

Métrologie du temps externe pour le système européen de radionavigation par satellites Galileo

Time metrology external activities required by the European Global Navigation Satellite System project Galileo

Pierre UHRICH, Philip TUCKEY, Joseph ACHKAR et David VALAT

LNE-SYRTE, Observatoire de Paris, CNRS UMR 8630, 61 Avenue de l'Observatoire, 75014 Paris, France, Pierre.Uhrich@obspm.fr.

Résumé

Le développement actuel du projet de système européen de radionavigation par satellites Galileo est dirigé par un organisme dépendant du Commissaire européen aux Transports, dénommé *GNSS Supervisory Authority* (GSA), GNSS étant l'acronyme de *Global Navigation Satellite System*. Le LNE-SYRTE, à l'Observatoire de Paris, est membre d'un consortium d'entreprises et d'Instituts nationaux de métrologie européens, dénommé *Fidelity*, qui est sous contrat avec la GSA pour la réalisation d'un prototype du fournisseur externe de services en métrologie du temps, dénommé *Galileo Time Service Provider* (GTSP), nécessaire à Galileo pendant sa phase de validation en orbite. Cet article décrit le rôle de *Fidelity*, ainsi que les principaux éléments du prototype du GTSP qui est en cours de réalisation.

MOTS CLÉS : GALILEO, GNSS, GPS, NAVIGATION PAR SATELLITES, ÉCHELLES DE TEMPS, MÉTROLOGIE DU TEMPS.

Abstract

The current development of the European Global Navigation Satellite System (GNSS) project Galileo is managed by the European GNSS Supervisory Authority (GSA), under the responsibility of the European Commissioner on Transport. The LNE-SYRTE, in Observatoire de Paris, is a core member of a consortium called Fidelity, a gathering of European private companies and National Metrology Institutes, in charge of the realization of a prototype of the Galileo Time Service Provider (GTSP), to be used by Galileo during its In-Orbit Validation (IOV) phase. This paper describes the role of Fidelity, together with the current development of the GTSP prototype.

KEY WORDS: GALILEO, GNSS, GPS, SATELLITE NAVIGATION, TIME SCALES, TIME METROLOGY.

Glossaire des abréviations et acronymes utilisés

- AOS : *Astrodynamical Observatory of Space Research Centre*, INM polonais.
- BC : *Backup Clock*, horloge secondaire de génération du GST.
- BIPM : Bureau international des poids et mesures.
- CCTF : Comité consultatif du temps et des fréquences.
- CDR : *Critical Design Review*, Revue critique de conception.
- CIPM : Comité international des poids et mesures.
- CNES : Centre national d'études spatiales, Agence française de l'espace.
- CNRS : Centre national de la recherche scientifique.
- EFTF : *European Frequency and Time Forum*, congrès annuel européen en métrologie temps/fréquence.
- EGNOS : *European Geostationary Navigation Overlay Service*, première étape européenne des systèmes de radionavigation par satellites, complément au GPS.
- ENT : *EGNOS Network Time*, échelle de temps de référence du système EGNOS.

- ESA : *European Space Agency*, Agence spatiale européenne.
- EURAMET : *European Association of National Metrology Institutes*, organisation régionale de métrologie pour l'Europe.
- FCS : *Frequency Control Symposium*, congrès annuel américain en métrologie temps/fréquence.
- FOC : *Full Operational Capability*, phase de pleine capacité opérationnelle de Galileo.
- GCC : *Galileo Control Center*, centre de contrôle au sol de Galileo.
- GGTO : *GPS Galileo Time Offset*, écart de temps entre les échelles de temps du GPS et de Galileo.
- GJU : *Galileo Joint Undertaking*, Entreprise commune à la Commission européenne et à l'ESA pour le développement du système Galileo (remplacée par la GSA en janvier 2007).
- GLONASS : GNSS russe.
- GMS : *Galileo Mission Segment*, ensemble des stations sol de Galileo.
- GNSS : *Global Navigation Satellite System*, système de radionavigation global par satellites.
- GOC : *Galileo Operating Company*, futur concessionnaire privé chargé du fonctionnement opérationnel de Galileo.
- GPS : *Global Positioning System*, GNSS américain.
- GPS Time : Echelle de temps de référence du GPS.
- GSA : *European GNSS Supervisory Authority*, organisme européen chargé du développement des GNSS européens EGNOS et Galileo, rattaché au Commissaire européen aux transports.
- GSS : *Galileo Sensor Station*, équipement destiné à collecter les observables Galileo et GPS.
- GST : *Galileo System Time*, échelle de temps de référence de Galileo.
- GST(MC) : Signal physique représentant le GST au sein des PTF.
- GTSF : *Galileo Time Service Facility*, station automatique opérationnelle pour la réalisation des activités du TSP.
- GTSP : *Galileo Time Service Provider*, entité externe à Galileo en charge d'activités de métrologie du temps, principalement la détermination des paramètres de pilotage du GST sur l'UTC modulo 1 s.
- GTSPF : *Galileo Time Service Prototype Facility*, prototype d'une station automatique pour la réalisation des activités du GTSP.
- IEEE : *Institute of Electrical and Electronics Engineer*, association professionnelle d'ingénieurs en électricité et en électronique.
- INM : Institut national de métrologie.
- INRiM : *Istituto Nazionale di Riserca Metrologica*, INM italien.
- ION : *Institute of Navigation*.
- IOV : *In-Orbit Validation*, phase expérimentale de validation en orbite du système Galileo.
- IRIG-B : Format de données contenant un signal temporel codé analogique servant à la datation d'évènements.
- ITU-R : *International Telecommunication Union-Radiocommunication Sector*, Secteur des radiocommunications de l'Union internationale des télécommunications.
- LNE : Laboratoire national de métrologie et d'essais, INM français.
- LNE-SYRTE : LNM français chargé des activités de métrologie temps/fréquence.
- LNM : Laboratoire national de métrologie.
- MC : *Master Clock*, horloge maîtresse de génération du GST.
- NPL : *National Physical Laboratory*, INM du Royaume-Uni.
- NRL : *Naval Reasearch Laboratory*, laboratoire scientifique de la marine américaine.
- ODTS : *Orbit Determination and Time Synchronization*, algorithme de détermination d'orbites et de synchronisation d'horloges de Galileo qui traite les observables collectées par les GSS.
- OP : Observatoire de Paris.
- P3 : Combinaison linéaire des observables en code P sur les porteuses L1 et L2 du GPS, qui permet d'éliminer les retards liés à la propagation des signaux dans l'ionosphère.
- pps : *Pulse per second*, impulsion par seconde, représentation physique d'une échelle de temps.
- PTB : *Physikalisch Technische Bundesanstalt*, INM allemand.
- PTF : *Precise Timing Facility*, station de métrologie du temps au sein du segment sol de Galileo, chargée entre autres de la génération du GST.
- PTFC : PTF italienne.
- PTFK : PTF allemande.
- SNTP : *Simple Network Time Protocol*, protocole de datation en réseau simplifié.
- SYRTE : Systèmes de référence temps-espace, département de l'Observatoire de Paris auquel est rattaché le LNE-SYRTE.
- TAI : Temps atomique international, échelle de temps atomique calculée chaque mois par la Section du temps du BIPM à partir de données de plus de 300 horloges réparties dans environ 55 institutions de par le monde.
- TSP : *Time Service Provider*, fournisseur des services temps de Galileo dans sa phase FOC, inclus dans la GOC.
- TWSTFT : *Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer*, technique de comparaisons d'horloges par la méthode à deux voies via un satellite de télécommunications.
- UMR : Unité mixte de recherche entre le CNRS et un autre organisme.
- UPMC : Université Pierre et Marie Curie.
- USNO : *United States Naval Observatory*, en charge entre autres de la réalisation de l'échelle de temps de référence du GPS.
- UTC : Temps universel coordonné, échelle de temps civile internationale, basée sur le TAI et asservie à la rotation de la Terre par secondes entières.

