

# IGS-MGEX, on prépare le terrain pour les sciences et techniques GNSS multi-constellation

Oliver MONTENBRUCK - Peter STEIGENBERGER - Robert KHACHIKYAN - Georg WEBER - Richard B. LANGLEY - Leoš MERVART  
Urs HUGENTOBLE - Traduction : Bernard FLACELIÈRE - Élise MATHIS

Cet article a été initialement publié en anglais dans le numéro de janvier / février 2014 du magazine *Inside GNSS* et est publié ici avec son autorisation. Sa traduction en français a été réalisée par XYZ, qui est responsable de l'exactitude de cette version. L'article original est disponible en ligne à l'adresse <<http://www.insidegnss.com/node/3849>>.

*Avec l'émergence de quatre nouvelles constellations (Beidou, Galileo, QZSS, IRNSS) ainsi que les modernisations en cours du GPS américain et du GLONASS russe, le monde de la navigation par satellite va subir des changements considérables. Face à ces défis, l'International GNSS Service (IGS) a lancé cette expérience multi-GNSS pour permettre de se familiariser par anticipation avec les nouveaux systèmes et aussi pour préparer leur intégration dans la modélisation et l'analyse des données GNSS de haute précision. Cet article rend compte de l'état des nouvelles constellations, du projet MGEX, il décrit aussi les premiers produits obtenus et les résultats récents de chaque système.*

**A**u cours de la dernière décennie, le monde du positionnement global a connu des changements spectaculaires. Avec au début une seule constellation (GPS), un ensemble de six systèmes régionaux ou mondiaux de navigation par satellite - avec l'ajout de GLONASS, BeiDou, Galileo, *Quasi-*

*Zenith Satellite System* (QZSS) et le système indien régional de navigation par satellites (IRNSS) - a maintenant émergé, il offre déjà, ou du moins se prépare à offrir, les services de positionnement (P) depuis l'espace, de navigation (N) et de synchronisation de temps (T) ou PNT.

## MOTS-CLÉS

MGEX - GNSS - IGS -  
GPS - Glonass - BeiDou  
- Galileo - QZSS - IRNSS

Ces services indépendants sont complétés par une variété de systèmes d'augmentation par satellites (SBAS) pour accroître la disponibilité, l'exactitude et la fiabilité des PNT pour les applications critiques en terme de sécurité. Les avantages potentiels des nouveaux systèmes satellitaires de navigation ont longtemps été loués et souvent utilisés pour justifier la nécessité de leur mise en place. Laissant de côté les arguments politiques pour une infrastructure de PNT nationale indépendante, les systèmes multi-constellation peuvent en effet offrir de nombreux avantages par rapport à la navigation GPS autonome et l'utilisation de son mode de positionnement originel par mesure de pseudo-distances. Les nouvelles structures de signal utilisées fourniront non seulement une plus grande robustesse contre les interférences et multi-trajets, mais permettront aussi un suivi plus robuste des signaux à faible puissance.

La disponibilité des signaux non cryptés sur trois fréquences permet de nouvelles approches de résolution des ambiguïtés dans le positionnement relatif basé sur la phase de la porteuse et peut également contribuer à l'analyse de l'ordre supérieur des retards ionosphériques. Dernier point, mais non le moindre, la simple augmentation du nombre de satellites disponibles non seulement améliore les applications de navigation, mais aussi offre un plus grand nombre de signaux pour les applications de la météorologie spatiale.



Station de contrôle GNSS à O'Higgins la station Allemande antarctique de réception, opérée conjointement par l'Agence fédérale pour la cartographie et la géodésie (BKG) et le Centre aérospatial allemand (DLR)



Compte tenu des contributions remarquables à la science que le GPS continue à offrir dans la géodésie, la télédétection, l'espace et la physique fondamentale, des avantages semblables et même plus nombreux sont généralement attendus des nouveaux systèmes spatiaux de PNT. La plupart de ces applications utilisent directement ou indirectement les services de l'IGS (international GNSS Service), qui a, depuis de nombreuses années, établi les standards élevés pour la modélisation et l'analyse des mesures de haute précision GPS et GLONASS.

L'IGS est un organisme bénévole de plus de 200 agences et institutions qui maintiennent un réseau mondial de stations d'observation, les archives de ces données d'observation sur le long terme ainsi que les produits dérivés de l'analyse de ces mesures.

Avec l'avènement des signaux GPS modernisés et la montée de nombreux nouveaux GNSS comme BeiDou, Galileo, QZSS et IRNSS ainsi que de nouveaux systèmes d'augmentation tels que le SCDM de la Russie (*System of Differential Correction and Monitoring*) et l'Indien GAGAN (*GPS Aided GEO Augmented Navigation*), l'IGS s'est pleinement engagé à s'étendre vers un service complètement multi-GNSS.

Pour ouvrir la voie à la fourniture future de données et de produits de haute qualité pour toutes les constellations, l'IGS a lancé l'expérience multi-GNSS ou *Multi-GNSS Experiment* (MGEX) sous la coordination de son groupe de travail multi-GNSS. MGEX sert de cadre pour augmenter la prise de conscience globale des multi-GNSS dans les communautés scientifiques et techniques, ainsi que pour familiariser les participants et les utilisateurs de l'IGS avec les nouveaux systèmes de navigation par satellite.

Cet article propose un bref aperçu des constellations GNSS nouvelles et/ou modernisées et de leurs signaux disponibles pendant l'automne 2013. Ensuite, il décrira le réseau MGEX, que l'IGS a établi pour le suivi multi-GNSS et qui est exploité en parallèle au réseau existant pour l'utilisation de GPS et GLONASS.

La section suivante présentera les produits initiaux obtenus de MGEX, évaluera leur performance, et traitera des normes de traitement pertinents. Nous concluons par une discussion sur les mesures et actions nécessaires afin d'intégrer pleinement les nouvelles constellations et les nouveaux signaux dans la gamme de services IGS.

