

# Contribution de l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière à la réalisation du repère de référence terrestre de GALILEO

■ Jonathan CHENAL - Zuheir ALTAMIMI

*L'Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN) participe depuis près de 10 ans au consortium GGSP (GALILEO Geodetic Service Provider) chargé de fournir le repère de référence terrestre du système européen GALILEO (GALILEO Terrestrial Reference Frame - GTRF). Celui-ci est spécifié pour que les positions des stations communes du GTRF avec le Repère International de Référence Terrestre (ITRF) soient cohérentes à hauteur de 3 cm. Trois centres d'analyse calculent chaque jour et chaque semaine les positions d'environ 150 stations à la surface de la Terre, dont une quarantaine de Stations de Suivi de GALILEO (GALILEO Sensor Station - GSS). L'IGN est en charge de leur combinaison et de l'alignement de la solution ainsi combinée sur l'ITRF. L'analyse et le cumul rigoureux des solutions hebdomadaires fournissent le GTRF proprement dit, qui est composé de position de stations et de leurs vitesses linéaires. Les résultats montrent que la cohérence entre les deux repères atteint 5 mm au niveau des coordonnées de leurs stations communes.*

## MOTS-CLÉS

ITRF - GALILEO  
GGSP - GTRF - IGN

nal. Son orientation initiale est celle donnée par le Bureau International de l'Heure à l'époque 1984.0, et l'évolution temporelle de celle-ci est régie par la condition de non-rotation globale par rapport aux mouvements horizontaux à la surface de la Terre. Il fait l'objet de réalisations périodiques, sous la forme d'un jeu de coordonnées temporelles des stations des quatre techniques de la géodésie spatiale (Interférométrie à Très Longues Lignes de Base - VLBI, Télémétrie Laser sur Satellites - SLR, Détermination d'Orbites par Radio-Intégration Satellitaire - DORIS, et Systèmes Globaux de Navigation par Satellites - GNSS) obtenues par combinaison rigoureuse au sens des moindres carrés. Sa dernière réalisation est appelée ITRF2008 (Altamimi et al., 2011, 2012).

## ■ Le repère de référence terrestre de GALILEO

Le repère de référence terrestre de GALILEO (GTRF) est spécifié pour que les coordonnées des stations qui lui sont communes avec la version courante de l'ITRF soient cohérentes à hauteur de 3 cm à 95 % (2 sigmas).

En effet, le repère de référence terrestre de GALILEO consiste en un jeu de coordonnées d'un ensemble de stations de deux natures distinctes :

- Des stations du réseau mondial du Service International des GNSS (*IGS - International GNSS Service*), utiles pour la robustesse du calcul ainsi que la mise en référence de la solution.
- Des stations de suivis de GALILEO (*GSS - GALILEO Sensor Stations*), ou expérimentales (*GESS*), qui sont les stations de l'infrastructure du système, dont les données de stations ne sont

La navigation par satellites repose pour partie sur un message de navigation contenu dans le signal émis par les satellites, qui contient, entre autres, les éphémérides des satellites, c'est-à-dire leur position à un instant de référence donné, ainsi que les paramètres pour les propager dans le temps. Toute position obtenue de façon primaire par leur utilisation est donc exprimée dans la même référence que celle dans laquelle eux-mêmes sont exprimés. Ainsi, chaque système de navigation par satellites est doté d'un repère de référence terrestre : le WGS84 (*World Geodetic System 1984*) pour le GPS, le PZ-90 (*Parametri Zemli 1990*) pour GLONASS, le CGCS2000 (*China Geodetic Coordinate System 2000*) pour BEIDOU. Dans le cas de GALILEO, il s'agit du GTRF (*GALILEO Terrestrial Reference Frame*). Celui-ci répond à des spécifications précises relatives à son lien avec le Repère International de Référence Terrestre (ITRF - *International Terrestrial*

*Reference Frame*). Le GTRF est calculé par le consortium GGSP, composé d'établissements géodésiques européens dont l'IGN fait partie. Les résultats obtenus montrent en particulier que le GTRF est parfaitement cohérent avec l'ITRF, répondant ainsi à sa définition.

