation dans les composants des deux équipements comparés: récepteur, antenne, câbles, etc. Il existe aujourd'hui un volume considérable d'informations sur ce type de comparaison [Kirchner *et al.*, 1993; Buisson *et al.*, 1985]. Toutes font état du même comportement: une dépendance à court terme (une journée) et parfois à long terme (saisonnière) vis-à-vis de la température externe. La variation journalière est normalement de quelques nanosecondes et la variation saisonnière de 10 ns environ. Il convient de souligner que le phénomène observé est un effet différentiel et que les variations effectives de temps de propagation dues à la température peuvent être plus importantes.

### 12.3.3 Etalonnage différentiel du système GPS

L'étalonnage différentiel de récepteurs du temps GPS distants qui reposent sur le principe de la technique à un seul site décrite ci-dessus a progressé ces dernières années. Dans cette configuration, l'un des deux récepteurs à comparer est un récepteur local. L'autre est un récepteur portable, qui est expédié vers les différents sites à étalonner. Si l'on suppose que les temps de propagation dans le récepteur de l'équipement horaire GPS mobile (y compris les câbles et les antennes) sont constants, on peut calculer, pour chaque site comparé, une correction horaire différentielle. Dans des conditions idéales, l'incertitude indiquée d'un tel étalonnage différentiel est de 2 ns environ. L'étalonnage différentiel des équipements horaires du GPS permet de comparer avec précision des horloges atomiques distantes. Cette précision est limitée par les incertitudes de l'étalonnage différentiel et par le bruit de la liaison utilisée pour les observations simultanées.

Ces quinze dernières années, le BIPM a réalisé plusieurs étalonnages différentiels [Lewandowski, 1996]. Les récepteurs du temps du GPS situés au NIST et à l'Observatoire de Paris ont été comparés une dizaine de fois; les corrections de temps différentielles déterminées lors de ces étalonnages ne diffèrent pas de plus de quelques nanosecondes. Ces résultats donnent une idée de la reproductibilité que l'on peut atteindre lorsque les étalonnages sont réalisés dans des conditions idéales, dans des laboratoires où les récepteurs du temps du GPS, y compris les câbles, sont entretenus avec soin. Ils nous informent aussi sur la stabilité à long terme des récepteurs horaires du GPS. Il convient de souligner qu'à l'instar des comparaisons sur un seul site, il s'agit ici aussi de comparaisons différentielles. Ainsi, les deux récepteurs étant situés dans l'hémisphère nord, des effets saisonniers peuvent avoir été annulés. Pour l'heure, il n'y a pas eu d'étalonnages répétés entre sites basés dans l'hémisphère nord et dans l'hémisphère sud.

Les sites n'affichent pas tous une cohérence nette entre plusieurs opérations d'étalonnage. On a parfois observé des écarts de 10 ns environ, qui peuvent s'expliquer par une réaction différente des récepteurs aux variations de température saisonnières ou à des propagations par trajets multiples non reconnues comme telles. Dans d'autres cas, l'écart était plus important, atteignant parfois plusieurs dizaines de nanosecondes; ces variations proviennent probablement de modifications intentionnelles non consignées ou de changements non désirés survenus dans le matériel du récepteur horaire GPS.

### 12.3.4 Principe de la fermeture autour du globe

Comme on l'a indiqué précédemment, la comparaison d'horloges par la technique des observations simultanées des satellites du GPS s'effectue entre des paires de stations. Dans certains cas, il est possible d'encercler le globe terrestre, dans une direction, au moyen de plusieurs paires. La condition de fermeture entraîne l'annulation de toutes les erreurs d'horloge et, dans le cas idéal de liaisons horaires sans bruit, le résultat obtenu doit être égal à zéro. Plusieurs essais ont été réalisés dans le passé. L'un d'entre eux, effectué sur une période d'une année environ à partir de données provenant du NIST, de l'OP et du Communications Research Laboratory (CRL) et utilisant des éphémérides précises soumises à un post-traitement ainsi que des mesures ionosphériques, a mis en évidence une erreur systématique de quelques nanosecondes qui évolue dans le temps [Lewandowski, 1993]. Etant donné que les temps de propagation dans le matériel sont également annulés par la condition de fermeture, les sources d'incertitude restantes sont uniquement liées au trajet du signal GPS dans l'espace ou à la propagation par trajets multiples. Il semblerait que l'erreur systématique observée provienne de la précision limitée des mesures ionosphériques. Une fraction de cette erreur systématique peut aussi être due à une erreur sur les coordonnées des antennes de l'un des laboratoires concernés. La variation de l'erreur systématique dans le temps semble également indiquer que les mesures ionosphériques jouent un rôle, car celles-ci peuvent subir les effets du changement des conditions entre le jour et nuit, étant donné que les orbites

GPS sidérales «se déplacent» de 4 min chaque jour tout au long de l'année. A noter que la correction liée à la troposphère peut aussi avoir une incidence sur la variation des temps de propagation qui a été observée.

Il semble que le principe de la fermeture autour du globe constitue un bon test de la précision du calcul des retards dus à la réfraction atmosphérique, car les observations simultanées sur des lignes de base d'une telle longueur sont nécessairement effectuées à des élévations très faibles.

## 12.4 Comparaison entre le GPS et d'autres techniques de transfert du temps

### 12.4.1 Comparaison avec la technique TWSTFT (comparaison de temps et de fréquence par aller et retour sur satellite)

La comparaison de temps et de fréquence par aller et retour sur satellite (TWSTFT, *two-way satellite time and frequency transfer*) s'appuie sur des satellites de télécommunication géostationnaires pour fournir une comparaison d'horloges d'une précision de quelques centaines de picosecondes. Elle met en jeu deux stations, A et B: chacune envoie, au même instant, un signal codé que l'autre reçoit. Le début du signal codé de A est synchronisé sur le signal à 1 Hz de l'horloge locale A. Le signal codé de B est également synchronisé sur l'horloge locale B. Un compteur d'intervalles de temps, lancé par l'horloge locale de l'utilisateur, est arrêté à la réception du signal. Avant de calculer la différence entre les deux horloges locales, il est nécessaire de rassembler les relevés de chaque compteur des stations A et B. En règle générale, en raison des processus de bruit en jeu, il faut environ 2 min pour recueillir le volume de données nécessaire au calcul d'une valeur moyenne. Ces sessions de deux minutes sont habituellement effectuées trois fois par semaine. En 1991, pendant une année environ, les échelles de temps de l'Observatoire de la Côte d'Azur (OCA) et de l'Université technique de Graz (TUG), distantes de quelque 800 km, ont été comparées par la méthode des observations simultanées GPS CV I et par la technique TWSTT [Kirchner *et al.*, 1993]. L'incertitude indiquée de la liaison GPS est de 3 ns.

Les données présentées à la Figure 12-4 montrent la différence entre les valeurs [UTC(TUG)-Horloge(OCA)] obtenues par des mesures TWSTT et des mesures par observations simultanées des satellites du GPS. A la fin de l'expérience, les liaisons ont été étalonnées de façon indépendante en mesurant les temps de propagation différentiels des récepteurs GPS et des stations terriennes associées au satellite. Pour ce faire, on a transporté un récepteur GPS et un terminal satellite vers l'autre site. Etant donné que les différences entre les valeurs obtenues par TWSTT et celles obtenues par observations simultanées des satellites du GPS font apparaître une variation (saisonnnière) systématique, la valeur moyenne et l'écart type des différences (3,6 et 3,9 ns respectivement) ne sont pas des mesures appropriées pour décrire la concordance des deux techniques sur la période de comparaison. La variance d'Allan modifiée des différences faisant apparaître un bruit blanc de scintillation de phase jusqu'à une durée moyenne de 50 jours environ, le calcul des valeurs moyennes et des écarts types correspondants est justifié pour des intervalles de données ne dépassant pas cette durée. Pour la durée de la comparaison, la moyenne des moyennes sur 50 jours est de 3,2 ns et l'écart type de 2,6 ns. La différence maximale des moyennes est égale à 8 ns. Elle correspond à un effet saisonnier qui, là encore, est probablement dû à des temps de propagation dépendant de la température dans l'équipement de réception GPS (Figure 12-4).

FIGURE 12-4

**Différences entre (UTC(TUG)-horloge(OCA)) obtenues par des mesures TWSTT, différences entre (UTC(TUG)-horloge(OCA)) obtenues par des mesures d'observations simultanées des satellites du GPS, et température extérieure à l'université TUG**

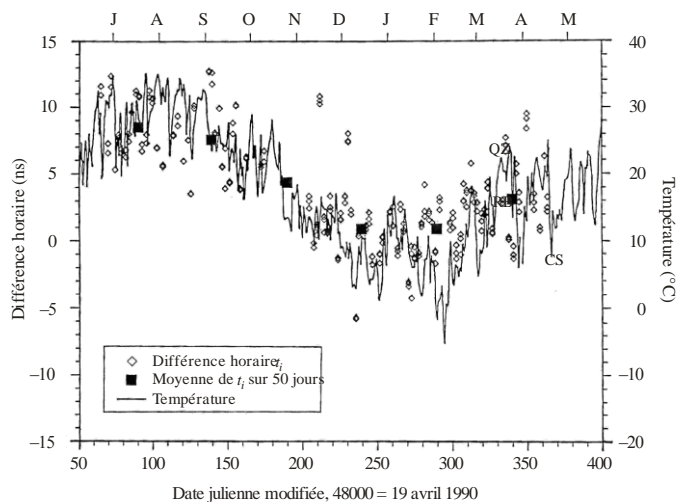


Fig. 12-4

La technique TWSTT est mise en œuvre dans huit laboratoires du temps européens et dans deux laboratoires du temps des Etats-Unis d'Amérique. Elle est aujourd'hui opérationnelle. Les résultats d'une expérience menée en 1997 font apparaître la même dépendance à la température dans les différences entre les mesures TWSTT et les mesures par observations simultanées des satellites du GPS que dans l'expérience de 1991.

#### 12.4.2 Comparaison avec le transfert de temps par lien laser

La synchronisation par laser à partir d'une orbite géostationnaire (LASSO, *Laser synchronization from stationary orbit*) était une technique qui devait permettre de comparer des horloges atomiques distantes avec une incertitude de 100 ps environ. Lors d'une expérience réalisée entre le 8 décembre 1992 et le 28 janvier 1993, deux horloges atomiques distantes, l'une située à l'Observatoire McDonald (Texas), l'autre à l'Observatoire de la Côte d'Azur (séparés de quelque 8 000 km), ont été comparées au moyen de la technique LASSO et de la technique des observations simultanées des satellites du GPS [Friedelance, 1994; Baumont *et al.*, 1993]. En raison des mauvaises conditions météorologiques, cinq sessions LASSO seulement ont été organisées. La liaison utilisée pour les observations simultanées des satellites du GPS ayant été calculée sans éphémérides précises ni mesures à double fréquence de l'ionosphère, on estime que son incertitude était de 10 ns.

La liaison GPS a été étalonnée au moyen d'un récepteur portable; la liaison LASSO, qui présentait une incertitude que l'on estime inférieure à 100 ps, n'était en revanche pas étalonnée. Cette comparaison des deux techniques présente une bonne cohérence, dans la limite des incertitudes en jeu, et une erreur systématique de 192 ns environ. Les mesures des différences entre les deux méthodes atteignent un écart de crête à crête de 15 ns environ. L'erreur quadratique moyenne des valeurs résiduelles de la moyenne est de 6 ns.

Une nouvelle génération de techniques de comparaison d'horloges à base de lasers est apparue ces dernières années, parmi lesquelles le T2L2 (*time transfer by laser link*/transfert de temps par lien laser, qui présente en théorie une incertitude de 30 ps) et le LTT (*laser time transfer*/transfert de temps par laser). Depuis 2008, ces deux expériences sont embarquées à bord d'un satellite Jason 2 pour la première et d'un satellite Compass pour la seconde. La technique ELT (*European laser timing*) devrait en outre être embarquée à bord de la station spatiale internationale ISS dans le cadre de la mission ACES de l'Agence spatiale européenne.

Bien que ces systèmes soient, par nature, inadaptés à des fonctions opérationnelles en raison de leur sensibilité aux conditions météorologiques, ils constituent sans aucun doute d'excellents outils pour mesurer la précision

du transfert du temps par les systèmes GNSS et par la technique TWSTT. Par ailleurs, comme ils permettent d'effectuer des comparaisons extrêmement précises entre des horloges au sol qui sont à la pointe de la technologie, on pourrait aussi les utiliser pour des essais de physique fondamentale.

## 12.5 Transfert du temps par GPS: évolutions récentes

### 12.5.1 Transfert du temps par observations simultanées des satellites du GPS à canaux multiples

Le transfert du temps par GPS a récemment connu une évolution majeure grâce au développement et à la mise à disposition de récepteurs du temps à canaux multiples, faisant suite à l'achèvement de la constellation GPS, à la baisse des prix des récepteurs et aux demandes des spécialistes des références horaires. Pendant les quinze années précédentes, le transfert du temps à l'échelle internationale reposait sur des récepteurs GPS à code C/A et à canal unique et sur un calendrier international d'observations simultanées d'une durée standard de 13 min [Allan et Weiss, 1980].

Les récepteurs d'ancienne génération ayant une mémoire limitée, on ne pouvait pas programmer plus de 48 enregistrements par jour, sachant qu'en pratique, le nombre d'enregistrements nécessaire était plus faible encore. Le choix s'est porté sur une observation d'un seul satellite avec une durée d'intégration de 13 min en raison de la vitesse de transmission du message de navigation GPS. L'émission d'un message complet peut en effet durer jusqu'à 12,5 min (25 pages). Ainsi, une intégration sur une durée de 13 min garantit que toutes les mesures d'observations simultanées comportent les mêmes données. Dans les premiers temps du GPS, on pouvait observer des discontinuités importantes entre deux messages de navigation consécutifs. La situation ayant évolué, il serait peut-être possible de raccourcir les périodes d'intégration.

Les récepteurs à code C/A et à canaux multiples examinés ici observent tous les satellites du GPS qui sont en visibilité et effectuent des enregistrements standard de 13 minutes, toutes les 16 minutes aux heures standard. Les données à canaux multiples produites sont mémorisées dans un fichier unique dont le format a été normalisé [Allan et Thomas, 1994; Lewandowski *et al.*, 1996]. Les heures standard sont décalées de 4 min tous les jours de façon à suivre les orbites sidérales du GPS.

Par convention, les heures standard ont pour référence le 1<sup>er</sup> octobre 1997 [Report on GPS and GLONASS standardization, 1997]. Ces mêmes heures standard sont utilisées dans le programme international de poursuite par observations simultanées à un seul canal du BIPM, qui est publié tous les six mois. Les instruments qui appliquent la procédure «all-in-view» suivent également le programme international à un seul canal, ce qui simplifie beaucoup leur introduction parallèle dans le système actuel des observations à un seul canal. Il est probable que les observations à un seul canal disparaîtront sous peu et que le programme périodique du BIPM n'aura donc plus lieu d'être.

S'il est possible en théorie d'observer simultanément jusqu'à 12 satellites du GPS, cinq seulement environ sont visibles au-dessus de 15° en zone urbaine moyenne (et présentent donc un intérêt pour le transfert du temps). Etant donné qu'un jour compte 89 périodes utiles de 16 minutes, 89 poursuites peuvent être observées dans chaque canal. En utilisant toutes les observations disponibles au-dessus de 15° (5 environ par période de 16 minutes), il est donc possible d'observer 445 poursuites par jour. Toutes ces poursuites peuvent être utilisées pour des liaisons régionales d'observations simultanées. Dans le cas de très longues lignes de base, entre deux continents, on peut obtenir une centaine de poursuites d'observations simultanées par la technique des canaux multiples.

L'augmentation d'un facteur 10 du nombre d'observations simultanées dans le mode à canaux multiples par rapport au mode monocanal devrait permettre d'améliorer notablement la qualité du transfert du temps et des fréquences. On peut espérer un gain théorique de la stabilité égal à  $(10)^{1/2} = 3,2$  pour des durées d'intégration où le bruit blanc de phase est prépondérant [Lewandowski *et al.*, 1997].

Cela étant, les observations à canaux multiples peuvent subir des variations systématiques, qui sont essentiellement dues à des effets de l'environnement sur l'antenne. Ce phénomène devrait avoir, sur tous les canaux, une incidence analogue à celle décrite précédemment pour les récepteurs à un seul canal, à l'exception des effets dus aux trajets multiples. Le gain obtenu grâce aux observations à canaux multiples ainsi que les effets systématiques sont illustrés ci-dessous au moyen d'une comparaison expérimentale.

La liaison horaire entre le BIPM et le NMi Van-Swinden Laboratorium (VSL) de Delft (Pays-Bas) a été envisagée dans le cadre d'une comparaison expérimentale, car elle présente une ligne de base de 400 km environ [Lewandowski *et al.*, 1997]. Les deux laboratoires sont équipés de récepteurs GPS à canaux multiples et les coordonnées de leur antenne au sol sont exprimées dans le Repère international de référence terrestre (ITRF) avec une incertitude de 0,3 m.

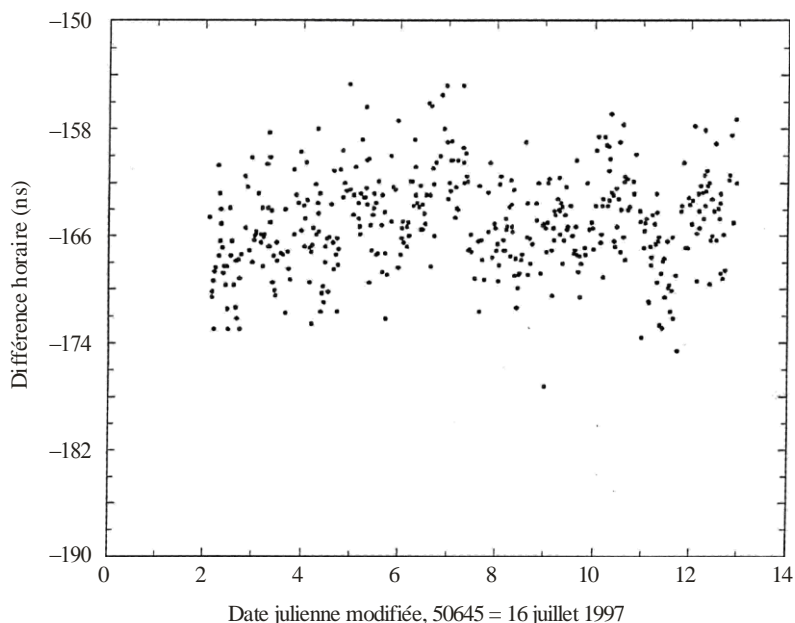
Dans les deux laboratoires, les récepteurs étaient connectés à des horloges HP5071A et avaient été étalonnés à l'aide d'un récepteur portable. Les mêmes récepteurs ont été utilisés (pour une même durée de 10 jours) pour le transfert de signaux horaires monocanal et à canaux multiples. Nous avons recueilli environ 38 observations utiles par jour en mode à un seul canal et environ 350 en mode à canaux multiples (Figures 12-5 et 12-6). Le niveau de bruit de 3 ns environ était analogue sur les deux liaisons.

Examinons maintenant l'avantage apporté par l'augmentation du nombre d'observations simultanées journalières de 38 à 350. Le gain théorique en stabilité est de  $(350/38)^{1/2} = 3,0$ . Ce gain est visible sur les courbes de stabilité pour des durées d'intégration inférieures à 104 s dans le cas du transfert de signaux horaires sur une distance de 400 km, et également dans le cas d'une comparaison sur le même site, au BIPM (voir les courbes de stabilité reproduites à la Figure 12-7). La comparaison à canaux multiples subit un effet systématique, qui devient manifeste à  $3 \times 10^4$  s environ (courbe 2).

Cet effet diminue lorsque les antennes stabilisées en température sont activées (courbe 3) (§ 12.5.2). Dans la comparaison à un seul canal (courbe 1), les effets systématiques ne sont pas visibles, car ils sont certainement couverts par le niveau de bruit, qui est plus élevé. Il ressort de cette analyse que l'avantage apporté par les observations à canaux multiples est très fortement limité par l'instabilité des temps de propagation des récepteurs et permet à peine d'effectuer une comparaison d'unités HP5071A de qualité moyenne à leur niveau de performance maximal pour des durées d'intégration de cinq jours, ce qui correspond à l'intervalle standard pour le calcul du temps TAI.

FIGURE 12-5

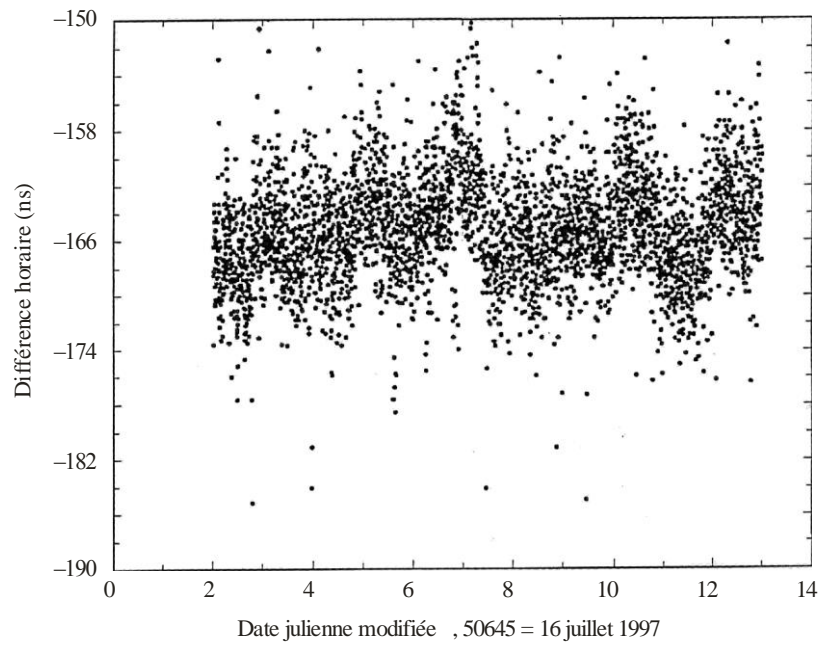
**(horloge du BIPM – horloge du VSL) par la méthode des observations simultanées des satellites du GPS à un seul canal**



Sat\_time\_freq-12-05

FIGURE 12-6

(horloge du BIPM – horloge du VSL) par la méthode des observations GPS simultanées à canaux multiples



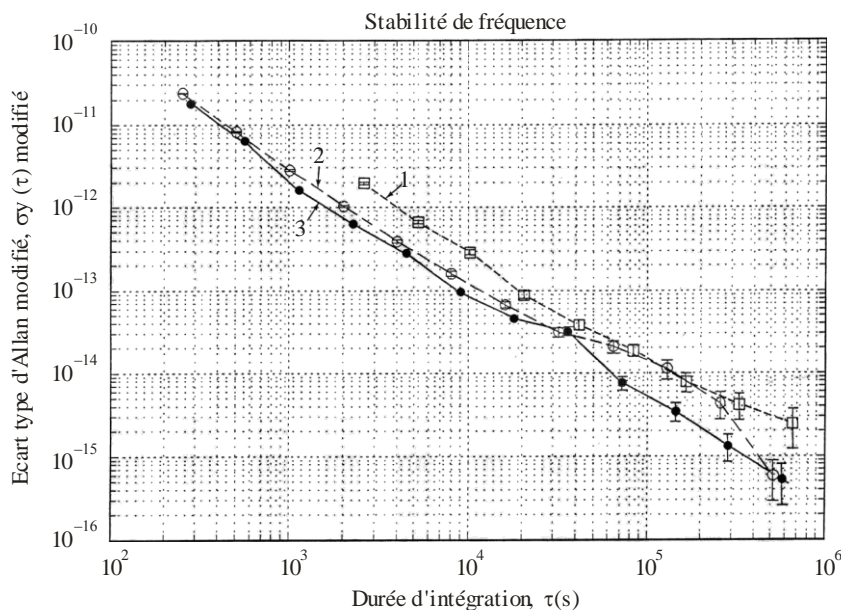
Sat\_time\_freq-12-06

FIGURE 12-7

**Comparaison sur un seul site de deux récepteurs horaires GPS situés au BIPM  
(deux antennes distinctes sur un seul site)**

**Ecart type d'Allan modifié de:**

- a) comparaison à un seul canal sans stabilisation de la température d'antenne;
- b) comparaison à canaux multiples sans stabilisation de la température d'antenne;
- c) comparaison à canaux multiples avec stabilisation de la température des antennes



Sat\_time\_freq-12-07

### 12.5.2 Antennes stabilisées en température

Il est aujourd'hui bien documenté et généralement admis que les équipements de réception du temps du GPS, et plus particulièrement leur antenne, sont sensibles aux conditions environnementales [Lewandowski et Tourde, 1990]. Pour les systèmes conventionnels de réception du temps du GPS, cette sensibilité peut s'exprimer par un coefficient de 0,2 ns/°C environ et peut atteindre 2 ns/°C. Cette sensibilité a effectivement été un obstacle majeur, compte tenu de l'objectif annoncé: une précision du transfert du temps du GPS de 1 ns. Une comparaison de la méthode GPS CV (observations simultanées des satellites du GPS) et de la technique TWSTT (comparaison d'horloges par aller et retour sur satellite), sur une période d'une année environ, fait apparaître un effet saisonnier crête à crête de 8 ns (Figure 12-4), qui est imputable à l'instabilité de l'équipement horaire GPS. La solution à ce problème n'a pas été trouvée immédiatement. Aujourd'hui encore, la quasi-totalité des équipements horaires GPS utilisés dans les laboratoires de métrologie du temps en subit les effets. Plus important encore: l'avantage apporté par la mise en œuvre récente des observations à canaux multiples «all in view» est très fortement limité par l'instabilité des temps de propagation des récepteurs.

Aucune solution pratique n'ayant été trouvée pour résoudre le problème par des moyens électroniques, une autre démarche a été proposée [Lewandowski *et al.*, 1997]: protéger l'antenne à l'aide d'une étuve thermostatée. La stabilisation de la température de l'antenne vise en tout premier lieu à maintenir les composants essentiels à une température constante.

Les prototypes d'étuve ont été construits au BIPM. Dans la foulée, une version commerciale appelée «antenne stabilisée en température» (TSA, *temperature-stabilized antenna*) est apparue sur le marché. Une comparaison préliminaire sur un seul site, réalisée au BIPM, entre deux récepteurs GPS à canaux multiples équipés d'antennes TSA montre que l'erreur systématique est annulée et fait apparaître une stabilité relative de fréquence égale à quelques multiples de  $10^{-15}$  pour des durées d'intégration d'une journée environ (voir la Figure 12-7). Cette amélioration a permis de tirer pleinement parti du transfert de signaux horaires à canaux multiples et de s'approcher de la qualité qu'on pouvait attendre de l'utilisation de la phase de la porteuse GPS.

