

## GNSS : une révolution pour le géopositionnement précis *GNSS: a revolution for geopositioning*

---

**Félix Perosanz**

GET/CNES, Felix.Perosanz@cnes.fr

---

*Mots clés : GNSS, IGS, SSR, OSR*

*Key words: GNSS, IGS, SSR, OSR*

---

### Résumé

Les systèmes globaux de navigation par satellite (GNSS) n'avaient pas à l'origine de vocation à répondre aux besoins de positionnement pour des applications scientifiques précises. Mais un usage détourné des signaux a permis d'accéder à des mesures de distance satellite-récepteur d'une précision millimétrique. Si la technique différentielle s'est imposée comme une méthode incontournable, le mode PPP est aujourd'hui une alternative de plus en plus populaire. Mais quelle que soit l'approche, les GNSS ont révolutionné la réalisation des repères d'espace et de temps ainsi que les nombreux usages nécessitant en temps différé ou en temps réel un positionnement précis.

### Abstract

Global Navigation Satellite Systems (GNSS) were not initially designed to be used for precise scientific applications. However a smart signal processing can provide a satellite-receiver range measurement with millimeter accuracy. If the differential technique has become an essential method, PPP mode is today an increasingly popular alternative. But whatever the approach, GNSS have revolutionized the realization of space and time frames and the many uses requiring post-processed or real-time precise positioning.

## 1 Les GNSS : une technique géodésique d'opportunité

Les systèmes globaux de navigation par satellite (GNSS) tel le populaire GPS des USA opérationnel depuis 1995 n'avaient pas à l'origine de vocation à être exploités pour des usages scientifiques précis. Leurs signaux radioélectriques sont basés sur la modulation de la phase d'une onde porteuse en bande L (1-2 GHz) par un code PRN d'une fréquence proche de 1 MHz. La démodulation de ce code par un récepteur permet de mesurer la distance entre les satellites émetteurs et l'utilisateur avec une précision de quelques mètres. Les récepteurs étant multicanaux, l'utilisateur peut déduire des mesures simultanées sur plusieurs satellites sa propre position par « tri-latération » avec cette même précision. Mais rapidement l'idée d'un usage détourné de ces signaux en mesurant directement la phase de l'onde porteuse est apparue. Avec une fréquence 1000 fois supérieure, c'est à une mesure d'une précision millimétrique que les utilisateurs équipés de récepteurs spécifiques ont eu accès. Les scientifiques ont depuis largement tiré profit de ces mesures providentielles en provenance d'un nombre sans cesse croissant de constellations de satellites comme GLONASS (Russie), Galileo (Europe), ou Beidou (Chine). Les mesures GNSS sont devenues de façon opportune une technique géodésique précise et largement exploitée pour de nombreux usages scientifiques. Dans un premier temps cet article compare les techniques différentielles et PPP du point de vue de la corrélation des paramètres. L'apport essentiel des GNSS pour la réalisation des repères d'espace et de temps est ensuite rappelé ainsi que le rôle moteur du service International IGS qui a fait évoluer les techniques GNSS vers plus de précision et moins de délais.

## 2 Le GNSS précis : une question de (dé)corrélation

L'exploitation de la précision millimétrique des mesures de phase n'est pas immédiate car elle doit passer par une modélisation très fine de chacun des termes qui la composent :

- la position du centre de masse du satellite émetteur à l'instant d'émission
- le vecteur centre de masse du satellite centre de phase de l'antenne émettrice qui est fonction de la géométrie et de l'attitude (orientation dans l'espace) du satellite
- le biais d'horloge du satellite par rapport à l'échelle de temps de la constellation
- la position du centre de phase de l'antenne réceptrice à l'instant de réception

- le vecteur « excentricité » entre le centre de phase récepteur et le point à positionner
- les délais de propagation dans l'ionosphère et la troposphère
- les termes relativistes
- l'effet de « phase wind-up » dû à la rotation relative entre l'émetteur et le récepteur
- le biais de mesure de phase correspondant au nombre entier de cycles initial inconnu au démarrage de l'acquisition des données d'un satellite. Ce biais appelé « ambiguïté » est commun à toutes les mesures de phase d'un même passage d'un satellite (entre son lever et son coucher) sauf en cas d'interruption du signal
- des biais « hardware » au niveau du satellite et du récepteur qui font perdre leur nature entière à l'ambiguïté de phase

La clé d'un usage « précis » des données GNSS passe par une maîtrise de ces différents termes. Le problème mathématique à résoudre est généralement surdimensionné c'est-à-dire que le nombre d'observations en provenance des satellites en visibilité est supérieur au nombre de paramètres à déterminer. Cependant une solution « fiable » ne sera obtenue que si un niveau de décorrélation suffisant entre les paramètres est atteint. Concrètement cela signifie qu'un nombre suffisant d'équations (c'est-à-dire d'époques d'observations) devra être accumulé pour séparer les contributions des termes d'horloge récepteur, coordonnées, allongement troposphérique et ambiguïté de phase qui sont au départ corrélés (ou anti-corrélés) à plus de 90%. Naturellement la situation est sensiblement plus favorable dans le cas d'un post-traitement où l'ensemble du système d'équations peut être résolu globalement a posteriori. Mais que ce soit pour des applications en temps réel ou en temps différé deux types de stratégies ont été adoptées au cours du temps pour résoudre ce problème: l'approche différentielle et l'approche PPP.

