

# Galileo fait son entrée dans le GNSS

■ Bernard BONHOURE

*Après des années de positionnement essentiellement par GPS seul, GLONASS a rejoint ces dernières années le GPS pour une utilisation à la fois grand public et précise. Les systèmes GNSS "Global Navigation Satellite Systems" sont devenus stratégiques, et de nouvelles constellations, Galileo pour l'Europe et Beidou pour la Chine, sont en phase de déploiement. La mise en exploitation FOC "Full Operation Capacity" reste annoncée vers 2020 pour ces deux constellations. L'année 2016 a vu apparaître les premiers téléphones portables compatibles Galileo et 2017 sera une année charnière pour la généralisation de la prise en compte du système Européen au niveau des utilisateurs. Des premiers services Galileo dits "Initial Services" ont été déclarés le 15 décembre 2016 avec 11 satellites opérationnels. Les premiers résultats Galileo depuis cette déclaration montrent une qualité de mesure de distance entre chaque satellite et le récepteur proche du mètre pour 95 % des mesures, pour un bon environnement et un bon récepteur. Ceci situe Galileo à la première place en termes de précision des mesures de pseudo-distance. Cela signifie que l'ajout de Galileo à GPS ou à d'autres constellations améliore le positionnement, à la fois grâce à une meilleure géométrie mais aussi par la qualité intrinsèque des mesures de distance.*

## Introduction

Le présent article donne un état du système Galileo, et l'illustre à travers des premiers positionnements réels. Les différentes perspectives d'utilisation de Galileo au sein des systèmes GNSS sont évoquées en conclusion. Le système américain GPS, "Global Positioning System", est constitué aujourd'hui d'une trentaine de satellites opérationnels. Ce système est un excellent moyen de déterminer sa position en trois dimensions et le temps. Le GPS est devenu un système stratégique aujourd'hui et des systèmes similaires vont émerger dans les années à venir, comme Galileo pour l'Europe et Beidou pour la Chine. La constellation GLONASS est de nouveau opérationnelle avec 24 satellites depuis quelques années. Les puces électroniques de positionnement des téléphones portables supportent désormais GPS et GLONASS, et une amélioration est notée à la fois pour la disponibilité du service et le temps nécessaire pour obtenir un premier positionnement appelé communément de l'autre côté de la Manche "Time To First Fix".

## MOTS-CLÉS

GALILEO, GNSS, GPS, GLONASS, Beidou, PVT, positionnement, navigation

tionnels. Cela amènera une nouvelle amélioration des performances, en particulier dans les environnements contraints tels que la ville ou les vallées en montagne, et permettra une indépendance et aussi une ou plusieurs solutions de secours en cas de panne ou d'indisponibilité d'un ou plusieurs systèmes élémentaires.

Un accord important a été signé en 2007 entre les USA et l'Europe pour s'assurer de la compatibilité et de l'interopérabilité de GPS et Galileo, mais en fait toutes les mesures des systèmes GNSS peuvent être combinées.

Des PVTs (Position, Vitesse, Temps) Galileo seul et mixtes GPS/Galileo ont été calculés avec succès ces dernières années et derniers mois par le CNES (cf. [1-3]), le Centre National d'Etudes Spatiales, en mode statique et en mode dynamique. Les résultats ont été publiés aux différents colloques majeurs ION GNSS, ENC GNSS, NAVITEC, et l'exactitude des pseudo-distances sont dans le même ordre de grandeur pour GPS et Galileo, avec même les meilleurs résultats pour Galileo.

Le futur sera très probablement tout GNSS "Global Navigation Satellite Systems", c'est-à-dire que la grande majorité des récepteurs combineront les signaux des différents systèmes opéra-