### 12.5.3 Utilisation de la phase de la porteuse GPS

Le service GPS international ou IGS (*international GPS service*), qui a été créé pour améliorer les applications géodésiques du GPS, a joué un rôle majeur dans les avancées les plus récentes en matière de transfert du temps par GPS. En règle générale, les récepteurs de transfert du temps actuels rejettent les données relatives à la phase de la porteuse et aux pseudo-distances une fois l'algorithme de transfert du temps exécuté. Or, en conservant ces données, il est possible d'appliquer un post-traitement au moyen d'algorithmes plus perfectionnés et ainsi d'améliorer en théorie la précision du transfert de signaux horaires et de fréquence. Ces données sont déjà utilisées en géodésie pour le radiopéage différentiel. Le verrouillage sur la phase de la porteuse réduit les effets de la propagation par trajets multiples. Grâce aux récepteurs à canaux multiples disponibles aujourd'hui et à l'utilisation de techniques basées sur la double différence des observations simultanées (techniques classiques en géodésie), deux sites peuvent tout à fait maintenir une phase de porteuse commune. L'utilisation de mesures des retards ionosphériques en association avec des corrections troposphériques compensées de façon nominale permettrait d'atteindre une stabilité de fréquence de  $1 \times 10^{-15}$  avec des durées d'intégration de l'ordre d'une journée [Schildknecht *et al.*, 1990; Overney *et al.*, 1998]. Ce niveau de qualité est grosso modo celui qui est requis pour la comparaison des étalons primaires de fréquence actuels. Pour y parvenir, les mesures journalières ne suffisent pas: il est nécessaire d'effectuer des mesures en continu.

Plusieurs expériences pilotes ont déjà démontré les avantages que présentent les mesures de la phase de la porteuse pour les comparaisons de fréquence [Overney *et al.*, 1998; Petit *et al.*, 1996]. Le format RINEX (*receiver independent exchange format*/format d'échange indépendant du récepteur) [Gurtner, 1994] est bien adapté à la consignation des données de pseudo-distance et de phase de la porteuse pour les systèmes GPS et GLONASS. Si le récepteur du temps en a la capacité, il est préconisé qu'un fichier contenant des données de pseudo-distance et de phase de la porteuse au format RINEX soit généré toutes les 15 s pour tous les satellites en visibilité. Ce fichier peut ensuite servir au traitement ultérieur de données horaires et de fréquence de précision.

Les métrologistes du temps et les géodésistes, qui ont une meilleure compréhension des signaux de phase de la porteuse du GPS, ont récemment uni leurs forces et lancé une initiative importante appelée «projet pilote IGS/BIPM». Dans le cadre de ce projet, ils étudient des comparaisons de temps et de fréquence de précision au moyen de mesures de phase et de code GPS. Un problème majeur concerne la résolution des ambiguïtés de phase pour les applications horaires, qui limitent la précision de cette technique.

Il importe en outre de noter que la phase de la porteuse est également soumise à des instabilités du temps de propagation dans le matériel. Ici encore, pour tirer pleinement avantage de cette technologie prometteuse, les temps de propagation dans les divers éléments de l'équipement de réception doivent être stabilisés et mesurés.

### 12.6 Utilisation du système GLONASS

Le système GLONASS [Gouzhva *et al.*, 1992] ressemble beaucoup au système GPS. Jusqu'à récemment, la communauté internationale de la métrologie du temps y avait toutefois rarement recours en raison du manque de récepteurs du commerce adaptés à ses besoins. Aujourd'hui, les choses évoluent, et les premières liaisons horaires internationales permanentes ont été établies. Des récepteurs du temps GLONASS sont aujourd'hui disponibles et conformes aux mêmes normes que les récepteurs du temps GPS. Plusieurs études ont été menées en vue de comparer la qualité des mesures de code C/A à un seul canal qu'offrent les deux systèmes [Lewandowski *et al.*, 1993]. Toutes ces études montrent qu'ils affichent une qualité analogue en ce qui concerne les liaisons régionales. Les antennes des récepteurs GLONASS présentent une dépendance à la température comparable à celle observée pour le système GPS. Pour les liaisons intercontinentales, il est nécessaire d'utiliser des éphémérides GLONASS précises issues d'un post-traitement.

Certaines études récentes montrent qu'il est possible d'effectuer des comparaisons d'horloges à base de mesures du code C/A à canaux multiples combinant les deux systèmes GPS et GLONASS [Lewandowski *et al.*, 1997]. Les récepteurs de codes multiples à plusieurs canaux utilisant les deux systèmes sont parfaitement opérationnels, y compris sur le plan du logiciel. Ils utilisent un logiciel et un format standard [Lewandowski *et al.*, 1996]. La comparaison avec d'autres récepteurs du temps GPS a permis d'évaluer leur qualité du point de vue de la métrologie. De plus, l'utilisation combinée des systèmes GPS et GLONASS en mode multicanal permet quasiment (la constellation GLONASS étant incomplète) de doubler le nombre d'observations. Le gain



de stabilité des comparaisons d'horloges à canaux multiples GPS + GLONASS par rapport aux mesures du GPS à un seul canal est de quatre environ. A lui seul, le mode à canaux multiples du GPS fournit un gain de stabilité de trois environ.

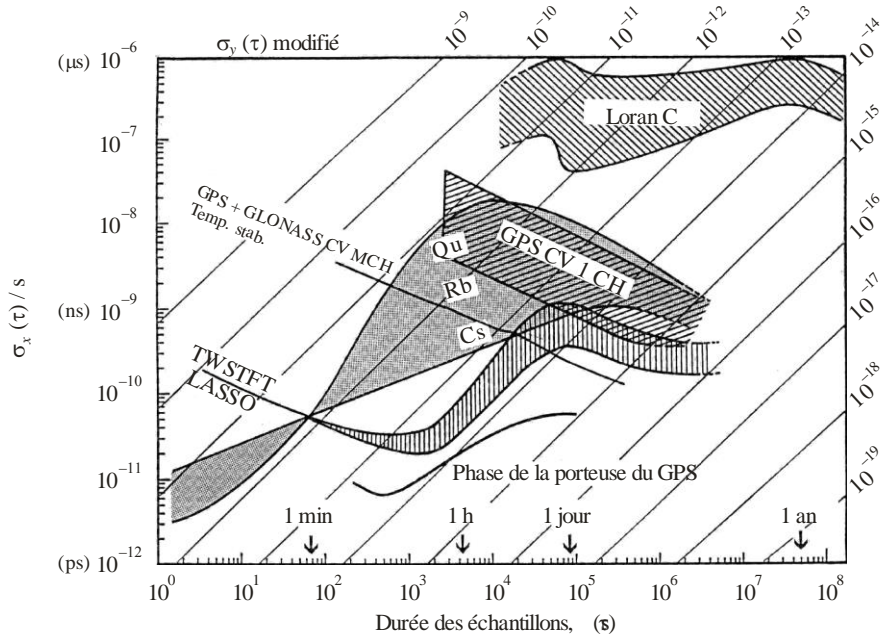
L'utilisation du code P du système GLONASS présente manifestement un avantage: la mesure de base du code ou «pseudo-distance» est moins bruitée. La précision de la mesure de pseudo-distance étant de l'ordre de 1/100ème de la longueur d'onde du code considéré, les pseudo-distances mesurées sur le code P du GLONASS sont précises à 1 ns (la longueur d'onde du code P du GLONASS étant de 30 m soit environ 100 ns), tandis que le code C/A du GLONASS ne permet d'atteindre qu'une précision de 10 ns (la longueur d'onde du code C/A du GLONASS étant de 300 m soit environ 1 000 ns). Des essais ont récemment été réalisés au moyen de récepteurs du temps disponibles depuis peu et capables de traiter le code P du GLONASS. En dépit des difficultés liées aux multiples fréquences mises en œuvre dans le système GLONASS, qui occasionnent des délais de propagation différents dans le matériel, les premiers résultats sont très encourageants [Azoubib *et al.*, 1998].

### 12.7 Conclusion

Le système GPS est devenu l'instrument polyvalent et incontournable des spécialistes des références horaires. Source de temps et outil de comparaison d'horloges, ce système de transfert de signaux horaires atteindra bientôt une précision d'une nanoseconde par jour. La Figure 12-8 propose de comparer les nouvelles techniques GPS à plusieurs autres méthodes, notamment à la méthode standard des observations simultanées actuellement en vigueur. On notera toutefois que des études sont en cours et que le nombre de ces nouvelles techniques devrait progresser considérablement.

FIGURE 12-8

**Comparaison entre quelques techniques nouvelles de transfert de signaux horaires et la méthode classique de comparaison d'horloges par observations simultanées à un seul canal des satellites du GPS.**  
 (Les données d'horloge et les données concernant LORAN-C, la technique TWSTFT et la phase de la porteuse du GPS ont été reproduites avec l'aimable autorisation de D. W. Allan.)



La méthode actuelle de comparaison d'horloges, qui repose sur des mesures du code C/A émis par les satellites du GPS, est essentiellement limitée par des instabilités du matériel et, sur de longues distances, par l'incertitude associée à la détermination des retards ionosphériques. L'incertitude associée aux comparaisons à un seul canal est de 3 à 4 ns – parfois plus – pour des temps d'intégration d'une journée, ce qui est à peine suffisant pour comparer des horloges du commerce de moyenne qualité de type HP5071A. De toute évidence, cette technique n'est pas suffisamment précise pour la comparaison des étalons de fréquence haut de gamme utilisés dans les laboratoires. La phase de la porteuse du GPS, qui offre une plus grande précision, présente le plus fort potentiel en matière de comparaisons de fréquence. Une fois mise en service, elle permettra de comparer des étalons de fréquence de laboratoire de grande qualité et pourra aussi servir à l'évaluation d'autres techniques de transfert du temps et des fréquences. Elle devrait permettre d'atteindre une stabilité de l'ordre de 100 ps/jour, au minimum. Si les ambiguïtés liées à la phase de la porteuse du GPS peuvent être levées, cette technique pourra être utilisée non seulement pour les comparaisons de fréquence, mais aussi pour les comparaisons de temps.

Il convient également de tenir compte de l'évolution du système GPS lui-même. Le programme de «modernisation du GPS» reposera sur un deuxième, puis un troisième signal codé à usage civil. L'ajout de fréquences civiles permettant de réaliser des mesures de l'ionosphère plus précises et de mieux lever les ambiguïtés liées à la phase de la porteuse du GPS, ce programme de modernisation conduira à des avancées significatives. De plus, il se peut que la future constellation du GPS contienne un plus grand nombre de satellites et que leurs signaux soient plus puissants. Conformément à la directive présidentielle de mars 1996, la dégradation du signal appelée «disponibilité sélective» a été supprimée. Cette décision a considérablement amélioré la diffusion directe du temps via le système GPS.

Pour ce qui est d'améliorer la précision des récepteurs du temps, le développement d'un système d'étalonnage intégré dans les récepteurs constitue une étape majeure. Ce système représente la meilleure solution pour résoudre les difficultés actuelles liées aux instabilités du temps de propagation dans les équipements de référence horaire reposant sur le GPS. En attendant la généralisation de ces systèmes d'étalonnage intégrés, les assemblages électroniques d'antenne, les éventuels amplificateurs de ligne extérieurs et probablement les câbles d'antenne doivent être stabilisés en température. L'utilisation d'enceintes thermostatées devrait améliorer non seulement la comparaison d'horloges par observations simultanées du code C/A et la diffusion du temps, mais aussi les comparaisons de fréquence par mesure de la phase de la porteuse.

Indéniablement, en combinant les mesures de code GPS et de code GLONASS dans les récepteurs du temps, on pourrait améliorer les comparaisons d'horloges à l'échelle internationale. Le système GLONASS offre la possibilité d'accéder au code P (code de précision) sur deux fréquences et donc de mesurer les retards ionosphériques. De plus, les signaux GLONASS sont diffusés sur 48 fréquences (24 à l'avenir) contre deux seulement pour le GPS. Il est donc plus robuste sur le plan de la radiodiffusion et plus résistant aux brouillages. Cela étant, sur le plan de la fiabilité et de la continuité de fonctionnement, le système GLONASS doit être amélioré.

Comment les choses vont-elles évoluer? Sur les quarante-cinq dernières années, la qualité des étalons de fréquence atomiques a progressé d'un ordre de grandeur en moyenne tous les sept ans. A l'avenir, la comparaison de ces étalons sur de longues distances passera nécessairement par une amélioration du transfert de signaux horaires et de fréquence. D'après les informations fournies dans le présent chapitre, les techniques évoluées de transfert du temps par GPS devraient permettre de relever ce défi.

## Références

- ALLAN D. W. [novembre 1987], «Time and frequency (time-domain) characterization, estimation and prediction of precision clocks and oscillators», *IEEE Trans. Ultrasonics., Ferroelectrics., Fre. Contr.*, UFFC-34, p. 647-654.
- ALLAN D. W. et LEPEK A. [1993], «Trends in international timing», *Proc. 7th European Frequency and Time Forum*, p. 221-227.
- ALLAN D. W. et THOMAS, C. [1994], «Technical directives for standardization of GPS time receiver software», *Metrologia*, Vol. 31, 1, p. 69-79.

- ALLAN D. W. et WEISS M. M. [1980], «Accurate time and frequency transfer during common-view of a GPS satellite», *Proc. 1980 Frequency Control Symp.*, p. 334-336.
- AZOUBIB J., LEWANDOWSKI W. et DE JONG G., [1998], «A new approach to international time transfer: multi-channel multi-code GPS+GLONASS common-view observations», *Proc. 12th European Frequency and Time Forum*, 1998, p. 87-93.
- BAERISWYL P., SCHILDKNECHT T., UTZINGER J. et BEUTLER G. [1995], «Frequency and time transfer with geodetic GPS receivers: First results», *Proc. 9th European Frequency and Time Forum*, p. 46-51.
- BAUMONT F., FRIEDELANCE P., GRUDLER P., VEILLET C., WIAANT L., LEWANDOWSKI W. et PETIT G. [1993], «Preliminary report on the comparison of LASSO and GPS time transfers», *Proc. 7th European Frequency and Time Forum*, p. 641-643.
- BIPM [1997], *Report of the open forum on GPS and GLONASS standardization*, présenté à la 6<sup>e</sup> réunion du CGGTTS, 1997 (disponible sur demande).
- BUISSON J. A., OAKS O. J. et LISTER M. J. [1985], «Remote calibration and time synchronization (R-CATS) between major European time observatories and the US Naval Observatory using GPS», *Proc. 17th Annual. P7TI Meeting*, p. 201-222.
- BUTTERLINE E. [January, 1993], «Reach out and time someone», *GPS World*, p. 32-40.
- FRIDELANCE P. [1994], *L'expérience LASSO*, thèse de doctorat, Université Paris 6, Paris, France.
- GOUZHVA J. *et al.* [juillet/août 1992], «High-precision time and frequency dissemination with GLONASS», *GPS World*, p. 40-49.
- GURTNER W. [1994], *RINEX: The receiver independent exchange format version 2*, Astronomical Institute, Université de Berne, Berne, Suisse.
- KIRCHNER D., RESSLER H., GRUDLER P., BAUMONT F., VEILLET C., LEWANDOWSKI W., HANSON W., KLEPCZYNSKI W. et UHRICH, P. [septembre, 1993], «Comparison of GPS common-view and two-way satellite time transfer over a baseline of 800 km», *Metrologia*, Vol. 30, 3, p. 183-192.
- KLEPCZYNSKI W. J. [1996], «GPS for precise time and time interval measurement», *Global Positioning System: Theory and Applications*, Vol. III, dirigé par B. W. Parkinson et J. J. Spilker Jr., Washington, DC, American Institute of Aeronautics and Astronautics, chapitre 17, p. 483-500.
- LEWANDOWSKI W. [1996], *Determination of the differential time correction between GPS time equipment located at the Observatoire de Paris, Paris, France, and the United States Naval Observatory*, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique, BIPM, Rep. BIPM-96/10.
- LEWANDOWSKI W., AZOUBIB J., DE JONG G., NAWROCKI J. et DANAHER, J. [...], «A new approach to international time and frequency comparisons: "All-in-view" multi-channel GPS+GLONASS observations», *Proc. ION GPS97*, p. 1085-1091.
- LEWANDOWSKI W., AZOUBIB J., GEVORKYAN A. G., BOGDANOV P. P., KLEPCZYNSKI W. J., MIRANIAN M., DANAHER J., KOSHELYAEVSKY N. B. et ALLAN D. W. [1996], «A contribution to the standardization of GPS and GLONASS time transfers», *Proc. 27th P7TI Meeting*, p. 367-383.
- LEWANDOWSKI W., MOUSSAY P., CHERENKOV G. T., KOSHELYAEVSKY N. B. et PUSHKIN, S. B. [1993], «GLONASS common-view time transfer», *Proc. 7th European Frequency and Time Forum*, p. 147-151.
- LEWANDOWSKI W., MOUSSAY P., DANAHER J., GERLACH R. et LEVASSEUR E. [1997], «Temperature-protected antennas for satellite time transfer receivers», *Proc. 11th European Frequency and Time Forum*, p. 498-503.
- LEWANDOWSKI W., PETIT G. et THOMAS C. [avril 1993], «Precision and accuracy of GPS time transfer», *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 42, p. 474-478.
- LEWANDOWSKI W. et THOMAS C. [juillet 1991], «GPS time transfer», *Proc. IEEE*, Vol. 79, 7, p. 991-1000.
- LEWANDOWSKI W. et TOURDE R. [1990], «Sensitivity to the external temperature of some GPS timing receivers», *Proc. 22<sup>nd</sup> P7TI Meeting*, p. 307-316.
- OVERNEY F., PROST L., DUDLE D., SCHILDKNECHT T., BEUTLER G., DAVIS J. A., FURLONG J. M. et HETZEL P. [1998], «GPS time transfer using geodetic receivers (GeTT): Results on European baselines», *Proc. 12th European Frequency and Time Forum*.

- PETIT G., MOUSSAY P. et THOMAS C. [1996], «GPS time transfer using carrier-phase and P-code measurements», *Proc. 10th European Frequency and Time Forum*, p. 279-285.
- SCHILDKNECHT T., BEUTLER G., GURTNER W. et ROTHACHER M. M. [1990], «Toward sub-nanosecond GPS time transfer with geodetic GPS receivers: First results», *Proc. 4th European Frequency and Time Forum*, p. 335-346.

## CHAPITRE 13

**TECHNIQUES GÉODÉSIQUES FAISANT APPEL À  
DES MESURES DE CODE ET DE PHASE DU SYSTÈME GPS**

	<i>Page</i>
13.1 Introduction .....	174
13.2 Considérations touchant au matériel et à l'instrumentation .....	175
13.2.1 Composants d'un satellite du GPS .....	175
13.2.2 Installations des antennes de poursuite du GPS.....	177
13.2.3 Câbles d'antenne et connexions .....	178
13.2.4 Récepteurs GPS .....	179
13.2.5 Evaluation des effets de la propagation par trajets multiples et test du système .....	179
13.2.6 Etalonnage des retards associés aux stations de poursuite.....	180
13.3 Stratégies d'analyse des données .....	181
13.3.1 Equation d'observation du GPS .....	181
13.3.2 Méthodes applicables aux solutions faisant appel à un réseau mondial .....	183
13.3.3 Repères de référence et modèles applicables aux termes de correction .....	184
13.3.4 Radiorepérage ponctuel précis (PPP, <i>Precise point positioning</i> ) .....	185
13.3.5 Effets des erreurs sur les solutions de l'équation horaire .....	186
13.4 Produits horaires et échelles de temps de l'IGS .....	187
13.4.1 Ensembles de produits disponibles .....	187
13.4.2 Echelles de temps de l'IGS .....	189
13.5 Evaluation de la qualité de fonctionnement par analyse des discontinuités au changement de jour .....	192
13.6 Comparaisons avec des résultats indépendants de transfert du temps par aller-retour .....	197
13.7 Evaluation de la qualité de la comparaison d'horloges .....	198
13.8 Evolutions futures .....	200

### 13.1 Introduction

Depuis plus d'une vingtaine d'années, les méthodes reposant sur le GPS constituent le fondement de la majorité des techniques de transfert du temps et des fréquences de grande précision. L'approche classique adoptée pour la conservation du temps universel coordonné (UTC) repose essentiellement sur des analyses de deux types de données: pseudo-distances à une seule fréquence (code C/A) d'une part, observations simultanées (CV, *common view*), d'autre part. Ces analyses sont effectuées dans l'hypothèse d'une annulation de la plupart des erreurs systématiques [Allan et Weiss, 1980]. Avec le remplacement à grande échelle des récepteurs d'ancienne génération à un seul canal par des unités à canaux multiples, la qualité des données produites a été améliorée et les comparaisons intercontinentales par observations simultanées ont ainsi atteint des niveaux d'incertitude de quelques ns, pour des intervalles d'intégration supérieurs à cinq jours [Lewandowski *et al.*, 1997]. Cela étant, le développement parallèle de méthodes géodésiques de haute précision reposant sur des observations de la phase de la porteuse du GPS à double fréquence a mis en évidence une reproductibilité du radiopérage de l'ordre du centimètre pour des durées d'intégration d'une journée [Zumberge *et al.*, 1997]. Dans l'hypothèse où ces résultats, qui concernent le radiopérage, s'appliquent aussi aux durées équivalentes des trajets de la lumière (~33 ps), les techniques géodésiques reposant sur la phase de la porteuse du GPS ouvrent, de toute évidence, des possibilités de comparaison horaire à l'échelle mondiale d'une précision inférieure à la nanoseconde, fait largement reconnu depuis les années 1990. Effectivement, il a été démontré que ces techniques offrent une précision proche de ~100 ps à chaque époque, dans des cas favorables, pour des intervalles d'analyse d'une journée [Ray et Senior, 2003]. Mais en raison des incertitudes liées à l'étalonnage des instruments, la capacité de comparaison horaire en valeur absolue reste limitée à >1 ns [Petit *et al.*, 2001]. Outre une plus grande précision (équivalente à une stabilité de fréquence), la méthode géodésique se prête bien à la diffusion du temps et des fréquences à l'échelle mondiale. De plus, cette approche est compatible avec la conception opérationnelle de base du système GPS (moyennant le remplacement du message de diffusion GPS par des données plus précises), contrairement aux observations simultanées, de type point à point par nature, qui se dégradent à mesure que la distance de la ligne de base augmente.

Pour mettre en œuvre la méthode géodésique, il faut essentiellement disposer d'observations GPS bifréquence des pseudo-distances (habituellement avec le code P décodé) et de la phase de la porteuse; en principe, ces observations doivent être consignées toutes les 30 secondes et conjuguées à un modèle d'analyse complet de la propagation des signaux unidirectionnels non différenciés, précis au millimètre. Les erreurs types sur les mesures de phase et de code sont respectivement de 1 cm et de 1 m environ, à chaque fréquence. Pour ces deux valeurs observables, on estime que les erreurs dues à la propagation par trajets multiples prédominent sur le bruit thermique [Langley *et al.*, 1996]. Du fait de leur plus grande précision, les données de phase sont de la plus haute importance pour les applications modernes de géodésie. Un échantillonnage continu est donc nécessaire pour garantir la continuité d'une phase fiable pendant toute la durée du passage d'un satellite. Les solutions de radiopérage relatif font souvent appel à des algorithmes de double différence, qui permettent d'éliminer tous les effets liés aux horloges des satellites et des récepteurs de poursuite. En général, en raison de leur très faible incidence, les données de code ne sont pas utilisées. Cela étant, il est nécessaire d'en tenir compte dans l'analyse des données non différenciées et l'extraction des estimations d'horloge afin de séparer les paramètres de décalage d'horloge et les paramètres d'ambiguïté de cycle de phase, ce qui ne serait pas réalisable autrement. De cette façon, la combinaison des observations permet de bien lisser les données de code bruitées en tirant parti des données de phase beaucoup plus précises. Pour chaque couple récepteur-satellite, la qualité des estimations d'horloge est optimisée en garantissant des intervalles de données de phase continue exemptes des plus longs sauts de cycle possibles, ce qui réduit au minimum le nombre de paramètres d'ambiguïté. Les récepteurs de géodésie modernes poursuivent au moins douze satellites en simultané, chaque passage pouvant atteindre 4 h environ. Outre les problèmes d'obstacles à la visibilité, les poursuites les plus délicates se situent généralement aux plus petits angles d'élévation, là où la puissance du signal est la plus faible et où les temps de propagation dans l'atmosphère et les effets de trajets multiples sont les plus importants et les plus variables.

Le présent chapitre se propose d'examiner la méthode géodésique de comparaison d'horloges via le système GPS et donne un état des lieux des évolutions récentes. En principe, les mêmes méthodes s'appliquent à d'autres systèmes mondiaux de navigation par satellite (GNSS). Bien que la constellation GLONASS en vigueur ait été peu exploitée à cette fin, on considère généralement que le système européen GALILEO pourrait renforcer les capacités actuelles de façon significative.

## 13.2 Considérations touchant au matériel et à l'instrumentation

Tout élément situé sur le parcours du signal GPS (parfois même à proximité) peut avoir une incidence sur la qualité de mesure du temps et des fréquences. S'agissant du transfert de signaux horaires, les considérations matérielles qui s'appliquent à une installation de géodésie suivent fondamentalement les mêmes règles de bon sens que celles touchant à tout autre équipement de référence horaire. La configuration globale de l'équipement de réception doit être aussi simple que possible, la stabilité des composants du système et de leur environnement exigeant une vigilance maximale. Dans la mesure du possible, les nouveaux composants doivent être testés de façon approfondie avant d'être mis en service. En limitant les modifications à un seul composant à la fois, on peut en évaluer plus facilement les conséquences.

### 13.2.1 Composants d'un satellite du GPS

Les informations fondamentales nécessaires à l'utilisation du GPS figurent dans le document de contrôle des interfaces ICD-GPS-200, ou dans le document plus récent de spécification des interfaces IS-GPS-200. Les positions des satellites qui sont diffusées correspondent aux centres de phase équivalents des réseaux d'antennes des émetteurs. Cela étant, en interne, le système GPS calcule les orbites dynamiques pour le centre de masse de chaque satellite et relie les résultats aux centres de phase. Les décalages vectoriels nécessaires à cette opération ne sont pas fournis de façon officielle, étant donné que l'utilisateur ICD n'en a pas besoin.

A noter toutefois que la National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) publie ces décalages sur son site internet ([earth-info.nga.mil/GandG/sathtml/](http://earth-info.nga.mil/GandG/sathtml/)).

Les utilisateurs qui calculent leurs propres éphémérides de satellite et valeurs d'horloge doivent aussi faire l'hypothèse d'un ensemble de décalages du centre de phase des antennes. Lorsque l'on compare des valeurs d'horloge de satellite provenant de sources différentes, il est nécessaire de prendre en compte les éventuels écarts entre les composantes radiales des décalages de centre de phase pris comme hypothèse, car ces décalages se traduisent par des erreurs systématiques dans les valeurs d'horloge. La situation se complique encore en raison de la difficulté à mesurer avec précision les décalages d'antenne réels [Mader et Czopek, 2002], ce qui a donné lieu à l'utilisation de différents jeux de valeurs.