### 3 L'approche différentielle

L'idée de base est de créer de nouvelles observables à partir de la différence de mesures de phase issues de deux récepteurs proches et/ou de deux satellites en visibilité simultanée. Les termes affectant de façon sensiblement identique les mesures sont ainsi éliminés. La différentiation des mesures de phase GNSS est une forme de décorrélation « ultime ». En effet, plusieurs termes du modèle de mesure comme les biais d'horloge et hardware ne sont plus des inconnues à résoudre. Sur ce principe des réseaux denses de stations GNSS de référence (de position connues) ont été déployés dans de nombreux pays pour fournir un service de « corrections différentielles » destiné aux usagers nécessitant une précision centimétrique (géomètres, topographes, agriculteurs,...). En France, Teria, Orpheon ou Satinfo par exemple, fournissent ce type de service. On parle dans ce cas d'une représentation OSR (Observation State Representation) pour laquelle un seul terme correspondant à la somme des corrections à appliquer aux observations est transmis aux usagers. Dans le cas du post-traitement et de récepteurs « immobiles » le rapport nombre d'observations sur nombre d'inconnues devient très favorable et la technique différentielle permet d'atteindre des précisions millimétriques. Elle s'est imposée dès les années 1990 comme méthode incontournable pour tous les usages précis des GNSS.

### 4 Le mode PPP

Une approche alternative à la technique différentielle consiste à modéliser ou estimer chaque terme composant les mesures de phase plutôt que de chercher à les éliminer. On parle dans ce cas de représentation SSR (State Space Representation). Le PPP (Positionnement Ponctuel Précis) d'un récepteur GNSS sans nécessiter de récepteur de référence à proximité devient alors possible. Cependant l'accès à une source de corrections précises d'orbite et d'horloge des satellites par exemple est nécessaire. De plus, d'un point de vue des corrélations la situation est moins favorable car le nombre de paramètres à estimer (un biais d'horloge par époque de mesures par exemple) est nettement plus important. Ainsi, le positionnement d'un mobile en temps réel va nécessiter un temps de convergence plus long que dans le cas d'une approche différentielle. [1] et [2] détaillent les avantages et les inconvénients des approches différentielles et PPP ainsi que des représentations OSR et SSR.

### 5 La fixation des ambiguïtés de phase

L'exploitation ultime des mesures de phase GNSS passe par l'estimation du biais d'ambiguïté entière. La mesure GNSS devient alors précise et exacte, le nombre de paramètres dans le problème chute et ceux restants sont mieux décorrélés. Comme les biais « hardware » satellite et récepteur font perdre leur nature entière aux ambiguïtés de phase, la seule solution envisagée pendant de nombreuses années consistait à les éliminer par double-différentiation. En 2007 [3] observe que les biais satellites étant stables (constants sur une journée), ils peuvent être décorrélés du biais d'un récepteur pourvu que celui-ci observe simultanément un nombre suffisant

de satellites. La résolution des ambiguïtés entières en mode PPP devient alors possible. Ce mode de traitement appelé « Integer-PPP » (IPPP) ou « PPP-AR » permet de positionner un récepteur GNSS « isolé » avec une précision améliorée et devient une technique concurrente du mode différentiel. L'idée que le système Galileo dispose d'un service libre de diffusion de corrections SSR de ses propres signaux est à l'étude.

## 6 Le service international IGS

La décision de l'Association Internationale de Géodésie de créer en 1994 l'International GNSS Service est un acte fondateur. Ce service est basé sur un effort international de déploiement d'un réseau de stations géodésiques permanentes. La contribution française via le réseau REGINA [4] composé d'une quarantaine de stations du CNES et de l'IGN réparties sur toute la planète, répond à ce besoin et à la recommandation 69/L.53 des Nations Unies sur le « repère de référence géodésiques mondial pour le développement durable ». L'IGS dispose aussi de centres d'archivage de données et de centres d'analyses qui les traitent (calcul des orbites précises par exemple). Plus de 200 organismes contribuent volontairement à l'IGS avec l'objectif de fournir librement les produits GNSS les plus précis (IGS 2017). De par la « compétition amicale » que se livrent les différents centres d'analyses et le dynamisme de ses « Working Groups », l'IGS a progressivement imposé les GNSS comme une technique géodésique majeure en fournissant des produits de plus en plus précis, en diffusant des logiciels de traitement (GAMIT, Bernese, GIPSY, GINS,...), en imposant des standards (RINEX, SINEX, RTCM,...), en publiant des centaines d'articles. Si l'objectif premier était et reste de contribuer à l'amélioration de la réalisation des repères d'espace et de temps (cf. paragraphe suivant) et de mesurer la cinématique terrestre (cf. article de Pierre Briole) l'héritage de l'IGS est considérable et les usages précis des GNSS se sont étendus à des domaines aussi variés que l'océanographie, l'hydrologie, la météorologie terrestre et spatiale par exemple. Depuis 2010, dans le cadre d'un projet pilote qui a pour vocation à devenir un service « opérationnel », des produits sont calculés et délivrés en temps réel. Ainsi l'IGS a été le terreau de nombreuses innovations et développements qui ont considérablement amélioré la qualité des traitements et ouvert le champ à de multiples usages des GNSS.