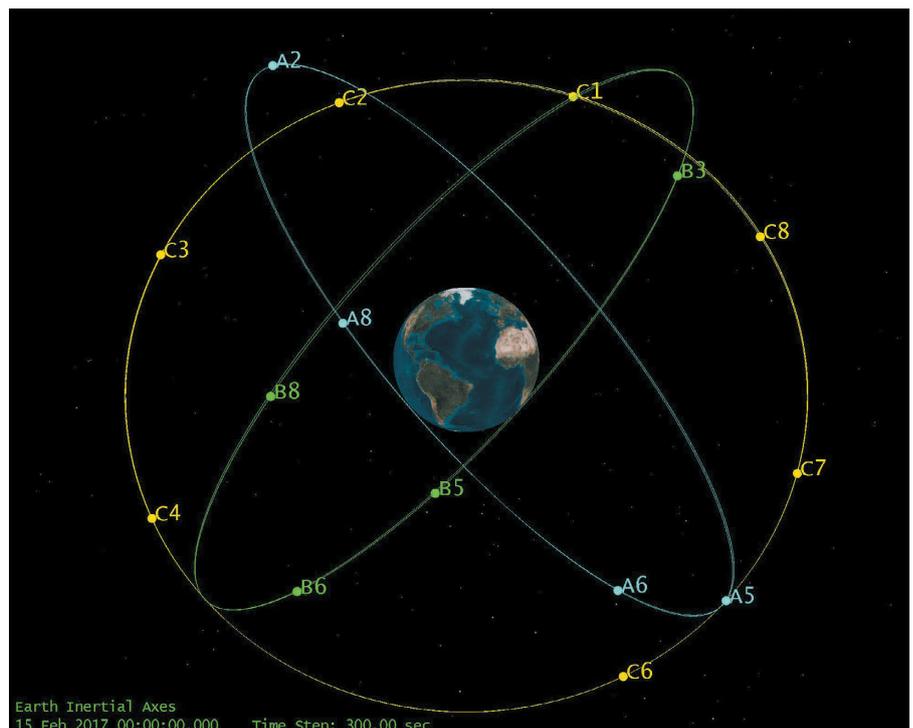


Figure 1. Positions des 15 satellites Galileo en vol le 15 février 2017 à 0H00 UTC



Aujourd'hui, des PVTs quadri-constellations sont possibles avec les satellites GPS, GLONASS, Galileo et Beidou. Des résultats de tests récents plus particulièrement avec Galileo sont présentés dans la suite de l'article.

## État du système Galileo

Un événement important ces derniers mois est la déclaration des Services Initiaux dits "Initial Services" outre-Manche pour Galileo le 15 décembre 2016. Cette déclaration a été prononcée avec 11 satellites opérationnels, mais 4 autres satellites ont déjà été lancés avec succès le 17 novembre dernier et sont en cours d'intégration dans le système.

Le graphique précédent, en Figure 1 montre les positions des 15 satellites Galileo, la fin de mise en opération des 4 derniers satellites lancés sur le plan orbital C étant prévue d'ici mi-2017. Les deux satellites elliptiques n'y figurent pas, car ils sont en mode test. Des éphémérides sont néanmoins émises par ces deux satellites. Le quatrième satellite lancé n'est pas non plus représenté, car il n'émet plus que sur une seule fréquence suite à une panne, et n'est donc pas considéré comme opérationnel.

Deux autres tirs Ariane 5 sont prévus fin 2017 et en 2018 afin d'ajouter 8 autres satellites sur les plans orbitaux A et B, ce qui rendra quasiment complète la

constellation de 24 satellites FOC (*Full Operating Capacity*). D'autres satellites sont également prévus dès aujourd'hui pour compléter la constellation, mettre en place une redondance, et assurer le renouvellement des satellites spécifiés pour une durée de vie de 12 ans. La constellation Galileo finale prévue est composée de 24 satellites opérationnels sur 3 plans avec 6 autres satellites en vol en redondance à raison de 2 satellites par plan.

## Des positionnements Galileo autonomes prometteurs

Des positionnements par Galileo seul ont été possibles dès mars 2013 avec la mise en route de 4 satellites.

Avec l'ajout de nouveaux satellites au cours de ces dernières années, des expérimentations de positionnement avec Galileo seul ou combiné avec d'autres constellations ont pu être menées avec succès. Des tests en zone urbaine, sur train, en vol, etc. ont démontré une bonne réception des signaux Galileo et la possibilité d'un positionnement autonome Galileo lorsque le nombre de satellites en visibilité est suffisant, soit au moins 4.

Le graphe ci-dessous illustre la trajectoire obtenue avec Galileo seul lors d'un test en vol dans la région de Toulouse le 22 avril 2016.