Contrairement au message de diffusion du GPS, les orbites de précision du service GPS international (IGS) sont déterminées par rapport au centre de masse des satellites. Lorsque le premier satellite Block IIR a été lancé en 1997, il est apparu que son décalage dans la direction de la Terre différait de celui des engins spatiaux d'ancienne génération. Pour que les calculs d'horloge des satellites effectués par les différents centres d'analyse de l'IGS puissent être comparés et combinés de façon cohérente, l'IGS a donc adopté un jeu de valeurs commun pour les vecteurs de décalage des centres de phase des antennes. Ce jeu de valeurs, entré en vigueur le 29 novembre 1998, se présente comme suit:

Blocks II & IIA	$dx = 0,279 \text{ m}$	$dy = 0,000 \text{ m}$	$dz = 1,023 \text{ m}$	[IGS]
Block IIR	$dx = 0,000 \text{ m}$	$dy = 0,000 \text{ m}$	$dz = 0,000 \text{ m}$	[IGS]

C'est le système habituel de coordonnées fixes par rapport au satellite qui s'applique: l'axe des z est orienté du centre de masse du satellite vers le centre de la Terre, l'axe des y est aligné sur les panneaux solaires et l'axe des x est orthogonal. Le calcul effectué par Mader et Czopek [Mader et Czopek, 2002] donne un décalage dz de 1,66 m pour un réseau d'antennes Block IIA non utilisé situé au sol. Les décalages utilisés par le système GPS en exploitation sont analogues à ceux de l'IGS pour les Blocks II et IIA:

Blocks II & IIA	$dx = 0,2794 \text{ m}$	$dy = 0,0000 \text{ m}$	$dz = 0,9519 \text{ m}$	[GPS]
-----------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------

mais différent de façon significative et sont distincts pour chaque engin spatial de type Block IIR, le décalage maximal étant compris entre 1,5 et 1,6 m environ pour dz. Si l'utilisateur souhaite comparer les valeurs d'horloge d'un satellite fournies par l'IGS avec d'autres résultats reposant sur des décalages d'antenne différents, il doit appliquer des corrections conformément à la formule suivante:

$$C_i(\text{utilisateur}) = C_i(\text{IGS}) - \{ [ dz_i(\text{utilisateur}) - dz_i(\text{IGS}) ] / c \} \quad (13-1)$$

où:

$dz_i(\text{IGS})$ : valeur de dz fournie par l'IGS pour le satellite BPA<sub>i</sub>

- $dz_i$ (utilisateur): valeur de  $dz$  fournie par l'utilisateur pour le satellite  $PBA_i$   
 $C_i$ (IGS): valeur de l'horloge fournie par l'IGS pour  $BPA_i$   
 $C_i$ (utilisateur): valeur de l'horloge fournie par l'utilisateur pour  $BPA_i$   
 $c$ : vitesse de la lumière (299 792 458 m/s).

Les diffusions GPS s'effectuent actuellement dans deux bandes L, dont les fréquences centrales nominales sont:

$$L_1 = 154 \cdot 10,23 = 1\,575,42 \text{ MHz et } L_2 = 120 \cdot 10,23 = 1\,227,60 \text{ MHz.}$$

La bande  $L_1$  contient une modulation par le code C/A à 1,023 MHz ainsi qu'un code P1(Y) chiffré (10,23 MHz) et un code de message à 50 bit/s.

Sur la porteuse  $L_2$ , seul un code de précision P2(Y) à 10,23 MHz est actuellement modulé, sachant qu'un second code à usage civil doit être ajouté dans un futur proche.

Bien que théoriquement en phase, les différentes modulations du GPS présentent inévitablement entre elles des erreurs systématiques non nulles. La plus importante est le biais associé à la pseudo-distance entre les modulations P1 et P2. La dispersion crête à crête des biais P1-P2 est supérieure à 10 ns. Etant donné que les horloges diffusées sont déterminées pour la combinaison linéaire P1/P2 qui permet d'éliminer les perturbations liées à l'ionosphère (combinaison dite «ionosphere-free») (voir plus bas), les utilisateurs à une seule fréquence doivent corriger les biais P1-P2 au moyen des valeurs  $T_{GD}$  figurant dans le message de navigation (voir ICD-GPS-200). Lorsque l'IGS produit ses cartes ionosphériques, il fournit également ses propres observations des biais P1-P2, appelées «biais différentiels de code» (DCB). Pour référence, la relation théorique entre les valeurs  $T_{GD}$  diffusées et les DCB de l'IGS est donnée par:

$$\text{DCB} = [1 - (77/60)^2] * T_{GD} \quad (+ \text{décalage d'échelle}) \quad (13-2)$$

pour chaque satellite, si ce n'est que les deux échelles diffèrent d'un décalage variable dans le temps qui s'explique par le fait que la valeur moyenne des DCB est fixée à zéro par l'IGS (par convention), tandis que les valeurs  $T_{GD}$  diffusées sont données par rapport à un biais instrumental absolu empirique. La différence d'échelle, en unités  $T_{GD}$ , décroît progressivement: évaluée à -4,3 ns début 2000, elle s'établissait à -7,1 ns mi-2004. Les valeurs  $T_{GD}$  diffusées sont révisées et actualisées tous les trimestres, tandis que l'IGS surveille et publie ses DCB en continu, à intervalles d'une journée.

La procédure de correction via les  $T_{GD}$  part de l'hypothèse que le biais P1-P2 est adapté aux utilisateurs à une seule fréquence aussi bien pour le code C/A que pour le code P1, ce qui n'est pas parfaitement exact en raison des erreurs systématiques P1-C/A, qui présentent un intervalle crête à crête de 5 ns environ. Cet aspect n'est pas pris en considération dans le document ICD-GPS-200. En revanche, l'IGS tient compte de ces erreurs systématiques depuis 1999, car certains récepteurs géodésiques poursuivent le code C/A et non le code P1, tandis que d'autres indiquent les valeurs de  $[C/A + (P2-P1)]$  au lieu du code P2 réel, les deux présentant des biais différents [Ray *et al.*, 2000]. Pour éviter de combiner des données présentant différents biais liés aux satellites, ce qui aurait pour effet de dégrader les produits horaires de satellite de l'IGS (ainsi que les résultats du radiorepérage ponctuel précis qui en découlent), l'IGS a mis en œuvre des procédures de traitement et d'analyse de divers jeux de données GPS pour veiller à la cohérence de l'ensemble. A l'avenir, à mesure que de nouvelles modulations seront ajoutées aux signaux GPS, des valeurs d'étalonnage tenant compte des biais inter-signaux additionnels devraient en principe être intégrées dans le message de navigation diffusé, et être surveillées par l'IGS.

Une autre difficulté liée aux signaux émis par les satellites provient du diagramme de phase du faisceau. On considère en général que le diagramme de phase est parfaitement hémisphérique, mais de nombreuses données viennent contredire cette hypothèse [Schmid et Rothacher, 2003]. Cette approximation, qu'elle concerne les satellites ou les antennes de poursuite (voir ci-après) conduit essentiellement à des erreurs dans l'échelle du repère GPS (dans la direction radiale) de l'ordre de 10 à 15 ppb environ (10 à 15 x 10<sup>-9</sup>). Ce phénomène, s'il a une incidence importante sur de nombreuses applications de géodésie, n'est probablement pas pertinent pour la plupart des opérations de comparaison d'horloges, tout du moins tant que la précision de l'étalonnage des instruments reste inférieure à la nanoseconde.



Un dernier point à noter en ce qui concerne les horloges des satellites GPS est l'arrêt, le 2 mai 2000 à 04 h 00 UTC, du système de disponibilité sélective consistant à dégrader intentionnellement les signaux horaires du GPS. Avant cette date, les variations d'horloges sur une journée étaient de l'ordre de 80 ns environ (valeurs quadratiques moyennes). Depuis, la stabilité des horloges est celle qui est intrinsèquement liée au système de référence horaire de chaque satellite, soit un gain supérieur à un ordre de grandeur. Outre la possibilité donnée aux utilisateurs civils de déterminer la position et l'heure grâce au GPS avec une précision beaucoup plus grande, tous les utilisateurs, en particulier ceux qui exploitent les produits beaucoup plus précis de l'IGS, peuvent aujourd'hui interpoler les valeurs des horloges du GPS publiées sous forme de tableau avec un niveau d'erreur beaucoup plus faible qu'auparavant.

### 13.2.2 Installations des antennes de poursuite du GPS

En règle générale, les équipements de géodésie sont installés dans des édifices ultra-stables, qui constituent la base physique des mesures à long terme de haute précision. La conception de ces édifices fait fréquemment appel à des piliers de béton enfouis en profondeur, à des structures de barres métalliques entrecroisées et à des mâts en acier. A noter aussi l'installation dans des immeubles, en particulier pour les applications horaires.

On trouvera des informations sur les différents types d'édifices à l'adresse [igs.cb.jpl.nasa.gov/network/monumentation.html](http://igs.cb.jpl.nasa.gov/network/monumentation.html).

Un marqueur géodésique matérialisé par un point gravé, par rapport auquel les coordonnées de la station sont référencées, est intégré dans l'édifice de façon permanente et sécurisée. La meilleure méthode consiste à mettre aussi en place un réseau de contrôle géodésique local de haute précision, qui est chargé de surveiller les déplacements relatifs de la station GPS primaire.

Pour bien distinguer les déplacements à proximité immédiate de l'édifice des effets à plus grande échelle, le réseau de commande doit en principe intégrer des marqueurs permanents couvrant une gamme de distances de ~10-100 m jusqu'à 10 km environ. Pour être opérationnel, le réseau local doit être inspecté périodiquement et peut intégrer d'autres stations GPS fonctionnant en continu. L'antenne GPS doit être fermement fixée directement au-dessus du marqueur géodésique de sorte que sa position soit fixe et que l'excentricité du point de référence du marqueur au point de référence de l'antenne (ARP, *Antenna Reference Point*) puisse être mesurée avec une précision inférieure à 1 mm.

Par convention, l'IGS a désigné un point ARP pour chaque modèle d'antenne. Contrairement aux centres de phase électrique L1 et L2, ce point doit être accessible physiquement pour que les mesures d'inspection locale puissent être effectuées. Pour la plupart des antennes dotées d'un anneau d'arrêt (*choke ring*), l'ARP est un point situé à la base du préamplificateur, sur la partie inférieure de l'instrument. Les dimensions physiques reliant l'ARP et les centres de phase du signal ainsi que les diagrammes de phase du front d'onde mesuré sont conservés dans des fichiers mis à disposition par l'IGS. Les informations concernant l'excentricité du marqueur et les dimensions de l'antenne sont nécessaires à l'analyse des données d'observation et à la conversion des résultats par rapport aux coordonnées de référence de la station.

Lorsqu'un niveau de qualité géodésique optimal n'est pas requis, comme c'est le cas dans de nombreuses installations du temps, on peut se dispenser de l'édifice et du marqueur géodésiques. Les coordonnées de la station sont alors directement référencées par rapport au point ARP (ou parfois au centre de phase). Cette façon de faire est certes commode, mais elle entraîne généralement une modification des coordonnées de la station à chaque changement de modèle d'antenne. Il est donc préférable de suivre les lignes directrices de géodésie standard à chaque fois que cela est réalisable.

Les applications de géodésie, y compris les comparaisons d'horloges de haute précision, nécessitent d'utiliser des antennes de qualité supérieure à double fréquence. Les installations les plus fréquentes sont conçues sur la base d'un ensemble d'anneaux d'arrêt (*choke rings*) concentriques. Plusieurs fabricants proposent ce type d'équipement, avec des dimensions internes légèrement différentes. Ces antennes sont spécialement conçues pour recevoir des signaux à double fréquence tout en atténuant fortement les signaux proches de l'horizon ou au-dessous, là où les réflexions par trajets multiples sont habituellement les plus préjudiciables [Schupler et Clark, 2001]. Pour les applications de comparaison d'horloges, en particulier, il est essentiel que l'antenne soit positionnée de façon à réduire au minimum les signaux de propagation par trajets multiples, et tout spécialement les trajets multiples dans les signaux de code. En règle générale, il faut pour cela un horizon sans obstacle dans toutes les directions et éviter de placer des objets réfléchissants à proximité de l'antenne. Le

signal L2 étant particulièrement sensible aux rétrodiffusions provenant de l'arrière de l'antenne [Byun *et al.*, 2002], si celle-ci ne peut pas être placée directement contre une surface non réfléchissante, le mieux est généralement de la fixer le plus haut possible au-dessus de tout environnement (en gardant à l'esprit les exigences de stabilité et d'accès). En tout état de cause, il faut absolument éviter que la distance entre le centre de phase de l'antenne et la surface qui se trouve à l'arrière soit un multiple de la demi-longueur d'onde en bande L, en particulier dans le champ proche de l'antenne [Elosegui *et al.*, 1995]. Une vue dégagée du ciel jusqu'à 10° d'élévation au minimum, et de préférence 5°, est nécessaire pour permettre des déterminations géodésiques fiables de la position de l'antenne.

Il y a eu quelques signalements, peu étayés, faisant état de fortes variations dans les estimations d'horloges géodésiques en fonction de la température pour certaines antennes GPS, signalements accompagnés de recommandations préconisant l'utilisation d'unités stabilisées en température. Il est possible que ce phénomène survienne dans certains équipements bas de gamme à une seule fréquence, mais des essais directs effectués sur une antenne standard AOA Dorne Margolin de type «choke ring» n'ont pas permis de détecter une sensibilité particulière des estimations d'horloges aux variations de température de l'antenne. Ray et Senior [2001] ont fixé une limite supérieure de 2 ps/°C pour la sensibilité à la température à court terme (sur une journée), limite qu'ils ont par la suite étendue à <10,1 ps/°C pour les éventuelles composantes à long terme [Ray et Senior, 2003]. Des niveaux de sensibilité encore plus faibles, 0,17 ps/°C ou moins, ont été calculés par [Rieck *et al.*, 2003] pour un modèle de type «choke ring» fabriqué par Ashtech.

A l'instar des antennes d'émission des satellites (mais le phénomène est connu depuis beaucoup plus longtemps), les diagrammes de faisceau des antennes de poursuite du GPS aussi s'écartent du modèle idéal parfaitement hémisphérique [Schupler *et al.*, 1994]. Cela se traduit, sur le plan pratique, par le fait que le centre de phase de l'antenne, et donc le point de référence géodésique, dépend de la direction du signal émis par le satellite considéré. En règle générale, les variations d'azimut sont ignorées et seule la dépendance par rapport à l'angle d'élévation est prise en compte. Cette façon de procéder a toutes les chances d'évoluer dans le futur. L'IGS a élaboré des ensembles de corrections de phase à appliquer aux analyses de données pour chaque modèle d'antenne. La non-prise en compte de ces effets peut entraîner des erreurs systématiques dans les calculs de l'altitude des stations pouvant atteindre ~10 cm. La démarche actuellement adoptée par l'IGS fait appel aux corrections différentielles de la phase définies par rapport à l'antenne AOA Dorne Margolin T de type «choke ring», qui fait office d'étalon de référence, et la majorité des valeurs mesurées suit la méthodologie de Mader [1998], dont on trouve une description sur le site internet [www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/](http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/).

Les diagrammes de phase des émetteurs des satellites ne sont pas pris en compte. L'IGS est passée à l'utilisation de diagrammes d'antenne absolus pour les satellites et les stations de poursuite [Schmid et Rothacher, 2003].

De nombreuses antennes GPS permanentes sont équipées de radômes, qui protègent les éléments «choke ring» contre la neige ou d'autres débris. En effet, ces corps étrangers ont toujours un effet préjudiciable sur la qualité de fonctionnement du système, essentiellement parce qu'ils faussent les phases du front d'onde, ce qui peut entraîner des décalages décelables de la position de la station, en particulier des décalages verticaux. Les différences de position mesurées avec et sans radôme peuvent atteindre plusieurs cm. Les essais ont montré que les radômes coniques posent en général de gros problèmes, tandis que certains types de radômes hémisphériques semblent avoir des effets minimes. Actuellement, l'IGS ne tient pas compte de la présence de radômes dans la publication de ses tables de centres de phase des antennes, toutes étant considérées sans radôme, même lorsque des corrections du centre de phase liées aux radômes ont été mesurées. La meilleure façon de procéder consiste donc en général à ne pas utiliser de radômes, sauf nécessité absolue, auquel cas il est conseillé de choisir un radôme hémisphérique, dont les effets ont été mesurés et jugés mineurs.

### 13.2.3 Câbles d'antenne et connexions

Le chemin de câble de l'antenne GPS vers le récepteur doit être aussi court que possible et composé d'un seul segment continu. Aucun répartiteur de signaux ou autre composant ne doit y être inséré afin de garantir une puissance et une adaptation d'impédance optimales. Il y a eu très peu d'essais pour étudier les effets des répartiteurs ou d'autres éléments analogues sur la qualité de fonctionnement des horloges; cela étant, d'après des données empiriques, il semble que l'ajout de tels éléments soit une source de perturbations. (Dans [Rieck *et al.*, 2003], les auteurs présentent des résultats concernant la sensibilité à la température, mais ils ne mentionnent pas d'études portant sur d'autres effets, notamment ceux dus à la propagation par trajets multiples.) Il convient de sceller correctement les connecteurs pour les protéger contre les moisissures et les expositions.

Les câbles choisis doivent présenter des caractéristiques de bonne stabilité de phase, une faible sensibilité à la température ( $< 0,1 \text{ ps}/^\circ\text{C}/\text{m}$ ) et de faibles pertes. Les chemins de câble à découvert sont à éviter au profit de conduites enterrées. De façon générale, il est toujours souhaitable de réduire l'exposition aux influences environnementales.

#### 13.2.4 Récepteurs GPS

Les récepteurs GPS géodésiques doivent fournir des observations des pseudo-distances et de la phase de la porteuse aux deux fréquences L1 et L2. A des fins de comparaison d'horloges, le récepteur doit aussi être en mesure d'accepter en entrée une fréquence de référence et un signal à 1 ips (1 impulsion par seconde) provenant d'un étalon externe et de les utiliser scrupuleusement pour ses fonctions horaires internes. Ces fonctionnalités sont souvent des options d'achat qui viennent compléter un équipement géodésique standard. A la fréquence L1, la plupart des récepteurs du réseau IGS poursuivent le code P1 plutôt que le code C/A plus restreint. L'expérience des modèles à code C/A seulement est donc limitée. Aucun essai de comparaison côte à côte de la performance des horloges pour différents types de poursuite de code n'a été signalé à ce jour, mais pour les quelques modèles d'utilisation courante, aucune différence détectable n'a été observée [Ray et Senior, 2003]. La condition essentielle à remplir est que la sensibilité aux trajets multiples dans les signaux de code reste faible.

Plusieurs études ont montré les effets préjudiciables des variations de température sur la stabilité de fréquence des récepteurs GPS [Rieck *et al.*, 2003], [Overney *et al.*, 1997], [Petit *et al.*, 1998], [Bruyninx et Defraigne, 1999], [Schildknecht et Dudle, 2000]. Les sensibilités types sont de l'ordre de  $\pm 100 \text{ ps}/^\circ\text{C}$ , avec de grandes variations d'un équipement à l'autre, même pour des modèles identiques. Il est donc essentiel, pour les applications de temps et de fréquence de haute qualité, que l'équipement de réception GPS soit conservé dans un lieu à environnement contrôlé, les fluctuations de température étant de préférence maintenues inférieures à  $\sim 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ .

De nombreux récepteurs offrent à l'utilisateur la possibilité de régler diverses fonctions, comme l'activation du lissage du code embarqué ou l'asservissement de l'horloge interne du récepteur sur le temps du GPS. Ce dernier réglage doit être désactivé pour obtenir des comparaisons de temps pertinentes. De même, il est généralement conseillé de désactiver le lissage du code, qui peut être mieux géré lors de l'analyse ultérieure des données.

A l'instar de tout système de diffusion du temps et des fréquences, il est essentiel que la fréquence de référence et les signaux à 1 ips en entrée restent mutuellement cohérents et qu'ils soient correctement isolés des sources de brouillage. Le cas échéant, on attachera une attention toute particulière à la génération des fréquences d'entrée secondaires. De plus, les tops à 1 ips doivent généralement rester proches du temps du GPS (faible tolérance  $< 30 \text{ ms}$  par exemple) pour que le récepteur fonctionne correctement.

Les données d'observation des systèmes GNSS sont transmises dans le monde entier au format RINEX (*receiver independent exchange format*/format d'échange indépendant du récepteur), dont on trouve une description à l'adresse <ftp://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/data/format/rinex210.txt>. Ce document contient également les spécifications de format des messages de navigation, des données météorologiques et d'autres données afférentes. En règle générale, il est conseillé d'archiver les fichiers de données brutes natives qui proviennent du récepteur, en plus des fichiers RINEX, dans l'éventualité où un problème de conversion serait découvert ultérieurement. Les utilisateurs de références horaires peuvent convertir les fichiers RINEX au format de fichier requis pour les observations simultanées («format CGGTTS») au moyen d'un outil développé par l'Observatoire royal de Belgique [Defraigne *et al.*, 2001].

#### 13.2.5 Evaluation des effets de la propagation par trajets multiples et test du système

Une fois qu'une station géodésique a été installée, il convient, avant de la mettre en service, de procéder à une évaluation approfondie de la qualité de ses données. Les problèmes éventuellement détectés doivent être résolus dans toute la mesure possible. L'UNAVCO (University Navstar Consortium) a développé un site web très bien documenté ([www.unavco.org/facility/facility.html](http://www.unavco.org/facility/facility.html)), qui contient de bons conseils et des rapports de tests d'équipements applicables aux stations GPS qui fonctionnent en continu. Le consortium tient également à jour toute une gamme d'outils logiciels. En particulier, le kit «teqc» est un outil indispensable à la gestion et à l'examen des données GPS brutes, qui offre notamment des fonctions de conversion de fichiers RINEX, d'édition de données et de contrôle de la qualité [Estey et Meertens, 1999]. Il est possible, à partir des résultats

fournis par teqc, de détecter la plupart des problèmes fondamentaux touchant à la qualité des données: sauts de cycle excessifs, saisie de données incomplète, trous dans la couverture du ciel, etc. Les diagnostics MP1 et MP2 réalisés par ce logiciel mesurent les variations (valeurs quadratiques moyennes) des trajets multiples des signaux de code aux fréquences L1 et L2 respectivement, dans l'hypothèse où les effets des trajets multiples des signaux de phase sont négligeables. Une erreur systématique inconnue étant remise à zéro à chaque passage du satellite, ces métriques ne sont pas sensibles aux signaux à périodes longues qui peuvent être importants pour les références horaires. En outre, en raison des comportements intrinsèquement différents selon les types de récepteurs, les mesures MPi n'ont généralement pas un caractère absolu et ne peuvent pas être facilement comparées d'un site à l'autre. Cela étant, l'observation de variations anormalement importantes des trajets multiples en fonction de l'angle d'élévation et dans le temps peut être le signe de problèmes au niveau du site ou de la configuration. Dans un cas au moins, de fortes corrélations ont été constatées entre les variations des mesures MP2 et des modifications de la qualité de fonctionnement des horloges géodésiques [Ray et Senior, 2003].

Lorsqu'il est possible de produire des solutions de radiopéage ponctuel précis (PPP) (voir ci-après) pour le comportement de l'horloge du récepteur à partir des produits horaires et de satellite de l'IGS, la comparaison d'une solution «code seulement» avec une solution «code+phase» peut mettre en évidence des problèmes imprévus concernant les données de pseudo-distance. Autre mesure diagnostique utile: le niveau des discontinuités dans les estimations d'horloge entre des intervalles d'analyse consécutifs d'une journée [Ray et Senior, 2003], qui traduit essentiellement les variations du bruit dû aux trajets multiples dans les pseudo-distances (voir ci-après). D'autres méthodes de recherche des erreurs liées aux trajets multiples – telles que la répartition céleste des résidus après ajustement d'une solution géodésique ou les variations à haute fréquence dans les rapports signal/bruit du GPS – portent généralement sur les effets de phase plutôt que sur les pseudo-distances. Le test classique reste toutefois la répétition d'un schéma d'erreur particulier, d'un jour sur l'autre, à la période nominale d'un jour sidéral, 23 h 56 min 4 s, qui correspond approximativement au cycle de répétition de la géométrie satellite-sol.

### 13.2.6 Etalonnage des retards associés aux stations de poursuite

Pour comparer les valeurs d'horloge de deux stations différentes au moyen d'un système intermédiaire, il est nécessaire de connaître avec précision les délais de propagation internes de tous les matériels d'instrumentation en jeu. Cette procédure est appelée «étalonnage». En règle générale, les méthodes d'étalonnage sont regroupées en deux catégories: d'une part, les déterminations absolues, qui consistent à mesurer un ensemble point à point d'erreurs systématiques (biais) au moyen d'un simulateur de signaux GPS, qui a lui-même été étalonné avec précision; d'autre part, les déterminations différentielles, qui consistent en une comparaison côte à côte par rapport à un autre système analogue pris comme référence. Dans la pratique, les deux méthodes sont utilisées. Un petit nombre de récepteurs géodésiques a été étalonné en mode absolu. Ces récepteurs sont ensuite transportés et servent de référence pour étalonner, en mode différentiel, un nombre beaucoup plus important de récepteurs en service [Petit *et al.*, 2001].

Un type de récepteur GPS géodésique, le Ashtech Z-XII3T, a été étalonné en mode absolu à partir d'un simulateur situé dans les locaux de l'U.S. Naval Research Laboratory ([White *et al.*, 2001], [Petit *et al.*, 2001], [Plumb *et al.*, 2005]). Les résultats absolus sont conformes, dans la limite de leurs incertitudes de 3,5 ns environ, à une mesure différentielle effectuée par rapport à un récepteur du temps classique déjà étalonné reposant sur le principe des observations simultanées [Petit *et al.*, 2000]. Il semble que le simulateur GPS lui-même constitue la source d'erreur principale de la procédure d'étalonnage absolu [Plumb et Larson, 2005]. Des étalonnages différentiels ultérieurs par rapport à un étalon absolu peuvent être réalisés avec des incertitudes plus faibles, de l'ordre de 1,6 ns [G. Petit, communication privée].

Par souci de commodité pour les utilisateurs, les données GPS issues d'un récepteur étalonné peuvent être ajustées pour éliminer les biais instrumentaux lors de la génération des fichiers d'échange RINEX. La façon de procéder, telle que spécifiée, consiste à indiquer la correction de décalage d'horloge, dT, dans un champ réservé, pour chaque enregistrement de l'époque des observations, et à modifier les données d'observation conformément aux formules suivantes dans le but d'en assurer la stricte cohérence:

$$\text{heure}(\text{corrigée}) = \text{heure} - dT \quad (13-3)$$

$$\text{PR}(\text{corrigé}) = \text{PR} - (dT * c) \quad (13-4)$$

$$\text{phase(corrigée)} = \text{phase} - (dT * \text{fréq}) \quad (13-5)$$

où:

- heure: époque des observations
- PR: pseudo-distance (*pseudorange*)
- phase: phase de la porteuse pour la fréquence «fréq».

Le fait d'indiquer la valeur de correction du décalage d'horloge pour chaque époque des observations permet de reconstituer, si nécessaire, les observations d'origine. Cela étant, cette possibilité offerte par le format RINEX est limitée par la spécification du format des valeurs de décalage d'horloge, qui sont tronquées à la nanoseconde la plus proche. Si des corrections d'étalonnage d'horloge inférieures à la nanoseconde sont appliquées sans recourir au champ RINEX réservé au décalage d'horloge, les valeurs de correction correspondantes doivent figurer sous forme de commentaire dans l'en-tête du fichier RINEX.

