

GALILEO en route vers 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" est annoncée vers 2020 pour ces deux constellations. Les premières puces GNSS quadri-constellations sont en passe d'être intégrées dans nos téléphones portables. Le présent article donne un état du système GALILEO plus particulièrement vu à travers les premiers positionnements quadri-constellations utilisant ses signaux. Après une courte présentation théorique de la combinaison des signaux multi-constellations pour le positionnement, quelques résultats en environnement réel sont présentés. Les premiers PVT "Position/Vitesse/Temps" obtenus montrent que les satellites GALILEO et BEIDOU déjà en vol peuvent déjà être utilisés en combinaison de GPS et GLONASS, avec une exactitude atteinte de pseudo-distance typique de l'ordre de 1 à 2 mètres RMS. 2020 est une date de "Challenge" pour le FOC, mais des premiers services dits "Early Services" devraient être disponibles d'ici cette date avec un nombre réduit de satellites. Le positionnement quadri-constellations devrait être encore plus précis que celui de GPS/GLONASS, notamment en zone contrainte.

MOTS-CLÉS

GALILEO, GNSS, GPS, GLONASS, BEIDOU, PVT, SPRING

bilité de GPS et GALILEO, mais en fait toutes les mesures des systèmes GNSS peuvent être combinées.

Des PVTs GALILEO seul et mixtes GPS/GALILEO ont été calculés avec succès ces dernières années par le CNES (cf. [9]), le Centre national d'études spatiales, en mode statique et en mode dynamique. Les résultats ont été publiés aux colloques ION GNSS, et l'exactitude des pseudo-distances sont dans le même ordre de grandeur pour GPS et GALILEO.

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

État du système GALILEO

Le système GALILEO est en cours de déploiement depuis quelques années. Les stations de communication avec les satellites ont été installées et le réseau de récepteurs GALILEO de référence compte aujourd'hui plus de dix stations réparties à travers le monde. Les centres de contrôle satellites et de mission nominaux, respectivement en Allemagne et en Italie, sont également en fonctionnement. L'ensemble du système permet déjà l'utilisation de certains satellites en vol pour un positionnement.

Après le lancement de deux satellites prototypes en 2005 et 2008, les premiers satellites opérationnels ont été lancés à leur tour à partir de 2011.

Huit satellites GALILEO étaient en vol le 15 juin 2015, date à laquelle ont été réalisés les tests présentés dans le présent article. Tous les satellites émettent des signaux, mais seulement trois d'entre eux émettaient des éphémérides valides à cette date, à savoir 3 satellites du premier lot "In Orbit Validation". Vingt-deux satellites FOC ont été commandés pour rejoindre les quatre satellites IOV.

Le présent article donne un état du système GALILEO, et l'illustre à travers des premiers positionnements réels quadri-constellations. Les différentes perspectives d'utilisation des systèmes GNSS dont GALILEO 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 ou 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 ou 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 le 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".

Les systèmes d'Augmentation tels que WAAS et EGNOS fournissent un bon modèle ionosphérique, et les mesures de pseudo-distance peuvent même être utilisées dans un calcul PVT "Positionnement-Vitesse-Temps".

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



Figure 1. Positions des 8 satellites GALILEO en vol le 15 juin 2015 à 17h UTC



Le graphique *Figure 1* ci-dessus montre les positions des 8 satellites GALILEO le 15 juin 2015 à 17h UTC, avec les 3 satellites IOV avec des éphémérides en visibilité de Toulouse.

Le quatrième satellite IOV FM4 "Flight Model 4" n'émet plus qu'en mono-fréquence suite à une panne fin mai 2014, et le Centre de mission de GALILEO se basant aujourd'hui sur des mesures bi-fréquence, ne génère pas d'éphémérides pour ce satellite, mais une étude est en cours pour que cela soit possible.

Des analyses sont également en cours pour générer des éphémérides pour les deux satellites lancés sur une orbite elliptique, suite à une panne du lanceur Soyouz en août 2014.

Enfin, les satellites FOC FM3 et FM4 étaient encore en phase de test sans émission d'éphémérides le 15 juin 2015.