## Etat des systèmes de navigation par satellite

Le *tableau 1* résume les systèmes spatiaux actuels de PNT et les satellites opérationnels tels que décrits dans la publication par R. Langley citée dans la section bibliographie à la fin de cet article. Avec le lancement plus récent de IRNSS-1A, un total de six systèmes de navigation par satellite sont à ce jour disponibles. Parmi ceux-ci, les systèmes existants GPS et GLONASS ont depuis longtemps atteint leur pleine capacité opérationnelle et fournissent des signaux de navigation sur au moins deux fréquences (L1, L2) qui sont accessibles aux utilisateurs civils.

Les dernières générations de satellites GPS IIF et GLONASS-K ont ajouté une troisième fréquence (L5 et L3, respectivement), mais ces signaux restent limités à un très petit nombre de satellites. En juin 2013, l'opérateur du GPS a commencé une première campagne de tests avec des retransmissions en vraie grandeur du nouveau code civil L2C

et du nouveau message de navigation CNAV sur L5. Ceux-ci offrent une meilleure information sur la navigation et une amélioration des capacités de positionnement. La diffusion du message définitif devrait commencer dès avril 2014. Les utilisateurs doivent s'attendre à une précision du signal CNAV initiale moins bonne que les signaux existants. Une fois la mise en œuvre complète, en décembre 2014, la précision du signal CNAV devrait atteindre ou dépasser celle des signaux existants.

En plus du GPS et GLONASS, le système BeiDou offre maintenant un service de navigation autonome pour la Chine et la zone Asie-Pacifique, un service mondial devant être disponible vers 2020. Même si le document de contrôle d'interface *BeiDou Open Service Interface Control Document* (ICD) ne couvre que les signaux publics B1 et B2 à l'heure actuelle, les signaux de trois fréquences BeiDou au maximum peuvent de fait être suivis par une variété de récepteurs multi-GNSS. BeiDou est donc la première constellation permettant une évaluation systématique des techniques de positionnement triple-fréquence.

Galileo a actuellement quatre satellites de validation en orbite (IOV) en exploitation. Ces satellites sont utilisés pour de premiers tests et expérimentations, mais ils n'ont pas encore été déclarés en bonne santé. Un service opérationnel initial avec une couverture mondiale

System	Blocks	Signals	Sats
GPS	I/A	L1 C/A, L1/L2 P(Y)	8
	IIR-A/B	L1 C/A, L1/L2 P(Y)	12
	IIR-M	+L2C	7
	IIF	+L5	4
GLONASS	M	L1/L2 C/A + P	24
	K	+L3	(1)
BeiDou	GEO	B1, B2, B3	5
	IGSO	B1, B2, B3	5
	MEO	B1, B2, B3	4
Galileo	IOV	E1, (E6), E5a/b/ab	(4)
QZSS	n/a	L1 C/A, L1C, SAIF L2C, E6 LEX, L5	1
IRNSS	n/a	L5,S	(1)

**Tableau 1.** Etat du déploiement des systèmes de navigation par satellites globaux et régionaux en septembre 2013. Les satellites entre parenthèses n'ont pas été déclarés opérationnels



est prévu dans quelques années. Bien que l'accès aux signaux Galileo E6 n'est pas encore entièrement défini, les utilisateurs peuvent accéder librement aux signaux ayant des performances anti multi-trajet avancé dans les bandes E1 et E5a/E5b.

C'est une caractéristique unique, les satellites Galileo sont équipés de masers à hydrogène passifs. Ceux-ci offrent une stabilité d'horloge exceptionnelle avec de nombreux avantages potentiels pour la navigation en temps réel, le positionnement précis et les applications scientifiques.

Le Japon a validé le concept de QZSS avec son satellite "Michibiki" pendant plus de deux ans. Un système QZSS pleinement opérationnel comprenant au moins trois satellites en orbite géosynchrone inclinée (IGSO) et un en orbite géostationnaire (GEO) est envisagée dans la présente décennie. Le QZSS prend en charge un ensemble unique de signaux de navigation sur quatre bandes de fréquences distinctes et propose différents types de données de correction pour les utilisateurs nécessitant des précisions moyennes et hautes.

Enfin, l'Inde a lancé un premier satellite, IRNSS-1A, en juillet 2013, qui est actuellement en phase de test. À terme, IRNSS sera composé de quatre IGSO et deux satellites GEO. IRNSS-1A transmettra des signaux dans les deux bandes L5 et S, mais les récepteurs GNSS courants ne peuvent actuellement pas suivre ces signaux en raison de l'absence d'informations sur les codes de distance sur L5 employés et le choix unique en son genre de la fréquence S. Il n'est actuellement pas non plus clairement établi si, afin d'améliorer l'interopérabilité avec les systèmes existants, l'ajout d'un signal L1 est envisagé pour les satellites IRNSS à venir.

Les six systèmes de navigation par satellite que nous avons décrits ici sont complétés par un total de 13 satellites en orbite géostationnaire SBAS. Bien que n'étant pas dans la cible immédiate de l'IGS et de la communauté scientifique, un nombre croissant de satellites SBAS diffusent déjà des signaux sur deux fréquences (L1/L5) qui peuvent être suivis par les récepteurs GNSS

modernes et qui pourraient être intéressants pour les futures applications précises de positionnement.

Une vue d'ensemble à jour des systèmes GNSS mettant l'accent sur les nouvelles constellations est maintenue sur le site Web du projet IGS multi-GNSS (bibliographie) ainsi que des informations supplémentaires pour le traitement des données.