### 13.3 Stratégies d'analyse des données

C'est à Counselman et Shapiro que l'on attribue généralement la possibilité d'atteindre, grâce au GPS, des niveaux de précision géodésique supérieurs de plusieurs ordres de grandeur aux niveaux que l'on pensait obtenir à l'origine [Counselman et Shapiro, 1979]. En appliquant des techniques astronomiques développées pour l'interférométrie à très grande ligne de base (VLBI), ils ont proposé d'utiliser la phase de la porteuse comme variable d'observation GPS principale en lieu et place de la pseudo-distance. Il a été démontré qu'en suivant très précisément les variations de la phase du signal GPS, il était possible de déterminer les positions relatives avec une précision de l'ordre du centimètre, contre quelques dizaines de mètres auparavant. Peu après, Bossler *et al.* [1980] ont décrit des méthodes permettant de résoudre les ambiguïtés de phase entières de la porteuse. Les autres développements qui ont rapidement suivi se sont largement inspirés des méthodes et des modèles de la VLBI, dont la plupart sont directement applicables au système GPS. En termes d'analyse, les principales différences concernent, d'une part, les paramètres additionnels du GPS associés aux orbites et les coefficients de pondération relatifs appliqués aux observations du temps de propagation de groupe (facteurs essentiels pour la VLBI, mais pas pour le GPS, à l'exception des solutions de l'équation horaire) et, d'autre part, les observations de la phase (primordiales pour le GPS, mais généralement intégrées sous forme de dérivées par rapport au temps assorties d'un petit coefficient de pondération dans le cas de la VLBI).

#### 13.3.1 Equation d'observation du GPS

Les étapes fondamentales de la réduction des données d'observation du GPS sont décrites dans le document ICD-GPS-200 ainsi que dans de nombreuses publications ultérieures. Pour un couple donné satellite-station de poursuite, l'équation d'observation des pseudo-distances pour chaque fréquence observée,  $i$ , peut s'écrire comme suit:

$$P_i = R + c(C_r - C_s) + I_i + T + e_i \quad (i=1,2) \quad (13-6)$$

où:

- $i = 1, 2$  correspond aux deux fréquences  $L_1$  et  $L_2$
- $R$ : distance entre les centres de phase du satellite et du récepteur
- $c$ : vitesse de la lumière dans le vide
- $C_r$ : erreur de synchronisation d'horloge de la station de poursuite à l'instant de réception du signal (y compris toutes les composantes de temps de propagation interne)
- $C_s$ : erreur d'horloge du satellite d'émission à l'instant d'émission
- $I_i$ : retard ionosphérique
- $T$ : retard dû à l'atmosphère neutre (essentiellement la troposphère)
- $e_i$ : erreur de mesure (y compris le bruit thermique et d'autres sources telles que la propagation par trajets multiples).

Le bruit thermique de l'antenne et du récepteur impose une limite inférieure théorique à l'amplitude des erreurs de mesure, qui dépend en partie de la technique de poursuite employée par le récepteur. Des expériences à ligne de base nulle, dans lesquelles la quasi-totalité des effets externes comme la propagation par trajets multiples peut être éliminée, donnent des valeurs quadratiques moyennes des bruits de mesure de pseudo-distance  $C/A$  et de phase de la porteuse L1 égales respectivement à 4 cm et 0,2 mm, pour un couple de récepteurs Ashtech Z-12 [Langley, 1996]. Cela étant, les effets locaux liés à l'environnement dépassent toujours le bruit de mesure réel. Pour le traitement géodésique, les valeurs standard *a priori* des erreurs en mode pseudo-distance et en mode phase de la porteuse sont respectivement de 1 m et 1 cm environ, d'après les résidus après ajustement observés [Lichten et Border, 1987], [Zumberge *et al.*, 1997].

L'ionosphère a un effet dispersif (retard à peu près proportionnel à l'inverse du carré de la fréquence). Les retards ionosphériques sont de signes opposés pour la pseudo-distance et pour la phase. La combinaison linéaire des deux fréquences:

$$P3 = 2,5457 * P1 - 1,5457 * P2 \quad (13-7)$$

est, au premier ordre, dépourvue d'effets ionosphériques (voir toutefois [Kedar *et al.*, 2003] pour une étude de l'effet du second ordre). Ainsi:

$$P3 = R + c(C_r - C_s) + T + e \quad (13-8)$$

où:

$e$ : erreurs combinées de  $P1$  et  $P2$ .

L'équation d'observation pour les variables de phase est identique (exprimée en unités de distance) moyennant l'ajout d'un terme d'ambiguïté ( $N_i \lambda_i$ ) pour tenir compte du nombre inconnu de cycles de phase à chaque fréquence porteuse. La distance,  $R$ , est exprimée en termes de coordonnées géocentriques des centres de phase de l'antenne du satellite ( $X, Y, Z$ ) et du récepteur ( $x, y, z$ ) par la formule suivante:

$$R = \sqrt{(X - x)^2 + (Y - y)^2 + (Z - z)^2} \quad (13-9)$$

Si, au lieu des centres de phase, on utilise les coordonnées du centre de masse du satellite ou du marqueur géodésique du récepteur, il convient d'appliquer les excentricités appropriées, déterminées à partir de mesures externes. Le message de diffusion du GPS fournit les valeurs de position (centre de phase) et d'horloge de chaque satellite en fonction du temps, avec une précision de quelques mètres. A partir des observations simultanées d'au moins quatre satellites différents et d'un modèle rudimentaire du retard troposphérique, il est possible de déterminer la position et l'heure d'un récepteur d'utilisateur avec une précision <10 m à chaque époque. Si la position de l'utilisateur est connue *a priori* et que seule la valeur d'horloge est inconnue, il suffit de recueillir les observations d'un seul satellite.

Les comparaisons d'horloges par la méthode des observations simultanées sont réalisées en calculant la différence entre les données simultanées provenant de deux récepteurs dont les coordonnées sont connues. L'erreur d'horloge du satellite est ensuite éliminée, de même que la quasi-totalité de l'erreur de position du satellite et du retard troposphérique. Les mesures conventionnelles par observations simultanées reposent seulement sur les pseudo-distances calculées à partir des signaux  $C/A$  à une seule fréquence; dans ce cas, les erreurs de modélisation de l'ionosphère limitent en général la précision du calcul des différences des horloges distantes. Ce problème peut être en grande partie résolu en utilisant la combinaison linéaire des observations  $P1$  et  $P2$  avec code  $P$  décodé, comme dans la méthode des observations simultanées  $P3$  [Defraigne *et al.*, 2001]. En règle générale, la précision des comparaisons d'horloges par la méthode des observations simultanées diminue à mesure que la distance entre les récepteurs augmente, car l'annulation de mode commun des termes non pris en compte est de moins en moins efficace. Pour atténuer ces effets, la méthode des observations simultanées pour le temps UTC a été modifiée ces dernières années. Les orbites et les cartes ionosphériques très précises de l'IGS ([igs.cb.jpl.nasa.gov](http://igs.cb.jpl.nasa.gov)) sont aujourd'hui utilisées pour calculer des corrections permettant de contrer ces effets [G. Petit, communication privée]. Il est possible d'affiner encore les calculs, par exemple en utilisant des modèles troposphériques plus précis et en tenant compte des mouvements géophysiques (déplacements dus aux marées, etc.). Cela étant, ces modifications incrémentales ne permettent pas de mettre

à profit la précision inhérente des observations de la phase; aussi les résultats horaires obtenus par la méthode des observations simultanées ne peuvent-ils pas atteindre le niveau de la technique géodésique intégrale, en particulier sur des intervalles inférieurs à 1 jour environ.

Dans les analyses géodésiques, les données de navigation diffusées ne sont pas utilisées, si ce n'est éventuellement pour le premier niveau d'examen et de modification des données. Tous les effets géophysiques connus sont calculés à partir des meilleurs modèles *a priori*, et les inconnues restantes sont ajustées à partir des données en utilisant des paramétrages physiquement plausibles. Dans la plupart des cas, il est préférable de prendre comme valeurs d'horloge et d'orbite du satellite les valeurs très précises publiées par l'IGS, car il est peu probable que l'utilisateur GPS lambda fasse mieux. Cette façon de procéder simplifie considérablement l'estimation des horloges des récepteurs, à condition toutefois de respecter strictement les conventions et les modèles de l'IGS.

### 13.3.2 Méthodes applicables aux solutions faisant appel à un réseau mondial

Dans le cas où les horloges et les orbites des satellites ne proviennent pas d'une source externe, mais doivent être calculées, nous examinons dans un premier temps certaines procédures, notamment celles utilisées par les centres d'analyse de l'IGS, qui consistent à réduire les données issues d'un réseau de poursuite mondiale en vue d'obtenir de grands ajustements simultanés. Pour déterminer les orbites et les horloges des satellites, il faut disposer d'un réseau mondial de récepteurs répartis de façon adéquate. Les intervalles d'analyse sont généralement segmentés en traitements par lots de 24 heures pour coïncider avec les fichiers journaliers RINEX standard, qui contiennent en principe des observations effectuées entre 00:00:00 et 23:59:30. (A noter que par convention, l'IGS utilise le temps du GPS pour horodater tous ses fichiers de données.) Pour certains types de solution, il est possible de constituer des intervalles d'analyse de plusieurs jours en regroupant plusieurs intervalles successifs d'une journée. La première étape consiste à examiner les fichiers de données provenant de chaque station. Il est en effet nécessaire de modifier les éventuelles erreurs, de corriger ou de signaler clairement les sauts de phase de porteuse, d'ajuster les données pour tenir compte de légers décalages d'horodatage dans certains types de récepteurs, et de corriger les biais de pseudo-distance lorsque P1 et P2 ne sont pas disponibles. Une fois examinées, les données sont en principe reformatées et stockées dans des fichiers à accès direct adaptés au système d'analyse choisi.

Toutes les méthodes d'ajustement géodésique partent de l'hypothèse qu'il existe suffisamment de données *a priori* précises, que l'estimation des paramètres est linéaire et que, par conséquent, les méthodes des moindres carrés généralisées s'appliquent. A défaut de sources plus satisfaisantes, il est possible d'utiliser le message de navigation diffusé. Si nécessaire, pour une nouvelle station par exemple, on pourra recourir à l'itération de la solution pour satisfaire à la condition de linéarité. On imprime aux orbites des satellites *a priori* une rotation en les faisant passer d'un repère fixe par rapport à la croûte terrestre (repère utilisé pour les orbites figurant dans le message de diffusion ainsi que par l'IGS) vers un repère inertiel géocentrique (ECI, *Earth-centered inertial*) en se basant sur un ensemble supposé de valeurs de paramètres d'orientation de la Terre (EOP, *Earth orientation parameters*). En principe, ces paramètres sont ceux publiés par l'IGS ou par le Service international de la rotation terrestre et des systèmes de référence (IERS) (voir le site internet [www.iers.org](http://www.iers.org)). Dans le repère inertiel géocentrique, les orbites des satellites peuvent être ajustées à des modèles paramétrés prenant en compte les mouvements dynamiques, et intégrées. Cette étape est nécessaire pour générer des dérivées partielles de paramètres en cas d'ajustement des orbites au cours de l'étape suivante d'ajustement des données. Plusieurs formules ont été élaborées pour décrire les mouvements des satellites GPS, depuis l'approche par éléments finis de Fliegel *et al.* [1992] jusqu'au modèle empirique de Beutler *et al.* [1994]. On pourrait s'attendre à ce qu'un modèle physique plus satisfaisant du comportement des satellites soit supérieur à une approche purement empirique, mais l'expérience semble indiquer que tout gain éventuel serait négligeable. Cela s'explique par le fait que dans les applications géodésiques de haute précision, le paramétrage des orbites doit être suffisamment poussé pour que des mouvements de l'ordre du centimètre soient détectables, ce qui est extrêmement difficile à obtenir pour des satellites réels sans utiliser au minimum quelques paramètres empiriques. En outre, les mouvements sont complexifiés par les variations de l'accélération imputables à des changements de l'exposition à la pression du rayonnement solaire, et, tout particulièrement, par les actions de micropoussée effectuées pour maintenir le comportement de certains satellites d'ancienne génération.

L'équation d'observation est évaluée pour chaque point de donnée à partir des coordonnées de la station *a priori*, lesquelles subissent également une rotation vers le repère ECI. Outre les effets de base déjà mentionnés,

les contributions d'un certain nombre d'effets, plus faibles, doivent aussi être prises en compte (voir le paragraphe suivant). Les paramètres sont ajustés pour correspondre aux observations; pour ce faire, on réduit au minimum les résidus en appliquant des méthodes standard: moindres carrés «batch», moindres carrés séquentiels ou filtre de Kalman. Les filtres de Kalman et autres filtres apparentés sont particulièrement performants pour le traitement des paramètres d'horloge, car ils s'adaptent facilement aux processus de bruit stochastiques, qui conviennent bien à la description de variations d'horloge réalistes. Pour un réseau mondial de quelques dizaines de stations de poursuite, l'ensemble complet des paramètres généralement ajustés comprend:

- jusqu'à trois coordonnées géocentriques pour chaque station (sous réserve de quelques précisions concernant le référentiel terrestre, notamment des contraintes applicables aux positions de certaines stations de référence);
- des paramètres d'horloge du récepteur variables dans le temps (qui doivent être suffisants pour permettre des variations d'amplitude quasiment arbitraire d'époque à époque);
- les paramètres orbitaux de chaque satellite (au minimum les six paramètres de Kepler, ou équivalent, plus un biais  $Y$  et d'autres termes empiriques);
- les horloges des satellites variables dans le temps;
- les retards troposphériques au zénith variables dans le temps (ainsi que les éventuels gradients en azimut);
- les décalages et les vitesses de variation des paramètres d'orientation de la Terre correspondant au mouvement du pôle et à la durée du jour; et
- les ambiguïtés de phase de la porteuse.

Parfois, des paramètres mineurs additionnels sont intégrés pour prendre en compte certains effets comme les variations du comportement des satellites ou les décalages nets de l'origine du réseau de poursuite par rapport au centre de masse de la Terre. L'ensemble des paramètres d'horloge présente une déficience de rang égale à un, étant donné qu'il n'existe pas d'information absolue concernant une quelconque époque d'horloge. Les analyses géodésiques standard résolvent ce problème en choisissant une horloge particulière (en règle générale, une horloge très stable située au sol) non compensée, qui sert de référence lors du processus d'estimation. Les estimations des autres horloges sont alors déterminées par rapport à cette horloge fixe. Une autre solution consisterait à spécifier le référentiel de l'horloge en calculant une combinaison linéaire des horloges disponibles égale à zéro (ou à toute autre valeur spécifiée, telle que le temps du GPS).

Pour maximiser la qualité des résultats, il est souhaitable de «fixer» au minimum certains paramètres d'ambiguïté de phase. Comme cela est extrêmement difficile à réaliser sur la base d'observations unidirectionnelles indifférenciées, la procédure normale consiste à appliquer des contraintes strictes aux valeurs entières des ambiguïtés en double différence pour certains couples de stations. Lorsque l'on y parvient pour une grande partie des paramètres d'ambiguïté, on stabilise considérablement la solution globale. Dans la plupart des cas, l'itération de la solution permet de «fixer» un plus grand nombre de paramètres d'ambiguïté et d'améliorer l'édition des données.

### 13.3.3 Repères de référence et modèles applicables aux termes de correction

Pour évaluer l'équation d'observation GPS fondamentale et obtenir des résultats avec une précision de l'ordre du centimètre, il est absolument nécessaire de prendre en compte un certain nombre d'effets mineurs. La plupart de ces effets sont documentés dans les conventions de l'IERS [McCarthy et Petit, 2003]. Le système de coordonnées géocentrique utilisé pour les points fixes attachés à la surface de la Terre est le Repère international de référence terrestre (ITRF) [Altamimi *et al.*, 2002]. La transformation du repère ITRF vers le repère ECI prend en compte les mouvements du pôle dans le repère terrestre ainsi que la rotation autour du pôle. Le mouvement du pôle dans l'espace inertiel (à savoir la nutation [Altamimi *et al.*, 2002]) est parfois volontairement omis, ou pris en compte de façon approximative seulement, car les satellites proches de la Terre n'y sont pas très sensibles. Le repère ECI n'est donc pas toujours parfaitement aligné sur le Repère de référence céleste international (ICRF), système quasi inertiel qui est formé par les positions VLBI de radiosources extragalactiques et dont l'origine est le barycentre du système solaire.



Les termes de correction applicables aux satellites sont les décalages décrits précédemment (entre les centres de masse et les centres de phase des antennes) ainsi que la rotation de phase de la polarisation du satellite due à des changements de point de vue. Ce dernier effet, connu en astronomie sous le nom d'«angle parallactique», provient du fait que le signal GPS est une onde à polarisation circulaire dextrogyre. La phase de polarisation semble changer à mesure que varie la géométrie de visée entre le récepteur et le satellite. Une correction doit être appliquée lors de l'évaluation des observations de la phase de la porteuse, ce qui n'est pas le cas pour les pseudo-distances, comme cela est décrit par Wu *et al.* [1993].

En raison des effets géophysiques, les corrections apportées à la position du récepteur sont beaucoup plus nombreuses et complexes [McCarthy et Petit, 2003]. Les mouvements essentiellement verticaux des points de surface dus aux marées terrestres (déplacements du solide terrestre), qui présentent des amplitudes de quelques décimètres aux latitudes moyennes, doivent être modélisés avec précision. Dans la plupart des endroits du globe, les mouvements de la croûte terrestre dus aux effets de surcharge des marées océaniques sont plus faibles d'un ordre de grandeur quasiment. Ils peuvent néanmoins être amplifiés dans certaines régions côtières. Si l'on procède à l'estimation des orbites du GPS, il convient également de prendre en considération, dans les intégrations orbitales *a priori*, les variations du géopotential dues aux marées terrestres et océaniques. La correction de marée polaire prend en compte la déformation de rotation de grande amplitude engendrée par les variations de la position du pôle par rapport à la croûte terrestre. Le mouvement du pôle lui-même, et la vitesse de rotation, subissent des modulations diurnes et semi-diurnes relativement importantes, qui sont causées par les déplacements de marée de l'océan. Lorsque les coordonnées des satellites du GPS sont exprimées dans un repère inertiel, il convient d'appliquer des corrections pour prendre en compte ces grands déplacements du repère terrestre. Les orbites de l'IGS, dans un repère à axes fixes par rapport à la Terre, intègrent déjà les variations infrajournalières des paramètres d'orientation de la Terre; il n'y a donc pas d'effet net pour un observateur terrestre. McCarthy et Petit ont fourni des modèles précis de tous ces effets [McCarthy et Petit, 2003]. De plus, les utilisateurs doivent appliquer les corrections du centre de phase spécifiques à l'antenne, recommandées par l'IGS et décrites précédemment.

Bien que les unions scientifiques internationales préconisent l'utilisation du temps-coordonnée géocentrique (TCG) pour l'analyse des données des satellites proches de la Terre, la plupart (si ce n'est la totalité) des équipes d'analyse continuent d'utiliser le temps terrestre (TT), qui est simplement décalé par rapport au temps UTC et au temps TAI. En revanche, le temps TCG diffère en fréquence par rapport au temps TT en raison d'effets liés à la relativité générale. En conséquence, les fréquences d'horloge provenant de l'IGS et d'autres équipes d'analyse du GPS devraient être directement comparables à celles mesurées dans les laboratoires du temps. Certaines constantes physiques, notamment le produit de la constante gravitationnelle et de la masse de la Terre, GM, dépendent du repère relativiste choisi; il convient donc de veiller tout particulièrement à utiliser les valeurs appropriées.

En règle générale, trois types de correction relativiste sont appliqués dans le traitement relatif au GPS:

1. Le décalage de fréquence du premier ordre, par rapport au temps TT, causé par la dilatation du temps et par la différence de potentiel gravitationnel a déjà été appliqué dans le système GPS via le réglage des décalages des oscillateurs de l'engin spatial, sur la base des paramètres orbitaux théoriques. La correction du second ordre liée aux orbites GPS non circulaires doit être appliquée par l'utilisateur (voir le document ICD-GPS-200).
2. Une correction «dynamique» de l'accélération des satellites proches de la Terre figure dans les conventions de l'IERS [McCarthy et Petit, 2003].
3. Le temps-coordonnée de propagation, y compris le retard gravitationnel, figure séparément dans les conventions de l'IERS (à noter cependant qu'il est souvent omis).

(Voir Kouba [2004] pour de plus amples informations.)

### 13.3.4 Radiopérage ponctuel précis (PPP, *Precise point positioning*)

Plutôt que résoudre le problème en s'appuyant sur un vaste réseau mondial de stations GPS, il est beaucoup plus économique et efficace, dans la plupart des applications, d'analyser les données provenant de chaque station prise séparément, en mode PPP (*precise point positioning*, radiopérage ponctuel précis) [Zumberge *et al.*, 1997]. Dans le cadre de cette approche, les orbites et les horloges précises des satellites proviennent d'une source préexistante et sont appliquées sans ajustement. (Certaines variantes de la méthode PPP

permettent une relaxation partielle des orbites et des horloges.) En appliquant les modèles examinés précédemment, l'utilisateur peut déterminer les coordonnées, les variations d'horloge et les retards troposphériques associés à un récepteur unique, pris isolément [Kouba et Heroux, 2000]. La qualité des résultats dépend directement de la précision et de la cohérence des données *a priori* concernant le satellite. Les résultats PPP découlant du repère et du référentiel des orbites et des horloges sur lesquelles on se base, il importe que ceux-ci soient bien définis et stables. Les produits de l'IGS (voir ci-après) sont expressément prévus à cet effet. Kouba [2004] fournit des indications utiles sur la bonne façon d'utiliser les produits de l'IGS dans les analyses de type PPP. Pour des intervalles de solution d'une journée, la reproductibilité type des positions devrait être de l'ordre de 10 mm environ dans le sens vertical et de 3 à 5 mm dans le sens horizontal. Les résultats PPP relatifs à l'horloge du récepteur devraient afficher une précision d'un niveau analogue, < 100 ps, mais l'exactitude (incertitude d'étalonnage non incluse) sera, en règle générale, plus importante (voir ci-après); l'échelle de temps PPP sera celle des horloges de satellite *a priori*.

### 13.3.5 Effets des erreurs sur les solutions de l'équation horaire

Les erreurs associées aux modèles d'analyse, aux informations *a priori* ou aux données d'observation ont une incidence sur les estimations horaires du GPS. Dach *et al.* [2003] ont examiné, à partir de simulations, les signatures de différents types d'erreurs d'entrée. Par exemple, une erreur sur l'altitude de la station entraîne un décalage de fréquence pour les longues lignes de base est-ouest. Dans le domaine temporel, cette erreur provoque une discontinuité à la frontière entre deux intervalles de traitement. Les erreurs sur les orbites des satellites peuvent avoir des effets analogues. En pratique, dans les produits de l'IGS, il y a peu de chances que ces erreurs aient des effets significatifs, car les positions des stations et des satellites sont ajustées, de même que les horloges. Il est probablement plus important de souligner la confirmation apportée par Dach *et al.*: un bruit de pseudo-distance de l'ordre de 0,5 m – à supposer même qu'il présente une distribution de bruit blanc – génère des décalages entre les intervalles discrets de traitement d'une journée à des niveaux visibles dans les résultats horaires effectifs (voir ci-après). On peut même supposer que le bruit de pseudo-distance coloré a un effet encore plus prononcé sur les sauts d'horloge entre intervalles.

L'utilisation d'un plus grand nombre de données de pseudo-distance (augmentation du taux d'échantillonnage et/ou allongement des intervalles) devrait en principe améliorer la précision horaire. En fait, des taux d'échantillonnage supérieurs ne sont efficaces que si la longueur d'onde des trajets multiples dominants reste inférieure à la période d'échantillonnage. Sinon, le fait d'ajouter des données ne permet pas de réduire en moyenne les erreurs d'horloge. Comme le montrent Senior *et al.* [1999] en ce qui concerne les incertitudes formelles des horloges, l'allongement des intervalles d'analyse devrait permettre de réduire en moyenne les effets du bruit dans les mesures de code, pas mieux toutefois que  $\sqrt{N}$ . À noter cependant que cela n'a pas été démontré pour des résultats d'horloge réels, mais seulement pour des erreurs formelles. Il n'a pas non plus été déterminé si des intervalles plus longs ne diffèrent que d'un biais d'horloge net ou si le contenu de fréquence est également modifié (amélioré). Si l'allongement des intervalles n'entraîne une amélioration de la précision d'horloge qu'au niveau d'un biais, d'autres démarches d'analyse devraient donner des résultats quasi équivalents (par exemple, filtrage post-analyse adéquat des résultats obtenus avec des intervalles plus courts). Pour certaines applications, ces dernières méthodes pourraient se révéler plus économiques ou mieux adaptées.

Il est logique et prévisible d'observer des discontinuités entre intervalles d'analyse indépendants, et ce pour tous les paramètres géodésiques, y compris les orbites, les retards troposphériques et les horloges. Les décalages devraient traduire la qualité inhérente des données GPS et des méthodes d'analyse. L'amplitude des sauts d'horloge est en général plus importante que celle des autres paramètres du fait de la contribution exclusive des données de code, bien qu'intégrées efficacement sur l'intervalle d'analyse. Plusieurs démarches ont été envisagées pour réduire au minimum les discontinuités d'horloge au passage d'un jour à l'autre. La méthode la plus évidente serait d'éviter totalement les lots d'analyses discrètes et d'appliquer un mode de traitement continu [Petit *et al.*, 1999; Senior *et al.*, 1999].

Cela étant, ce principe est difficile à mettre en œuvre et peut provoquer des accumulations d'effets d'erreur [Senior *et al.*, 1999]. L'allongement des intervalles d'analyse a en outre pour effet de corréliser les estimations d'horloge sur les mêmes périodes (statistique de type «à marche aléatoire»), ce qui peut entraîner une moins bonne stabilité que celle susceptible d'être atteinte au moyen d'intervalles d'analyse indépendants (comportement de type bruit blanc). Une autre méthode d'élimination des discontinuités d'analyse consiste à concaténer des séries temporelles au moyen d'intervalles qui se chevauchent afin de déterminer les décalages

[Bruyninx et Defraigne, 1999], [Larson *et al.*, 2000]. Même si les sauts d'horloge au niveau des frontières d'intervalle obéissent à une distribution de bruit blanc [Ray et Senior, 2003], cette méthode a pour effet d'ajouter une composante de bruit «à marche aléatoire» sur les séries concaténées. En d'autres termes, le processus de concaténation génère aussi des corrélations d'horloge à long terme et peut limiter la stabilité à long terme susceptible d'être atteinte sans cela. Dach *et al.* [Dach *et al.*, 2006] examinent d'autres méthodes, plus perfectionnées, consistant à générer des résultats d'horloge quasi continus pendant le processus d'estimation en passant des données d'un intervalle au suivant. Ces méthodes, qui agissent comme un filtre/lisseur, visent à améliorer la stabilité de la comparaison d'horloges à court terme et ont peu d'incidence sur les intervalles plus longs.

Il est difficile de comprendre cette obstination généralisée à supprimer les sauts d'horloge au niveau des frontières d'intervalle, en particulier lorsqu'ils sont de faible amplitude (de l'ordre de 100 à 200 ps). L'utilisation de méthodes introduisant des corrélations à long terme dans les séries temporelles d'horloge (par concaténation par exemple) semble être particulièrement contre-productive. S'il est vraiment nécessaire d'éliminer les discontinuités, il est vraisemblablement préférable de recourir à une méthode de filtrage/lissage, qui permet d'éviter le problème des séries temporelles corrélées, même si ce type de méthode peut fausser le comportement des horloges à court terme. D'un autre côté, les discontinuités fournissent des informations diagnostiques précieuses sur la qualité de l'installation de la station (voir ci-après). Si les sauts sont supérieurs au niveau de bruit standard de 120 ps environ [Ray et Senior, 2003], il convient alors de rechercher et de traiter les causes sous-jacentes, sans les masquer par des manipulations post-analyse.