## Le GTRF : un repère de référence de précision

### ■ Les systèmes et repères de référence terrestres

Un système de référence terrestre est un concept mathématique permettant l'expression de coordonnées dans l'environnement terrestre. Il s'agit d'un trièdre orthonormé, dont l'axe Z pointe vers le pôle conventionnel, et qui tourne avec le mouvement diurne de la Terre. L'origine du Système International de Référence Terrestre (ITRS) est le centre des masses de la Terre, et son échelle est le mètre du système internatio-



pas publiques. Ces stations sont au nombre d'une quarantaine désormais, sur l'ensemble du globe.

## Le consortium GGSP

### ■ Structure du consortium

Le consortium GGSP (*GALILEO Geodetic Service Provider*) a été formé en 2004 pour répondre à l'appel d'offres de l'Entreprise Commune GALILEO (*GALILEO Joint Undertaking* - GJU) afin de mettre en place le prototype du service de fourniture du repère de référence terrestre de GALILEO. Ce consortium regroupe depuis le début les établissements suivants :

- Institut Astronomique de l'Université de Berne (AIUB), Suisse ;
- *GeoForschungsZentrum* (GFZ), Potsdam, Allemagne ;
- *Bundesamt für Kartographie und Geodäsie* (BKG), Francfort-sur-le-Main, Allemagne ;
- Centre Européen d'Opérations Spatiales (ESOC), Darmstadt, Allemagne ;
- Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN), Saint-Mandé, France.

La GJU a depuis été remplacée par la GSA (*European GNSS Agency*), et des intermédiaires, dans le cadre du contrat lié au Segment de Mission au Sol de GALILEO. Le prototype initial du service est passé de la GJU à l'Agence Spatiale Européenne sous une délégation de la Commission Européenne, mais le consortium est le même depuis sa création.

L'organisation du consortium est similaire à celle de l'IGS, au sein duquel ces établissements sont impliqués :

- Trois centres d'analyse (GFZ, ESOC, AIUB), qui estiment les paramètres suivants à partir des observations fournies sous la forme de fichiers RINEX :
  - Positions des stations IGS et G(E)SS.
  - Paramètres de rotation de la Terre.
  - Orbites, horloges, biais inter-systèmes, délais de groupe d'émission des satellites des systèmes GPS et GALILEO.
  - Délais troposphériques et ionosphériques zénithaux sur les stations IGS et G(E)SS.
- Trois centres de combinaisons des produits des centres d'analyse :

- Positions des stations IGS et G(E)SS : IGN.
  - Orbites et horloges des satellites des systèmes GPS et GALILEO, paramètres de rotation de la Terre : GFZ.
  - Délais troposphériques et ionosphériques zénithaux sur les stations IGS et G(E)SS : BKG.
- Un centre de validation des solutions GTRF : BKG.

Chaque calcul réalisé par un des centres constitue ce qu'on appelle une "solution", en ce sens que le résultat fourni est la solution à un problème d'estimation de paramètres à partir d'observations.

Les calculs relatifs à ces différentes étapes sont réalisés à deux cadences différentes :

- Chaque jour, ce sont les calculs dits rapides, qui traitent les observations de la veille.
- Chaque semaine, ce sont les calculs dits finaux, qui traitent les observations de l'avant-dernière semaine.

L'intégralité des opérations fait l'objet d'une automatisation, depuis le téléchargement des fichiers nécessaires, en passant par la détection et le rejet des points faux, l'enchaînement des étapes du traitement, la rédaction des rapports automatiques de calculs, leur envoi par courriel, ainsi que le transfert par FTP des fichiers de résultats.

### ■ Historique du consortium

Les travaux d'études et prototypage ont débuté à l'automne 2005. Les premiers calculs finaux ont été réalisés en novembre 2006 (semaine GPS numéro 1399), sous la forme de sept campagnes de quatre semaines chacune. Puis, à partir de juillet 2008, six mois de calculs hebdomadaires ininterrompus ont été réalisés, jusqu'à mars 2009, avant que le consortium ne cesse ses activités jusqu'à novembre 2011. Depuis, les calculs hebdomadaires sont réalisés en continu.