UTC(k) : Réalisation physique de l'UTC par le laboratoire k.

UTC(OP) : Réalisation physique de l'UTC par le LNE-SYRTE à l'Observatoire de Paris.

WAN : *Wide Area Network*, réseau de connexions à longues distances.

1. Introduction

Le développement actuel du projet de système européen de radionavigation par satellites Galileo est dirigé par un organisme dépendant du Commissaire européen aux Transports, dénommé *GNSS Supervisory Authority* (GSA), GNSS étant l'acronyme de *Global Navigation Satellite System*. La GSA a remplacé en janvier 2007 l'Entreprise commune à la Commission européenne et à l'Agence spatiale européenne (ESA), la *Galileo Joint Undertaking* (GJU). Le LNE-SYRTE, à l'Observatoire de Paris, est membre d'un consortium d'entreprises et d'Instituts nationaux de métrologie (INM) européens, dénommé *Fidelity*, qui est sous contrat depuis juin 2005 avec la GJU, puis aujourd'hui avec la GSA, pour la réalisation d'un prototype du fournisseur externe de services en métrologie du temps, dénommé *Galileo Time Service Provider* (GTSP) [1]. Le consortium est décrit dans le chapitre 2, le rôle du prototype du GTSP est décrit dans le chapitre 3. Il doit fournir des éléments en métrologie du temps pendant la phase de validation en orbite, *In-Orbit Validation* (IOV), de Galileo, originellement prévue pour début 2008. L'échelle de temps de référence du système, *Galileo System Time* (GST), doit être générée en interne, à partir des horloges appartenant directement à Galileo. En revanche, le GTSP doit fournir les paramètres de pilotage du GST sur le Temps Universel Coordonné (UTC) modulo 1 s, donc de manière équivalente sur le Temps Atomique International (TAI), afin de maintenir l'écart entre ces deux échelles inférieur à une spécification décrite en détail dans ce chapitre 3. *Fidelity* doit également gérer pour le compte de Galileo les relations avec le Bureau international des poids et mesures (BIPM). Enfin, *Fidelity* doit fournir les plans de transition vers le GTSP correspondant à la phase suivante du développement de Galileo, la pleine capacité opérationnelle, *Full Operational Capability* (FOC), ainsi que des réflexions sur l'usage et le rôle futurs de Galileo pour des utilisateurs de services liés au Temps. Le contrat avec la GSA court normalement jusqu'en octobre 2008.

Ce prototype d'un GTSP a été dessiné pour être une station automatique : son architecture et ses fonctions sont décrites dans le chapitre 4. Le chapitre 5 évoque les algorithmes qui doivent être utilisés pour la prédiction de l'écart entre le GST et le Temps Atomique International (TAI) qui doit conduire à la détermination des paramètres de pilotage du GST sur l'UTC. Ces algorithmes utilisent entre autres des comparaisons d'horloges entre les Stations temps de Galileo, *Precise Timing Facilities* (PTF), et les INM membres du consortium *Fidelity*, dénommés « laboratoires UTC(k) » dans la terminologie des documents du projet. Le moyen principal de comparaisons est le transfert de temps à deux voies, *Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer* (TWSTFT),

sous la responsabilité de l'INM allemand. Le moyen de secours est les vues communes des satellites du *Global Positioning System* (GPS) américain, sous la responsabilité du LNE-SYRTE. L'exactitude des comparaisons d'horloges requiert des étalonnages, discutés dans le chapitre 6. Les principales fonctions des PTF sont évoquées dans le cadre des liaisons avec le GTSP dans le chapitre 7. Des interactions potentielles entre le GTSP et la première étape européenne de radionavigation par satellites EGNOS sont proposées dans le chapitre 8.

Dans les parties qui s'y rapportent, l'accent est mis plus particulièrement sur les activités auxquelles le LNE-SYRTE contribue, principalement liées aux comparaisons d'horloges par GPS entre les différentes composantes du système, ainsi qu'à la fourniture quotidienne de données d'horloges et de comparaisons à la fois par TWSTFT et par GPS. Le LNE-SYRTE, déjà engagé dans EGNOS depuis plusieurs années [2], participe également au projet de lien entre les deux systèmes européens de radionavigation par satellites.

2. Le consortium *Fidelity*

Le consortium *Fidelity* est constitué d'entreprises privées et d'INM européens. En voici la liste, avec une définition succincte de leur activité principale et de leur rôle dans *Fidelity* :

- *Helios Technology*, entreprise de consultance technique et de management, Royaume-Uni : Direction générale du projet et de la définition et de la conception du prototype du GTSP ;
- *National Physical Laboratory* (NPL), INM du Royaume-Uni : Direction des activités opérationnelles du GTSP, contribution à sa définition et à sa conception, algorithmes de prédiction de l'écart entre le GST et le TAI et de pilotage du GST sur l'UTC, fourniture de données d'horloges et de comparaisons ;
- *Kayser-Threde*, société allemande spécialisée dans la conception, le développement et la fabrication de projets dans les domaines spatiaux, scientifiques et industriels : Ingénierie système, et contribution à la définition et à la conception du GTSP ;
- Centre national d'études spatiales (CNES), Agence française de l'espace : Contribution à la définition, à la conception du prototype du GTSP, accueil au CNES et opérations du prototype, activités d'harmonisation entre EGNOS et Galileo ;
- *Istituto Nazionale di Riserca Metrologica* (INRiM), INM italien : Contribution à la définition et à la conception, chargé de la standardisation, d'un support sur les développements d'algorithmes, et des relations avec le BIPM, fourniture de données d'horloges et de comparaisons ;
- *Physikalisch Technische Bundesanstalt* (PTB), INM allemand : Contribution à la définition et à la conception, opération et étalonnage des liaisons

- TWSTFT, fourniture de données d’horloges et de comparaisons ;
- LNE-SYRTE, Laboratoire national de métrologie (LNM) français : Contribution à la définition et à la conception, opération et étalonnage des liaisons GPS, fourniture de données d’horloges et de comparaisons, activités d’harmonisation entre EGNOS et Galileo ;
- Thales TRT, entreprise d’électronique globale, Royaume-Uni : Programme de génération d’horloge composite ;
- *Astrodynamical Observatory of Space Research Centre* (AOS), INM polonais : Évaluation des performances.

3. Rôle du prototype du GTSP

L’élaboration de l’échelle de temps de référence du système, le GST, n’est pas du ressort du GTSP. Le GST est réalisé au sein d’une des PTF à partir d’un ensemble d’horloges atomiques (masers à hydrogène actifs et étalons à césium haute performance) appartenant à Galileo, d’instruments de mesures dédiés et d’un algorithme approprié. Le rôle principal du prototype du GTSP est de fournir les paramètres de pilotage du GST sur l’UTC modulo 1 s, donc de manière équivalente sur le TAI. Pour le pilotage du GST, il faut réaliser un processus en trois étapes.