Plusieurs points remarquables sont à noter pour ce test mené par le CNES :

- Le positionnement est réalisé par le récepteur lui-même en temps réel, démontrant donc l'utilisation de Galileo seul de bout en bout.
- La disponibilité des positions est de 100 % pour des positions toutes les secondes, ce qui illustre une parfaite continuité de l'expérimentation.
- La précision de positionnement (plus scientifiquement appelée exactitude), en horizontale pour la durée du vol d'environ une heure est de 2.24 m à 95 %, c'est-à-dire que 95 % des positions sont précises à mieux que 2.24 m. On obtient 3.55 m à 95 % en erreur verticale.
- Une précision estimée de la mesure de pseudo-distance de 1.43 m à 95 %, en utilisant la trajectoire précise de référence calculée à l'aide des mesures de phase.

## Un système Galileo disponible et performant

Depuis la déclaration des services initiaux le 15 décembre 2016, le système Galileo est surveillé de manière continue par divers organismes comme l'exploitant du système, l'Agence Spatiale Européenne, le CNES, etc.

Des réseaux mondiaux de récepteurs permanents sont utilisés pour cela dont les stations IGS. Dans le cadre de l'IGS, le CNES et l'IGN ont mis en place un réseau de 35 stations appelé REGINA assurant une couverture mondiale, et ce réseau est plus particulièrement utilisé pour réaliser la surveillance de Galileo.

### ■ Une qualité de mesure de distance de 1 mètre à 95 %

La précision de la mesure élémentaire de distance entre chaque satellite Galileo et le récepteur est d'environ 1 mètre à 95 % pour les meilleurs récepteurs dans un bon environnement. C'est l'ensemble des mesures de distance, appelées de manière technique plus précise pseudo-distances, qui permet de calculer de façon continue la Position, la Vitesse et le Temps au niveau du récepteur.

Cette qualité est mesurée pour chaque satellite grâce à des récepteurs dont la



Figure 2. Positions Galileo (cercles rouges) vs trajectoire précise (cercles verts)  
Pas de temps 1s, 28 April 2016 14H GST

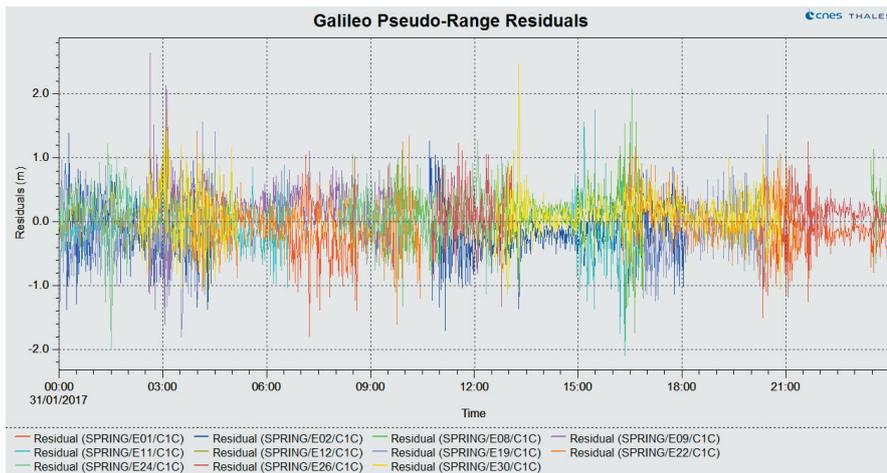


Figure 3. Erreurs de pseudo-distance Galileo pour le récepteur BRUX le 31 janvier 2017