Après un premier positionnement avec les seuls quatre satellites IOV GALILEO le 12 mars 2013, on peut de nouveau réaliser une telle localisation autonome par GALILEO, avec les 3 satellites IOV PFM "Proto-Flight Model", FM2, et FM3 et le satellite FOC FM3 qui émet des éphémérides à partir du 20 juin 2015.

Deux autres satellites sont attendus pour la fin de l'année 2015 après leur tir sur Soyouz et leur recette en vol, et

d'autres tirs sont également prévus en 2016 et les années suivantes. Le déploiement de GALILEO devrait donc s'accélérer dans les années qui viennent, le planning de mise en route et d'utilisation opérationnelle du système étant principalement déterminé par les dates de tir des satellites. La capacité FOC correspond au bon fonctionnement de 24 satellites bien répartis sur les trois plans orbitaux.

Approche théorique du positionnement multi-constellations

L'approche théorique pour un PVT multi-constellations et en particulier quadri-constellations est présentée ici. Le positionnement d'un récepteur est obtenu à partir de mesures dites de pseudo-distance entre le récepteur et chaque satellite.

Une pseudo-distance est la différence entre le temps de réception en échelle de temps récepteur moins le temps d'émission en échelle de temps satellite. Elle est donnée par,

$$PR = (T_{arr}^{REC} - T_{dep}^{SAT}) * c \quad (1)$$

où *PR* est la pseudo-distance ("Pseudo-Range" en anglais),

T_{arr}^{REC} est le temps d'arrivée (arr) du signal dans le récepteur en échelle de temps récepteur (REC),

T_{dep}^{SAT} est le temps du départ (dep) du signal du satellite en échelle de temps satellite (SAT), et *c* est la vitesse de la lumière.

On fait alors apparaître dans la mesure les biais (erreur systématique) de temps récepteur et satellite par rapport un temps commun dit système de la constellation considérée,

$$T_{arr}^{REC} - T_{dep}^{SAT} = T_{arr}^{SYST} + Cb_{REC}^{SYST} - (T_{dep}^{SYST} + Cb_{SAT}^{SYST}) \\ = T_{arr}^{SYST} - T_{dep}^{SYST} + Cb_{REC}^{SYST} - Cb_{SAT}^{SYST}$$

où T_{arr}^{SYST} est le temps d'arrivée du signal dans l'échelle de temps commune système (SYST),

T_{dep}^{SYST} est le temps de départ du signal dans l'échelle de temps système,

Cb_{REC}^{SYST} est le biais de temps (dit "Clock bias" en anglais) récepteur par rapport au temps système, et

Cb_{SAT}^{SYST} est le biais de temps satellite par rapport au même temps système.

$T_{arr}^{SYST} - T_{dep}^{SYST}$ est le temps de propagation du signal, que l'on modélise par la somme de la distance géométrique parcourue et les retards dus aux effets atmosphériques,

$$PR = c * (T_{arr}^{SYST} + Cb_{REC}^{SYST} - (T_{dep}^{SYST} + Cb_{SAT}^{SYST}))$$

soit avec le modèle de propagation,

$$PR = D_{GEOID} + c * (Cb_{REC}^{SYST} - Cb_{SAT}^{SYST}) + e + T + \epsilon \quad (2)$$

où D_{GEOID} est la distance géométrique entre la position du satellite au moment de transmission du signal et la position du récepteur au moment de réception du signal, *e* est le délai ionosphérique, *T* est le délai troposphérique, et ϵ est l'erreur résiduelle entre la mesure et le modèle.

Linéarisation des équations

Les référentiels des différents systèmes GNSS sont suffisamment proches aujourd'hui (à quelques centimètres voire mieux), pour considérer que la position terrestre du récepteur XYZ est commune à toutes les constellations. Les référentiels GNSS suivent dans la pratique l'ITRF en époque courante. La linéarisation des équations en multi-constellations est très similaire au cas mono-constellation en rassemblant les lignes de chaque constellation. Nous pouvons différencier le vecteur des pseudo-distances autour d'une solution proche et obtenir,



$$PR - PR_0 = \begin{pmatrix} -(a)^{GPS} & (1) & (0) & (0) & (0) \\ -(a)^{GLONASS} & (0) & (1) & (0) & (0) \\ -(a)^{GALILEO} & (0) & (0) & (1) & (0) \\ -(a)^{BEIDOU} & (0) & (0) & (0) & (1) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \\ c * Cb_{REC}^{GPS} \\ c * Cb_{REC}^{GLONASS} \\ c * Cb_{REC}^{GALILEO} \\ c * Cb_{REC}^{BEIDOU} \end{pmatrix} \quad (3)$$

où PR est le vecteur des pseudo-distances mesurées, PR₀ est le vecteur pseudo-distance théorique à la solution proche, (a) sont les matrices des vecteurs unitaires donnant la direction du récepteur vers les satellites,