- D’abord, le GST, sous la forme GST(MC), (où MC, pour *Master Clock*, désigne le signal physique représentant le GST), est comparé aux UTC(k) des INM membres de *Fidelity*, au moyen de comparaisons à deux voies TWSTFT [3] comme moyen principal ou de vues communes par GPS P3 [4] comme moyen de secours. Les données d’horloges et de comparaisons sont envoyées quotidiennement au GTSP. *Fidelity* a la charge de l’étalonnage des liens entre les PTF et les « laboratoires UTC(k) » ;
- Ensuite, le GTSP génère une prédiction de l’écart entre l’UTC et le GST (modulo 1 s), en utilisant une horloge composite intermédiaire basée sur l’ensemble des horloges des PTF et des « laboratoires UTC(k) » dont les données sont disponibles, ainsi que sur les dernières valeurs connues de UTC – UTC(k) fournies chaque mois par le BIPM pour le mois précédent. L’horloge composite est censée fournir une meilleure stabilité que le groupe d’horloges au sein d’une PTF et un suivi d’intégrité du signal intégré à l’algorithme de génération ;
- Enfin, le GTSP envoie quotidiennement les paramètres de pilotage aux PTF, qui peuvent les utiliser pour aligner la réalisation physique du GST sur l’UTC (modulo 1 s) suivant les spécifications requises.

Les spécifications des performances de ce raccordement sont les suivantes :

- l’écart entre l’UTC et le GST (modulo 1 s) doit rester inférieur à 50 ns (facteur d’élargissement $k = 2$) ;

- l’incertitude sur cet écart doit être inférieure à 26 ns ($k = 2$) ;
- la contribution à l’instabilité du GST due au pilotage sur l’UTC doit rester inférieure à $3 \cdot 10^{-15}$ en écart type d’Allan à un jour ;
- l’incertitude de l’écart de fréquence normé de UTC – GST doit rester inférieure à $5,4 \cdot 10^{-15}$ ($k = 2$) sur une durée moyenne de un jour.

Les deux premières spécifications sont déduites des besoins en synchronisation sur l’UTC des futurs utilisateurs, en fonction des capacités actuelles et futures des systèmes en métrologie du temps. On rappelle que la Recommandation actuelle du Comité international des poids et mesures (CIPM) est de maintenir les UTC(k) proches de l’UTC dans une fourchette de ± 100 ns (facteur d’élargissement $k = 1$), bien que certains LNM soient capables de faire bien mieux : par exemple l’écart UTC – UTC(OP) n’a dépassé les ± 50 ns qu’une seule fois sur les huit dernières années. Les deux dernières spécifications sont issues des contraintes de stabilité de l’échelle de temps de référence pour un système de radionavigation par satellites.

La phase d’élaboration du prototype, qui incluait les calculs de budgets d’incertitudes conformes aux spécifications, s’est achevée avec succès en août 2006 par la Revue critique de conception, *Critical Design Review* (CDR), par le gestionnaire du projet Galileo assisté d’experts indépendants. Le chapitre suivant décrit en détail le projet de la station automatique et les fonctions qu’elle devra remplir lors de la validation en orbite (IOV).

4. Élaboration et fonctions du prototype du GTSP

4.1. Architecture du prototype du GTSP

La figure 1 représente le contexte et l’organisation du prototype du GTSP au moment de l’IOV de Galileo. Au sein du consortium *Fidelity*, se trouve la station automatique *Galileo Time Service Prototype Facility* (GTSPF), ainsi que les « laboratoires UTC(k) » qui contribuent aux opérations par la fourniture quotidienne de leurs données d’horloges et de comparaisons. Le segment sol de Galileo avec lequel la GTSPF est en relation fait partie du Segment de mission de Galileo, *Galileo Mission Segment* (GMS), au sein duquel se trouvent notamment les deux PTF prévues pour être en fonction dès l’IOV. Les comparaisons d’horloges entre les PTF et les « laboratoires UTC(k) » s’effectuent soit par TWSTFT *via* un satellite géostationnaire de télécommunication, soit par vues communes de satellites de la constellation GPS. Lorsque Galileo sera opérationnel dans sa phase FOC, les comparaisons d’horloges pourront se faire ultérieurement par des vues communes des satellites de Galileo. Il y a également des interactions avec le BIPM, ainsi qu’avec des utilisateurs institutionnels privilégiés (GSA, ESA, industriels impliqués dans le projet, autorités de l’aviation civile, etc.) par l’intermédiaire d’un site web.

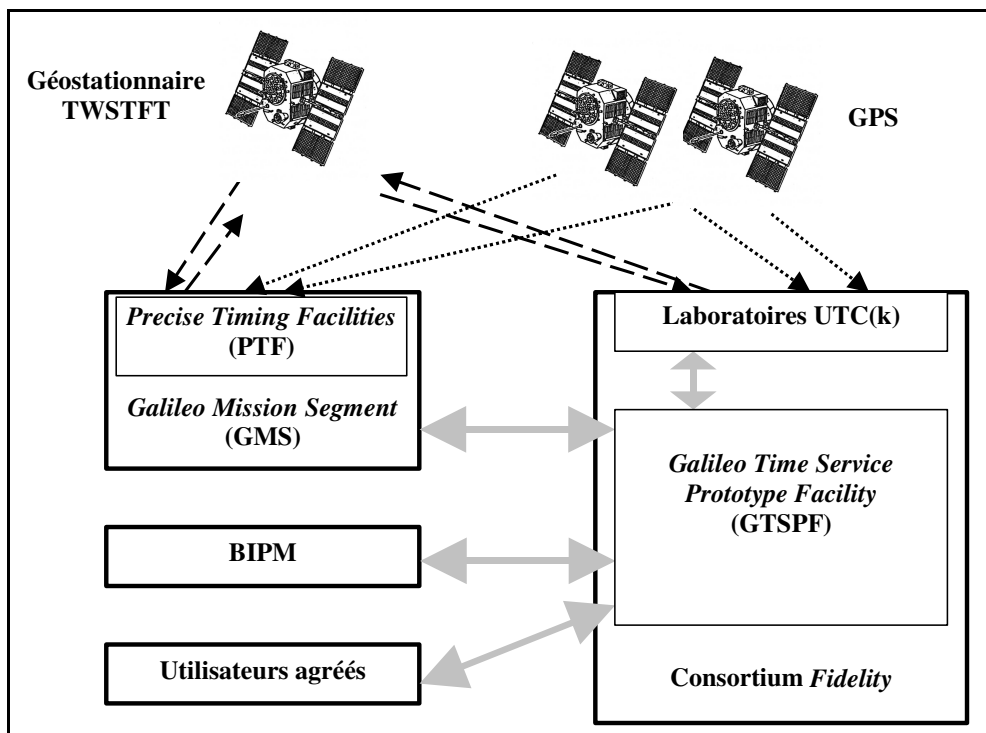


Fig. 1. – Le consortium *Fidelity* et les interactions entre les différents éléments et institutions autour de la station automatique GTSPF.

Les relations avec ces entités externes à la GTSPF sont les suivantes :

– GMS

Le segment sol de Galileo fournira quotidiennement à la GTSPF les données d’horloges et de comparaisons collectées dans les PTF, ainsi que le pilotage effectivement appliqué au signal GST(MC) signal physique qui représente le GST, auquel toutes les mesures (horloges locales et comparaisons externes) au sein d’une PTF sont rapportées. Le chapitre 7 détaille l’organisation interne d’une PTF. En retour, la GTSPF fournira quotidiennement au GMS les paramètres de pilotage qui devraient être appliqués au GST pour qu’il soit conforme aux spécifications dans sa relation à l’UTC.

– BIPM

Le BIPM fournira à la GTSPF sa Circulaire T mensuelle, qui contient notamment les informations sur l’écart entre le TAI et l’UTC, exprimé par un nombre entier de secondes, ainsi que les prévisions de modification de cet écart lorsqu’une seconde intercalaire doit être introduite. La Circulaire T contient également l’écart entre l’échelle de temps du GPS, *GPS Time*, et l’UTC. Des discussions ont eu lieu avec le BIPM concernant la possible inclusion des horloges des PTF dans le calcul du TAI. Mais à l’heure actuelle, le BIPM préfère attendre de connaître le futur opérateur industriel du segment sol de Galileo, une fois le système dans sa phase FOC, et négocier directement avec lui cette question, car l’inclusion temporaire d’horloges d’un

système expérimental dans le calcul du TAI n’est pas conforme à sa nature opérationnelle.