## Le réseau IGS multi-GNSS

Comme une ossature du projet MGEX, un nouveau réseau de stations de surveillance multi-GNSS a été déployé dans le monde entier en parallèle au réseau historique de l'IGS pour GPS et GLONASS. S'appuyant sur les contributions de divers organismes nationaux, des universités et d'autres institutions bénévoles, le réseau MGEX est passé à près de 90 stations en septembre 2013 (voir la figure 1).

MGEX s'appuie largement sur les ressources des institutions qui ont modernisé leurs réseaux historiques de suivi GNSS au cours des dernières années ou ont établi de nouvelles stations de surveillance capables de multi-GNSS. Dans l'ensemble, environ les deux tiers de toutes les stations MGEX sont apportés par le Centre national d'études spatiales français (CNES) et le *Deutsches Geo-Forschungszentrum* (GFZ), le *Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt* (DLR), l'Agence spatiale européenne (ESA), et le *Bundesamt für Kartographie und Geodäsie* (BKG). Le site MGEX fournit une carte et la liste de toutes les stations MGEX mise

à jour avec des liens vers des fichiers de description (*sitelog*) spécifiques à la station.

Au minimum, toutes les stations MGEX sont capables de suivre les satellites GPS ainsi que ceux d'une des nouvelles constellations Beidou, Galileo, QZSS. Bien que n'étant pas une condition préalable, GLONASS est également suivi par la majorité des stations et une fraction importante offre également le suivi des L1 ou L1/L5 des SBAS. Cependant, aucune station suivant les satellites IRNSS n'est disponible à présent pour le projet MGEX en raison du manque de spécification du signal et de l'état précoce du projet.

MGEX s'appuie sur un réseau très hétérogène comprenant une large gamme d'équipements. Les types de récepteurs les plus couramment utilisés sont répertoriés dans la section fabricants à la fin de cet article. La plupart des sites utilisent des antennes *choke ring* mais des antennes de qualité topographique avec de conventionnels *ground-planes* (plan anti-réflexions) sont également utilisées sur de nombreuses stations.

Même si la variété de récepteurs et antennes employés représente un défi important pour le traitement cohérent des données, cette variété est, dans le même temps, un atout précieux. La diversité des techniques de suivi et des types de données utilisées par les différents récepteurs disponibles contribue à une compréhension approfondie et à l'évaluation des nouveaux signaux de navigation. En outre, la comparaison de différents types d'équipement contribue à l'évolution et à l'amélioration de

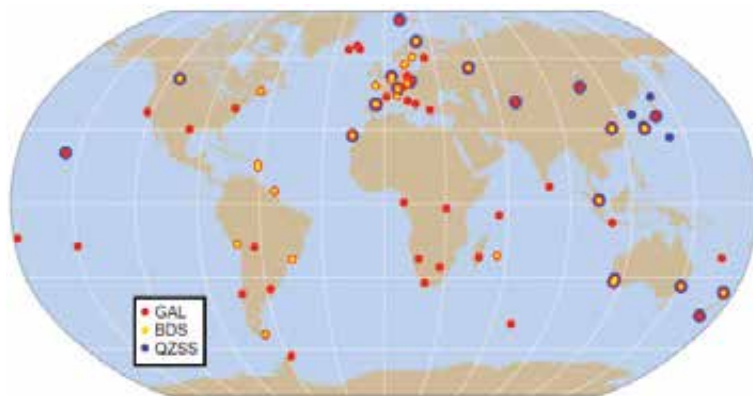


Figure 1. La distribution des stations MGEX ainsi que les constellations suivies (septembre 2013)





la conception des récepteurs GNSS par les fabricants.

Six sites MGEX accueillent actuellement plusieurs récepteurs de différents types connectés à une antenne commune (tableau 2 dans la section fabricants). Cela permet une comparaison directe du comportement de suivi et aide à l'évaluation des biais différentiels de code et de phase spécifiques à chaque récepteur.

Les centres de données du *Crustal Dynamics Data Information System* (CDDIS) de la NASA, de l'Institut géographique national français (IGN), et du BKG archivent et distribuent les données d'observation et les éphémérides diffusées collectées par le réseau MGEX. Pour faciliter ces activités, le format *Receiver Independent Exchange 3* (RINEX 3) a invariablement été adopté tout au long du projet MGEX. La mise en œuvre de la dernière version 3.02 est en cours, mais étant donné l'héritage du format DOS (8 + 3) les noms de fichiers sont actuellement conservés pour préserver la compatibilité avec les modes de calcul existants.

L'introduction de nouveaux noms de fichiers avec des champs d'information étendus est prévue dans la nouvelle norme RINEX 3.02 à un stade ultérieur, en coordination avec les utilisateurs MGEX et le Comité de l'infrastructure de l'IGS. Au minimum, les fichiers d'observations quotidiennes RINEX à 30 secondes de taux d'échantillonnage sont prévus pour toutes les stations, mais des fichiers d'observations horaires et/ou à 15 minutes avec une cadence d'acquisition plus élevée sont également offerts pour des sites sélectionnés via les centres de données

individuels. Les liens vers les données MGEX archivées sont disponibles sur le site MGEX.

En plus des données stockées, de nombreuses stations fournissent également au projet MGEX des flux de données temps réel contenant des observations multi-GNSS (*Figure 2*). Le BKG à Francfort héberge un caster <<http://mgex.igs-ip.net/home>> dédié au projet MGEX, où les utilisateurs intéressés peuvent actuellement accéder à des flux de données d'environ 70 stations après une inscription gratuite. Le *Networked Transport of RTCM via Internet Protocol* (NTRIP) et le format RTCM3-MSM Multi Signal Message ont été adoptés pour le projet MGEX pour assurer une interface cohérente, indépendamment des récepteurs utilisés et de leurs formats de données binaires natifs.