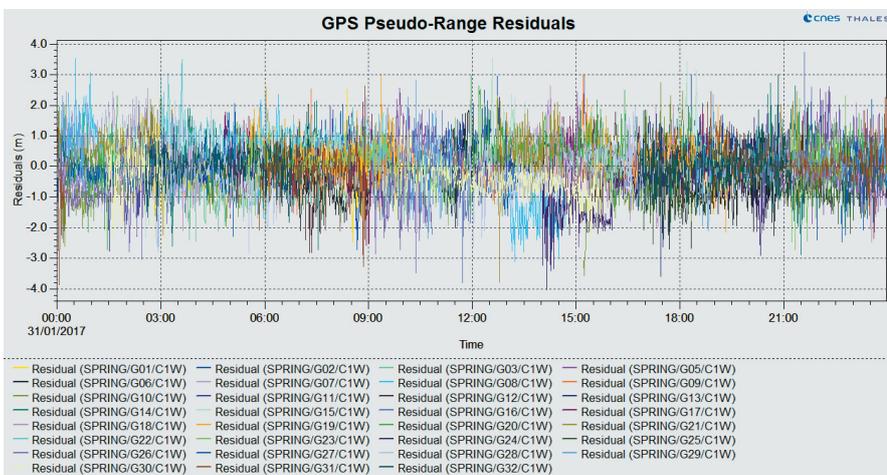


Figure 4. Erreurs de pseudo-distance GPS pour le récepteur BRUX le 31 janvier 2017

position est connue au centimètre près. La *figure 3* illustre les précisions de distance pour un récepteur à Bruxelles, son identifiant IGS étant BRUX.

Il s'agit des erreurs estimées des mesures de distance par satellite Galileo pour le 31 janvier 2017. Les mesures dites "iono-free" sur les fréquences E1 et E5a sont utilisées, ce sont les plus précises car corrigées des effets ionosphériques.

L'étude des erreurs pour les mesures "code-less" GPS P1&P2 donne le graphique *Figure 4*.

Les valeurs GPS sont plus élevées, mais il faut prendre en compte que les mesures sont ici "code-less" et donc plus bruitées que les mesures qui seraient réalisées avec la connaissance des codes militaires P1 et P2.

Les résidus de pseudo-distance en calcul PVT mono-fréquence sont un peu plus élevés du fait de l'effet ionosphérique, mais ils montrent également

une meilleure précision pour Galileo vis-à-vis de la référence GPS. Il faut néanmoins moduler ce type de résultat par le fait que pour les applications

habituelles en milieu plus ou moins contraint comme le milieu urbain, la qualité des mesures de distance est dégradée par les effets locaux tels les multitrajets y compris sans visibilité du signal direct soit en cas dit "Non Light Of Sight", et un bruit de code plus élevé du fait de l'environnement.

D'autres analyses permettent de mesurer la part d'erreur des éphémérides, c'est-à-dire le "User Range Error". Les performances URE de Galileo à 95 % oscillent sur les derniers mois entre 60 et 75 cm, ce qui est remarquable vis-à-vis d'une spécification à 1.30 m qui est donc tenue.

En ce qui concerne la disponibilité, les premiers mois après la déclaration des Services Initiaux montrent que la disponibilité par satellites opérationnels est bien supérieure à la spécification de 90 % dans cette première phase des opérations.

■ **Un positionnement par Galileo seul à quelques mètres de précision en bonne géométrie**

Le nombre de satellites Galileo opérationnels reste limité. Il était de 11 pour le mois de janvier 2017. Cela ne permet pas un positionnement continu en utilisant cette seule constellation.

On peut néanmoins ne regarder la qualité de positionnement que lorsqu'une bonne géométrie est disponible, c'est-à-dire lorsque le PDOP "Position Dilution Of Precision" est



Figure 5. Positions par Galileo seul pour le récepteur BRUX avec PDOP<6 en janvier 2017

inférieur à 6, si on se réfère au seuil habituellement retenu pour cela pour GPS et GLONASS.

Le PDOP est un coefficient rendant compte de la géométrie entre le récepteur et les satellites. On obtient de manière approchée l'écart-type de l'erreur de position en 3D par la multiplication du PDOP et de l'écart-type de l'erreur de distance mesurée.

Nous obtenons ainsi les positions *figure 5* pour l'ensemble du mois de janvier 2017, pour le récepteur de Bruxelles en solution Galileo seul bi-fréquence E1/E5a.

Pour les périodes où PDOP est inférieur à 6 c'est-à-dire 40 % du temps, on obtient une précision horizontale à 95 % de 1.96 m et une précision verticale à 95 % de 2.56 m. On note une qualité de pseudo-distance autour de 1.00 m à 95 % ce qui est remarquable. Des statistiques similaires sont obtenues en mono-fréquence E1 en utilisant le modèle ionosphérique Nequick de Galileo.