A partir du début de l'année 2014, des calculs rapides sont réalisés quotidiennement.

### ■ Rôle de l'IGN

L'IGN est impliqué dans le consortium GGSP par le biais du Service de Géodésie et Nivellement, en charge

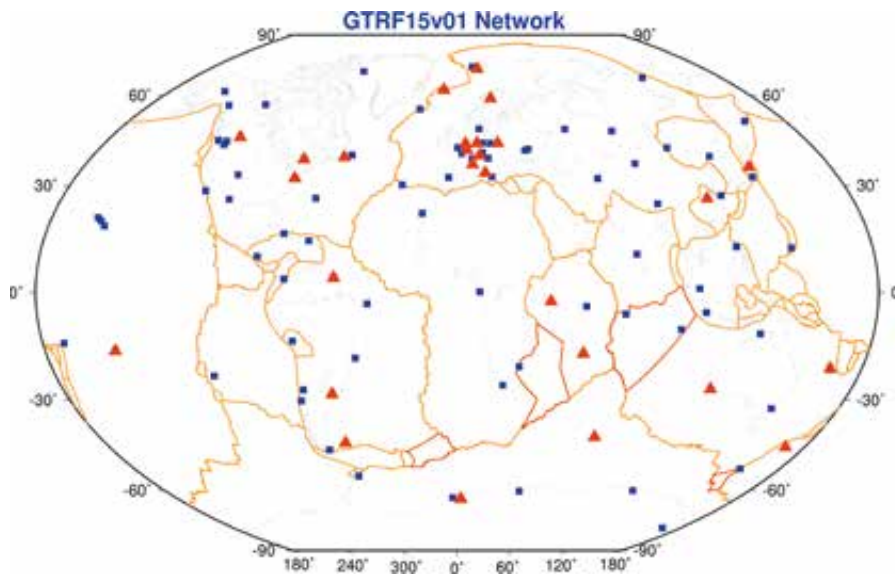
des calculs cadencés (rapides et finaux) et du Laboratoire de Recherche en Géodésie (LAREG), qui a la responsabilité scientifique et du calcul du GTRF. Dans les deux cas, le logiciel CATREF est le cœur logiciel du calcul de la combinaison.

La fonction de centre de combinaison de l'IGN ne se limite pas à ces deux calculs cadencés. Lui incombe aussi la responsabilité du calcul d'une nouvelle version du GTRF lorsque nécessaire, i.e. : chaque année au minimum, ainsi qu'après chaque nouvelle version de l'ITRF. Ce calcul, à l'instar de celui de l'ITRF par exemple, fait l'objet d'une analyse scientifique poussée, qu'un traitement automatisé ne permet pas forcément. Le calcul d'une nouvelle version du GTRF s'appuie sur les solutions combinées hebdomadaires calculées par le SGN et sur l'ITRF en cours pour la mise en référence.

## Stratégie de calculs et résultats

La réalisation tant des solutions cadencées que du GTRF proprement dit repose sur la méthode dite des contraintes minimales. Celle-ci consiste en l'utilisation d'une solution dite de référence au moment même du calcul de combinaison, de façon à assurer l'alignement optimal de la combinaison sur la référence, c'est-à-dire que les sept (ou 14) paramètres de la similitude entre la solution combinée et la référence sont nuls par construction. Cela signifie que le système d'axes de la solution combinée est bâti pour être parallèle à celui de la référence, que leurs origines sont confondues, et que leur échelle est la même.

Dans le cas des calculs cadencés, la combinaison fait intervenir les solutions des trois centres d'analyses, et une référence propagée à l'époque de ces solutions, en l'occurrence la solution IGb08 dérivée de l'ITRF2008 et restreinte aux stations GNSS. Dans le cas du GTRF, la combinaison est un cumul de série temporelle appuyé sur chacune des solutions hebdomadaires calculées depuis 2006, et une référence propagée à l'époque choisie pour en combiner les coordonnées,



**Figure 1.** Réseau des stations du GTRF15v01. Carrés bleus : sites ITRF/IGS et triangles rouges : sites GESS/GSS. Les bordures des plaques tectoniques sont en tracés en orange et rouge.

en l'occurrence la version courante de l'ITRF, l'ITRF2008. Ceci assure qu'à la fois les solutions combinées cadencées, rapides et hebdomadaires, sont alignées sur la référence, mais aussi que le GTRF lui-même l'est également.