Mieux que les messages hérités du RTCM 3.1, les nouveaux messages MSM sont conçus pour traiter toutes les constellations, tous les signaux et tous les types d'observation de manière à assurer une compatibilité totale avec le contenu de l'information des fichiers d'observation RINEX. Suite à la publication de la nouvelle norme RTCM 3.2, les principaux fabricants de récepteurs préparent la mise en œuvre du support du MSM, mais les versions de firmware compatibles avec le MSM n'ont pas encore été rendues publiques. En substitution, le BKG et le NRCAN (*Natural Resources of Canada*) ont commencé à générer pour le projet MGEX des prototypes de flux de données MSM par conversion en temps réel des formats de données natifs. Les flux de données qui en résultent sont disponibles sur le

casteur MGEX du BKG et facilitent la familiarisation et l'utilisation précoce de ce format.

## Orbites et horloges précises

Dans une première étape vers l'intégration de nouvelles constellations dans un service IGS multi-GNSS, divers centres d'analyse calculent des orbites et des horloges précises pour Galileo et QZSS basés sur des observations du réseau MGEX et, éventuellement, d'autres stations dont ils sont propriétaires. Les données sont publiques et mises à disposition des utilisateurs intéressés aux archives de MGEX tenues par le CDDIS. Des efforts similaires sont attendus dans un proche avenir pour BeiDou.

**Galileo.** La *Technische Universität München* (TUM) et le CNES / Collecte Localisation Satellites (CLS) fournissent régulièrement les orbites et des horloges des quatre satellites Galileo IOV (PRN E11, E12, E19, E20) avec des latences de trois à six jours. Ils sont complétés par divers lots d'éphémérides recalculés, une contribution du *Center for Orbit Determination in Europe* (CODE) et du GFZ. Dans l'ensemble, comme le montre la *figure 3*, les orbites et horloges Galileo de MGEX couvrent actuellement un laps de temps de près d'un an et demi, ce qui permet des évaluations de performance à long terme dans un large éventail de conditions.

En l'absence de valeurs publiées pour les décalages d'antenne GNSS par rapport aux centres de masse, les valeurs classiques  $(x, y, z) = (+0.2, 0.0, +0.6)$  m ont été adoptées pour le projet MGEX et sont recommandées pour la modélisation d'observation lorsqu'on travaille avec les orbites et horloges MGEX. Ces valeurs se rapportent à l'orientation du système de coordonnées lié à chaque satellite Galileo illustré sur la *figure 4*.

Comme le GPS, les satellites IOV emploient un pilotage de lacet sur l'axe z pointant vers la terre pour maintenir l'axe y des panneaux solaires perpendiculaire à la direction du soleil. Contrairement au GPS, cependant, le soleil est toujours maintenu dans l'hémisphère - x, tandis que le panneau + x

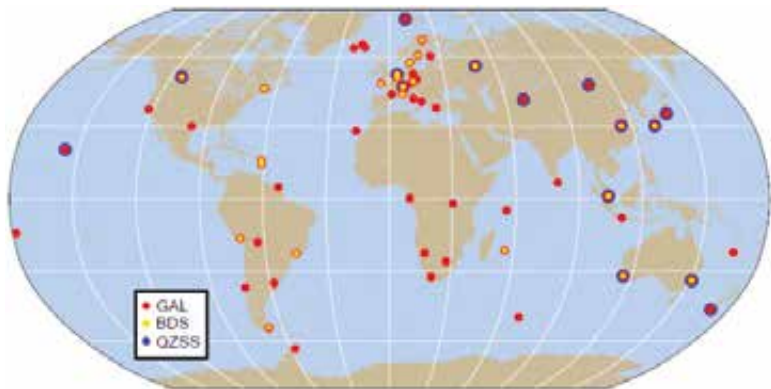


Figure 2. Le réseau MGEX en temps réel (septembre 2013)

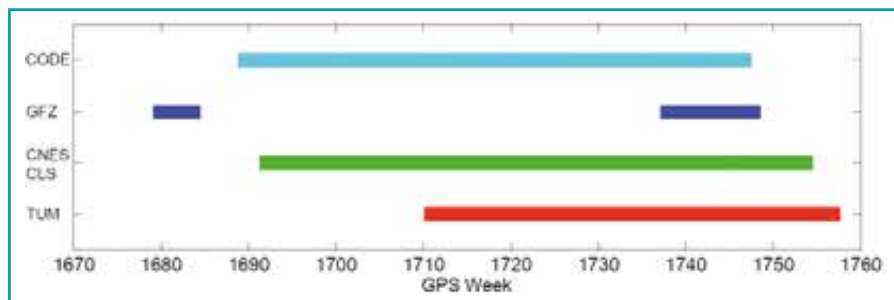


Figure 3. Disponibilité des orbites et horloges précises de Galileo mi-septembre 2013

orbites calculées par GNSS fournissent une mesure directe des erreurs radiales des orbites.

La figure 6 illustre les résultats de cette collecte de données SLR pour les paires de satellites IOV-1/2 (PRN E11 / E12) et IOV-4.3 (E19 / E20), qui sont situés dans des plans orbitaux B et C, respectivement. Mis à part une erreur systématique radiale moyenne d'environ 5 centimètres qui est encore inexpliquée, les résidus affichent clairement un motif en nœud papillon avec des amplitudes maximum d'environ 20 centimètres et un écart-type d'environ 8 centimètres. Ces valeurs dépassent nettement l'auto-cohérence des orbites CODE et TUM et indiquent la présence d'erreurs communes fortement corrélées dans ces deux solutions.

Comme on peut le reconnaître à partir d'une comparaison des résidus SLR pour des satellites individuels, l'amplitude de l'erreur est liée principalement

portant l'étalon de fréquence atomique est orienté vers l'espace. L'article de A. Konrad et al. figurant dans la bibliographie traite ce sujet plus en détail. Tous les centres d'analyse MGEX utilisent une combinaison iono-free de E1 (Open Service) et E5a dans leur traitement de Galileo, et les décalages d'horloge satellites résultant s'appliquent spécifiquement pour ces deux types d'observations. Pour le traitement mono-fréquence ou l'utilisation des observations E5b et E5AltBOC, les paramètres de délais de groupe appropriés doivent être pris en considération. Ceux-ci peuvent, par exemple, être obtenus à partir de la diffusion de message d'éphémérides Galileo.