– INM

Les « laboratoires UTC(k) » fourniront quotidiennement leurs données d’horloges et de comparaisons à la GTSPF. Il s’agit là d’un changement notable dans les activités opérationnelles du LNE-SYRTE : jusqu’ici, ces données n’étaient délivrées au BIPM et éventuellement à d’autres utilisateurs que sur une base mensuelle (à l’exception des comparaisons par TWSTFT dont les données sont diffusées quotidiennement), et uniquement pour une utilisation scientifique. Désormais, ces données doivent être diffusées vers l’extérieur tous les matins, ce qui implique de mettre en place des procédures de vérification et de validation automatiques de ces données, car elles seront ensuite utilisées dans un système opérationnel. Des moyens appropriés devront donc être mis en œuvre d’ici l’IOV de Galileo. En retour, la GTSPF fournira aux laboratoires une prédiction quotidienne de l’écart UTC – UTC(k), qui sera basée sur un nombre d’horloges bien plus élevé que ce qui est habituellement disponible dans chaque INM pris séparément. On en attend donc une nette amélioration de cette prédiction, et par conséquent une meilleure qualité des comparaisons-clés du BIPM en métrologie du temps pour ces INM.

– Utilisateurs institutionnels

La GTSPF fournira sur un site web à accès restreint des informations sur les performances du pilotage du GST

sur l'UTC et toute autre information pertinente qui sera susceptible de concerner ces utilisateurs.

4.2. Fonctions de la GTSPF

La figure 2 contient le diagramme fonctionnel des principales fonctions de la GTSPF, divisées en un segment de vérification, un segment de contrôle, et un segment de mission.

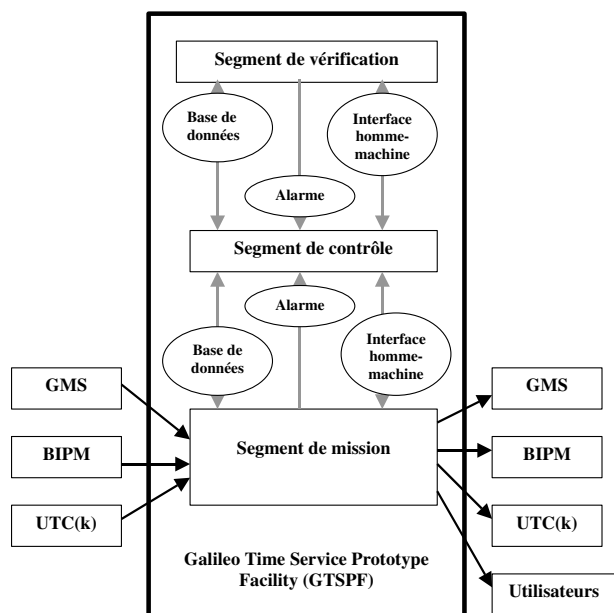


Fig. 2. – Configuration fonctionnelle de la station automatique GTSPF.

4.2.1. Segment de vérification

Le segment de vérification surveille les performances de l'ensemble de la mission et fournit des rapports d'analyse de l'évolution de ces performances, ainsi que des paramètres de configuration du système et des étalonnages. Il s'agit de vérifier :

- des paramètres quotidiens, notamment l'écart courant UTC – TAI et ses éventuels changements planifiés, l'écart prédit TAI – GST(MC) et son incertitude, et les paramètres de pilotage de GST(MC) ;
- des paramètres mensuels, ce qui inclut un rapport mensuel sur les horloges et les comparaisons utilisées par la GTSPF, l'écart courant UTC – TAI et ses éventuels changements planifiés, l'écart maximal observé sur TAI – GST(MC), ainsi que l'écart maximal quotidien TAI – GST(MC) sur une fenêtre glissante de dix jours ;
- des paramètres annuels, dans un rapport annuel sur les horloges et les moyens de comparaisons utilisés par la GTSPF, ainsi que sur les activités de maintenance et d'étalonnage, sur l'écart maximum TAI – GST(MC) sur l'année observée avec l'incertitude maximale relevée sur cet écart sur la base d'une fenêtre glissante de dix jours ;

- des paramètres système, principalement les performances quotidiennes, mensuelles et annuelles de l'écart UTC – GST(MC) diffusé aux utilisateurs, par rapport à la prédiction de cet écart fournie par la GTSPF ;
- des paramètres de configuration et d'étalonnage, ce qui inclut des informations sur toutes les horloges et les moyens de comparaisons utilisés (par exemple, le planning des comparaisons par TWSTFT), l'état des horloges et des équipements, incluant les moyens de comparaisons, en mettant l'accent sur des problèmes potentiels d'intégrité, et le planning des activités de maintenance et d'étalonnage.

4.2.2. Segment de contrôle

Le segment de contrôle doit fournir les moyens de configurer et contrôler la GTSPF ainsi que les moyens de communiquer des informations sur ses performances à des utilisateurs externes : organisation des données et de la base de données, contrôle des commandes, site web, gestion de l'archivage et de l'accès aux archives, interface homme-machine qui doit permettre la gestion, la configuration et la surveillance de la GTSPF, gestion des alarmes et de leur transfert vers l'utilisateur approprié.

4.2.3. Segment de mission

Le segment de mission a la responsabilité d'accomplir le traitement des données de comparaisons d'horloges, essentiel pour la mission, ainsi que la production et la dissémination des paramètres de pilotage du GST. Cela comprend un pré-traitement, puis le traitement des données, et la gestion des communications vers les entités externes à la GTSPF. Le pré-traitement doit valider l'intégrité des données et s'applique aux comparaisons d'horloges (TWSTFT et GPS P3) et aux différences locales d'horloges au sein des PTF ou des « laboratoires UTC(k) ». À partir de ces données validées, qui ne doivent plus être que des écarts d'horloges deux à deux, l'algorithme d'horloge composite forme une échelle de temps atomique libre, puis l'algorithme de prédiction et de pilotage produit les paramètres pour piloter GST(MC) sur le TAI, qui sont ensuite transmis au GMS.

L'interface avec les entités externes se fait via un réseau privé virtuel, et doit réaliser l'encodage et le décodage des données, le formatage des données, ainsi que l'envoi vers la base de données de la GTSPF. Le site web permet de diffuser les informations quotidiennes, mensuelles et annuelles requises par les utilisateurs agréés.

5. Algorithme de prédiction de l'écart UTC – GST

Deux algorithmes sont actuellement développés pour cette application : un algorithme d'horloge composite, pour la génération d'une échelle de temps atomique libre, et un algorithme de prédiction et de pilotage.

5.1. Algorithme d'horloge composite

L'algorithme d'horloge composite est basé sur un calcul de type filtre de Kalman, car lorsqu'il est correctement adapté, il produit une échelle de temps proche de l'optimum quelle que soit la période de temps considérée. Ce type de calcul a été préféré à une échelle de temps basée sur une moyenne pondérée des horloges, qui n'est optimale que pour une seule période donnée, celle pour laquelle les poids des horloges sont optimisés. Un des inconvénients des filtres de Kalman appliqués aux échelles de temps est l'accroissement infini de la matrice de covariance du système [5], parce que les paramètres physiques représentés par le vecteur d'état ne sont que partiellement observables dans les mesures entre horloges prises deux à deux. Ce problème a été récemment résolu pour tous les types de bruit, comme cela a été démontré sur des données simulées et réelles [6], en fixant arbitrairement certaines valeurs de la matrice de covariance à chaque nouvelle étape du calcul. De plus, il a été montré que le filtre de Kalman fonctionne bien avec des horloges qui exhibent une dérive de fréquence linéaire, ce qui est le cas des masers à hydrogène.