### 13.4 Produits horaires et échelles de temps de l'IGS

Depuis sa création en 1994, l'IGS produit des fichiers journaliers contenant des positions de satellite et des observations horaires de précision, sous forme de tableaux, pour des intervalles de 15 min. Depuis cette date, certains produits ont été modifiés, d'autres ajoutés. Tous les produits de l'IGS (<http://igsceb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>) sont calculés en effectuant la moyenne pondérée des solutions transmises par plusieurs centres d'analyses participants (huit au maximum). Bien qu'en règle générale les jeux de données utilisés par chaque groupe se chevauchent, les effets de différenciation des stratégies d'analyse, des modélisations et des logiciels sont largement indépendants. Ainsi, les combinaisons judicieusement pondérées des résultats individuels sont généralement supérieures à toute solution prise séparément. Cette façon de procéder permet probablement d'améliorer la précision et l'exactitude des produits de l'IGS, et, sans aucun doute, de les rendre plus stables, plus fiables et plus robustes que les résultats individuels de chacun des groupes d'analyse.

#### 13.4.1 Ensembles de produits disponibles

Les produits horaires «classiques» de l'IGS ont été modifiés le 5 novembre 2000 (semaine GPS 1087). A cette date, un nouvel algorithme de combinaison a été mis en œuvre et les produits horaires ont été étendus à de nombreux récepteurs du réseau de poursuite ainsi qu'aux satellites [Kouba et Springer, 2001]. L'intervalle de tabulation des nouvelles horloges (satellites et stations de poursuite) a été réduit à 5 min, le taux d'échantillonnage des horloges de satellite étant auparavant fixé à 15 min.

Trois séries de catégories de produits sont générées sur la base de la latence des données:

1. les produits ultrarapides (contenant les horloges de satellite, mais pas les récepteurs), qui sont destinés aux utilisateurs en temps réel;
2. les produits rapides, publiés 17 heures environ après la fin de chaque journée;
3. les produits finaux, publiés 13 jours environ après la fin de chaque semaine.

Le Tableau 13-1 récapitule les produits horaires et orbitaux de l'IGS, les latences et les précisions estimées. (En plus des produits figurant dans ce tableau, l'IGS fournit aussi des cartes ionosphériques, des retards troposphériques dans la direction du zénith, des paramètres d'orientation de la Terre, etc.) Tous ces produits sont mis à disposition par les centres de données ou par le bureau central de l'IGS ([igsceb.jpl.nasa.gov](http://igsceb.jpl.nasa.gov)). L'utilisation des produits rapides ou finaux de l'IGS à la place des données diffusées permet d'effectuer des radiorepérages PPP de l'ordre de 1 cm pour des intervalles de 24 heures.

Le réseau de poursuite de l'IGS est composé de plus de 350 installations de réception réparties à travers le monde. Toutes les stations fonctionnent en continu et transmettent une fois par jour (au minimum) des fichiers d'observations au format RINEX contenant des échantillons espacés de 30 secondes. La plupart des stations utilisent des oscillateurs à quartz internes, qui sont asservis par leurs propres observations pour la poursuite du temps du GPS, mais plus de cent sont équipées d'étalons de fréquence externes. La Figure 13-1 montre la répartition et le type des étalons externes au sein du réseau de l'IGS (situation en novembre 2004). Environ 51 sont équipées d'étalons à maser H, 28 d'horloges à jet de césium et 27 d'horloges au rubidium. Parmi elles, 20 environ sont installées sur les mêmes sites que des laboratoires du temps.

TABLEAU 13-1

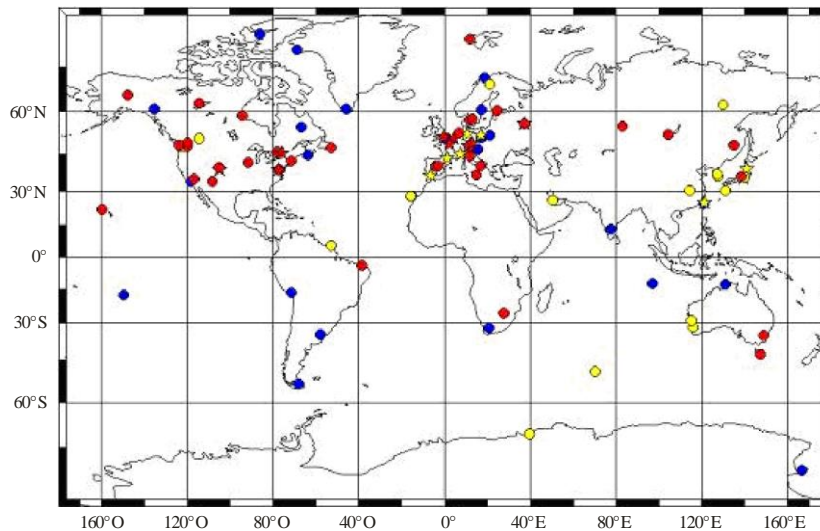
**Produits orbitaux et horaires combinés de l'IGS et leurs caractéristiques comparés aux valeurs radiodiffusées**

Ephémérides des satellites du GPS et horloges des satellites/stations		Estimation de la précision	Latence	Intervalle de mise à jour	Intervalle entre échantillons
Radiodiffusées	Orbites	~200 cm	Temps réel	--	Quotidien
	Horloges des satellites	~7 ns			
Ultrarapides (moitié par prévision)	Orbites	~ 10 cm	Temps réel	Quatre fois par jour	15 min
	Horloges des satellites	~ 5 ns			
Ultrarapides (moitié par observation)	Orbites	< 5 cm	3 h	Quatre fois par jour	15 min
	Horloges des satellites	~ 0,2 ns			
Rapides	Orbites	< 5 cm	17 h	Quotidien	15 min
	Horloges des satellites et des stations	~ 0,1 ns			5 min
Finales	Orbites	< 5 cm	~ 13 jours	Hebdomadaire	15 min
	Horloges des satellites et des stations	~ 0,1 ns			5 min

Les estimations de précision des orbites (à l'exception des orbites obtenues par prévision) reposent sur des comparaisons avec des résultats indépendants de télémétrie laser. Les précisions sont supérieures à celles qui sont indiquées. Les fichiers de produits sont établis pour des périodes de 24 heures, sauf ceux contenant des produits ultrarapides, qui couvrent 48 heures. Les données horaires à 5 minutes d'intervalle sont fournies dans des fichiers au format «RINEX horaire», tandis que les échantillons horaires à 15 min d'intervalle figurent dans des fichiers au format SP3, avec les éphémérides des satellites.

FIGURE 13-1

**Cartes montrant la répartition des stations de l'IGS utilisant des étalons de fréquence externes (situation en novembre 2004). Les types d'étalon sont indiqués par des couleurs: rouge pour les masers H, jaune pour les étalons au césium et bleu pour les étalons au rubidium. Les stations de l'IGS situées sur le même site qu'un laboratoire du temps sont indiquées par une étoile**



Sat\_time\_freq-13-01

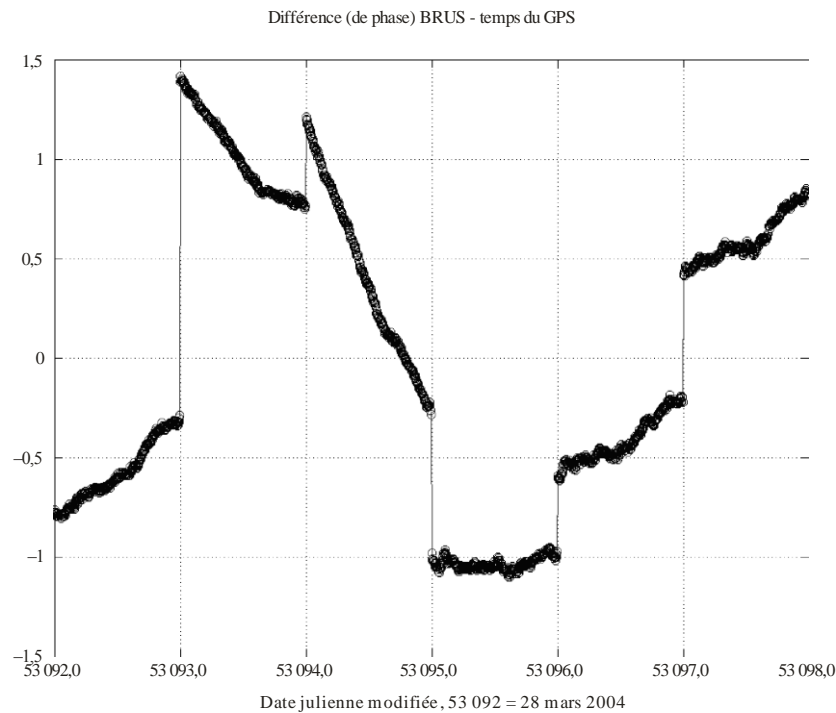
### 13.4.2 Echelles de temps de l'IGS

Il n'y a pas d'exigence particulière en ce qui concerne l'échelle de temps des produits horaires utilisés pour des applications de radiopérage géodésique, si ce n'est qu'elle doit être raisonnablement proche du temps du GPS. L'un des points forts importants de la géodésie par GPS est qu'elle ne dépend pas, au premier ordre, de la stabilité ou de la précision de l'échelle de temps, étant donné que les effets des horloges peuvent être éliminés par double différence. Cela étant, il est souhaitable que l'échelle de temps de référence possède d'autres propriétés, notamment une bonne stabilité et une traçabilité précise par rapport au temps UTC. Ces propriétés renforcent la valeur des produits horaires de l'IGS pour des applications autres que la géodésie pure, en particulier les opérations de référence horaire.

A l'origine, l'IGS utilisait, comme référence pour ses produits horaires, un simple alignement linéaire journalier des horloges des satellites observés sur le temps du GPS radiodiffusé. Or l'instabilité du temps du GPS est comparativement importante ( $2 \times 10^{-14}$  à 1 jour), ce qui est plus mauvais, d'au moins un ordre de grandeur, que l'instabilité des meilleurs étalons de fréquence du réseau de l'IGS. Même certains des satellites de nouvelle génération, du type Block IIR, possèdent des horloges plus stables que l'ensemble du temps du GPS, et ce, en partie en raison de l'algorithme d'asservissement de type «tout ou rien» utilisé pour que l'échelle de temps radiodiffusée reste alignée sur le temps UTC (via la réalisation conservée par l'U.S. Naval Observatory). L'ancienne procédure appliquée par l'IGS pour aligner chaque jour ses horloges sur le temps du GPS introduisait des discontinuités importantes d'un jour à l'autre, en temps et en fréquence (Figure 13-2). Si cette procédure n'a pas d'incidence sur l'utilité des produits à des fins de radiopérage précis, en revanche, son intérêt dans le cadre de la diffusion du temps et des fréquences est assurément limité.

FIGURE 13-2

**Estimations de transfert du temps par géodésie GPS pour la station BRUS située à Bruxelles, entre le 28 mars et le 2 avril 2004**



Sat\_time\_freq-13-02

Les estimations du transfert du temps présentées à la Figure 13-2 correspondent à un alignement linéaire journalier sur le temps du GPS. L'instabilité de la station BRUS s'explique essentiellement par l'alignement linéaire journalier de l'échelle de temps sur le temps du GPS radiodiffusé, qui est responsable des grandes discontinuités observables en temps et en fréquence. A noter qu'une courbe de tendance linéaire a été retirée pour le traçage.

Pour améliorer la stabilité de ses produits horaires rapides et finaux, l'IGS a élaboré de nouvelles échelles de temps internes. Ces nouvelles échelles sont constituées des ensembles pondérés des horloges concernées, à la fois pour les stations et pour les satellites. On trouvera dans [Senior *et al.*, 2003] une description détaillée de l'algorithme correspondant.

Chaque échelle de temps («IGRT» pour les produits rapides et «IGST» pour les produits finaux) est, dans une large mesure, déterminée par les masers H disponibles, les horloges de moins bonne qualité pouvant néanmoins y contribuer un peu, notamment celles au rubidium embarquées à bord des satellites de type Block IIR.

L'algorithme consiste en la mise en œuvre d'un filtre de Kalman avec un modèle polynomial simple pour chaque horloge, suivi d'un algorithme linéaire quadratique gaussien (LQG) qui permet d'asservir avec souplesse les échelles de temps sur le temps du GPS.

Les coefficients de pondération associés à chaque horloge sont déterminés de façon itérative et dynamique à partir de l'instabilité observée à plusieurs intervalles d'intégration inférieurs à une journée. On impose à ces coefficients une limite supérieure pour éviter qu'une horloge ne prédomine sur les échelles de temps [Thomas et Azoubib, 1996].

L'algorithme d'asservissement LQG est considérablement amorti au moyen d'une constante de temps de 30 à 40 jours environ. On obtient ainsi des échelles de temps dont l'instabilité est généralement inférieure à  $1 \times 10^{-15}$  sur une journée, mais qui sont toujours limitées à moyen et long terme par l'asservissement sur le temps du GPS. Il y a néanmoins des périodes où la stabilité des échelles de temps se dégrade quelque peu,

notamment lorsque le nombre de stations à maser H intervenant dans les produits horaires est anormalement faible.

La Figure 13-3 illustre la qualité de fonctionnement de l'horloge BRUS lorsque l'on prend pour référence l'échelle de temps des produits finaux de l'IGS, IGST. Les informations horaires interstations sont les mêmes que celles de la Figure 13-2; seules les échelles de temps sous-jacentes sont différentes. Il apparaît incontestablement que l'utilisation de l'échelle de temps de l'IGS améliore considérablement la stabilité. Les légères discontinuités restantes au niveau de certains changements de jour reflètent essentiellement la qualité des données locales BRUS.

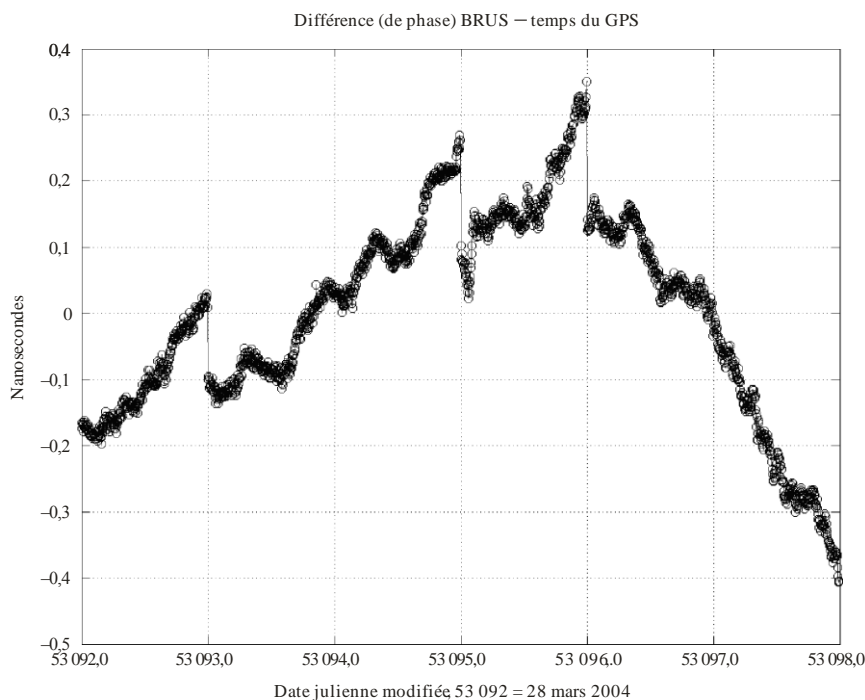
Il est possible que certains effets liés à une ou plusieurs horloges en particulier, notamment des sauts lors du passage d'un jour à l'autre, nuisent aux échelles de temps d'ensemble, en raison par exemple de problèmes d'édition de données non détectés. L'expérience montre néanmoins que ces problèmes restent mineurs et que les échelles d'ensemble affichent une qualité très supérieure à toute horloge participante prise séparément.

Les nouvelles échelles de temps de l'IGS ont été mises en œuvre dans les produits officiels au début du mois de mars 2004 (voir le courriel de l'IGS N° 4875 à l'adresse [igscb.jpl.nasa.gov](mailto:igscb.jpl.nasa.gov)).

Les produits horaires alignés sur les mêmes échelles de temps internes sont disponibles depuis novembre 2000 à l'adresse (<https://goby.nrl.navy.mil/IGStime>).

FIGURE 13-3

**Données horaires BRUS identiques à celles présentées à la Figure 13-2, mais en prenant pour référence l'échelle de temps des produits finaux de l'IGS, IGST. A noter qu'une courbe de tendance linéaire a été retirée pour le traçage**



Sat\_time\_freq-13-03

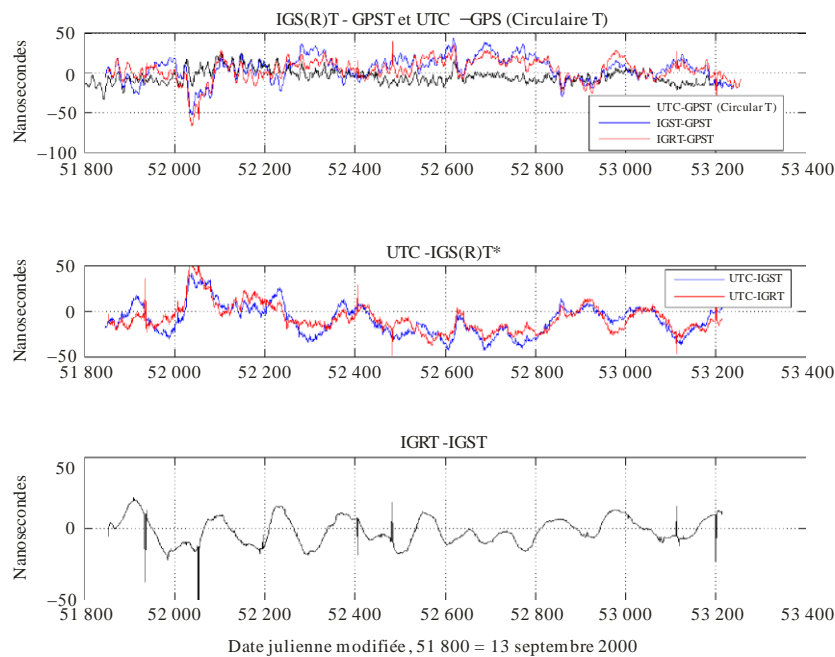
La variation à long terme de chaque échelle de temps de l'IGS par rapport au temps du GPS et au temps UTC est illustrée à la Figure 13-4 (valeurs approchées). Les instabilités infrajournalière et journalière des échelles de temps de l'IGS sont considérablement améliorées par rapport au temps du GPS, mais l'instabilité à plus long terme est comparable en raison de la dépendance continue au temps du GPS. Des travaux sont en cours pour lier les échelles de temps de l'IGS au temps UTC avec une meilleure précision, l'idée étant d'utiliser des

données provenant du BIPM et de tirer parti des stations de l'IGS situées sur le même site que des laboratoires du temps [Senior *et al.*, 2004].

La courbe supérieure de la Figure 13-4 illustre la différence entre le temps UTC et le temps GPST calculée à partir de la série des *Circulaires T* du BIPM, ainsi que la différence entre les échelles de temps IGST et IGRT de l'IGS et le temps GPST. Les réalisations du GPST par l'IGS et par le BIPM peuvent différer de quelques ns, car les deux organismes n'appliquent pas les mêmes stratégies d'observation et d'analyse [Senior *et al.*, 2004]. La courbe du milieu correspond aux valeurs UTC-IGST et UTC-IGRT obtenues par différence des séries temporelles de la courbe supérieure, en partant de l'hypothèse que les temps GPST donnés par la *Circulaire T* et par l'IGS sont équivalents. Des écarts par rapport à cette hypothèse expliquent une petite partie des différences reportées sur les courbes, en particulier aux hautes fréquences. Enfin, la courbe du bas correspond à la différence entre IGRT et IGST, dans l'hypothèse où chacun de ces deux temps observe le temps GPST de façon équivalente. Les pics qui apparaissent de temps à autre sont dus à des erreurs d'alignement peu fréquentes des horloges de l'IGS sur le temps GPST; en fait, ils ne figurent sur aucune de ces échelles.

FIGURE 13-4

**Comparaison des échelles de temps IGST et IGRT de l'IGS par rapport au temps du GPS (GPST) et par rapport au temps UTC (modulo les secondes intercalaires) entre le 5 novembre 2000 et le 28 juin 2004**



Sat\_time\_freq-13-04

### 13.5 Evaluation de la qualité de fonctionnement par analyse des discontinuités au changement de jour

La précision «absolue» des estimations horaires reposant sur le GPS (modulo le biais d'étalonnage) est entièrement déterminée par les données de pseudo-distance, intégrées sur l'intervalle d'analyse, en général 24 h. Lorsque l'on analyse des ensembles de données mondiales échantillonnées pendant une journée par intervalles de 5 min, les estimations des erreurs formelles liées aux horloges sont habituellement de 120 ps environ, dans l'hypothèse où chaque observation de pseudo-distance présente une incertitude de 1 m. Il est possible d'obtenir une valeur plus réaliste de la précision effective des mesures en comparant les estimations horaires au niveau des frontières entre intervalles d'analyse indépendants, pour des récepteurs équipés d'oscillateurs très stables.

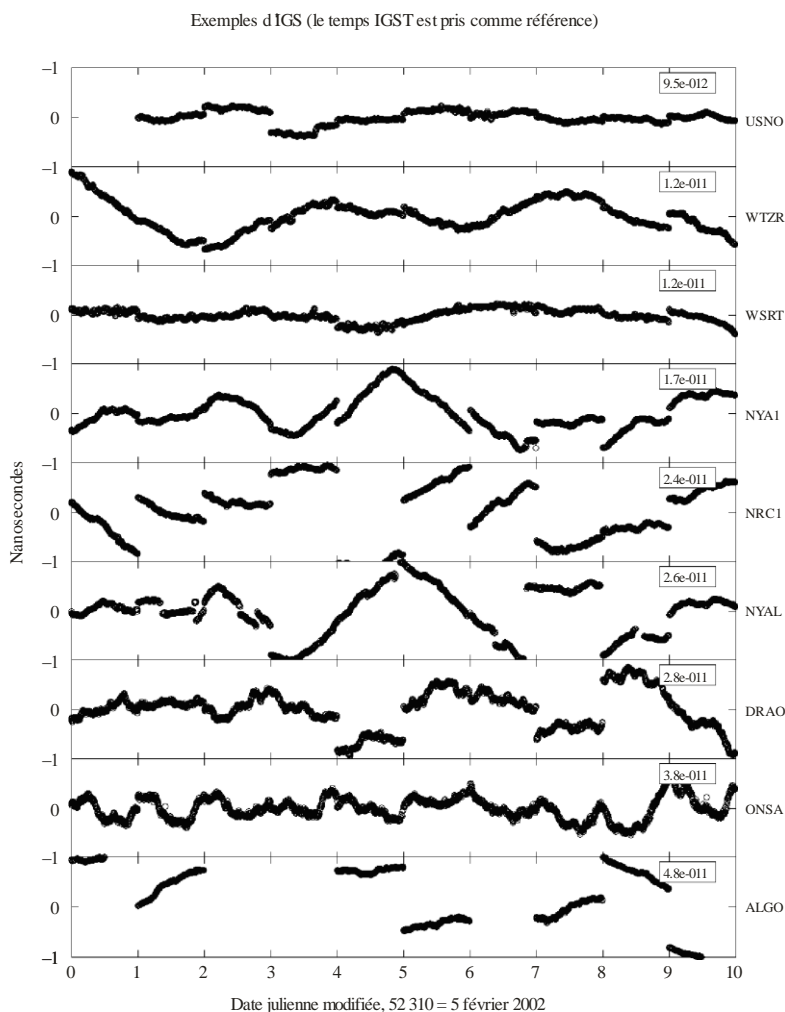


(Il est aussi possible d'utiliser, pour les essais, des horloges moins stables à condition que les intervalles d'analyse se chevauchent, ce qui permet d'éliminer les erreurs d'interpolation, sachant que, dans ce cas, les estimations horaires adjacentes ne sont plus indépendantes.) Cette procédure est analogue aux essais classiques de reproductibilité utilisés en géodésie pour une série horaire de déterminations de position.

Les sauts horaires au changement de jour peuvent être analysés pour des solutions en ligne de base ou pour des réseaux dans lesquels l'horloge d'une seule station a été désignée comme étant la référence. Cela étant, les résultats peuvent être difficiles à interpréter, car les effets au niveau des deux stations font l'objet d'une convolution dans chaque série horaire d'horloge. Pour une analyse de ce type, une meilleure méthode consiste à utiliser les produits horaires de l'IGS, avec la nouvelle échelle de temps d'ensemble très stable [Senior *et al.*, 2003]. En découplant les paires d'horloges, il a été possible d'isoler les comportements observés relatifs aux stations individuelles. La Figure 13-5 fournit un exemple de séries temporelles simultanées d'estimations horaires de l'IGS pour huit stations à maser H. On notera que la variabilité des discontinuités entre stations est indépendante de la stabilité des horloges prises individuellement, étant donné que certains sites présentent des sauts importants, mais une très bonne stabilité infrajournalière, et inversement. Ray et Senior ont observé que les distributions des décalages au changement de jour étaient de type gaussien à moyenne nulle, mais qu'elles présentaient des variations en valeur quadratique moyenne très dépendantes du site considéré.

FIGURE 13-5

**Estimations horaires de neuf sites de l'IGS équipés de masers H entre le 5 et le 15 février 2002**



Une tendance quadratique distincte a été éliminée de chaque horloge pour tracer les courbes présentées à la Figure 13-5. Pour chaque courbe, la valeur encadrée indique l'écart type d'Allan à 300 s, sans tenir compte des sauts horaires aux changements de jour. L'amplitude des sauts au changement de jour varie considérablement selon les stations et est indépendante de la stabilité infrajournalière de l'horloge.

La précédente analyse des sauts horaires de l'IGS a été actualisée et étendue: voir le Tableau 13-2. Un total de 1 310 jours, entre octobre 2000 et juin 2004, a été examiné à partir des produits horaires rapides et fins de l'IGS.

Les critères d'édition et de traitement étaient les mêmes que ceux de l'étude menée par Ray et Senior [Senior *et al.*, 2003]. L'indisponibilité des données au niveau du changement de jour étant de 30 min au maximum (5 min en général), le bruit d'interpolation dû aux instabilités des étalons à maser H devrait être négligeable. Les statistiques en valeurs quadratiques moyennes étant fournies pour les différences entre paires de jours indépendants, chaque estimation de la précision journalière devrait être inférieure d'un facteur  $\sqrt{2}$ . S'agissant de la qualité de fonctionnement (valeurs quadratiques moyennes), on notera en particulier la très grande dispersion entre stations, qui atteint quasiment un ordre de grandeur. Cet effet résulte vraisemblablement de la grande variabilité des performances du code en fonction des stations et témoigne donc de la multiplicité des conditions de propagation par trajets multiples, qu'elles soient externes à l'antenne ou internes aux instruments GPS. Dans certains cas, on a observé une variation notable de la performance avec le temps, phénomène qui a parfois été corrélé à des changements consignés dans les journaux d'exploitation du site concerné. Par ailleurs, certains cas font apparaître des variations saisonnières. Il a précédemment été montré que les variations en valeurs quadratiques moyennes étaient indépendantes du choix du modèle d'antenne ou de récepteur, ainsi que de l'utilisation éventuelle de radômes.