Cb_{REC}^{SYST} sont les biais de temps récepteur relativement à chaque temps système (SYST) des constellations.

Des équations supplémentaires peuvent être ajoutées si on utilise les biais diffusés entre les différents temps systèmes. Des biais sont aujourd'hui diffusés pour l'écart des temps GALILEO/GPS et GLONASS/GPS. Néanmoins, cette solution n'a pas été retenue dans les différents tests réalisés, car des biais restent à être validés et les récepteurs doivent préalablement être calibrés pour les différents temps de transit des signaux du centre de phase d'antenne à la numérisation et datation du signal. L'estimation d'un biais de temps récepteur par constellation est une solution robuste et préférée, même si ajouter une inconnue nécessite un nombre de mesures suffisant par constellation (au moins deux), pour une prise en compte effective dans la solution.

■ Solution matricielle

Si les mesures ne sont pas d'égale qualité, on pondère généralement les mesures par une matrice diagonale W avec pour coefficients l'inverse des variances de chaque mesure, avec une hypothèse d'indépendance des mesures et un biais moyen négligeable. Les distributions des erreurs de pseudo-distance sont relativement proches de gaussiennes dans la pratique.

On note, $\Delta PR = PR - PR_0$

et la matrice d'observation avec les dérivées partielles,

$$H = \begin{pmatrix} -(a)^{GPS} & (1) & (0) & (0) & (0) \\ -(a)^{GLONASS} & (0) & (1) & (0) & (0) \\ -(a)^{GALILEO} & (0) & (0) & (1) & (0) \\ -(a)^{BEIDOU} & (0) & (0) & (0) & (1) \end{pmatrix}$$

puis le vecteur solution relatif à la solution proche,

$$\Delta X = \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \\ c * Cb_{REC}^{GPS} \\ c * Cb_{REC}^{GLONASS} \\ c * Cb_{REC}^{GALILEO} \\ c * Cb_{REC}^{BEIDOU} \end{pmatrix}$$

En faisant apparaître la matrice de pondération, les équations normales sont,

$$H^T W H \Delta X = H^T W \Delta PR$$

d'où la solution optimale en résidus des mesures,

$$\Delta X = (H^T W H)^{-1} H^T W \Delta PR \quad (4)$$

Pour une solution non pondérée, la matrice de pondération est réduite à la matrice identité.

On peut définir des coefficients DOP "Dilution Of Precision" comme pour la solution monoconstellation, avec des coefficients supplémentaires pour les biais de temps récepteur/constellation additionnels.

Exemples de positionnements quadri-constellations avec GALILEO

Les signaux des quatre constellations peuvent être reçus aujourd'hui par différents types de récepteurs comme les récepteurs commerciaux Trimble NetR9, JAVAD Delta, LEICA GR10/GR25, Septentrio PolaRx4, et Novatel OEM6. Certains de ces récepteurs ont été déployés par le CNES et l'IGN dans le cadre du réseau mondial REGINA participant à l'expérimentation IGS

MGEX "Multi-GNSS Experiment". Les éphémérides diffusées par les satellites sont disponibles pour les quatre constellations y compris pour les satellites GALILEO et BEIDOU, et sont normalement utilisées.