La figure 5 présente une comparaison d'estimations d'orbites précises de Galileo IOV provenant de TUM et de CODE. En moyennant tous les satellites sur la période d'analyse de huit mois, les deux produits sont cohérents à plus ou moins 16 centimètres (RMS sur l'écart de positions 3D). De ce fait, la part due aux orbites de l'imprécision du positionnement final est d'environ 5 cm. Les produits orbite de CNES / CLS montrent actuellement une erreur environ trois fois plus grande, qui peut largement être attribuée au calcul d'arc d'orbites sur des périodes journalières

(par opposition aux solutions sur trois ou cinq jours fournies par les autres centres d'analyse).

Pour une évaluation indépendante de la performance, nous avons utilisé les mesures de distances laser sur satellite (SLR) recueillies par le Service international de télémétrie laser (ILRS). En moyenne, quelques 50 points normaux sont collectés par jour pour chacun des quatre satellites Galileo IOV. Les résidus des mesures SLR par rapport aux

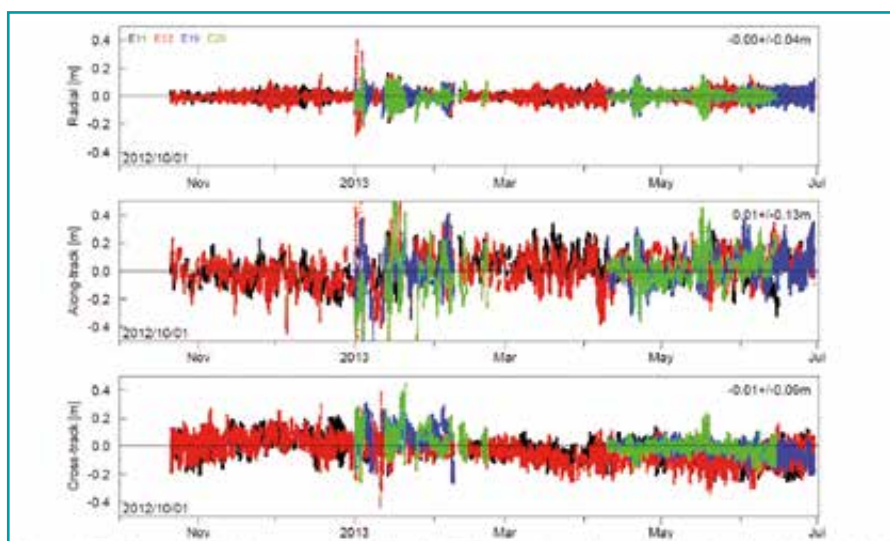


Figure 5. Différence des orbites précises MGEX (TUM - CODE) pour Galileo IOV

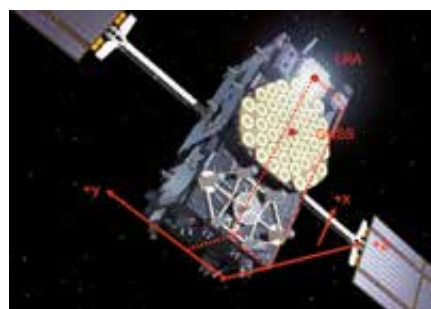


Figure 4. Orientation du système de coordonnées du vaisseau spatial Galileo-IOV (dessin d'artiste, ESA)

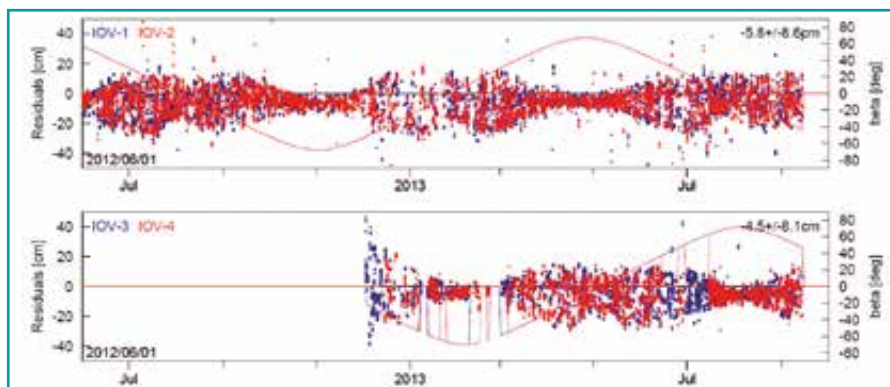


Figure 6. Résidus de distances laser des orbites CODE et TUM pour le 1<sup>er</sup> (haut) et le 2<sup>e</sup> (bas) satellite Galileo-IOV. Les lignes pleines indiquent l'angle du soleil au-dessus du plan orbital (angle  $\beta$ )

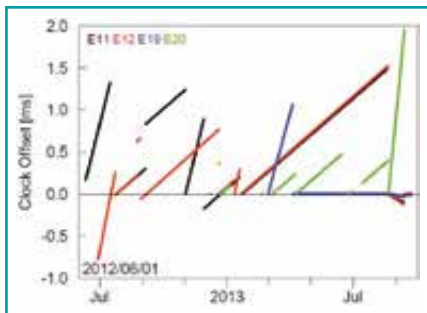


Figure 7. Décalage en temps des satellites Galileo-IOV par rapport au temps GPS, dérivé des analyses de MGEX