TABLEAU 13-2

**Résumé des statistiques de discontinuité horaire au changement de jour pour 38 stations de l'IGS équipées d'étalons de fréquence à maser H**

Site IGS	Saut horaire (valeur quadratique moyenne) (ps)	Observations
ONSA	149	Excellent
BREW	152	Excellent
OPMT (TL)	158	Nouvelle station, d'où un nombre de données très limité
BRUS (TL)	165	Valeur améliorée, à 118 ps, à la suite de changements effectués à l'été 2003
MAD2	170	Valeur quadratique moyenne non fiable car nombre de données très limité
WTZR (TL)	189	
GODE	205	
USN1 (TL)	225	Station remplacée par USN3 en juillet 2004
WSRT	227	Légère dégradation depuis l'été 2003
KHAJ	233	Données limitées
CRO1	236	Le maser n'est plus utilisé
USUD	266	Le maser n'est plus utilisé
NPLD (TL)	268	
TID*	269	Semble s'être amélioré depuis l'été 2003
YEBE	271	
GOL2	271	Valeur quadratique moyenne non fiable car nombre de données très limité
AMC2 (TL)	283	Amélioration à la suite de changements d'antenne/de récepteur effectués en juin 2002
SPT0 (TL)	286	

TABLEAU 13-2 (*fin*)

Site IGS	Saut horaire (valeur quadratique moyenne) (ps)	Observations
WES2	296	
PIE1	305	Amélioration depuis un changement de récepteur effectué en octobre 2002
STJO	334	
USNO (TL)	354	Semble s'être dégradé depuis le printemps 2003
IRKT	359	
NYAL	363	Bien meilleur que NYA1 en 2004
NLIB	368	
MATE	389	Variations temporelles significatives; meilleur qu'en 2004
KOKB	460	Dégradation importante avant un changement d'antenne/de câble en mai 2004
FAIR	478	Légère amélioration depuis l'été 2003
DRAO	522	
YELL	564	Fortes variations saisonnières; beaucoup plus mauvais pendant l'hiver
ALBH	587	Amélioration très nette, à 97 ps, après septembre 2003
HOB2	631	Variations corrélées avec des changements intervenus dans la station
MEDI	703	
FORT	706	
NYA1	750	Dégradation importante depuis l'été 2003
ALGO	877	Fortes variations saisonnières; beaucoup plus mauvais pendant l'hiver
NRC1 (TL)	936	Fortes variations saisonnières; beaucoup plus mauvais pendant l'hiver
METS	1 065	Le maser n'est plus utilisé

Les horloges rapides et finales de l'IGS entre octobre 2000 et juin 2004 ont été utilisées. Les stations situées sur le même site qu'un laboratoire du temps sont indiquées par le symbole (TL).

Parmi les différentes stations de l'IGS étudiées, c'est celle d'ONSA (Onsala, Suède) qui présente la meilleure qualité de fonctionnement à long terme, avec une précision horaire journalière de  $(149/\sqrt{2}) = 105$  ps.

Les stations BREW (Brewster, Etat de Washington, Etats-Unis d'Amérique), OPMT (Paris, France), BRUS (Bruxelles, Belgique), MAD2 (Madrid, Espagne), WTZR (Wetzell, Allemagne) et GODE (Greenbelt, Etat du Maryland, Etats-Unis d'Amérique) affichent des erreurs horaires journalières qui ne sont que légèrement supérieures, entre 107 et 145 ps.

Quant aux autres stations, elles présentent une qualité de fonctionnement médiocre, qui progresse de façon continue de 620 à 753 ps, pour ALGO (Algonquin, Ontario, Canada), NRC1 (Ottawa, Ontario, Canada) et METS (Metsahovi, Finlande).

L'intervalle des valeurs de précision horaire (ordres de grandeur) témoigne non pas d'un artefact dans l'échelle de temps de l'IGS (par exemple), mais de la variation des conditions locales. Cette conclusion est fortement étayée par les variations temporelles de la qualité de fonctionnement que l'on observe dans un certain nombre de stations.

En règle générale, les variations brusques correspondent à un changement connu de la configuration ou de l'équipement. (Malheureusement, les modifications apportées aux stations ne sont pas toujours signalées.) Quelques stations affichent de fortes variations saisonnières, en particulier les trois stations canadiennes YELL, ALGO et NRC1 (Figure 13-6).

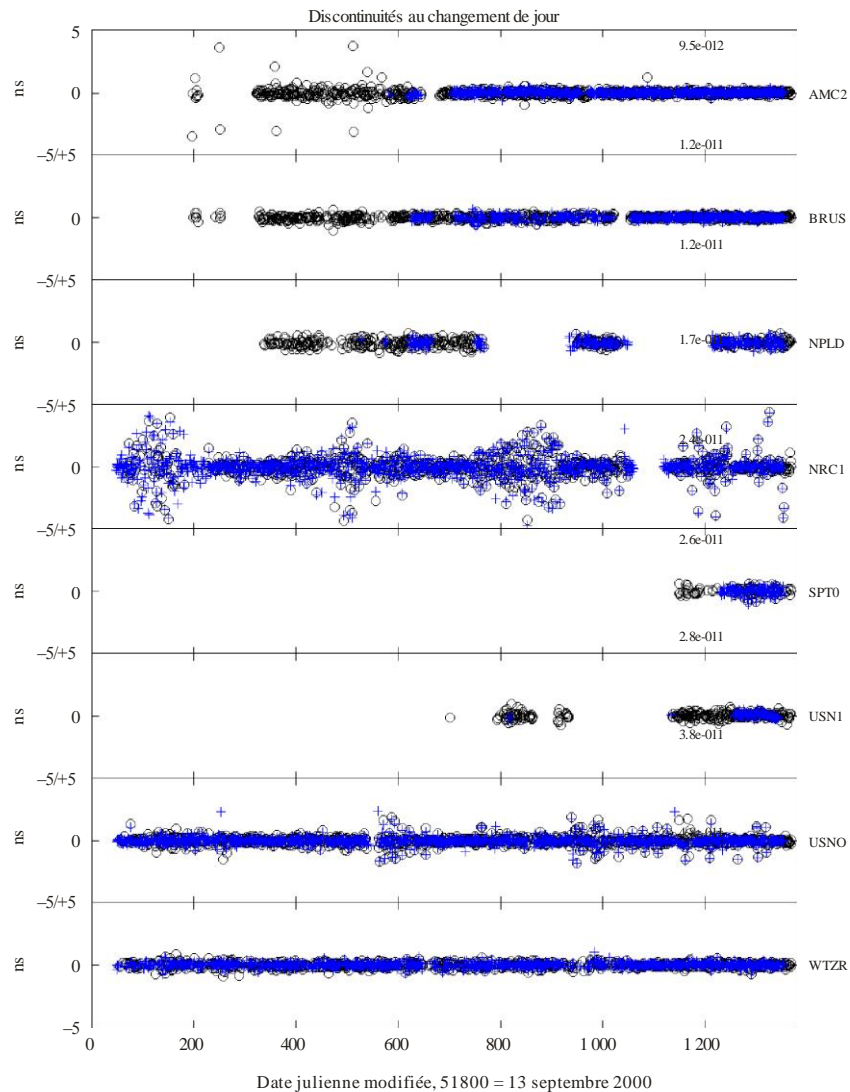
Nous avons émis l'hypothèse (voir plus haut) que l'augmentation importante des sauts horaires pendant les périodes d'hiver au niveau de ces sites était causée par une accumulation de neige et de glace sur des surfaces situées au-dessous ou à l'intérieur du champ proche des antennes.

La Figure 13-6 présente l'historique des sauts horaires au changement de jour pour les stations de l'IGS situées dans des laboratoires du temps équipés de masers H (celles qui sont repérées par le symbole TL dans le Tableau 13-2). La station OPMT n'a pas été prise en compte en raison du nombre très limité de ses données. L'installation BRUS, en particulier depuis les changements effectués à l'été 2003, devrait servir d'exemple aux autres laboratoires du temps.

La période d'étude correspondant à la Figure 13-6 s'étend d'octobre 2000 à juin 2004. Les résultats provenant des horloges rapides de l'IGS apparaissent sous forme de cercles noirs; ceux des horloges finales sont matérialisés par le symbole «+», de couleur bleue.

FIGURE 13-6

**Variations temporelles des décalages horaires au changement de jour pour huit stations de l'IGS à maser H situées dans des laboratoires du temps**



### 13.6 Comparaisons avec des résultats indépendants de transfert du temps par aller-retour

En plus des évaluations internes examinées précédemment, il importe de comparer les estimations horaires géodésiques avec celles effectuées par des systèmes indépendants. La méthode conventionnelle des observations simultanées, bien que très largement utilisée dans les laboratoires du temps, n'est pas suffisamment précise pour fournir des comparaisons vraiment pertinentes, si ce n'est peut-être pour les intervalles d'intégration les plus longs. En revanche, la méthode des observations simultanées P3 et la méthode TWSTT sont, de ce point de vue, plus prometteuses. Certains résultats, parmi les meilleurs, obtenus sur des lignes de base intercontinentales sont en accord avec les horloges géodésiques, à 0,5 ns près environ (valeurs quadratiques moyennes) ou 0,3 ns près (TDEV), pour des temps d'intégration allant jusqu'à plusieurs mois [Plumb *et al.*, 2005; Petit *et al.*, 2004].

Le Tableau 13-3 récapitule les résultats tirés d'études de comparaison récentes de qualité.

TABLEAU 13-3

**Récapitulatif des comparaisons publiées entre, d'une part, la méthode géodésique et, d'autre part, la méthode des observations simultanées P3 ou la méthode TWSTT, pour un certain nombre de liaisons de longueurs variables**

Liaison	Longueur de la ligne de base	Méthode/statistique/valeur	Intervalle des données	Source
NPL-PTB	749 km	P3/valeur quadratique moyenne/0,48 ns TW/valeur quadratique moyenne/0,57 ns	5 mois 4 mois	Petit et Jiang, 2004
IEN-PTB	835 km	P3/valeur quadratique moyenne/0,49 ns TW/valeur quadratique moyenne/0,64 ns	2 mois 2 mois	Petit et Jiang, 2004
TL-CRL	2 112 km	P3/valeur quadratique moyenne/0,58 ns TW/valeur quadratique moyenne/1,27 ns	8 mois 8 mois	Petit et Jiang, 2004
USNO-NPL	5 695 km	P3/valeur quadratique moyenne/0,48 ns TW/valeur quadratique moyenne/0,59 ns	5 mois 3 mois	Petit et Jiang, 2004
USNO-PTB	6 275 km	P3/valeur quadratique moyenne/0,45 ns TW/valeur quadratique moyenne/0,49 ns	5 mois 5 mois	Petit et Jiang, 2004
USNO-AMC <sup>(1)</sup>	2 361 km	TW/Différence $\pm$ valeur quadratique moyenne/ $-2,10 \pm 0,69$ ns (accord d'étalonnage) TW/TDEV/ $< 0,1$ ns, $300 \leq \tau \leq 2\,000$ s $< 0,34$ ns, $2\,000 \leq \tau \leq 7 \times 10^6$ s TDEV/0,34 ns à $7 \times 10^6$ s	7 mois	Plumb et Larson, 2004
USNO-NIST	2 405 km	TW/valeur quadratique moyenne/0,83 ns TW/TDEV/ $< 0,3$ ns, $3\,600 \leq \tau \leq 6 \times 10^6$ s $< 0,72$ ns, $6 \times 10^6 \leq \tau \leq 7,4 \times 10^6$ s TDEV/0,72 ns à $7,4 \times 10^6$ s	5,5 mois	Plumb et Larson, 2004

TABLEAU 13-3 (*fin*)

Liaison	Longueur de la ligne de base	Méthode/statistique/valeur	Intervalle des données	Source
PTB-NIST	7 532 km	TW/valeur quadratique moyenne/0,79 ns TW/TDEV / < 0,5 ns, $2 \times 10^5 \leq \tau \leq 7,5 \times 10^6$ s TDEV/0,24 ns à $7,5 \times 10^6$ s	7 mois	Plumb et Larson, 2004
USNO-PTB	6 275 km	valeur quadratique moyenne / 2 ns	2 ans	Dach <i>et al.</i> , 2002

<sup>(1)</sup> Liaisons TW et géodésiques étalonnées séparément pour ce qui concerne les temps de propagation des instruments.

Par rapport aux données GPS continues, les mesures de type TWSTT sont relativement rares: quatre jeux par jour environ ces dernières années. Les différences sont calculées par interpolation des résultats géodésiques et des résultats par observations simultanées P3 aux époques TWSTT. Les réductions des données d'observations simultanées P3 ont été effectuées au moyen d'orbites précises et de cartes ionosphériques fournies par l'IGS, et en appliquant des déplacements types associés aux marées terrestres. En outre, un lissage Vondrak a été appliqué aux résultats P3, ce qui est équivalent à un filtre passe-bas présentant une période de coupure de 0,4 jour environ. Ainsi que le notent Petit et Jiang [Petit et Jiang, 2004], les différences entre séries temporelles simultanées devraient être constantes pour chaque couple d'horloges (ce qui est équivalent à un biais d'étalonnage).

Ainsi, l'écart type devrait être une mesure de l'instabilité relative à long terme des deux méthodes de transfert du temps. Les données géodésiques et les données P3 provenant souvent du même récepteur GPS, certaines erreurs liées au récepteur et à l'antenne devraient être les mêmes dans chacun de ces ensembles de données et ne devraient donc pas apparaître après soustraction (effets de sensibilité à la température par exemple). Par conséquent, seules les comparaisons avec la méthode TWSTT sont totalement indépendantes. Pour les trois lignes de base de grande amplitude étudiées par Plumb et Larson [Plumb et Larson, 2005], les différences horaires TW-géodésiques affichent des écarts types d'Allan où prédominent les instabilités TWSTT jusqu'à des intervalles allant de  $10^5$  à  $10^6$  s. Pour des intervalles plus longs, les instabilités horaires prédominent sur le bruit de transfert des deux méthodes.

D'après les comparaisons avec la méthode TWSTT ayant fait l'objet d'une publication, la précision des résultats du transfert de temps géodésique est apparemment au moins aussi bonne que  $(0,5 \text{ ns}/\sqrt{2}) = 0,35 \text{ ns}$  (valeur quadratique moyenne), dans l'hypothèse où chacune des méthodes contribue à égalité aux différences observées. Cette valeur est certes beaucoup plus importante que les erreurs formelles géodésiques correspondant à des analyses sur une journée (0,12 ns environ), mais elle se situe dans l'intervalle de performance de certaines stations GPS de qualité médiocre (Tableau 13-2). Etant donné que les comparaisons montrent aussi, de façon systématique, une meilleure stabilité des horloges géodésiques pour des intervalles allant jusqu'à plusieurs jours, on peut affirmer avec une quasi-certitude que le bruit réel de la méthode TWSTT (valeur quadratique moyenne) est plus important et que la précision géodésique type est d'un meilleur niveau que 0,35 ns.

### 13.7 Evaluation de la qualité de la comparaison d'horloges

La Figure 13-7 montre le seuil de stabilité des calculs horaires géodésiques sur 24 heures, tel qu'il a été déterminé par Ray et Senior [Ray et Senior, 2003] à partir d'une analyse des sauts des horloges de l'IGS au changement de jour. Le comportement n'est pas notablement différent de  $\tau^{-0,5}$ , ce qui est cohérent avec un bruit «à marche aléatoire». Pour un temps d'intégration d'une journée, l'instabilité calculée est égale à  $1,4 \times 10^{-15}$ .

Certaines des meilleures stations de l'IGS s'approchent de ce niveau de qualité, mais, nous l'avons vu, d'autres sont beaucoup plus médiocres. Au-delà de l'intervalle d'analyse d'une journée, les estimations horaires

devraient être quasiment indépendantes et l'on prévoit un comportement plus proche du bruit blanc,  $\tau^{-1}$ , comme le montre la Figure 13-7.

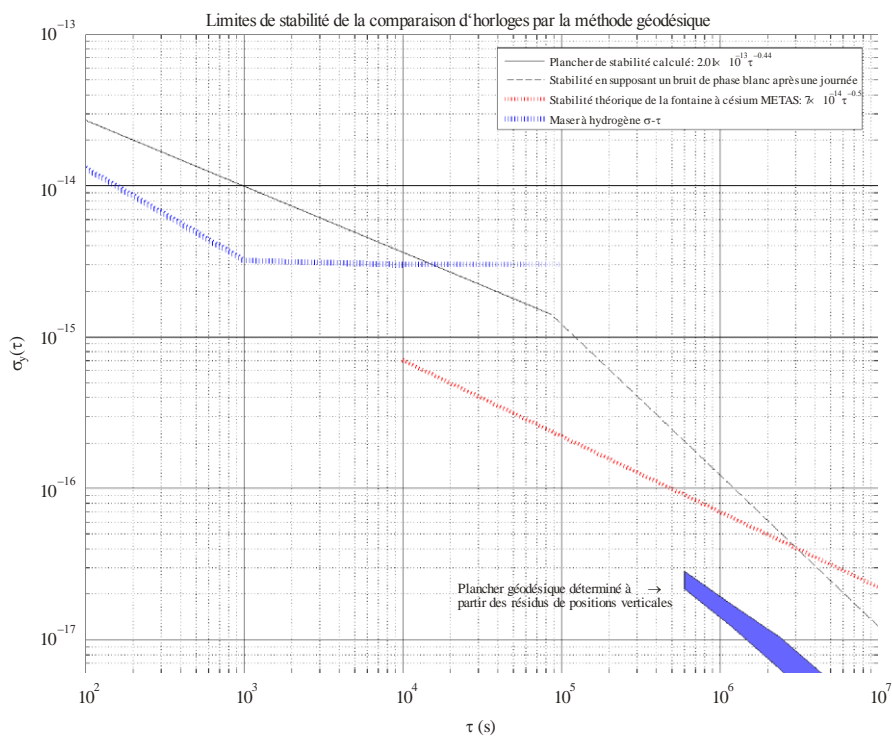
Cela étant, il n'a pas encore été possible d'étudier ce domaine avec autant de soin en raison des instabilités des étalons de fréquence d'usage courant. Lorsque l'on disposera de données de fontaines à césium en plus grande quantité, la stabilité des horloges géodésiques sur des intervalles supérieurs à 1 journée sera présentée. La Figure 13-7 indique, sous forme de courbes, l'objectif attendu de la fontaine à césium METAS [Dudle *et al.*, 2001], à titre d'exemple.

Avec des intervalles d'analyse prolongés au-delà de 24 heures, le plancher de stabilité sera probablement inférieur à celui indiqué ici, bien que cela n'ait pas été démontré. D'un autre côté, cette façon de procéder prolongera incontestablement le comportement «à marche aléatoire» des horloges géodésiques sur les mêmes intervalles, donc de durée supérieure, ce qui pourrait compromettre l'objectif d'une plus grande stabilité sur des durées plus importantes à partir d'intervalles indépendants d'une journée.

On trouve aussi, à la Figure 13-7, la stabilité spécifiée (valeur prudente probablement) du maser H actif MHM2010 de Symmetricon (successeur du maser H Sigma Tau). Cette courbe de stabilité montre que la méthode géodésique ne doit pas être un obstacle aux comparaisons de ces horloges à haute performance sur des intervalles d'une journée, même si le bruit de transfert du temps est probablement supérieur aux instabilités des horloges pour des intervalles inférieurs à 14 000 s environ. La dispersion des stabilités sur une journée que l'on observe parmi les stations à maser H de l'IGS – qui se situe entre le niveau du plancher de stabilité que nous avons calculé et  $10^{-14}$  environ – résulte probablement de la combinaison de deux facteurs: d'un côté, la stabilité inhérente de l'étalon de fréquence local (certains étant d'anciens dispositifs et d'autres n'étant pas soumis à un contrôle environnemental strict), et, de l'autre, les conditions locales des effets de la propagation par trajets multiples sur les pseudo-distances.

FIGURE 13-7

**Plancher de stabilité de l'écart type d'Allan pour des comparaisons d'horloges par la méthode géodésique (ligne noire continue)**



Le comportement de la limite reproduit à la Figure 13-7 est compatible avec un bruit «à marche aléatoire» jusqu'à des intervalles d'une journée. Au-delà, il est prévisible que les estimations horaires journalières indépendantes présenteront des erreurs dont la distribution correspond à un bruit blanc, et un écart type d'Allan  $\tau$  matérialisé par la ligne noire en pointillé. A titre de comparaison, la courbe rouge indique l'objectif attendu de la fontaine à césium METAS et la courbe bleue est celle d'un maser H  $\sigma$   $\tau$  (de Symmetricon). La limite fondamentale de la méthode géodésique est représentée par la bande bleue inférieure, qui a été déterminée à partir de la reproductibilité de mesures d'altitude des stations.

### 13.8 Evolutions futures

L'application de méthodes géodésiques aux comparaisons horaires et de fréquence à l'échelle mondiale n'en est qu'à ses débuts. Ces méthodes ne sont pas encore d'un usage courant parmi les spécialistes des références horaires. Il faut néanmoins s'attendre à une adoption beaucoup plus large de cette technique dans ce domaine, en particulier au vu de sa performance élevée et de son faible coût. L'installation de nouveaux étalons de fréquence en laboratoire, plus stables, y contribuera incontestablement. La méthode géodésique complexifie l'analyse des données, ce qui a probablement empêché d'y recourir plus largement. Il existe pourtant des ensembles logiciels qui sont très fréquemment utilisés par la communauté du radiorepérage, mais ils sont moins connus des spécialistes des références horaires, ce qui est tout à fait compréhensible. Il est très probable que le développement d'outils génériques simples permettant de résoudre les équations horaires de type PPP facilitera l'utilisation des estimations horaires géodésiques et favorisera ainsi leur adoption.

La performance de la comparaison d'horloges par la méthode géodésique est limitée par la qualité des données de pseudo-distance, en particulier par les effets de la propagation par trajets multiples. Aussi les améliorations majeures viendront-elles probablement de la réduction des erreurs liées à ces deux paramètres. Le perfectionnement de la technique de poursuite des récepteurs GPS et l'amélioration de la conception des antennes géodésiques pourraient apporter des bénéfices. Dans de nombreux cas, le choix d'un meilleur emplacement pour les équipements existants et l'optimisation de leur installation présenteraient certainement un intérêt. Mais les plus grands bénéfices sont probablement à attendre des signaux diffusés par les GNSS de prochaine génération et des nouveaux systèmes de modulation. Certains formats de signaux proposés pour GALILEO, par exemple, laissent entrevoir une réduction considérable des erreurs dues à la propagation par trajets multiples [Hein et Pany, 2002]. De façon générale, les propositions de formats de signaux consistant à décaler une plus grande quantité de puissance vers les extrémités des bandes, notamment certaines nouvelles modulations du système GPS, devraient permettre d'atténuer notablement la propagation par trajets multiples [Weill, 2003].

Pour ce qui est des comparaisons horaires reposant sur des méthodes existantes, l'erreur absolue qui prédomine est l'incertitude liée à l'étalonnage du matériel. Les erreurs d'étalonnage sont supérieures, d'au moins un ordre de grandeur, aux erreurs types des estimations horaires effectuées par la méthode géodésique. Cela étant, les perspectives d'amélioration substantielle des procédures d'étalonnage restent floues.

### Références

- ALLAN D. W. et WEISS M. [1980], «Accurate time and frequency transfer during common-view of a GPS satellite», *Proc. 1980 IEEE Frequency Control Symp.*, Philadelphie, p. 334-356.
- ALTAMIMI Z., SILLARD P. et BOUCHER C. [2000], «ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for Earth science application», *J. Geophys. Res.*, **107**(B10), 2214, doi: 10.1029/2001-JB000561, 2002.
- BEUTLER G., BROCKMANN E., GURTNER W., HUGENTOBLER U., MERVART L. et ROTHACHER M. [1994], «Extended orbit modeling techniques at the CODE processing center of the International GPS Service for Geodynamics (IGS): Theory and initial results», *Manuscripta Geodaetica*, **19**, p. 367-386.
- BOSSLER J. D., GOAD C. C. et BENDER, P. L. [1980], «Using the Global Positioning System (GPS) for geodetic positioning», *Bull. Geod.*, **54**, p. 553-563.



- BRUYNINX C. et DEFRAIGNE P. [1999], «Frequency transfer using GPS codes and phases: Short- and long-term stability», *Proc. 31st Precise Time and Time Interval Meeting*, Washington, DC, The U.S. Naval Observatory, p. 471-480.
- BYUN S. H., HAJJ G. A. et YOUNG L. E. [2002], «GPS signal multipath: A software simulator», *GPS World*, juillet **13**(7), p. 40-49.
- COUNSELMAN C. C. et SHAPIRO I. I. [1979], «Miniature interferometric terminals for Earth surveying», *Bull. Geod.*, **53**, p. 139-163.
- DACH R., BEUTLER G., HUGENTOBLE U., SCHAER S., SCHILDKNECHT T., SPRINGER T., DUDLE G. et PROST, L. [2003], «Time transfer using GPS carrier phase: Error propagation and results», *J. Geodesy*, **77**, doi 10.1007/s00190-002-0296-z, p. 1-14.
- DACH R., SCHILDKNECHT T., HUGENTOBLE U., BERNIER L.G. et DUDLE G. [2006], «Continuous Geodetic Time Transfer Analysis Methods», *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, **53**(7), p. 1250-1259.
- DEFRAIGNE P., PETIT G. et BRUYNINX C. [2001], «Use of geodetic receivers for TAI», *Proc. 33rd Precise Time and Time Interval Meeting*, Washington, DC, The U.S. Naval Observatory, p. 341-348.
- DUDLE G., JOYET A., BERTHOUD P., MILETI G. et THOMANN P. [2001], «First results with a cold cesium continuous fountain resonator», *IEEE Trans. Instr. Meas.*, **50**(2).
- ELOSEGUI P., DAVIS J. L., JALDEHAG R. T. K., JOHANSSON J. M., NIELL A. E. et SHAPIRO I. I. [1995], «Geodesy using the Global Positioning System: The effects of signal scattering on estimates of site positions», *J. Geophys. Res.*, **100**, p. 9921-9934.
- ESTEY L. H. et MEERTENS C. M. [1999], «TEQC: The multi-purpose toolkit for GPS/GLONASS data», *GPS Solutions*, **3**(1), p. 42-49.
- FLIEGEL H., GALLINI T. et SWIFT E. [1992], «Global Positioning System radiation force model for geodetic applications», *J. Geophys. Res.*, **97**(B1), p. 559-568.
- HEIN G. W. et PANY T. [décembre 2002], «Architecture and signal design of the European satellite navigation system Galileo – Status», *J. Global Positioning Systems*, **1**(2), 2002, p. 73-84.
- KEDAR S., HAJJ G. A., WILSON B. D. et HEFLIN M.B. [2003], «The effect of the second order GPS ionospheric correction on receiver positions», *Geophys. Res. Lett.*, **30**(16), 1829, doi:10.1029/2003 GL017639.
- KOUBA J. [2004], «Improved relativistic transformations in GPS», *GPS Solutions*.
- KOUBA J. et P. HEROUX [2000], «Precise point positioning using IGS orbit products», *GPS Solutions*, **5**(2), p. 12-28.
- KOUBA J. et SPRINGER T. [2001], «New IGS station and satellite clock combination», *GPS Solutions*, **4**(4), p. 31-36.
- LANGLEY R. B. [1996], «GPS receivers and the observables», *GPS for Geodesy*, Teunissen, P. J. G. et Kleusberg A. (dir.), Berlin, Springer-Verlag, p. 141-173.
- LARSON K. M., LEVINE J., NELSON L. M. et PARKER T. E. [2000], «Assessment of GPS carrier-phase stability for time-transfer applications», *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, **47**(2), p. 484-494.
- LEWANDOWSKI W., AZOUBIB J., De JONG G., NAWROCKI J. et DANAHER J. [1997], «A new approach to international time and frequency comparisons: All-in-view multi-channel GPS+GLONASS observations», *Proc. Institute of Navigation GPS97*, p. 1085-1091.
- LICHTEN S. et BORDER J. [1987], «Strategies for high precision GPS orbit determination», *J. Geophys. Res.*, **92**, 1987, p. 12751-12762.
- MADER G.L. [1998], «GPS antenna calibration at the National Geodetic Survey», *GPS Solutions*, **3**(1), p. 50-58.
- MADER G.L. et CZOPEK F. [2002], «Calibrating antenna phase centers», *GPS World*, **13**(5), p. 40-46.
- MCCARTHY D. D. et PETIT G. [2003], *IERS Conventions 2003, IERS Technical Note 32*, Francfort-sur-le-Main, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2003.
- OVERNEY F., SCHILDKNECHT Th., BEUTLER G., PROST L. et FELLER U. [1997], «GPS Time transfer using geodetic receivers: Middle-term stability and temperature dependence of the signal delays», *Proc. 11th European Frequency and Time Forum*, p. 504-508.
- PETIT G. et JIANG, Z. [28 mai 2004 et 16 juillet 2004], *Study of time transfer methods: II. TWSTT vs. geodetic clock comparisons*, rapports internes du BIPM.