Avec 24 satellites Galileo opérationnels lors du FOC, la géométrie va s'améliorer d'un facteur d'un peu moins de 2, et on se rapprochera donc sensiblement de 1 mètre de précision horizontale à 95 % pour ce type de récepteur statique de grande qualité dans un très bon environnement. Des traitements multi-constellations notamment avec Galileo et GPS, montrent que l'ajout des mesures Galileo améliore les solutions GPS ou GPS/GLONASS, ce qui est logique vu la qualité de pseudo-distance Galileo constatée.

Les 4 derniers satellites lancés devraient permettre après leur recette en vol une disponibilité de 79 % correspondant au critère PDOP inférieur à 6 pour Galileo

seul, à la latitude de Bruxelles. Ce chiffre est obtenu pour l'élévation minimale standard de 5 degrés pour les satellites.

## Conclusion

Les performances attendues de Galileo sont au rendez-vous. On peut même dire que la qualité intrinsèque des mesures de pseudo-distance est sensiblement meilleure que celle spécifiée. La disponibilité individuelle des satellites déclarés opérationnels est aussi supérieure à la disponibilité requise pour cette première phase des services initiaux.

Cet article développe principalement les résultats du positionnement classique dit "stand-alone" à partir des mesures de pseudo-distances. Les mesures de phase Galileo sont également de qualité, et leur utilisation possible a déjà été démontrée ces dernières années pour les positionnements précis de type RTK ou PPP. Le CNES diffuse même en temps réel à travers les "casters" IGS des corrections PPP sur les 4 constellations en incluant Galileo.

Avec la déclaration des Services Initiaux en décembre dernier, Galileo fait son entrée dans les services GNSS. ●

## Contact

**Bernard BONHOURE**

Centre National d'Etudes Spatiales (CNES),  
Toulouse, France  
bernard.bonhoure@cnes.fr

## Références

[1] B. Bonhoure, C. Boulanger, T. Chapuis, F.X. Marmet, N. Suard (CNES) *First GNSS*

## ABSTRACT

*After years of positioning by mostly GPS alone, GLONASS is now also used for mass-market and precise positioning. GNSS systems have become strategic and new constellations like Galileo for Europe and Beidou for China are under deployment. FOC is still announced for both constellations around 2020. First Galileo compatible receivers have been produced in 2016 and 2017 will be a transition year for the generalization of implementation of the European system at receiver level. First Galileo services called "Initial Services" have been declared on 15 December 2016 with 11 operational satellites. Since the declaration, first Galileo results have shown a range accuracy of around 1 meter at 95% between the satellites and the receiver, for a good environment and a good sensor. This places the Galileo in the first rank concerning the accuracy of measurements. It means that adding Galileo to GPS or to other constellations improves the positioning, thanks to a better geometry and also to an inherent range quality.*

*Positioning Using 10V Galileo Satellites, ION GNSS 2013*

[2] B. Bonhoure (CNES) *Galileo Orbits and Clocks and Combined Galileo-GPS PVT Performance*, Galileo Special Session, ENC GNSS 2016

[3] Cédric Rouch, Bernard Bonhoure, Francois-Xavier Marmet, Thierry Chapuis, Hugues Secretan, Valentin Bienfait, (CNES) & Xavier Leblan (GUIDE) *Measurement campaigns and PVT experiments with new Galileo satellites*, NAVITEC 2016

### Olivier Reis

*Ingénieur géomètre-topographe  
ENSAI Strasbourg - Diplômé de l'Institut  
de traducteurs et d'interprètes (ITI) de Strasbourg*  
9, rue des Champs F-57200 SARREGUEMINES  
Téléphone / télécopie : 03 87 98 57 04  
Courriel : o.reis@infonie.fr

Pour toutes vos traductions d'allemand  
et d'anglais en français en topographie – géodésie –  
géomatique – GNSS

### Reinhard Stölzel

*Ingénieur géomètre-topographe  
Interprète diplômé de la Chambre  
de commerce et d'industrie de Berlin*  
Heinrich-Heine-Straße 17, D-10179 BERLIN  
Téléphone : 00 49 30 97 00 52 60  
Télécopie : 00 49 30 97 00 52 61  
Courriel : stoelzel@aol.com

Pour toutes vos traductions de français  
et d'anglais en allemand en géomatique – GNSS –  
infrastructures de transport

**Des topographes traducteurs d'expérience à votre service**