à l'angle du soleil au-dessus du plan orbital (c'est-à-dire l'angle  $\beta$ ). Les résidus sont les plus faibles lorsque le soleil atteint son maximum d'élévation au-dessus du plan respectif. Toutefois, un minimum secondaire peut être remarqué à proximité de la période d'éclipse, lorsque l'angle  $\beta$  disparaît. Les erreurs d'orbite radiales mises en évidence par les résidus des mesures SLR indiquent une erreur subtile dans les modèles d'accélération. En raison de leur corrélation évidente avec l'angle  $\beta$ , une déficience de la modélisation de la pression de radiation solaire apparaît actuellement comme la cause la plus plausible de ces erreurs. En effet CODE et TUM emploient le même modèle ECOM (Extended CODE Orbit Model) à 5 paramètres décrit dans l'article de TA Springer et al. (voir bibliographie), qui est bien adapté au système GPS, mais semble être moins adéquat pour les satellites Galileo. D'autres analyses seront nécessaires pour évaluer les avantages potentiels d'un modèle de *box-wing* complet ou un modèle *a priori* de type ROCK, comme proposé dans l'exposé de D. Svehla et al.

Un aperçu du décalage et de la dérive de l'horloge de Galileo IOV sur la base des produits d'éphémérides précises MGEX est représenté sur la figure 7. Au cours de la dernière année, les décalages d'horloge ont été principalement

limités à moins de 1,5 millisecondes avec des dérives typiques de 5-20 microsecondes par jour par rapport à l'échelle de temps GPS.

Les deux horloges masers hydrogène et au rubidium ont été mises en œuvre de manière alternée sur les satellites IOV individuels. Les observations et les décalages d'horloge MGEX peuvent être utilisés pour caractériser la déviation d'Allan sur une large gamme d'échelles de temps ; cependant une analyse détaillée de l'horloge est au-delà de la portée de ce document et est laissée à d'autres publications, par exemple, l'article de A. Hauschild et al.

**QZSS.** Après Galileo, QZSS est le deuxième système de navigation par satellite émergeant pour lequel les éphémérides précises sont générées dans le projet MGEX. À l'automne 2013, un seul centre d'analyse MGEX (TUM) détermine des orbites et horloges précises QZSS sur la base des observations du réseau MGEX. Toutefois, les produits finaux de QZSS générés par le segment de contrôle de JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) basé sur un réseau de surveillance spécifique ont été fournis en complément aux produits TUM depuis août de cette année. La contribution d'un nouveau produit d'éphéméride multi-GNSS généré par JAXA avec le nouveau logiciel de MADOCA (*Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis*) est prévue en 2014 à l'issue de comparaisons entre agences dédiées et de l'achèvement de la validation du logiciel.

La figure 8 compare les solutions d'orbites TUM et JAXA pour QZSS pour une période d'un mois en juillet-août 2013. Deux produits sont cohérents à plus ou moins 0,7 mètre (différence de positions 3D), tandis que la composante radiale diffère d'environ 0,1 mètre. Ceci est globalement cohé-

rent avec les résidus des mesures de distances par laser sur satellites d'environ 0,15 mètre pour chacun des deux produits dans la même période de temps. Bien que cette comparaison montre une bonne performance des produits MGEX pour QZSS lors des phases de haut angle  $\beta$ , une dégradation de la qualité peut apparaître quand QZSS atteint une attitude d'orbite normale pour  $|\beta| < 20$  degrés. Ici, le modèle standard IGS d'attitude de lacet ne s'applique plus, et le paramétrage de la pression de radiation doit être adapté pour tenir compte de l'orientation réelle du corps de l'engin spatial et des panneaux solaires.

**BeiDou.** Le système BeiDou a été déclaré service de navigation régional opérationnel en décembre 2012 et fournit des éphémérides diffusées de bonne précision à ses utilisateurs. Différentes institutions chinoises (telles que l'Université de Wuhan) calculent des orbites et les horloges précises en utilisant des réseaux propriétaires ainsi que les stations MGEX. Pour les satellites BeiDou en orbite terrestre moyenne (MEO) et en orbite inclinée géosynchrone (IGSO), des précisions du niveau de 10 centimètres (position 3D) et les résidus de SLR du même ordre ont été rapportés dans l'article de Q. Zhao et al. (voir bibliographie). Les satellites BeiDou géostationnaires (GEO) ont des performances dégradées, avec des erreurs d'environ 0,5 mètre le long de la trajectoire du fait de la géométrie d'observation statique. Dans le projet MGEX, la génération d'orbites et d'horloges précises pour BeiDou n'a pas encore commencé, mais des efforts sont faits pour fournir les premiers produits début 2014.

## Ephémérides radio diffusées

Dans un effort pour fournir aux utilisateurs des informations d'orbites et d'horloges pour tous les satellites GNSS actuellement suivis par le réseau MGEX, TUM et DLR génèrent un fichier cumulatif journalier des éphémérides radiodiffusées pour le GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou et SBAS. Dans l'ensemble, le fichier fournit des éphémérides de plus de 80 satellites, et

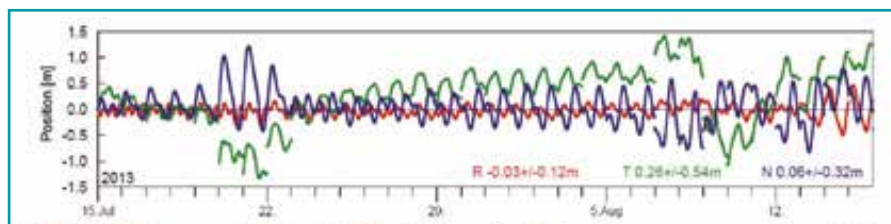


Figure 8. Différence des solutions TUM et JAXA pour l'orbite de QZSS sur une période d'un mois en mi-2013





ce nombre augmentera lorsque davantage de satellites sont déployés.