À partir des écarts entre paires d'horloges, mesurés soit directement en interne, soit par l'intermédiaire de systèmes de comparaisons à distance, l'algorithme d'horloge composite fabrique quotidiennement une échelle de temps atomique libre C_GTSP, pour « Composite_GTSP », qui est accessible *via* chaque horloge individuelle H_i , dont entre autres GST(MC), par le produit même du calcul sous la forme $C_GTSP - H_i$.

5.2. Algorithme de prédiction et de pilotage

Sur des simulations, l'algorithme de prédiction d'horloge, également basé sur un filtre de Kalman, s'est montré significativement plus performant qu'une simple prédiction linéaire en présence des différents types de bruit présents habituellement dans les données d'horloges [7]. La prédiction et le pilotage sont issus d'un processus en deux temps. D'abord, l'écart entre le TAI et l'échelle atomique libre C_GTSP est extrapolé d'après les données antérieures publiées par le BIPM. Puis C_GTSP est pilotée en temps et en fréquence sur le TAI, devenant ainsi l'échelle de temps C_GTSP_S, « S » pour « *Steered* », terme anglais pour « pilotée ». De la sorte, C_GTSP_S est une approximation quotidienne du TAI.

Ensuite, à partir de C_GTSP_S l'écart TAI – GST(MC) est estimé quotidiennement, les futures valeurs de TAI – GST(MC) sont prédites et des paramètres de pilotage sont évalués, de manière à pouvoir aligner GST(MC) sur le TAI. Une estimation de l'écart de fréquence normé entre le TAI et GST(MC) est également calculée. Ces éléments sont fournis quotidiennement au GMS pour les PTF. La décision d'appliquer ou non ces paramètres de pilotage à GST(MC) revient au GMS.

Par ailleurs, la GTSPF fournira également comme produit dérivé du calcul une prédiction quotidienne des écarts UTC – UTC(k) pour les INM membres de *Fidelity*, basée sur un ensemble d'horloges bien supérieur en

nombre à ce qui est disponible dans chaque INM pris séparément. Les laboratoires nationaux de métrologie auront donc la possibilité de réaliser des UTC(k) qui devraient être plus proches de l'UTC futur, ce qui devrait produire en retour, en plus d'une amélioration des comparaisons-clés du BIPM déjà évoquée plus haut, une plus grande facilité de la prédiction du TAI, ou de l'UTC modulo 1 s, réalisée par C_GTSP_S.

6. Étalonnage des comparaisons d'horloges

6.1. TWSTFT

Le TWSTFT est le moyen principal de comparaisons des horloges des stations impliquées dans le GTSP. Le Groupe de travail sur le TWSTFT du Comité consultatif du temps et des fréquences (CCTF) a accepté d'intégrer les deux PTF dans le réseau européen actuel, et de définir un planning des comparaisons incluant ces deux nouvelles stations, qui sera communiqué aux PTF par la GTSPF. Ainsi, des comparaisons par TWSTFT pourront être effectuées entre les PTF, les INM INRiM, LNE-SYRTE, NPL et PTB, ainsi qu'avec le *United-States Naval Observatory* (USNO) à Washington (Etats-Unis d'Amérique), qui est responsable de l'échelle de temps du GPS, pour la détermination de l'écart de temps entre *GPS Time* et le GST, dénommé *GPS Galileo Time Offset* (GGTO) [8]. La connaissance du GGTO est en effet déterminante pour l'interopérabilité des deux systèmes pour les utilisateurs. *Fidelity* est responsable des étalonnages de ces liaisons.

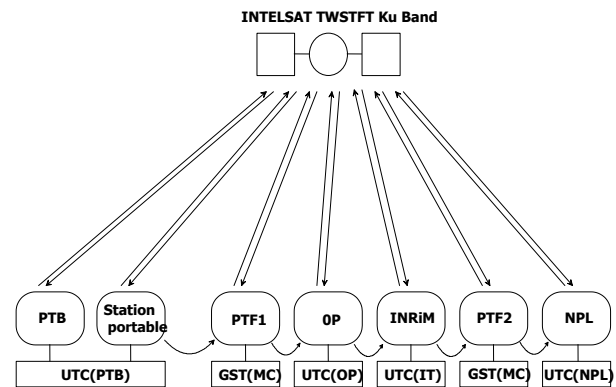


Fig. 3. – Exemple schématique d'une campagne d'étalonnage telle que celle qui doit être réalisée pour les liaisons TWSTFT dans le cadre de *Fidelity*.

Pour les stations européennes, cet étalonnage sera effectué de manière classique [9], par la circulation d'une station TWSTFT portable appartenant au *Johanneum Research University* (Autriche), sous la responsabilité du PTB. Cette station portable doit être installée successivement auprès de chaque station fixe (fig. 3) pour une durée typique de deux jours, et être incluse dans le cycle de sessions de mesures du planning TWSTFT. Un code spécifique est attribué à cette station portable, et certains intervalles de temps sont réservés pour réaliser

des mesures entre les deux stations co-localisées, raccordées à la même référence locale et utilisant le même répéteur en Bande Ku (10,7 GHz - 14,5 GHz) du satellite géostationnaire de télécommunication. Ce type de mesures en horloge commune permet de déterminer les différences de retards entre les stations participantes deux à deux, avec une incertitude de l'ordre de 1 ns ($k = 1$).

Pour la liaison transatlantique des PTF avec l'USNO, cette technique ne peut être appliquée, faute de réciprocité liée à l'utilisation de deux répéteurs pour assurer les liaisons Europe/États-Unis et États-Unis/Europe. Il faut donc un étalonnage indirect, soit en utilisant une liaison TWSTFT militaire en bande X (7 GHz - 8 GHz) qui existe entre le PTB et l'USNO, puis les liaisons entre le PTB et les PTF, soit en utilisant une autre technique, c'est-à-dire les vues communes par GPS.

6.2. GPS P3

La méthode des vues communes par GPS P3 [4] est le moyen de secours des comparaisons d'horloges pour le GTSP dans le cadre de l'IOV de Galileo. Le GPS P3 résulte d'une combinaison linéaire des codes P observés sur les porteuses L1 et L2 du GPS, destinée à s'affranchir des retards liés à la traversée de l'ionosphère par le signal. L'étalonnage de ces liaisons devrait être réalisé selon la méthode classique d'étalonnage relatif, par la circulation d'un équipement voyageur complet : récepteur GPS, antenne, et câble d'antenne [10, 11]. Cet équipement est installé pendant quelques jours dans chaque station aux côtés de l'équipement fixe, raccordé à la même référence locale. On mesure ainsi par vues communes l'écart entre le récepteur voyageur et le récepteur local. En procédant de la sorte dans chaque station impliquée, on en déduit la différence des retards des équipements sur chaque liaison entre deux stations. Le LNE-SYRTE a la responsabilité de ces étalonnages GPS, qui devraient démarrer par l'évaluation de l'équipement GPS voyageur par rapport aux équipements GPS installés à l'Observatoire de Paris. Deux circulations de l'équipement voyageur sont actuellement prévues : la première au démarrage opérationnel des PTF, la deuxième à la fin de l'IOV. Les stations visitées seront : les deux PTF, l'INRiM, le LNE-SYRTE, le NPL, le PTB, et l'USNO. L'objectif est une incertitude maximum de 3 ns ($k = 1$) sur les retards des équipements.