- PETIT G., JIANG Z., MOUSSAY P., WHITE J., POWERS E., DUDLE G. et UHRICH P. [2001], «Progresses in the calibration of “geodetic like” GPS receivers for accurate time comparisons», *Proc. 15th European Frequency and Time Forum*, p. 164-166.
- PETIT G., JIANG Z., TARIS T., UHRICH P., BARILLET R. et HAMOUDA F. [1999], «Processing strategies for accurate frequency comparison using GPS carrier phase», *Proc. 1999 Joint European Frequency and Time Forum and 1999 IEEE International Frequency Control Symposium*, p. 235-238.
- PETIT G., JIANG Z., UHRICH P. et TARIS, F. [2000], «Differential calibration of Ashtech Z12-T receivers for accurate time comparisons», *Proc. 14th European Frequency and Time Forum*, p. 40-44.
- PETIT G., JIANG Z., WHITE J., BEARD R. et POWERS E. [2001], «Absolute calibration of an Ashtech Z12-T GPS receiver», *GPS Solutions*, 4(4), p. 41-46.
- PETIT G., THOMAS C., JIANG Z., UHRICH P. et TARIS F. [1998], «Use of GPS Ashtech Z12T receivers for accurate time and frequency comparisons», *Proc. 1998 IEEE International Frequency Control Symposium*, p. 306-314.
- PLUMB J. et LARSON K. [2005], «Long-Term Comparisons Between Two-Way Satellite and Geodetic Time Transfer Systems», *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, **52**(11), p. 1912-1918.
- PLUMB J., LARSON K., WHITE J. et POWERS E. [2005], «Absolute Calibration of a Geodetic Time Transfer System», *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, **52**(11), p. 1904-1911.
- RAY J. R., DRAGERT H. et KOUBA J. [2000], «Recommendations for handling non-Rogue data», *IGS 1999 Technical Reports*, Jet Propulsion Laboratory Publication, Pasadena, Californie, p. 445-451.
- RAY J. R. et SENIOR K. [2001], «Temperature sensitivity of timing measurements using Dorne Margolin antennas», *GPS Solutions*, **5**(1), p. 24-30.
- RAY J. R. et SENIOR K. [2003], «IGS/BIPM Pilot Project: GPS carrier phase for time/frequency transfer and time scale formation», *Metrologia*, **40**(3), p. S270-S288.
- RIECK C., JARLEMARK P., JALDEHAG K. et JOHANSSON J. [2003], «Thermal influence on the receiver chain of GPS carrier phase equipment for time and frequency transfer», *Proc. 2003 IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition Jointly with the 17th European Frequency and Time Forum*, p. 326-331.
- SCHILDKNECHT Th. et DUDLE G. [2000], «Time and frequency transfer: High precision using GPS phase measurements», *GPS World*, 2000 **11**(2), 2000, p. 48-52.
- SCHMID R. et ROTHACHER M. [2003], «Estimation of elevation-dependent satellite antenna phase center variations of GPS satellites», *J. Geodesy*, **77**, doi: 10.1007/s00190-003-0339-0, p. 440-446.
- SCHUPLER B. R., ALLSHOUSE R. L. et CLARK T. A. [1994], «Signal characteristics of GPS user antennas», *J. Inst. Navigation*, **41**, p. 277-295.
- SCHUPLER B. R. et CLARK T. A. [2001], «Characterizing the behavior of geodetic GPS antennas», *GPS World*, **12**(2), p. 48-55.
- SENIOR K., KOPPANG P. et RAY J. [2003], «Developing an IGS time scale», *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, **50**(6), p. 585-593.
- SENIOR K., MATSAKIS D. et POWERS E. [1999], «Attenuating day-boundary discontinuities in GPS carrier-phase time transfer», *Proc. 31st Precise Time and Time Interval Meeting*, p. 481-489.
- SENIOR K., RAY J. et PETIT G. [2004], «Comparison of instrumental and empirical station timing biases for a set of Ashtech GPS receivers», *Proc. 2004 European Frequency and Time Forum*.
- THOMAS C. et AZOUBIB J. [1996], «TAI computation: Study of an alternative choice for implementing an upper limit of clock weights», *Metrologia*, **33**, p. 227-240.
- WEILL L. R. [2003], «How good can it get with new signals? Multipath mitigation», *GPS World*, **14**(6), p. 106-113.
- WHITE J., BEARD R., LANDIS G., PETIT G. et POWERS E. [2001], «Dual frequency absolute calibration of a geodetic GPS receiver for time transfer», *Proc. 15th European Frequency and Time Forum*, p. 167-172.
- WU J. T., WU S. C., HAJJ G. A., BERTIGER W. I. et LICHTEN S. M. [1993], «Effects of antenna orientation on GPS carrier phase», *Manuscripta Geodaetica*, **18**, p. 91-98.

ZUMBERGE J. F., HEFLIN M. B., JEFFERSON D. C., WATKINS M. M. et WEBB F. H. [1997], «Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks», *J. Geophys. Res.*, **102**(B3), p. 5005-5017.



## CHAPITRE 14

**COMPARAISON DE TEMPS ET DE FRÉQUENCE PAR ALLER ET RETOUR  
SUR SATELLITE (TWSTFT)**

	<i>Page</i>
14.1 Introduction .....	206
14.2 Description de la technique TWSTFT .....	206
14.3 Mesures de TWSTFT .....	208
14.4 Equipement du laboratoire de la station .....	208
14.4.1 Modem à étalement du spectre .....	209
14.4.2 Compteur d'intervalles de temps.....	209
14.5 Mesures dépendantes de la liaison (trajet et équipement) .....	209
14.5.1 L'effet Sagnac .....	209
14.5.2 Correction relativiste du second ordre applicable à l'effet Sagnac .....	210
14.5.3 Différence entre les fréquences de la liaison montante et de la liaison descendante.....	210
14.6 Méthodes d'étalonnage .....	210
14.6.1 Etalonnage d'une station au moyen d'un simulateur de satellite.....	210
14.6.2 Etalonnage d'une station au moyen d'une station terrienne transportable .....	211
14.6.3 Campagnes d'étalonnage de 1993 et 1998 .....	211
14.6.4 Campagne d'étalonnage en bande X.....	211
14.7 Problèmes causés par l'utilisation de plusieurs transpondeurs dans le satellite .....	211
14.8 Problèmes causés par l'utilisation de plusieurs transpondeurs dans le satellite .....	212
14.9 Stabilité à long terme de la méthode TWSTFT .....	213
14.9.1 Comparaisons à long terme entre la méthode GPS et la méthode TWSTFT.....	213
14.10 Conclusion.....	214

## 14.1 Introduction

Dans le domaine du transfert du temps, l'un des premiers objectifs est de comparer des horloges et/ou des étalons de fréquence sur de longues distances. Ce type de comparaison est motivé par de nombreuses raisons. Certains voudront par exemple effectuer des mesures instantanées sur des horloges très éloignées en vue de surveiller la qualité de certaines échelles de temps, tandis que d'autres souhaiteront plutôt comparer des étalons de fréquence évolués, comme des fontaines à césium, et/ou en contrôler la stabilité à long terme. La précision et l'exactitude susceptibles d'être atteintes au cours de ces mesures présente un intérêt pour la métrologie.

La technique appelée TWSTFT (*Two-way Satellite Time and Frequency Transfer*/comparaison de temps et de fréquence par aller et retour sur satellite) est une méthode permettant d'estimer les différences horaires entre deux stations par échange actif de signaux horaires via un satellite de communication géostationnaire [Kirchner, 1991]. En 1989, la 11<sup>e</sup> réunion du Comité consultatif pour la définition de la seconde (CCDS), aujourd'hui Comité consultatif du temps et des fréquences (CCTF), a émis la déclaration 1989/1 encourageant l'utilisation de la méthode TWSTFT et proposant la création, par le BIPM, d'un groupe de travail *ad hoc* sur les comparaisons de temps et de fréquence par aller et retour sur satellite.

Par décision de la 12<sup>ème</sup> réunion du CCDS en 1993, le groupe *ad hoc* a été converti en un groupe de travail permanent du CCTF. Principaux résultats obtenus par le groupe de travail:

- l'élaboration d'un format standard;
- l'organisation des liaisons horaires TWSTFT;
- le choix des modems;
- le calendrier des observations;
- la durée des observations;
- l'échange de données;
- la négociation sur l'utilisation des satellites;
- l'évaluation des liaisons TWSTFT;
- la comparaison avec d'autres techniques de comparaison d'horloges.

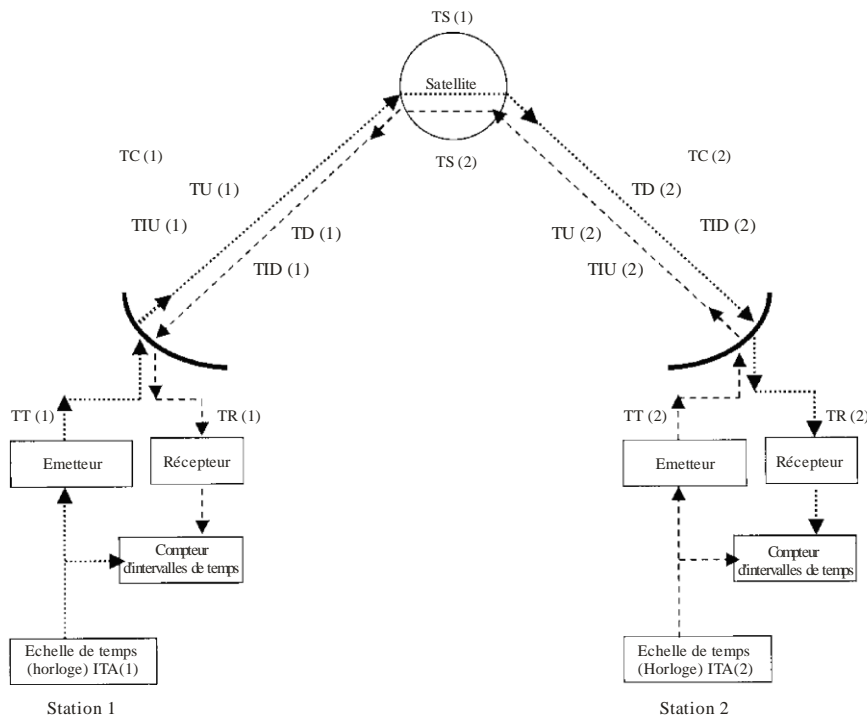
Cette méthode a progressivement gagné en popularité comme moyen d'obtenir des comparaisons à haute résolution entre laboratoires du temps. Le BIPM utilise désormais des données relatives à des horloges contribuant au calcul du temps TAI qui ont été obtenues par cette technique (voir le 20<sup>ème</sup> Rapport du BIPM sur la comparaison de temps et de fréquence par aller et retour sur satellite).

## 14.2 Description de la technique TWSTFT

Pour mener à bien la technique TWSTFT, les laboratoires doivent travailler par paires (voir la Figure 14-1). Les deux laboratoires concernés doivent disposer de stations de réception et d'émission et de modems à étalement de spectre en vue d'échanger des informations horaires via des satellites de communication à l'aide de signaux codés de pseudo-bruit (PB) et du mode AMRC (accès multiple par répartition en code). Côté émission, au moyen du modem, un signal à une impulsion par seconde (1 ips) est modulé sur la fréquence intermédiaire de la station, en règle générale 70 MHz. Le signal est ensuite converti vers les fréquences supérieures en un signal RF, puis amplifié et émis vers le satellite. Dans le transpondeur du satellite, ce signal est amplifié, décalé en fréquence d'une valeur égale à la fréquence de transposition du satellite, amplifié de nouveau et réémis. Au niveau du site de réception, le signal RF reçu est amplifié, abaissé en fréquence vers la fréquence intermédiaire, et démodulé au moyen du modem pour produire un signal à 1 ips. La procédure consiste à effectuer des mesures simultanées d'intervalles de temps sur les deux sites. Le signal à 1 ips généré par l'horloge locale démarre le compteur d'intervalles de temps local et, après avoir été émis par le satellite, arrête le compteur d'intervalles de temps distant.

FIGURE 14-1

Principe de la technique de comparaison de temps et de fréquence par aller et retour sur satellite



Sat\_time\_freq-14-01

Paramètres utilisés dans la Figure 14-1 pour la station 1 et la station 2 (k = 1 ou 2):

- TA(k): Horloge ou échelle de temps de la station k
- TI(k): Valeur relevée sur le compteur d'intervalles de temps
- TT(k): Temps de propagation dans l'émetteur
- TR(k): Temps de propagation dans le récepteur
- TU(k): Temps de propagation de la liaison montante à travers l'atmosphère
- TD(k): Temps de propagation de la liaison descendante à travers l'atmosphère
- TS(k): Temps de propagation dans le transpondeur du satellite
- TC(k): Correction des effets relativistes
- TI<sub>U</sub>(k): Retard ionosphérique sur la liaison montante
- TI<sub>D</sub>(k): Retard ionosphérique sur la liaison descendante.

La différence entre les horloges de la station 1 et de la station 2 est donnée par:

$$TA(1)-TA(2)$$

où:

TA(1) est lié à TI(1) par la formule:

$$TI(1) = TA(1) - TA(2) + TT(2) + T_U(2) + TS(2) + T_D(1) + TR(1) + TC(1) + TI_U(1) + TI_D(1) \quad (14-1)$$

et TA(2) est lié à TI(2) par la formule:

$$TI(2) = TA(2) - TA(1) + TT(1) + T_U(1) + TS(1) + T_D(2) + TR(2) + TC(2) + TI_U(2) + TI_D(2) \quad (14-2)$$

La différence entre ces deux expressions donne:

$$\begin{aligned} TI(1) - TI(2) = & 2 [TA(1) - TA(2) + TT(2) - TT(1) + T_U(2) - T_U(1) + TS(2) - TS(2) \\ & + T_D(1) - T_D(2) + TR(1) - TR(2) + TC(1) - TC(2) + TI_U(1) - TI_U(2) + TI_D(1) - TI_D(2)] \end{aligned} \quad (14-3)$$

Ce qui peut être réécrit sous la forme suivante:

$$\begin{aligned} TA(1) - TA(2) = & \frac{1}{2} [TI(1) - TI(2) + TT(1) - TT(2) + T_U(1) - T_U(2) + TS(1) - TS(2) \\ & + T_D(2) - T_D(1) + TR(2) - TR(1) + TC(2) - TC(1) + TI_U(1) - TI_U(2) + TI_D(1) - TI_D(2)] \end{aligned} \quad (14-4)$$

Si, dans le satellite, les signaux traversent le même transpondeur, alors  $TS(1)$  égale  $TS(2)$  et les temps de propagation correspondants s'annulent. Si le satellite ne se déplace pas trop vite, alors  $T_U(1)$  égale  $T_D(1)$  et  $T_U(2)$  égale  $T_D(2)$  et les temps de propagation correspondants s'annulent.  $TC(1)$  et  $TC(2)$  peuvent être calculés, moyennant l'incertitude sur les coordonnées des stations. Si les stations sont proches l'une de l'autre, alors  $TI_U(1) = TI_U(2)$  et  $TI_D(1) = TI_D(2)$ .

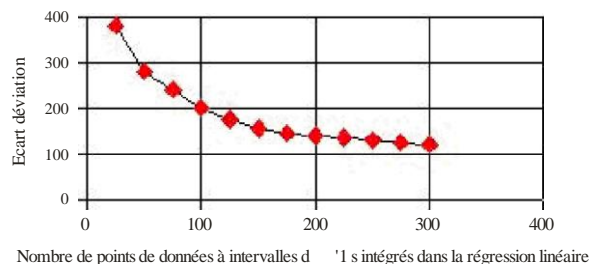
### 14.3 Mesures de TWSTFT

La mesure fondamentale réalisée au moyen de la méthode TWSTFT est une estimation de la différence entre deux horloges. On peut calculer l'écart type des résidus des différences entre les deux horloges mesurées par cette méthode. Dans l'hypothèse raisonnable d'un comportement d'horloge de type bruit blanc normal, on peut s'attendre à ce qu'en intégrant de plus en plus de mesures dans une régression linéaire des différences d'horloges, l'écart type de la régression tende asymptotiquement vers une limite.

La Figure 14-2 montre l'écart type en fonction du nombre de points de données à intervalles d'une seconde intégrés dans l'intervalle d'ajustement de la courbe [Klepczynski, 1995]. Après un temps d'observation de 300 s environ, la courbe tend vers une limite de 125 ps environ.

FIGURE 14-2

#### Ecart type des résidus par rapport à un ajustement linéaire des différences d'horloges obtenues par la méthode TWSTFT



Sat\_time\_freq-14-02

### 14.4 Equipement du laboratoire de la station

De nombreuses études ont été menées pour mieux cerner les incertitudes liées aux équipements TWSTFT utilisés au sol. Kirchner en propose un résumé dans [Kirchner, 1999]. Les sources principales de ces incertitudes sont les suivantes:

- le modem à étalement de spectre servant à générer le signal à 1 ips qui est émis par une station et reçu par l'autre;
- un compteur d'intervalles de temps utilisé pour mesurer la différence entre une horloge locale et l'impulsion horaire reconstruite par le modem à étalement de spectre.

l'incertitude due aux variations du rapport porteuse/densité de bruit ( $C/N_0$ ) dans le modem à étalement de spectre utilisé.



### 14.4.1 Modem à étalement du spectre

Le modem MITREX a été le premier modem à étalement de spectre du commerce spécialement conçu pour les mesures de distance et la comparaison d'horloges point à point de haute précision faisant appel à un satellite de communication géostationnaire [Hartl *et al.*, 1983]. Il repose sur la technique dite de la séquence directe ou technique PB (pseudo-bruit). La porteuse est modulée par déplacement de phase bivalente (MDPB). La résolution d'un système utilisant des codes PB dépend de la longueur d'un élément de code, la largeur de bande nécessaire étant égale à l'inverse de cette valeur, le débit d'éléments ( $f_c$ ). Plusieurs codes de ce type peuvent être transmis sur le même canal (AMRC) sans se brouiller mutuellement, à condition d'utiliser des codes présentant une faible corrélation croisée. Le MITREX affiche un débit d'éléments de 2,5 MHz et nécessite un canal de satellite de largeur de bande type égale à 3,5 MHz, selon le filtrage du signal et le service par satellite utilisés [Veenstra, 1990].

A l'heure actuelle, deux types de modem sont vendus dans le commerce: le modem ATLANTIS, fabriqué par Allen Osborne Associates, Etats-Unis, et le modem SATRE, fabriqué par Time Tech GmbH, Allemagne. Le modem SATRE est entièrement compatible avec le modem MITREX, contrairement au modem ATLANTIS qui utilise sa propre norme (débit d'éléments légèrement différent, autres codes). Un autre modem, développé au Communication Research Laboratory (CRL), Japon, n'est pas compatible avec le modem MITREX.

### 14.4.2 Compteur d'intervalles de temps

Il est de bonne pratique que les stations équipées d'un modem doté d'une fonction interne de mesure d'intervalles de temps utilisent un compteur externe. Un compteur externe est généralement nécessaire pour accompagner les mesures.

#### 14.4.2.1 Rapport porteuse/densité de bruit ( $C/N_0$ )

Les paramètres d'exploitation des stations TWSTFT sont déterminés par le rapport porteuse/densité de bruit,  $C/N_0$ , du modem et par les caractéristiques du satellite (puissance isotrope rayonnée équivalente ou p.i.r.e., et facteur de qualité,  $G/T$ , du terminal de satellite). Ces caractéristiques sont calculées au moyen d'un bilan de liaison. Le rapport porteuse/densité de bruit,  $C/N_0$ , est nécessaire pour évaluer la précision des mesures requise.

## 14.5 Mesures dépendantes de la liaison (trajet et équipement)

Dans ce domaine, les sources principales d'incertitude sont les suivantes:

- effet dû au mouvement, autour de l'axe de rotation de la Terre, des stations participantes et du satellite pendant la propagation du signal en direction et en provenance du satellite (effet Sagnac);
- effet dû au mouvement du satellite géostationnaire par rapport à la surface de la Terre;
- effet dû à la différence de retard ionosphérique du signal dans les fréquences montantes et descendantes des signaux émis par l'utilisateur et par le satellite.

### 14.5.1 L'effet Sagnac

L'effet Sagnac résulte du mouvement, autour de l'axe de rotation de la Terre, des stations terriennes et du satellite pendant la propagation d'un signal en direction et en provenance du satellite [Ashby et Allan, 1979]. Cet effet est proportionnel à la projection sur l'équateur de la surface du quadrilatère dont les sommets sont le centre de la Terre, la position des stations à la surface de la Terre et la position du satellite par rapport à la surface de la Terre. Il dépend donc de la position des stations 1 et 2 et du satellite. L'effet Sagnac atteint 420 ns environ dans la configuration extrême où les stations 1 et 2 sont situées sur l'équateur, chacune avec une élévation de  $6^\circ$ , du fait de la séparation maximale en longitude ( $150^\circ$  environ). Pour le calcul de l'effet Sagnac, les exigences de précision de position sont inférieures de plusieurs ordres de grandeur par rapport à celles requises pour le calcul du temps de propagation des signaux au moyen de méthodes unidirectionnelles comme le GPS. Pour l'effet Sagnac, l'incertitude liée aux erreurs sur les coordonnées des stations est estimée à 150 ps entre TUG et USNO et à 16 ps entre TUG et OCA.

### 14.5.2 Correction relativiste du second ordre applicable à l'effet Sagnac

Une correction du second ordre, due au mouvement du satellite par rapport à la surface de la Terre, est fonction de la vitesse du satellite et des élévations de ce dernier vues des stations 1 et 2 [Petit et Wolf, 1993]. La configuration extrême se présente lorsqu'une station affiche une élévation de  $6^\circ$  et l'autre de  $90^\circ$ . La différence entre les instants d'arrivée (TOA, *time of arrival*), au niveau du satellite, de signaux émis simultanément est alors de 17 ms environ. Dans l'hypothèse d'une vitesse radiale du satellite relativement élevée de 3 m/s, l'erreur résultante est de 170 ps environ. L'effet peut être réduit au minimum en choisissant un satellite qui est vu des deux stations avec le même angle d'élévation. Il peut aussi être totalement éliminé en décalant les instants d'émission. Les effets estimés lors d'expériences menées entre l'USNO (United States Naval Observatory) et la TUG (Technical University Graz) sont de l'ordre de 100 ps. Ils sont de l'ordre de 10 ps entre l'Observatoire de la Côte d'Azur (OCA) et la TUG (Technical University Graz).

### 14.5.3 Différence entre les fréquences de la liaison montante et de la liaison descendante

Le retard subi par un signal qui pénètre dans l'ionosphère, ou retard ionosphérique, dépend de la fréquence (retard proportionnel à  $1/f^2$ ), du contenu électronique total (CET) et de l'élévation [Flock, *et al.*, 1982; Jespersen, 1989]. Le CET est le contenu électronique total d'une colonne verticale de section transversale de  $1 \text{ m}^2$ , exprimé en électrons/ $\text{m}^2$ . Le CET le long d'un trajet oblique peut être calculé à partir d'une fonction de projection. L'incertitude due à l'ionosphère dépend des fréquences de la liaison montante et de la liaison descendante des stations 1 et 2 ainsi que du CET et de l'élévation au niveau des deux stations. L'incertitude liée à la non-réciprocité est de 150 ps environ dans le cas extrême suivant:

- l'un des satellites présente une élévation de  $90^\circ$  et l'autre de  $6^\circ$ ;
- fréquences en liaison montante et en liaison descendante de 14 GHz et 12 GHz, et de 14 GHz et 11 GHz;
- CET de  $10^{17}$  électrons/ $\text{m}^2$  et  $10^{18}$  électrons/ $\text{m}^2$  (dans l'hypothèse où l'une des stations est exploitée de nuit et l'autre de jour).

Pour les fréquences de la bande C (6/4 GHz), l'effet est bien entendu notablement supérieur. Il peut être réduit au minimum en choisissant un satellite pour lequel les deux élévations sont à peu près les mêmes et en veillant à ce que les CET et les fréquences en liaisons montante et descendante soient identiques sur les deux sites, ou en optant pour des fréquences encore plus élevées (bande Ka: 30/20 GHz).

Un effet n'est pas pris en compte: le retard troposphérique. Il est indépendant de la fréquence (négligeable) aux fréquences utilisées pour les communications par satellite.

## 14.6 Méthodes d'étalonnage

Certaines incertitudes ne peuvent pas être mesurées ou estimées de façon statistique. Elles doivent donc être évaluées par le biais d'un processus souvent appelé *étalonnage*. Dans certains cas, il s'agit de mesurer le temps de propagation à travers chacun des composants du système utilisé pour effectuer les mesures ou de mesurer le délai de propagation à travers l'ensemble du système. L'étalonnage peut aussi être réalisé au moyen d'un système transportable qui affiche une bonne stabilité ou qui a lui-même été étalonné. Cette façon de procéder est parfois appelée «étalonnage relatif». Il arrive même que l'on procède par comparaison au moyen d'un système totalement différent.