Un outil puissant SPRING "Simulateur de Performances d'un Récepteur Intégrant la Navigation par GNSS" est utilisé pour l'analyse du PVT issu d'un récepteur et permet aussi un post-traitement PVT à partir des mesures de pseudo-distance avec ses propres algorithmes. Cet outil est développé pour le CNES par la société THALES Services en France. Ce logiciel peut facilement fournir un PVT à partir des mesures du récepteur pour n'importe quelle combinaison des signaux GNSS, en bi-fréquence ou mono-fréquence avec les différents modèles ionosphériques disponibles, y compris ceux des systèmes SBAS. Une trajectoire précise peut être utilisée en référence pour obtenir les erreurs de position par exemple en milieux contraints ou dans les airs. Cet outil peut simuler des cartes de performance, montrant les coefficients DOP ou les variances estimées des positions, et prédire ainsi les performances futures en fonction du déploiement des constellations. Cet outil peut également prendre en compte des modèles précis 3D de bâtiments environnants afin d'estimer les masques et les multitrajets, en utilisant une technique de lancer de rayons.

■ Limitations pour les systèmes GALILEO et BEIDOU

Les systèmes GALILEO et BEIDOU sont en cours de déploiement. Il y a actuellement des limitations influant sur la performance PVT comme bien sûr le nombre de satellites, le nombre de stations de référence, et le nombre de stations de communication avec les satellites. Cela a un impact sur la géométrie mais aussi sur l'exactitude de la restitution et prédiction des paramètres d'orbite et de temps des satellites, ainsi que sur la latence des éphémérides diffusées.

Selon les opérations sur les satellites, certains satellites sont parfois indisponibles, et de temps en temps





pour un pourcentage de temps très minoritaire, on peut noter des éphémérides dont l'inexactitude dépasse les quelques mètres rencontrés lors des tests présentés.

Seuls les satellites MEO "Medium Earth Orbit" BEIDOU sont considérés pour les tests présentés ici. Quelques satellites IGSO "Inclined GeoSynchronous Orbit" ou GEO "Geosynchronous Earth Orbit" sont visibles, mais le traitement de ces satellites dégrade parfois la solution, en particulier avec les satellites GEO.

Trois satellites GALILEO étaient disponibles pour les tests le 15 juin 2015 avec des éphémérides, à savoir les PRN 11, 12 et 19 (satellites IOV PFM, FM2, et FM3). Les trois satellites MEO BEIDOU PRN 11, 12, et 14 sont disponibles sur la période, le quatrième satellite MEO PRN 13 n'étant plus reçu. Seuls les satellites avec un statut "Healthy" c'est-à-dire valides dans les données récepteur sont pris en compte.

Ainsi, tous les résultats présentés concernant ces nouvelles constellations doivent être considérés comme préliminaires, et une amélioration normale est attendue dans les années qui viennent.

■ Tests in situ le 15 juin 2015

Après des tests menés avec succès sur des récepteurs permanents statiques, des expérimentations ont été menées in situ avec un récepteur PolaRx4 Septentrio et une antenne Novatel 703 GGG embarqués sur un véhicule.

La version logicielle 2.9.0 récente du récepteur a été utilisée. Elle permet d'obtenir en temps réel une solution PVT quadri-constellations mono-fréquence L1 directement issue du récepteur à chaque seconde. Le modèle ionosphérique de GPS dit de "Klobuchar" était sélectionné.

Les tests ont été menés le 15 juin 2015 dans l'après-midi à Toulouse en France. Une première session a eu lieu en centre-ville en début d'après-midi, suivie d'une seconde session en fin d'après-midi en milieu périurbain.

Une solution en post-traitement PVT quadri-constellations a été également calculée avec l'outil SPRING à partir des mesures de pseudo-distances. On note des solutions PVTs proches pour le récepteur et SPRING en parti-