Nous contrôlons l'état de la solution de référence, en comparant la solution combinée à celle-ci, et en retirant les points dont les résidus sont trop élevés, reflet de sa lente dégradation compte tenu de son âge. La solution combinée est aussi, à chaque fois, comparée à d'autres solutions de référence :

- La dernière version en date du GTRF, actuellement le GTRF15v01, dont le réseau est illustré par la figure 1.
- La dernière solution cumulée des solutions hebdomadaires.

La stratégie d'analyse adoptée permet de garantir l'alignement du repère ainsi calculé à l'ITRF au niveau millimétrique. Elle permet aussi d'assurer une cohérence millimétrique entre les deux repères, en terme d'erreur moyenne quadratique pondérée sur les stations de référence choisies pour l'alignement. Le GTRF15v01 est calculé sur la base du réseau des stations des calculs hebdomadaires.

Au regard des résultats obtenus au cours du projet, tant concernant les produits hebdomadaires que le GTRF lui-même, on peut conclure que les

spécifications de réalisation du repère de référence terrestre de GALILEO sont largement respectées, ce qui en fait un repère aligné à l'ITRF, et cohérent avec lui au niveau des stations de référence à un niveau de l'ordre de 5 mm en trois dimensions, et entre 2 et 4 mm sur chaque composante. L'alignement du GTRF à l'ITRF au niveau millimétrique est un exemple à suivre par les autres fournisseurs GNSS afin d'assurer l'interopérabilité et ainsi faciliter l'accès des utilisateurs à tous les systèmes GNSS.

## Conclusion

L'activité GGSP a été pour l'IGN la première expérience de calculs de combinaisons cadencés de solutions globales de centres d'analyses. Si elle a largement bénéficié de l'expérience acquise depuis des décennies dans ce domaine notamment par le rôle de centre de produit du Repère International de Référence Terrestre, ses spécificités et les résultats obtenus ont constitué un démonstrateur de la capacité de l'IGN à jouer un rôle de service opérationnel de haut niveau, qui a préparé le terrain pour l'accueil du rôle de coordinateur du repère de référence de l'IGS, responsabilité que l'IGN exerce depuis 2009. Au-delà, elle permet au système européen de

navigation par satellites GALILEO de bénéficier de cette expérience et, à ses futurs utilisateurs, de garantir que les coordonnées obtenues avec ce système sont exprimées dans un repère de référence terrestre bien défini par rapport à l'ITRF. ●

## Contacts

Jonathan CHENAL  
jonathan.chenal@ign.fr  
Zuheir ALTAMIMI  
zuheir.altamimi@ign.fr

## Références

Altamimi, Z., X. Collilieux, L. Métivier (2011), *ITRF2008 : an improved solution of the International Terrestrial Reference Frame*, Journal of Geodesy, 85(8) :457-473, doi :10.1007/s00190-011-0444-4.

Altamimi, Z., X. Collilieux, L. Métivier (2012), *Le Repère International de Référence Terrestre (ITRF) : état actuel et perspectives*, XYZ, 133, 4<sup>e</sup> trimestre 2012, 36-40.

## ABSTRACT

*The French National Institute for Geographic and Forest Information (IGN) is involved since 2005 in the GGSP consortium (GALILEO Geodetic Service Provider) in charge of providing the terrestrial reference frame for the European system GALILEO (GALILEO Terrestrial Reference Frame - GTRF). The GTRF is specified to be consistent with the International Terrestrial Reference Frame at a 3 cm level for their common stations. Three analysis centers compute each day and each week the coordinates of about 150 stations over the world, including about 40 GALILEO Sensor Stations (GSS). IGN is responsible for their combination and for the alignment of the combined solutions to the ITRF. The rigorous analysis and stacking of the weekly combined solutions provide the global GTRF consisting of station (au singulier) positions and linear velocities. Results show that the consistency between their common station coordinates reaches the 5 mm level.*