À la demande de la GSA, des discussions sont en cours pour un éventuel étalonnage absolu de l'équipement voyageur. La méthode développée au *Naval Research Laboratory* (NRL, États-Unis d'Amérique) est reconnue [12, 13], mais nécessite des équipements (simulateur de signaux GPS, chambre anéchoïque, etc.) qui ne sont actuellement disponibles dans aucun INM européen. En revanche, le CNES dispose d'équipements similaires. Une étude répondant à la demande de la GSA serait l'occasion de mettre en place les compétences d'étalonnage temporel en absolu des ensembles récepteur plus câble plus antenne pour la réception de signaux de satellites de radionavigation dans un site européen.

7. Les stations Temps de Galileo : *Precise Timing Facilities* (PTF)

Fidelity n'a aucune responsabilité dans l'élaboration, la réalisation ou l'implantation des PTF. Mais une description détaillée permet de mieux comprendre la métrologie du temps à la base du système Galileo ainsi que les interactions entre la GTSPF et les PTF.

7.1. Description générale

L'architecture temps de Galileo comprend entre autres deux PTF qui seront installées au sein de deux Centres de contrôle (*Galileo Control Centers*, GCC). Le premier objectif des PTF est de fournir à Galileo une référence de temps stable et fiable, sous la forme du GST qui doit être disponible en tant que signal physique GST(MC). Une PTF est censée être une station automatique, qui nécessite donc des installations de contrôle et de surveillance sophistiquées. Les principales fonctions d'une PTF sont décrites ci-après :

- Maintenir un ensemble stable d'horloges atomiques (masers à hydrogène actifs et étalons à césium hautes performances) dans un environnement contrôlé. Un des masers se verra attribuer le titre d'horloge maîtresse (*Master Clock*, MC), un deuxième maser celui d'horloge de secours (*Backup Clock*, BC) ;
- Calculer le GST comme une moyenne pondérée de l'ensemble des horloges de la PTF, et fournir un pilotage de la MC sur cet ensemble dans le cas où la PTF devrait rester en opération indépendamment de la GTSPF ;
- Recevoir les paramètres de pilotage fournis par la GTSPF, et piloter le GST sur l'UTC ;
- Fournir une réalisation physique du GST : un signal de type une impulsion par seconde (1 pps, *pulse per second*) et un signal de fréquence à 10 MHz. Le signal 1 pps est GST(MC) ;
- Distribuer GST(MC) et le signal à 10 MHz au sein du GCC. En particulier une station de collecte des observables Galileo et GPS, dite « senseur Galileo », (*Galileo Sensor Station*, GSS), sera co-localisée avec chaque PTF et doit utiliser GST(MC) comme échelle de temps de référence, qui sera ainsi incluse dans le processus complet de détermination d'orbite et synchronisation temporelle (ODTS) au sein de Galileo ;
- Assurer les opérations des moyens de comparaison d'horloges avec les entités extérieures *via* TWSTFT et GPS P3. GST(MC) est le signal de référence pour ces équipements, qui utilisent également le signal à 10 MHz pour la génération des signaux requis ;
- Réaliser un GST(BC) et piloter cette réalisation secondaire du GST sur GST(MC) de telle sorte que le passage de l'une à l'autre, soit automatiquement en cas de rupture du signal GST(MC), soit

intentionnellement, puisse se faire sans interruption du processus ODTS ;

- Mesurer localement les écarts de chaque horloge de la PTF à GST(MC) ;
- Surveiller les stabilités de fréquence des horloges de la PTF ;
- Fournir les paramètres du GST et les données d’horloges et de comparaisons de la PTF à la GTSPF ;
- Disséminer le GST comme signal temporel codé analogique (de type IRIG-B) au sein du GCC et *via* un SNTP au sein du Réseau interne Galileo (*Galileo Wide Area Network*, WAN).

7.2. Le concept maître/esclave

Dès l’IOV de Galileo, il y aura deux PTF opérationnelles : PTFK développée actuellement en Allemagne par un consortium dirigé par Kayser-Threde, et PTFC développée actuellement en Italie par *Consortio Torino Time* [14]. Les deux stations sont réalisées suivant des spécifications identiques, et devraient donc être similaires dans leur fonctionnement. Une des PTF se verra assigner initialement le titre de PTF maîtresse (*Master PTF*), avec la responsabilité de générer le GST. La deuxième aura le statut de PTF esclave (*Slave PTF*), en charge de produire une redondance du GST. Le changement de statut entre PTF, de manière analogue au changement de statut entre GST(MC) et GST(BC), devra pouvoir être réalisé à tout moment sans interruption de service pour le système Galileo. Par définition, le GST courant est toujours le GST(MC) de la Master PTF.

7.3. Interactions entre les PTF et la GTSPF

Les comparaisons d’horloges entre les PTF et les « laboratoires UTC(k) » membres de *Fidelity* sont de la plus haute importance pour la génération des paramètres de pilotage du GST sur l’UTC. *Fidelity* a également la responsabilité des étalonnages de ces liaisons. Les PTF reçoivent de la GTSPF les paramètres de pilotage du GST sur l’UTC qui devraient être utilisés pour piloter la sortie GST(MC). Les PTF doivent fournir à la GTSPF les données d’horloges et de comparaisons, qui pourront aussi être ultérieurement transmises au BIPM pour être incluses dans le calcul du TAI. Enfin les PTF recevront de la GTSPF une notification de tout dysfonctionnement ou anomalie détecté sur les horloges ou les moyens de comparaisons des PTF.

8. Relations entre EGNOS et Galileo

Le projet EGNOS, pour *European Geostationary Navigation Overlay Service*, est la première étape des systèmes européens de radionavigation par satellites. Il fournit aux utilisateurs une évaluation de l’intégrité et des termes correctifs appliqués aux signaux du GPS disponibles en Europe sur une zone définie par l’Aviation civile. L’échelle de temps de référence pour EGNOS est

EGNOS Network Time (ENT), construite à partir des données d’horloges situées dans les 34 stations sol du système, réparties sur toute l’Europe et au-delà (Canada, Afrique du Sud, Inde, etc.). Par ailleurs, EGNOS est également sous la responsabilité de la GSA depuis début 2007, et une harmonisation avec Galileo doit être mise en place.

Dans la partie 12 de son message de navigation, EGNOS diffuse l’écart entre ENT et l’UTC. Cet écart est obtenu à l’aide d’une station installée au sein du LNE-SYRTE à l’Observatoire de Paris, sous la responsabilité du CNES, qui utilise UTC(OP) comme référence externe. Par l’algorithme de génération de ENT, EGNOS calcule ENT – UTC(OP), et le raccordement à l’UTC est obtenu par la prédiction de UTC – UTC(OP) [15]. Ainsi, on obtient l’équation suivante :

$$\text{ENT} - \text{UTC} = [\text{ENT} - \text{UTC(OP)}] - [\text{UTC} - \text{UTC(OP)}]$$

8.1. Rôle potentiel du GTSP dans le suivi de ENT – UTC

Comme indiqué par ailleurs, puisque le LNE-SYRTE fait partie des « laboratoires UTC(k) » membres de *Fidelity*, la GTSPF va calculer une prédiction quotidienne de UTC – UTC(OP) qui devrait être meilleure que la prédiction actuelle car basée sur un nombre d’horloges environ quatre fois supérieur à ce qui est actuellement disponible au LNE-SYRTE. De cette manière, le dernier terme de l’équation ci-dessus devrait être amélioré, et donc aussi la valeur de ENT – UTC diffusée aux utilisateurs. Il a cependant été montré que c’est plutôt le premier terme de l’équation qui pose actuellement problème [16]. Par ailleurs, l’utilisation de ces données impliquerait une modification des procédures opérationnelles de EGNOS et reste donc à discuter.