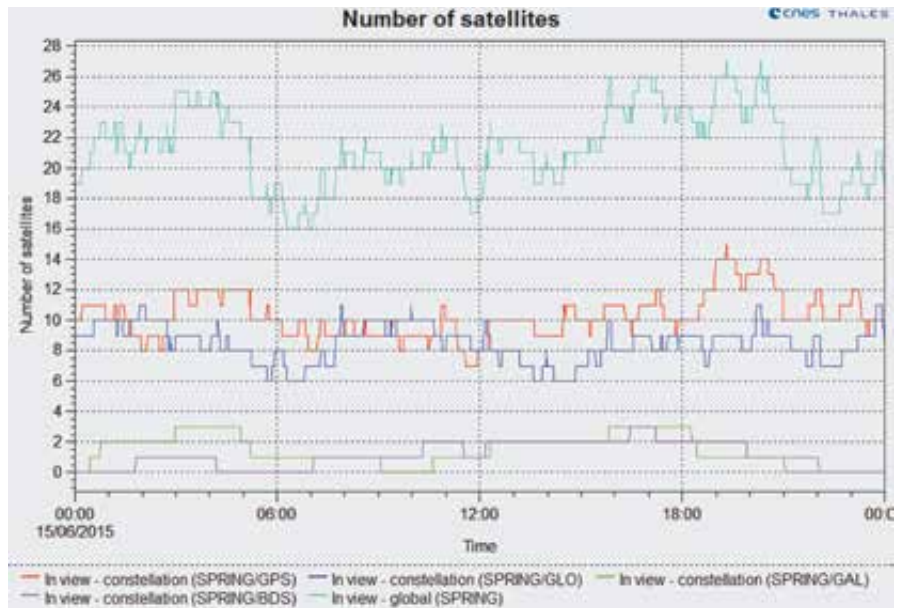


Figure 2. Nombre de satellites visibles par constellation et globalement à Toulouse le 15 juin 2015

culier en milieu peu contraint lors de la deuxième session.

Le graphique Figure 2 ci-dessus montre une bonne visibilité des satellites GALILEO et BEIDOU sur l'après-midi. Seuls les satellites au-dessus de 5 degrés d'élévation sont pris en compte.

La première session de test de 13 h 21 à 15 h 11 en temps GPS montre une bonne disponibilité des satellites avec typiquement une quinzaine de satellites utilisés en centre-ville pour le positionnement en quadri-constellations. On ne note aucun trou significatif de disponibilité de PVT en quadri-constellations.

Le graphique Figure 3 ci-dessous illustre assez bien la réalité d'une solution GPS/GLONASS/GALILEO/BEIDOU au centre historique de Toulouse, sur la place du Capitole. On voit ici l'utilisation de 6 satellites GPS, 5 satellites GLONASS, 2 satellites GALILEO, et 2 satellites BEIDOU. Les positions issues du récepteur à 1 Hz sont figurées par des cercles verts.

La seconde session de test a été conduite en milieu périurbain de 16 h 39 à 17 h 27 en temps GPS. Comme prévu lors de simulations antérieures à l'expérimentation, la solution quadri-



Figure 3. Positions PVT quadri-constellations du récepteur sur la Place du Capitole, Toulouse (cercles verts)



Figure 4. Positions 3D de la solution PVT quadri-constellations récepteur sur le centre du CNES à Toulouse (cercles verts, cercles rouges pour la référence PPP NRCAN)

Problèmes rencontrés et leçons apprises

Il a été crucial de développer des outils spécifiques pour analyser la performance des PVTs afin d'avoir une pleine maîtrise des algorithmes et une bonne confiance dans les résultats obtenus. Cela prend plusieurs années pour développer et valider de tels outils. Nous utilisons périodiquement au CNES un outil indépendant de l'outil SPRING, pour une validation croisée. Certains indicateurs clés sont directement comparés, comme les erreurs PVTs et les résidus des pseudo-distances. Des comparaisons externes avec l'ESA sur les PVTs GALILEO ont montré des résultats similaires.

La définition et l'utilisation de standards pour les données sont très importantes, et le standard RINEX3 utilisé avec les nouveaux récepteurs GNSS est la clé pour un travail efficace. Le nouveau format temps réel RTCM MSM est utilisé pour l'affichage du PVT et éventuellement un traitement temps réel ou post-traitement dans l'outil SPRING. Cela permet un monitoring temps réel des signaux GNSS à travers le monde en utilisant un réseau tel que REGINA ou plus généralement des stations IGS avec de tels flux disponibles.

Conclusion

Grâce à l'expérience acquise sur GALILEO lors de ces dernières années, et une mise à jour récente du logiciel récepteur par le constructeur

constellations a permis l'utilisation de tous les 6 satellites MEO GALILEO et BEIDOU disponibles visibles au-dessus de 5 degrés d'élévation jusqu'à 17 h 13 en temps GPS.

Le graphique *Figure 4 ci-dessus* illustre le positionnement quadri-constellations. Les cercles verts sont ceux de la solution PVT du récepteur et les cercles rouges sont ceux d'une solution PPP NRCAN GPS/GLONASS bi-fréquence. Les solutions sont à 1 Hz.