### 14.6.1 Etalonnage d'une station au moyen d'un simulateur de satellite

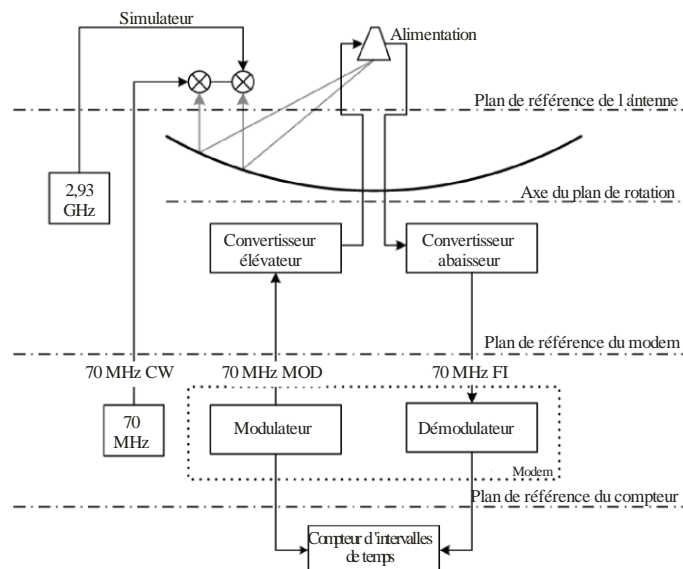
Si certains composants d'un système peuvent être mesurés séparément, l'incertitude totale du système ne peut pas être estimée de façon simple, en raison des trajets complexes que le signal empreinte à travers le système. L'incertitude totale peut être obtenue par deux méthodes: en mesurant la différence des temps de propagation des stations 1 et 2, ou en mesurant les temps de propagation de chaque station séparément.

Dans la première méthode, les temps de propagation dans chacun des composants du système sont générés par injection d'un signal à travers un simulateur de satellite dont les caractéristiques sont bien documentées [De Jong et Polderman, 1994; De Jong et Van Bemmelen, 2001]. Le système d'étalonnage est automatisé. L'une des campagnes de mesures a été effectuée à l'aide d'un terminal de satellite transportable (FAST, *Fly-Away Satellite Terminal*) [De jong *et al.*, 1995]. On notera que ce type de simulateur peut aussi servir à mesurer en

continu la variation des temps de propagation d'une station pour en donner la stabilité à long terme. La Figure 14-3 présente le diagramme synoptique du simulateur de satellite du laboratoire VLS qui a servi à effectuer les mesures lors de cette campagne.

FIGURE 14-3

**Diagramme synoptique du simulateur de satellite du VSL utilisé pour mesurer les temps de propagation à travers une station terrienne TWSTFT**



Sat\_time\_freq-14-03

#### 14.6.2 Etalonnage d'une station au moyen d'une station terrienne transportable

La seconde méthode peut être mise en œuvre en installant une station terrienne sur les sites de deux stations participantes ou en employant une troisième station comme étalon de transfert. Des campagnes de mesures reposant sur cette technique ont été effectuées en 1993 et 1998.

#### 14.6.3 Campagnes d'étalonnage de 1993 et 1998

Lors de la première campagne, une station TWSTFT a été transportée entre l'Observatoire de Côte d'Azur, Grasse, France (OCA) et la Technical University of Graz, Autriche (TUG), soit une distance de 800 km environ [Kirchner *et al.*, 1993]. Les écarts types formels des mesures effectuées pendant le voyage étaient de 1 ns environ. Les moyens d'améliorer cette expérience ont été examinés et une seconde campagne a été menée [Kirchner *et al.*, 1998]. Au cours de cette seconde campagne, les écarts types formels étaient de l'ordre de 200 ps, soit une nette amélioration par rapport à la première expérience. Pendant les deux campagnes, des comparaisons avec la méthode des observations simultanées des satellites du GPS ont été effectuées et l'on a consigné les différences systématiques entre les deux méthodes. Dans les deux méthodes d'étalonnage externe, il convient d'effectuer les mesures en continu afin de dresser un historique statistique de l'incertitude.

#### 14.6.4 Campagne d'étalonnage en bande X

Une expérience mettant en œuvre une station transportable en bande X a été menée entre l'US Naval Observatory (USNO), Washington, et le Laboratoire national de physique (NPL), Teddington, Angleterre.

### 14.7 Problèmes causés par l'utilisation de plusieurs transpondeurs dans le satellite

Si les temps de propagation à travers les différents transpondeurs du satellite n'ont pas été mesurés avant le lancement, il est très difficile d'obtenir des estimations de l'incertitude qui leur est associée. La seule façon de procéder est d'effectuer un étalonnage relatif en transportant un système étalonné sur les sites respectifs des

stations participantes. Ces mesures doivent être répétées aussi souvent que possible, en s'efforçant d'appliquer différentes techniques indépendantes pour en valider les résultats. Ici, la difficulté majeure tient au fait que les techniques utilisées pour vérifier d'autres techniques peuvent ne pas présenter la même incertitude que la technique primaire. Il convient donc d'être extrêmement vigilant lorsque l'on applique cette procédure à des fins d'évaluation de l'incertitude.

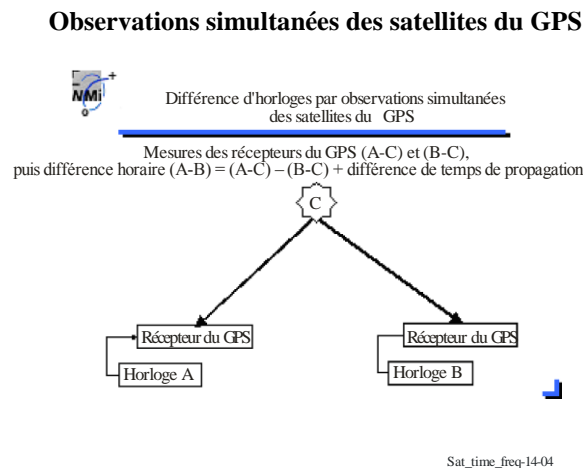
Le système indépendant étalonné peut aussi être un système TWSTFT, si, pour ce système, le problème de la méconnaissance des différences entre les délais de propagation dans le satellite ne se pose pas. Si ces différences sont connues (grâce à des mesures effectuées avant le lancement par exemple), on peut appliquer les méthodes décrites au paragraphe précédent pour étalonner les temps de propagation des stations.

#### 14.8 Problèmes causés par l'utilisation de plusieurs transpondeurs dans le satellite

Outre les deux techniques exposées précédemment, d'autres méthodes, comme le GPS, peuvent être utilisées. Il va de soi que la précision ainsi obtenue ne peut pas être meilleure que la précision du système GPS lui-même.

La configuration des mesures par la méthode des observations simultanées des satellites du GPS est présentée à la Figure 14-4. Les signaux émis par les satellites de navigation (C) sont reçus par les récepteurs et mesurés par rapport aux échelles de temps de l'horloge A et de l'horloge B situées respectivement en A et B. Par soustraction des valeurs mesurées (A – C) et (B – C), on obtient la différence des échelles de temps (A – B).

FIGURE 14-4



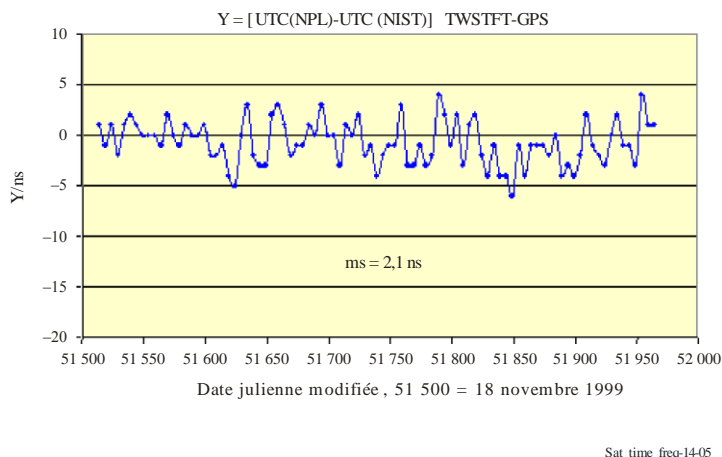
S'agissant des liaisons, les temps de propagation communs dans le satellite et dans son horloge s'annulent et seules les différences des retards ionosphériques et troposphériques sont à prendre en compte. Au niveau des sites A et B, les temps de propagation dans l'équipement (antenne, câble d'antenne, câble d'horloge et récepteur) étant en principe connus (étalonnage), le résultat peut être corrigé pour tenir compte de leur différence. Ces temps de propagation ne devraient pas dépendre des conditions environnementales.

Dans un premier temps, une unité de comparaison d'horloges GPS (TTU, *Time Transfer Unit*) est envoyée sur les sites des stations participantes de façon à effectuer, au début de la période d'étalonnage, des mesures en ligne de base par rapport à une unité TTU GPS présente sur site pendant toute la période d'étalonnage. Pendant les intervalles suivants, le récepteur étalonné est de nouveau envoyé sur les sites des stations participantes.

La Figure 14-5 présente les résultats de ces comparaisons sur de longues périodes.

FIGURE 14-5

**Différences entre la méthode TWSTFT et la méthode par observations simultanées du code C/A des satellites du GPS pour une liaison NPL/NIST**



## 14.9 Stabilité à long terme de la méthode TWSTFT

Pour la comparaison de fréquences, 150 ps est probablement une bonne estimation de l'incertitude associée aux mesures effectuées au moyen de la méthode TWSTFT.

### 14.9.1 Comparaisons à long terme entre la méthode GPS et la méthode TWSTFT

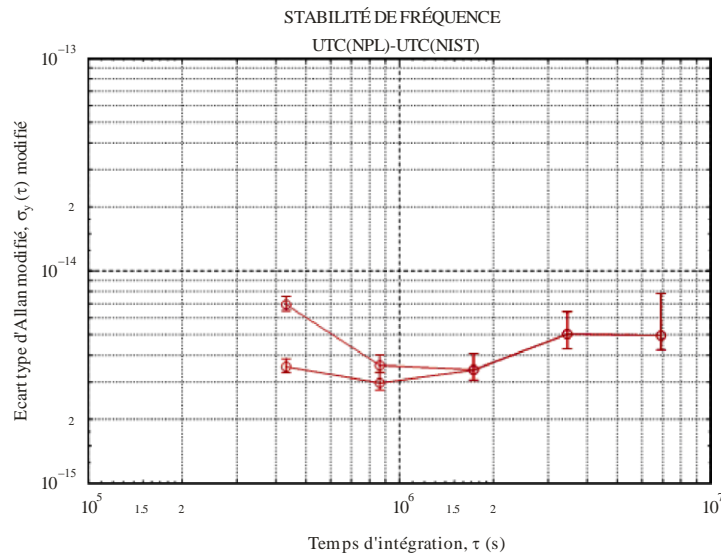
On compte, en septembre 2002, douze liaisons TWSTFT opérationnelles en Europe, en Amérique du Nord et sur le pourtour du Pacifique, dont dix participent à l'établissement du temps TAI. Ces liaisons TWSTFT sont toutes comparées aux observations simultanées des satellites du GPS et publiées dans les Rapports du BIPM sur la comparaison de temps et de fréquence par aller et retour sur satellite. Cette surveillance continue fournit des informations précieuses sur la stabilité à long terme des deux méthodes: certaines de ces liaisons sont opérationnelles depuis trois ans déjà. La Figure 14-5 illustre une comparaison type appliquée à une liaison entre le NPL et le NIST, qui sont distants de 8 000 km environ, pour la période 51 510-51 970 (jours juliens modifiés). La liaison TWSTFT NPS/NIST a été étalonnée par GPS.

Les données TWSTFT collectées au cours de trois sessions hebdomadaires, le lundi, le mercredi et le vendredi, ont été interpolées linéairement pour des dates TAI standard (jours juliens modifiés se terminant par 4 et 9). Les observations simultanées des satellites du GPS ont été calculées à partir des éphémérides précises et des cartes ionosphériques de l'IGS, puis lissées et interpolées pour les dates standard. Pendant la période de comparaison, aucun effet de décalage ou saisonnier n'a été observé. La valeur quadratique moyenne des différences entre les deux méthodes pour la période de comparaison est égale à 2,1 ns.

L'incertitude de la liaison TWSTFT est estimée à moins de 1 ns, tandis que celle des comparaisons simultanées des satellites du GPS est de 2,5 ns. Aussi pense-t-on que le bruit observé dans les différences entre les deux méthodes est essentiellement dû aux observations simultanées du GPS. Cette conclusion est confirmée par l'analyse de la stabilité de fréquence de [UTC(NPL) – UTC(NIST)], présentée à la Figure 14-6.

FIGURE 14-6

**Ecart type d'Allan modifié indiquant la stabilité de fréquence des deux techniques:  
observations simultanées des satellites du GPS (courbe supérieure) et TWSTFT (courbe inférieure)**



Les données obtenues par observations simultanées des satellites du GPS font apparaître un bruit blanc de phase dû à la méthode de comparaison, jusqu'à des temps d'intégration de 20 jours. Les données TWSTFT affichent un bruit blanc de fréquence, caractéristique du comportement des horloges, dès 5 jours de temps d'intégration; en d'autres termes, pour des temps d'intégration de 5 jours, les données TWSTFT ne font pas apparaître d'autre bruit. Il ressort que deux horloges situées à 8 000 km de distance, l'une au NPL, l'autre au NIST, sont comparées par TWSTFT sans bruit de transfert du temps pour des temps d'intégration de 5 jours. Les données GPS indiquent le bruit de la méthode, tandis que les données TWSTFT montrent le bruit des horloges.

### 14.10 Conclusion

Les données semblent corroborer l'intérêt que présente l'utilisation de la méthode TWSTFT pour la comparaison d'horloges et de fréquence avec une précision élevée. La méthode TWSTFT suppose un investissement de départ élevé, mais compte tenu de la facilité de la réduction des données, elle constitue, parallèlement aux autres techniques, une solution de substitution attrayante. Cette méthode étant actuellement étendue à d'autres types d'expérience comme la poursuite de la phase de la porteuse, tout porte à croire qu'elle ouvrira à l'avenir de nouvelles possibilités.

## Références

- ASHBY N. et ALLAN D. W. [1979], «Practical Implications of Relativity for a Global Coordinate Time Scale», *Radio Science*, **14**, p. 649-669.
- 20<sup>e</sup> Rapport du BIPM sur la comparaison de temps et de fréquence par aller et retour sur satellite, ([http://www.bipm.fr/pdf/cctf/wg\\_twstft.html](http://www.bipm.fr/pdf/cctf/wg_twstft.html)).
- De JONG G. *et al.* [1995], «Results of the Calibration of the Delays of Earth Stations for TWSTFT using the VSL Satellite Simulator Method», *Proceedings of the 27th Annual PTTI Meeting*, p. 359-372.
- De JONG G. et POLDERMAN M. C. [1994], «Automated Delay Measurement System for an Earth Station for Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer», *Proceedings of the 26th Annual PTTI Meeting*, 6-8 décembre, Reston, Virginie, Etats-Unis d'Amérique, p. 305-317.
- De JONG G. et VAN BEMMELEN R. [2001], «Evaluation and Improvement of the Calibration of a TWSTFT Station Using SATSIM», *Proceedings of the 33<sup>rd</sup> Annual PTTI Meeting*, p. 256-262.
- FLOCK W. L., SLOBIN S. D. et SMITH E. K. [1982], «Propagation effects on radio range and noise in earth-space telecommunications», *Radio Science*, **17**, No. 6, 1982, p. 1411.
- HARTL Ph., GIESCHEN N., MOSSNER K. M., SCHAFER W. et WENDE C. M. [1983], «High Accuracy Global Time Transfer via Geosynchronous Telecommunication Satellites with MITREX», *Journal of Flight Sciences and Space Research*, **7**, p. 335-342.
- JESPERSEN J. [31 mai-2 juin 1989], «Impact of Atmospheric Non-reciprocity on Satellite Two-Way Time Transfers», *Proceedings of the 43rd Annual Symposium on Frequency Control*, Denver, Colorado, Etats-Unis d'Amérique, p. 186-192.
- KIRCHNER D. [1991], «Two-Way Time Transfer via Communication Satellites», *Proceedings of the IEEE (Special Issue on Time and Frequency)*, **79**, p. 186-192.
- KIRCHNER D., RESSLER H., GRUDLER P., BAUMONT F., VEILLET Ch., LEWANDOWSKI W., HANSON W., KLEPCZYNSKI W. et UHRICH P. [1993], «Comparison of GPS Common-View and Two-Way Satellite Time Transfer over a Baseline of 800 km».
- KIRCHNER D., RESSLER H., HETZEL P., SORING A. et LEWANDOWSKI W. [1998], «Calibration of Three European TWSTFT Stations using a Portable Station and Comparison of TWSTFT and GPS Common-View Measurement Results», *Proceedings of the 30<sup>th</sup> PTTI Meeting*, p. 365-375.
- KIRCHNER D. [1999], «Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer (TWSTFT): Principle, Implementation and Current Performance», *Review of Radio Science 1996-1999*, Oxford University Press.
- KLEPCZYNSKI W. [1995], *Two Way Satellite Time Transfer*, Tutorial at PTTI Meeting.
- PETIT G. et WOLF P. [1993], «Relativistic Theory for Picosecond Time Transfer in the Vicinity of the Earth», *Proceedings of the 25<sup>th</sup> Annual PTTI Meeting*, p. 205-214.
- VEENSTRA L. B. [1990], «International Two-Way Satellite Time Transfers Using INTELSAT Space Segments and Small Earth Stations», *Proceedings of the 22nd Annual PTTI Meeting*, 4-6 décembre 1990, Vienna, Virginie, Etats-Unis d'Amérique, p. 383-398.





CHAPITRE 15

**DIFFUSION DU TEMPS ET DES FRÉQUENCES: RÉSUMÉ**

Plusieurs techniques sont applicables au transfert du temps et des fréquences, tout dépend de la précision souhaitée. Le système mondial de repérage GPS est la première ressource de transfert de signaux horaires de précision. Ce système repose sur une constellation de satellites équipés d'horloges atomiques. Ces horloges spatioportées, conjuguées aux étalons à jet de césium des stations de surveillance, permettent d'établir le temps du GPS, qui est le temps de synchronisation du système. Le recours au GPS pour la diffusion du temps et des fréquences dépend de la stabilité et de la précision du temps du GPS pour le radiorepérage. La réception passive simultanée de signaux émis par de multiples satellites du GPS suppose une synchronisation des satellites et un taux d'erreur inférieur à ce qu'on peut attendre d'une mesure de pseudo-distance par rapport à un seul satellite au moyen d'un récepteur d'utilisateur. La stabilité de l'horloge de chaque satellite entre les mises à jour ou la resynchronisation avec le temps du GPS détermine l'erreur de synchronisation du système. La propagation des signaux du GPS, les instruments du récepteur, l'incertitude associée à la position de l'utilisateur et le décalage par rapport au temps UTC(USNO) figurant dans le message de correction émis par les satellites sont les autres facteurs majeurs qui déterminent la précision du transfert du temps passif pour les utilisateurs. Le transfert du temps via le système GPS se présente sous deux formes:

1. transfert du temps passif, qui est essentiellement utilisé par les usagers des services de radiocommunication;
2. transfert du temps par observations simultanées et transfert du temps par observations simultanées de la phase de la porteuse, qui sont utilisés pour des opérations scientifiques et internationales concernant les échelles de temps.

Pour la grande majorité des utilisateurs, le mode passif est le premier mode de comparaison des horloges. En tant que service passif, la diffusion par les satellites du GPS est disponible sur une vaste zone, indépendamment de l'emplacement du récepteur. L'information horaire est déterminée par les algorithmes de calcul du système utilisateur, en même temps que la position et la vitesse, au cours du vol ou d'autres opérations mobiles. Les estimations de la précision du transfert de temps dépendent donc de l'incertitude associée à la position de l'utilisateur dans le processus de navigation. Dans le cas des sites fixes, dont la position est connue avec exactitude, on peut espérer une précision quasi optimale, inférieure à 10 ns,  $1 \sigma$ . L'efficacité d'utilisation de ce mode pour les plates-formes mobiles dépend des instruments de réception et de la capacité à traiter des données horaires de grande précision.

Le transfert du temps, sur la base du GPS, entre les centres du temps répartis à travers le monde et la communauté scientifique s'appuie sur une autre technique appelée «technique des observations simultanées» et sur sa variante, la technique des observations simultanées de la phase de la porteuse. La méthode des observations simultanées est une technique point à point; en cela, elle diffère de la réception passive susmentionnée, qui repose sur un principe de diffusion générale. Deux sites souhaitant comparer leurs horloges s'échangent leurs mesures de signaux de satellites GPS. En effectuant la différence de ces données de poursuite, on obtient une comparaison précise entre les horloges locales des deux sites. Les mesures de la phase de la porteuse permettent d'augmenter la précision des mesures de pseudo-distance ou de distance entre le récepteur et le satellite. Cette amélioration s'explique par le fait que l'on mesure non pas le code de modulation BPSK, qui est non ambigu, mais la phase de la porteuse RF, qui présente une ambiguïté. Ainsi l'ambiguïté du signal RF continu donne-t-elle lieu à une mesure de fréquence précise et non à une mesure du temps. L'International GNSS service (IGS) met actuellement au point des techniques visant à utiliser la phase de la porteuse du GPS de manière opérationnelle. Les stations de l'IGS et les centres d'analyse qui participent à cette étude sont parvenus à effectuer des comparaisons de fréquence sur le réseau des stations participantes, avec une précision inférieure à la nanoseconde. Les résultats disponibles à ce jour indiquent que pour exploiter pleinement le potentiel de cette technique, il sera nécessaire de développer des méthodes permettant d'étalonner les systèmes de réception au niveau de la picoseconde. Le NRL consacre quelques ressources à l'étude de l'étalonnage des systèmes de réception géodésiques au moyen de simulateurs du GPS. Cette technique, qui offre un contrôle total de l'ensemble des conditions de réception, ouvre des possibilités d'étalonnage absolu en vue de la détermination du transfert des époques horaires.

La technique de transfert du temps d'usage général la plus précise est la technique TWSTFT ou «comparaison de temps et de fréquence par aller et retour sur satellite» (*Two-way Satellite Time and Frequency Transfer*). Cette technique met à profit la possibilité de transmission bidirectionnelle des satellites de communication pour éliminer, presque entièrement, les délais de propagation liés à la transmission et aux instruments communs entre les deux sites participants. Il s'agit d'une technique point à point essentiellement utilisée entre centres du

temps équipés à cet effet. Pour un seul transfert par aller et retour, la précision d'une mesure unique est de 10 ps environ. La précision globale dépend de la non-réciprocité des instruments et des temps de propagation dans les transpondeurs du satellite participant et de son éventuel déplacement pendant le processus de transfert. Des précisions de transfert du temps de 100 ps sont en théorie réalisables, à condition de pouvoir éliminer suffisamment les erreurs non réciproques.

Les méthodes de transfert du temps examinées ci-dessus sont des méthodes directes. Elles sont spécialement conçues pour le transfert du temps (méthode TWSTFT par exemple) ou utilisent la synchronisation horaire comme ressource primaire (GPS notamment). D'autres systèmes de communication locaux nécessitant une synchronisation pour la mise en œuvre des protocoles de communication AMRC et AMRT et le transfert de données peuvent éventuellement servir à diffuser, dans leur zone de couverture locale, des informations horaires tirées du système GPS ou d'autres sources. Ils constituent une autre solution de transfert du temps.

Les Tableaux 15-1 et 15-2 proposent un récapitulatif des caractéristiques de qualité des différentes techniques examinées dans le présent Manuel.

TABLEAU 15-1

**Techniques de transfert du temps par les systèmes GNSS**

Paramètres	GPS passif (SPS)	GPS passif (PPS)	Observations simultanées (base courte)	Observations simultanées (base longue)	Observations simultanées – technique évoluée	Phase de la porteuse	WAAS/GPS
<b>Précision (ns) valeur quadratique moyenne (intervalle)</b>	≤ 8 ns <sup>(1),(2)</sup> par rapport à UTC(USNO)	≤ 8 ns par rapport à UTC(USNO)	3-8 ns (point à point)	5-10 ns (point à point)	≤ 5 ns (point à point)	≤ 5-10 ns (point à point)	≤ 20 ns par rapport à UTC(USNO)
<b>Sources d'erreur majeures</b>	Disponibilité sélective, trajets multiples, horloge, ionosphère, troposphère, équipement d'utilisateur, environnement RF, température (récepteur et antenne)	Trajets multiples, horloge, équipement d'utilisateur, environnement RF, température (récepteur et antenne)	Équipement d'utilisateur, réciprocity du trajet, éphémérides, environnement (température)			Équipement d'utilisateur, trajets multiples, sauts de cycle	Horloge, éphémérides
<b>Stabilité (valeur @ temps d'intégration)</b>	≤ 8 ns @ 13 min ≈ 1 ns @ 1 jour	≤ 5 ns @ 13 min ≈ 1 ns @ 1 jour	≤ 4 ns @ 1 h ≤ 1 ns @ 48 h	≤ 4 ns @ 1 h ≤ 1 ns @ 48 h	≤ 4 ns @ 1 h ≤ 1 ns @ 48 h	<< 1 ns @ 6 min	< SPS passif
<b>Possibilité d'étalonnage</b>	3-5 ns par rapport à un récepteur standard					<< 1 ns avec étalonnage absolu	3-5 ns par rapport à un récepteur standard
<b>Fréquence d'échantillonnage</b>	1 pour 13 min	1 pour 5 min 1 pour 13 min	1 pour 13 min	≥ 1 pour 13 min (post-traité)	1 pour 5 min 1 pour 13 min	Analogue à passif et observations simultanées	A déterminer
<b>Disponibilité</b>	Temps réel		Dépendant du calendrier			Dépendant du traitement	Temps réel

(1) Emplacement fixe avec position 3D connue jusqu'à &gt; 1 m, 3D

(2) Dépend de l'équipement d'utilisateur.

TABLEAU 15-2

**Techniques par aller et retour sur satellite et de Terre**

Paramètre	TWSTFT	Fibre LAN-WAN	Fibres à longue distance	Aller et retour comms (OTA)
<b>Précision (point à point) (intervalle) (ns valeur quadratique moyenne)</b>	$\approx 1$ ns (Bande Ku) $\approx 1$ ns (Bande X) $\approx 3$ ns (Bande C)	$\leq 1$ ns @ 200 km	$\leq 2$ ns @ 8 000 km	$\leq 5$ ns @ 200 km
<b>Sources d'erreur majeures</b>	Réciprocité du trajet, étalonnage du système, environnement (température)	Réciprocité du trajet, environnement (température)		Réciprocité du trajet, étalonnage du système, environnement (température)
<b>Stabilité (Valeur @ temps d'intégration)</b>	200 ps @ 1 h 100 ps @ 12 h	100 ps valeur quadratique moyenne	A déterminer	A déterminer
<b>Possibilité d'étalonnage (niveau en ns)</b>	$\approx 1$		$\approx 2$	$\approx 3-5$
<b>Fréquence d'échantillonnage</b>	1 pour 5 min	Continu		
<b>Rapidité</b>	Quasi-temps réel			





ISBN 978-92-61-13302-3

SAP id



3 6 1 3 2



9 7 8 9 2 6 1 1 3 3 0 2 3

Imprimé en Suisse  
Genève, 2014

Crédits photos: [www.itu.int](http://www.itu.int)