8.2. Rôle potentiel du GTSP dans le suivi de ENT – GST

Il serait possible de calculer ENT – GST par rapport à deux représentations du GST : soit par rapport à GST(MC) tel que généré au sein de la PTF, soit par rapport à un GST_{diffusé}, qui serait le GST tel que reçu par les utilisateurs des signaux de Galileo. ENT – GST(MC) serait mesuré au sein de la PTF en utilisant le « senseur Galileo » GSS dont la référence externe est GST(MC), puis en appliquant les corrections diffusées par EGNOS aux observables GPS collectées. L’exactitude de ce raccordement dépendrait des incertitudes sur la connaissance des retards du récepteur et des divers équipements intervenant jusqu’à GST(MC), ainsi évidemment que sur les termes correctifs EGNOS. En même temps, le calcul de la position de la PTF par l’intermédiaire du logiciel ODTS et en utilisant les signaux de Galileo reçus par le GSS fournit GST(MC) – GST_{diffusé}. Il serait ainsi possible d’assurer le suivi de ENT – GST(MC) et de ENT – GST_{diffusé} *via* GST(MC), soit en temps réel au sein de GMS, soit en temps différé par le GTSP, en fonction des besoins.

Par ailleurs, EGNOS diffuse dans son message de navigation une prédiction de ENT – UTC, et Galileo fera de même avec une prédiction de GST – UTC. Une simple

différence entre ces deux prédictions fournira une estimation de ENT – GST, mais sa qualité repose sur celle des deux prédictions radiodiffusées. Ce calcul pourrait cependant fournir une méthode simple de validation des signaux radiodiffusés par les deux systèmes européens. Le GTSP pourrait être chargé de cette validation, dont le principe pourrait d'ailleurs être étendu aux signaux du GPS américain et du GLONASS russe. Le GTSP deviendrait ainsi un centre unique de détermination, d'évaluation et de dissémination des différences entre les échelles de temps de tous les GNSS.

9. Éléments de réflexion sur le futur rôle de la structure de métrologie du temps externe de Galileo

Dans la phase FOC de Galileo, un *Time Service Provider* (TSP) permanent sera l'opérateur d'une station automatisée *Galileo Time Service Facility* (GTSF) qui fournira des services similaires à ceux décrits dans cet article pendant la durée opérationnelle de Galileo, actuellement prévue sur vingt ans dans sa première tranche. L'opérateur du TSP sera le concessionnaire privé chargé des opérations du système, *Galileo Operating Company* (GOC), mais les missions du TSP resteront décidées par la GSA [17]. Ce TSP devrait établir des contrats à responsabilité limitée avec les « laboratoires UTC(k) » européens qui voudront s'engager à fournir leurs données d'horloges et de comparaisons pendant cette période. Il est par ailleurs prévu d'utiliser des vues communes Galileo entre ces laboratoires et les PTF, la figure 4 décrivant l'organisation de ce système opérationnel. Une campagne d'étalonnage de toutes les liaisons (TWSTFT, GPS, Galileo) pourrait être organisée par le TSP suivant un rythme annuel.

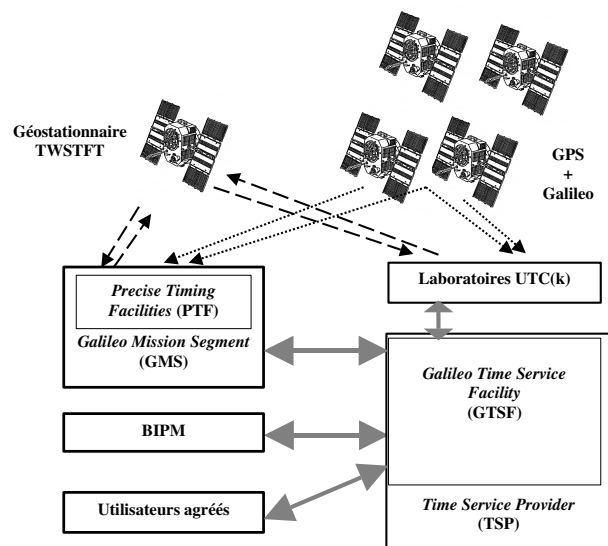


Fig. 4 – Configuration de la station automatique GTSF dans la phase *Full Operational Capability* (FOC) de Galileo. Les laboratoires UTC(k) seront liés au *Time Service Provider* (TSP) par un contrat à responsabilité limitée.

Ainsi, le TSP pourrait devenir l'intermédiaire entre la pyramide métrologique en métrologie du temps et le système Galileo (fig. 5). Il fournirait les données d'horloges et de comparaisons des PTF au BIPM, pour leur inclusion dans le calcul du TAI. Par ailleurs, le GST pourrait apparaître dans la Circulaire T du BIPM par une évaluation du type UTC – GST_{Diffusé}, comme c'est déjà le cas pour le GPS et le GLONASS, ces informations étant basées sur des mesures de type UTC(k) – GNSS *Time* obtenues au sein d'un « laboratoire UTC(k) ». Par exemple, l'écart UTC – GPS *Time* est actuellement évalué via UTC(OP) et les mesures GPS effectuées au LNE-SYRTE à l'Observatoire de Paris. Il est aussi proposé que le TSP soit chargé de promouvoir le GST auprès de la communauté internationale en métrologie du temps en diffusant aux utilisateurs des informations concernant la traçabilité du GST sur l'UTC. Enfin, le TSP serait chargé des relations de Galileo avec le Groupe de travail du CCTF sur le TWSTFT, pourrait être partenaire dans l'installation de récepteurs de signaux Galileo dans les « laboratoires UTC(k) » participants, et organiserait les étalonnages des liaisons entre ces laboratoires et les PTF. De plus, les experts auprès de la GJU et de la GSA recommandent que les institutions européennes (GSA, ESA, d'autres Agences spatiales, Euramet, les INM, etc.) soutiennent la création en Europe d'un centre d'étalonnages en absolu des équipements de transfert de temps.

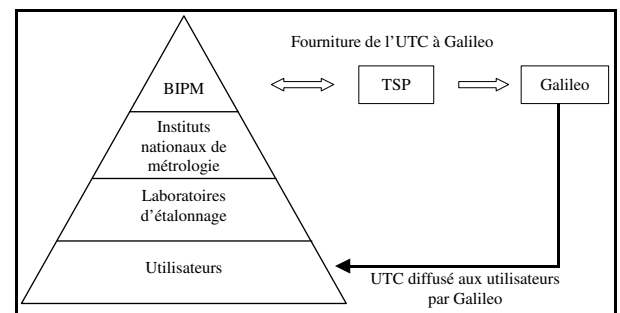


Fig. 5 – Le *Time Service Provider* (TSP) comme intermédiaire entre la pyramide métrologique temps/fréquence et Galileo, pour la diffusion de l'UTC aux utilisateurs.

Une fois l'activité opérationnelle de Galileo dans sa phase FOC reconnue, le TSP pourrait être chargé d'autres activités de services. Les produits du TSP, et notamment les paramètres de pilotage du GST sur l'UTC, pourraient intéresser des clients d'informations temporelles : les compagnies opératrices de réseaux de télécommunications, les compagnies de radiotélévisions, les compagnies d'électricité, les scientifiques, les personnes privées. D'autres institutions pourraient piloter leurs références sur le GST avec les produits du TSP : les gouvernements, les entreprises, la finance, la marine, et notamment le système de radionavigation côtière eLoran, les réseaux, les opérateurs de satellites, les compagnies d'électricité et de télécommunications. La qualité et la fiabilité des informations temporelles fabriquées par la GTSF et délivrées par le TSP, donc entre autres les algorithmes et les données d'horloges et de comparaisons, formeraient la base de ces services.