Afin de mieux mesurer l'exactitude des pseudo-distances, les points de 16 h 51:28 à 17 h 00:00 en temps GPS ont été extraits. Cette période correspond à une trajectoire en milieu ouvert sans masque significatif. Sur cette période, la trajectoire PPP NRCAN est suffisamment précise pour être prise en vraie référence. On obtient alors à travers l'outil SPRING les erreurs "vraies" de la trajectoire quadri-constel-

lations donnée en temps réel par le récepteur. Ces erreurs sont données dans la *Figure 5 ci-dessous*.

Les résidus des pseudo-distances ont été estimés avec l'outil SPRING en fixant la position à chaque instant sur la trajectoire "vraie" du PPP NRCAN, et seuls les quatre biais de temps récepteur/constellation sont alors calculés en solution moindres carrés ici non pondérée. Le graphique des résidus GALILEO et BEIDOU est fourni en *Figure 6 ci-dessous*.

Ce graphique permet de voir de bons résidus pour GALILEO. Les résidus BEIDOU sont moins bons sur cet exemple, mais restent corrects. En étudiant les résidus des deux autres constellations GPS et GLONASS, on voit que ce sont les satellites GLONASS qui dégradent le plus la solution avec les pires résidus pour deux satellites à 5-6 mètres.



Figure 5. Erreurs ENU de la solution récepteur temps réel quadri-constellations mono-fréquence L1

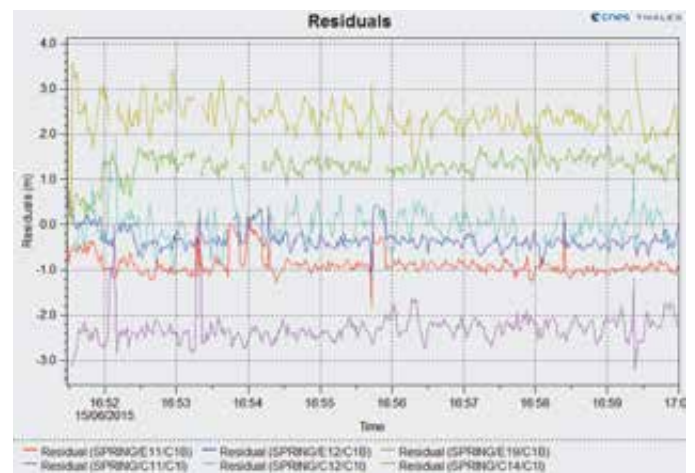


Figure 6. Résidus de pseudo-distance GALILEO et BEIDOU calculés sur la trajectoire de référence



Septentrio en l'occurrence, les PVTs quadri-constellations sont maintenant une réalité sur un récepteur commercial haut de gamme.

Ces premiers résultats quadri-constellations s'avèrent tout à fait satisfaisants. L'interopérabilité entre les différentes constellations GNSS est clairement démontrée ici. Néanmoins, une attention particulière doit être portée sur les biais inter-systèmes du récepteur si on veut utiliser les valeurs des écarts de temps diffusés GGTO "GPS to GNSS Time Offsets". Une solution robuste est d'estimer un biais de temps récepteur par constellation, et une solution de type Kalman pourra optimiser la prise en compte des mesures en propageant les valeurs GGTO faiblement variables. En considérant que les deux constellations GALILEO et BEIDOU sont en déploiement, les résultats apparaissent ici comme bons, mais il ne s'agit que d'un exemple. Lors de traitements bi-fréquences que l'on ne peut développer ici, on peut voir que la qualité atteignable aujourd'hui des pseudo-distances GALILEO est similaire à celle de GPS soit en dessous du mètre à 1 RMS. Celle des satellites MEO BEIDOU est plutôt entre 1 et 2 mètres RMS, GLONASS ayant tendance à fermer la marche vers les 2 mètres RMS. Néanmoins ces résultats doivent être consolidés avec le temps. La disponibilité récente des éphémérides pour les quatre constellations, en particulier BEIDOU, devrait permettre la surveillance régulière de la qualité des pseudo-distances et des PVT quadri-constellations dans un futur proche.