Pour améliorer la compatibilité avec les logiciels existants, qui peuvent ne pas avoir encore intégré les modèles d'orbites radiodiffusées de toutes les constellations, l'IGS fournira aussi la version SP3 (format standard de fichier d'orbites du *National Geodetic Survey*) du fichier d'éphémérides. Dans ce contexte, une extension du format de SP3c permettant d'accueillir plus de 85 satellites a été lancé et est en cours d'examen au sein de l'IGS.

Même si l'exactitude des orbites et horloges radiodiffusées n'est pas pleinement concurrentiel avec des produits précis, les éphémérides radiodiffusées sont bien adaptées pour de nombreuses applications, telles que l'analyse de la visibilité, le contrôle de la qualité des données d'observation, ou la navigation relative. Dans le cas de BeiDou, pour lequel des éphémérides précises ne sont pas encore disponibles dans le projet MGEX, les éphémérides radiodiffusées permettent d'atteindre une erreur de positionnement de l'ordre de 1,5 mètre. Les éphémérides radiodiffusées donnent également accès aux paramètres de délais de groupes radiodiffusés et de temps (TGD Timing Group Delay, BGD Broadcast Group Delay) et aux décalages de temps inter-système des nouvelles constellations pour lesquelles aucun produit de substitution n'est actuellement disponible dans le projet MGEX.

Compte tenu de la limitation actuelle du message de navigation dans le

format RINEX 3.02, le fichier cumulatif diffusé est limité aux messages de navigation historiques (L1 C / A code) pour GPS et QZSS, mais n'inclut pas les messages CNAV et CNAV2 diffusés avec les nouveaux signaux L2C, L5 et L1C. Néanmoins un effort a été fait dans le projet MGEX pour recueillir les éphémérides radiodiffusées CNAV au cours de la première transmission de test GPS CNAV en juin 2013 avec un nombre limité de récepteurs. En dehors des trames de données de navigation brutes binaires transmises par les satellites des blocs IIR-M et IIF au cours de la campagne, les données auxiliaires et de navigation ont été archivées dans un format de type RINEX et sont mis à la disposition des utilisateurs intéressés par la CDDIS.

## Travaux futurs

La construction du réseau MGEX a jeté les bases d'une familiarisation précoce avec de nouveaux signaux et systèmes GNSS. Même si les premiers pas ont été faits pour fournir des produits d'éphémérides précises pour chaque constellation individuellement, un effort important doit encore être fait avant qu'un service complet multi-GNSS puisse être offert par l'IGS.

Les principales activités devant être poursuivies par le groupe de travail multi-GNSS, en coopération avec d'autres entités de l'IGS au cours de l'année prochaine incluent :

- l'augmentation des capacités de suivi

multi-GNSS dans le cadre d'un réseau global IGS ;

- la prise en compte de constellations supplémentaires (BeiDou, IRNSS et, éventuellement SBAS) dans la production d'éphémérides précises ;
- le développement d'un nouveau produit : les biais de code différentiels multi-GNSS / multi-signal, et sa génération dans le traitement des données de l'ionosphère ;
- la caractérisation des nouveaux satellites GNSS (décalage d'antenne et modèle de phase, modes d'attitude, modèles de pression de radiation solaire, manœuvres) et l'élaboration de normes communes de traitement pour les orbites et horloges ;
- le développement d'outils de contrôle de la qualité du signal multi-GNSS et multi-signaux (bruit, multi-trajets, sauts de cycles, etc.), et leur application en routine pour la surveillance de l'ensemble du réseau.

Ces tâches contribueront à ouvrir la voie à un examen approfondi des nouveaux systèmes de navigation par satellites dans l'ingénierie et la science et à renforcer le rôle de l'IGS en tant que premier fournisseur de données et de produits GNSS gratuits de la plus haute qualité.

## Résumé et conclusions

Durant ces deux dernières années un réseau mondial multi-GNSS a été établi avec des premiers produits livrés à la communauté scientifique. Les travaux futurs dans le projet MGEX se concentrent sur l'intégration des constellations supplémentaires, la caractérisation améliorée des segments sol et spatiaux et la fourniture de nouveaux types de produits. Sous réserve de la participation active des centres d'analyse MGEX et d'une mise en place en temps opportun des chaînes de traitement nécessaires, le projet MGEX devrait faire la transition vers un projet pilote multi-GNSS dans les deux prochaines années. ●

## Remerciements

Cet article est basé sur un document présenté lors du 4<sup>e</sup> Colloque international sur les aspects scientifiques et

Site	Station	Receiver
Concepcion	CONX	Javad TRE_G3TH Delta
	CONZ	Leica GRX1200+GNSS
Singapore	SIN0	Javad TRE_G3TH Delta
	SIN1	Trimble NETR9
University of New Brunswick	UNBD	Javad TRE_G2T Delta
	UNBS	Septentrio PolaRxS
University of New South Wales	UNX2	Javad TRE_G3TH Delta
	UNX3	Septentrio AsteRx3
U.S. Naval Observatory	USN4	Septentrio PolaRxTR4
	USN5	NovAtel OEM6
Wettzell	WTZ2	Leica GRX1200+GNSS
	WTZ3	Javad TRE_G3TH Delta

Tableau 2. Stations MGEX colocalisées





fondamentaux du système Galileo à Prague, République tchèque, 4-6 décembre 2013.

## Les fabricants

Les types de récepteurs GNSS les plus utilisés dans le réseau MGEX comprennent le NetR9 de Trimble, Sunnyvale, Californie, USA ; Delta-G3TH de Javad GNSS, Moscou, Russie, et San Jose, Californie, États-Unis ; GR10/25 de Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Suisse ; et les récepteurs PolRx4 de Septentrio Satellite Navigation nv, Leuven, Belgique. Les stations MGEX sont équipées d'antennes choke ring dont la Leica AR25R3 / 4, Trimble 59800, et Javad Ringant G3T, ainsi que des antennes de qualité topographique avec de classiques ground-planes (plan anti-réflexion), tels que le Trimble Zephyr GII.