Évidemment, l'un des principaux services temporels de Galileo sera la diffusion globale de l'UTC. Ce signal pourrait donc servir de moyen principal d'accès à un temps légal pour les pays d'Europe, sa traçabilité étant assurée par les moyens mis en œuvre autour des « laboratoires UTC(k) » participant à la génération du GST. Du point de vue de l'utilisateur, cette traçabilité reposerait donc sur : la génération du GST, la diffusion par les satellites de Galileo des éléments permettant de produire l'écart GST – UTC, et l'équipement de réception de l'utilisateur pour ses besoins propres. Ces éléments pourraient former la base d'une utilisation de Galileo comme une méthode accréditée d'accès au temps légal.

Tous ces éléments de réflexion auxquels le LNE-SYRTE participe activement en sont au stade de la discussion entre les différents intervenants du projet, ainsi qu'avec des institutions externes comme le BIPM et EURAMET.

10. Développement actuel du projet et perspectives

La phase de spécification et de conception de la GTSPF s'est conclue en août 2006 par le passage avec succès de la CDR. Cette revue incluait la conception fonctionnelle et matérielle de la station, ainsi que la vérification des budgets d'incertitudes au moyen de simulations.

Le projet a depuis passé avec autant de succès les revues par la GSA de points clés de développement (*Development Key Point*) en avril et en juillet 2007, qui concernaient l'implantation, la vérification et la validation du planning de mise en oeuvre de la GTSPF. Les méthodes d'étalonnages des moyens de comparaisons entre les PTF et les « laboratoires UTC(k) » ont été validées. Ces revues visaient également à l'analyse et au planning du rôle et de l'utilisation élargis des services temps de Galileo, en terme de transition des phases IOV à FOC, mais aussi concernant la fourniture de service temps à une communauté plus large d'utilisateurs. Deux publications, préparées contractuellement par le LNE-SYRTE, ont rendu compte de ces activités à la communauté internationale de métrologie temps/fréquence [1,17].

Les activités d'étalonnages vont démarrer très prochainement par l'achat et l'évaluation des matériels nécessaires. La collecte quotidienne de données d'horloges et de comparaisons des « laboratoires UTC(k) » est mise en place depuis avril 2007 pour démarrer les tests des algorithmes d'horloge composite et de prédiction. Le développement de la GTSPF est pour l'instant en phase avec le programme établi lors de la CDR.

Le planning initial prévoyait ensuite entre autres une revue de démarrage d'essai (*Test Readiness Review*) de la GTSPF en novembre 2007, une revue d'acceptation des essais (*Test Acceptance Review*) en février 2008, et une revue finale du projet en octobre 2008, qui devait marquer la fin du contrat de *Fidelity*. Mais ce programme dépend désormais de la date de démarrage opérationnel des PTF,

du planning de l'IOV, actuellement décalée au deuxième semestre 2009, et plus généralement du développement global du projet Galileo. Fin 2007, une profonde réorganisation du projet Galileo a été entreprise, le consortium industriel qui avait remporté l'appel d'offre pour la mise en place du système ayant échoué à présenter son projet dans les délais impartis. C'est donc sur une base de financements publics européens que Galileo devrait être mis en œuvre dans les prochaines années.

Remerciements

Les auteurs remercient leurs collègues du consortium *Fidelity*, les membres de la GSA, de la GJU, de l'ESA et des industriels associés au projet Galileo, les experts évoluant au sein du *Timing Advisory Group* et de *Progeny* ainsi que le BIPM pour de fructueuses discussions sur ce projet depuis juin 2005.

Références

- [1] ACHKAR J., TUCKEY P., UHRICH P., VALAT D. et al., "Fidelity – Progress Report on Delivering the Prototype Galileo Time Service Provider", *Proc. of the 21st European Frequency and Time Forum (EFTF) and International Frequency Control Symposium (FCS)*, Genève, 2007, 446-451.
- [2] UHRICH P., VALAT D., PRODHOMME M., TARIS F., IBN TAÏEB I. et BLONDÉ P., « Le point sur la référence de temps française UTC(OP) et raccordement du système européen de radionavigation par satellites EGNOS à UTC(OP) », *Bulletin du Bureau national de métrologie*, **124**, 2004, 25-35.
- [3] "The operational use of two-way satellite time and frequency transfer employing PN codes", Rec. ITU-R TF.1153-2, 2003.
- [4] DEFRAIGNE P. et PETIT G., "Time transfer to TAI using geodetic receivers", *Metrologia*, **40**, 2003, 184-188.
- [5] GALLEANI L. et TAVELLA P., "On the use of the Kalman filter in timescales", *Metrologia*, **40**, 2003, 326-334.
- [6] DAVIS J.A., GREENHALL C.A. et STACEY P.W., "A Kalman filter clock algorithm for use in the presence of flicker frequency modulation noise", *Metrologia*, **42**, 2005, 1-10.
- [7] DAVIS J.A., GREENHALL C.A. et BOUDJEMAA R., "The development of a Kalman filter clock predictor", *Proc. of the 19th EFTF*, Besançon, 2005, 90-95.
- [8] POWERS E. et HAHN J., "A report on GPS and Galileo Time Offset coordination efforts", *Proc. of the 21st EFTF and IFCS*, Genève, 2007, 440-445.
- [9] PIESTER D. et al., "Calibration of six European TWSTFT earth stations using a portable station", *Proc. of the 20th EFTF*, Braunschweig, 2006, 460-467.
- [10] PETIT G., JIANG Z., UHRICH P. et TARIS F., "Differential calibration of Ashtech Z12-T receivers for accurate time comparisons", *Proc. of the 14th EFTF*, Turin, 2000, 40-43.

- [11] PETIT G., DEFRAIGNE P., WARRINGTON B. et UHRICH P., "Calibration of dual-frequency receivers for TAI", *Proc. of the 20th EFTF*, Braunschweig, 2006, 455-459.
- [12] WHITE J., BEARD R., LANDIS G., PETIT G. et POWERS E., "Dual frequency absolute calibration of a geodetic GPS receiver for time transfer", *Proc. of the 15th EFTF*, Neuchâtel, 2001, 167-170.
- [13] PLUMB J., LARSON K.M., WHITE J. et POWERS E., "Absolute calibration of a geodetic time transfer system", *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, **52**, n° 11, 2005, 1904-1911.
- [14] ZANELLO R., MASCARELLO M., TAVELLA P., GALLEANI L., DETOMA E. et BELLOTTI A., "The Galileo Precise Timing Facility", *Proc. of the 21st EFTF and IFCS*, Genève, 2007, 458-462.
- [15] UHRICH P., VALAT D., BRUNET M., MARÉCHAL J., BELTAN T. et SUARD N., "The French time reference UTC(OP) and the connection of the EGNOS Network Time", *Proc. of the 19th EFTF*, Besançon, 2005, 539-544.
- [16] DELPORTE J., MERCIER F., MARÉCHAL J., JEANNOT M., RICHARD J.-Y. et UHRICH P., "Performance assessment of the time difference between EGNOS Network Time and UTC", *Proc. of the ION GNSS*, Fort Worth, 2006.
- [17] HAHN J., JONES R., ACHKAR J. et TUCKEY P., "Galileo's timekeeping infrastructure: where do we go with the external time service provider ?", *Proc. of the 21st European Frequency and Time Forum (EFTF) and International Frequency Control Symposium (FCS)*, Genève, 2007, 452-457.

Article reçu le 4 décembre 2007 ; version révisée reçue le 29 février 2008.