Cet article ne vise que le positionnement classique dit "stand-alone", c'est-à-dire le service directement offert par les systèmes GNSS à partir des mesures de pseudo-distances. Les signaux GNSS évoqués ici et leurs mesures de phase sont aussi disponibles pour le positionnement précis pour les quatre constellations, que ce soit en mode RTK ou PPP. Diverses expérimentations CNES en cours montrent une utilisation possible des quatre constellations pour le positionnement précis, avec des flux de corrections PPP disponibles. Les puces GNSS quadri-constellations devraient être disponibles très rapidement pour le marché de masse. De

nouveaux tests seront conduits par le CNES dès leur disponibilité.

Nous sommes maintenant dans l'attente des "Early Services" de ces nouvelles constellations et plus particulièrement de GALILEO.

Le futur pour la majeure partie des récepteurs dont ceux du marché de masse, sera très probablement "Full GNSS".

Remerciements

Ce travail n'aurait pu être mené sans l'expérience acquise au cours d'échanges internationaux en particulier avec l'équipe projet de l'Agence Spatiale Européenne en charge du développement de GALILEO. Je remercie également les différents acteurs dans le développement de l'outil SPRING indispensable à de telles analyses.

Mes remerciements vont également aux personnes impliquées dans l'expérimentation MGEX de l'IGS, en incluant le personnel IGN et CNES intervenant notamment sur le réseau REGINA. Les standards développés dans le cadre de l'IGS, ainsi que le libre accès aux données d'observables et d'éphémérides sont la clé d'analyses efficaces pour les systèmes GNSS. ●

Contact

Bernard BONHOURE

Ingénieur expert senior GNSS. Centre national d'études spatiales (CNES), service "Systèmes de Navigation" Toulouse
bernard.bonhoure@cnes.fr

Références

- [1] A. Moudrak et al., *Interoperability on Time; GPS-GALILEO Offset Will Bias Position*, GPS World, March 2005.
- [2] S.E. Dinwiddy, *GALILEO Global Component; System Requirements Document*, Issue 4, July 2004.
- [3] Jörg H. Hahn (ESA), Edward D. Powers (USNO), *A Report on GPS and GALILEO Time Offset Coordination Efforts* 1-4244-0647-1/07 IEEE
- [4] M. Tossaint, S. Binda, J. Hahn, M. Falcone (ESA), *GALILEO Validation - The navigation Message*, GPS World, February 2008.
- [5] I. Vanschoenbeek, B. Bonhoure,

M. Boschetti, J. Legenne (CNES) *GNSS Time Offset, Effects on GPS-GALILEO Interoperability Performance*, Inside GNSS, Sept-Oct 2007.

[6] B. Bonhoure, C. Boulanger, J. Legenne (CNES) *GPS-GIOVE Mixed PVT Experimentation*, ION GNSS Sept 2009.

[7] C. Boulanger, B. Bonhoure, N. Suard, (CNES) & D. Lapeyre (Thales Services) *New Open GNSS Signals: First Combined GPS/GLONASS/GIOVE Experiments*, ION GNSS Sept 2011.

[8] M. Falcone, S. Binda and al., *GALILEO on its Own - First position fix*, Inside GNSS - March/April 2013

[9] B. Bonhoure, C. Boulanger, T. Chapuis, F.X. Marmet, N. Suard (CNES), *First GNSS Positioning Using IOV GALILEO Satellites*, ION GNSS 2013

[10] T. Chapuis, B. Bonhoure, S. Rougerie, F. Lacoste, T. Grelier (CNES) D. Lapeyre, P. Noirat (Thales Services), *SPRING a powerful 3D GNSS simulator for constraint environment*, ION GNSS 2014

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 announced for both constellations around 2020. First four-constellation GNSS chips are likely to be integrated in our smart-phones in the very near future. The present paper gives a status of the GALILEO system and illustrates this with first four-constellation PVTs using its signals. After a short theoretical presentation of multi-constellation positioning, some results in real environment are presented.

First PVTs obtained show that the GALILEO and BEIDOU satellites in flight can be well used along GPS and GLONASS ones, with a typical achieved pseudo-range accuracy around 1 to 2 meters RMS. 2020 is a challenging date for FOC, but first services named Early Services should be available by this date with a reduced number of satellites. Four-constellation positioning should be even more precise than GPS/GLONASS one, in particular in constrained areas.