## Contacts

**Oliver MONTENBRUCK** German Aerospace Center (DLR), German Space Operations Center (GSOC)

**Peter STEIGENBERGER** Institute for Astronomical and Physical Geodesy, Technische Universität München

**Robert KHACHIKYAN** Nasa Jet Propulsion Laboratory/ International GNSS Service Central Bureau

**Georg WEBER** German Federal Agency for Cartography and Geodesy

**Richard B. LANGLEY** University of New Brunswick, Geodesy And Geomatics Engineering

**Leoš MERVART** Technical University of Prague, Faculty of Civil Engineering

**Urs HUGENTOBler** Institute for Astronomical and Physical Geodesy, Technische Universität München

Traduction : **Bernard FLACELIÈRE** Association française de topographie, **Elise MATHIS** Institut national de l'information géographique et forestière

## Bibliographie

1. Boriskin, A., and D. Kozlov, and G. Zyryanov, (2012), "The RTCM Multiple Signal Messages: A New Step in GNSS Data Standardization," Proceedings of the 25th International Technical Meeting

of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2012), Nashville, Tennessee USA, pp. 2947-2955, September 2012

2. GPS Directorate, Global Positioning System Modernized Civil Navigation (CNAV) Live-Sky Broadcast Test Plan, <[http://www.navcen.uscg.gov/Content/GPS/CNAVTesting/L2C\\_L5\\_CNAV\\_Test\\_Plan.pdf](http://www.navcen.uscg.gov/Content/GPS/CNAVTesting/L2C_L5_CNAV_Test_Plan.pdf)>, May 30, 2013

3. Hauschild A., and O. Montenbruck, and P. Steigenberger, "Short-Term Analysis of GNSS Clocks," GPS Solutions 17(3):295-307, DOI 10.1007/s10291-012-0278-4, July 2013

4. IGS Multi-GNSS Experiment homepage, <<http://igs.org/mgex>> (alternate URL for access from China: <<http://igs.unavco.org/mgex>>)

5. Ikari, S., and T. Ebinuma, R. Funase, and S. Naka-suka, "An Evaluation of Solar Radiation Pressure Models for QZS-1 Precise Orbit Determination," ION-GNSS-2013, Nashville, Tennessee USA, September 2013

6. International GNSS Service, "RINEX - The Receiver Independent Exchange Format, Version 3.02," IGS RINEX Working Group and RTCM-SC104, April 3, 2013

7. Konrad, A., and H.-D. Fischer, C. Müller, and W. Oesterlin, "Attitude & Orbit Control System for Galileo IOV," 17th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace, DOI 10.3182/20070625-5-FR-2916.00006, 2007

8. Langley, R., "The Almanac," GPS World, August 2013, pp. 47-50

9. MGEX Product Archive, <<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/mgex/>>

10. Miyoshi, M., and S. Kogure, S. Nakamura, K. Kawate, H. Soga, Y. Hirahara, A. Yasuda, and T. Takasu, "The orbit and clock estimation result of GPS, GLONASS and QZSS by MADOCA," 23rd International Symposium on Space Flight Dynamics, Pasadena, California, October 29-November 2, 2012

11. Montenbruck, O., and P. Steigenberger (2013a), "The BeiDou Navigation Message," IGNS Symposium 2013, Gold Coast, Australia, July 16-18, 2013

12. Montenbruck, O., and R. B. Langley, and P. Steigenberger (2013b), "First Live Broadcast of GPS CNAV Messages," GPS World, Vol. 24, No. 8, August 2013, pp. 14-15

13. NASA Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS), June 2013 CNAV Campaign Directory, <<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gnss/data/campaign/>

<[cnav/2013/06/](http://cnav/2013/06/)>

14. Pearlman, M. R., and J. J. Degnan, and J. M. Bosworth, "The International Laser Ranging Service," Advances in Space Research, 30(2):135-143 DOI:10.1016/S0273-1177(02)00277-6, 2002

15. Radio Technical Commission for Maritime Services, RTCM Standard 10403.2 Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Services - Version 3 with Amendment 1, RTCM, Arlington, Virginia USA, July 12, 2013

16. Springer, T. A., and G. Beutler, and M. Rothacher, "A New Solar Radiation Pressure Model for GPS Satellites," GPS Solutions 2(3):50-62, 1999

17. Svehla D., and M. Rothacher, U. Hugentobler, P. Steigenberger, and M. Ziebart, "Geometrical Model of Solar Radiation Pressure Based on High-Performing Clocks Onboard new GNSS Satellites," IAG Scientific Assembly, Potsdam, Germany, September 2013

18. Weber, G., and D. Dettmering, H. Gebhard, and R. Kalafus, "Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (Ntrip)—IP-Streaming for real-time GNSS applications," ION-GPS-2005, Long Beach, California USA, September 13-16, 2005

19. Zhao, Q., and Z. Hu, J. Guo, M. Li, X. Shu, G. Chen, C. Shi, and J. Liu, "Positioning Performance of BeiDou Navigation Satellite System," IGNS Symposium 2013, Gold Coast, Australia, July 16-18, 2013

Site web : <http://www.igs.org/mgex/>

## ABSTRACT

With four new and emerging constellations (BeiDou, Galileo, QZSS, IRNSS) as well as the ongoing modernization of the U.S. Global Positioning System and Russia's GLONASS, the world of satellite navigation is undergoing dramatic changes. Facing these challenges, the International GNSS Service has initiated the Multi-GNSS Experiment to enable an early familiarization with the new systems and to prepare their incorporation into high-precision GNSS modeling and analysis. This article reports on the status of the new constellations and the MGEX project and describes initial data products and recent results for individual systems.