## 7 Les GNSS incontournables pour la réalisation des références d'espace et de temps

L'ITRF (International Terrestrial Reference Frame) 2014 est aujourd'hui le standard international pour exprimer des coordonnées dans un repère lié à [la croûte ?] terrestre. L'ITRF est défini par un jeu de coordonnées et de vitesse d'un réseau de stations géodésiques de références qui d'une certaine façon matérialisent le repère. De la qualité de la détermination de ces coordonnées et vitesse dépend la qualité de la réalisation du système de référence lui-même. Celle-ci est critique par exemple lorsqu'il s'agit de surveiller le niveau des océans qui s'élèvent en moyenne de 3 mm/an. Il faut aussi noter que la précision d'un ITRF se dégrade avec le temps principalement du fait des incertitudes sur les vitesses des stations de référence. La technique GNSS (plus économique et facile à mettre en œuvre en comparaison aux techniques SLR, DORIS ou VLBI) représente la grande majorité des 1000 sites qui composent ce réseau (figure 1).

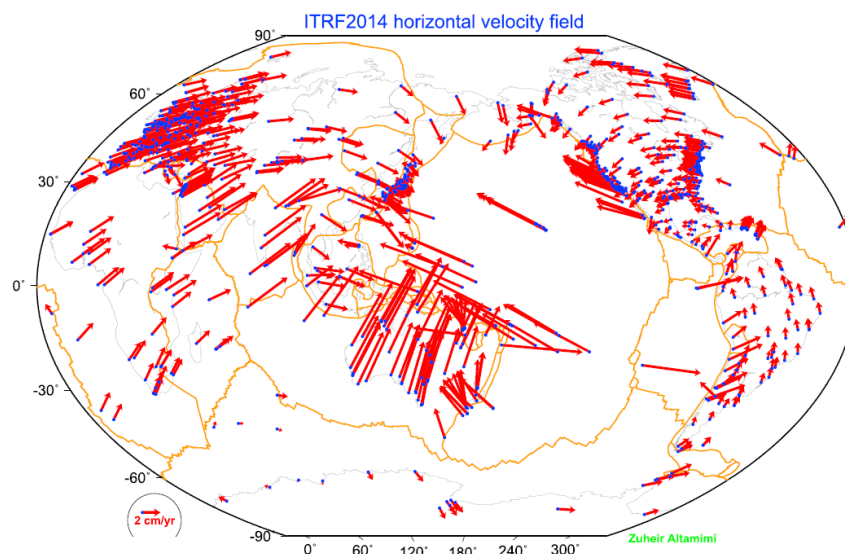


Figure 1 : Champ des vitesses horizontales de l'ITRF2014 [5]

Le passage du système de référence céleste (dans lequel sont calculées les trajectoires des satellites) au repère terrestre (dans lequel sont exprimées les coordonnées des stations) est paramétré par 5 quantités : les angles de précession et de nutation (issus de modèles), les coordonnées  $X_p$  et  $Y_p$  du pôle et l'écart UT1-UTC. Ce dernier

(qui représente les irrégularités de la vitesse de rotation de la Terre) ne peut être observé directement que par la technique VLBI qui a pour cible non pas des satellites mais des objets célestes (quasars). Le mouvement du pôle quant à lui est estimé par méthode inverse. Tout écart de XP et YP produit une oscillation journalière des coordonnées des stations dont l'amplitude et la phase dépendent de la position de la station. Ainsi les stations géodésiques GNSS de par leur nombre permettent aujourd'hui de mesurer Xp et Yp avec une précision remarquable de 0.2 milliseconde de degré (mas).

La réalisation des échelles de temps nécessite la comparaison et la combinaison des observations d'un réseau mondial de plus de 200 horloges atomiques (<https://www.bipm.org/en/bipm/tai/>). Cette tâche fondamentale repose aujourd'hui de façon essentielle sur la technique GNSS car elle permet d'estimer avec une grande précision l'écart à une référence commune de ces horloges lorsqu'elles sont connectées à un récepteur GNSS de position connue. La technique PPP qui ne nécessite pas que ces stations soient en vue commune des satellites, est largement utilisée par les laboratoires contribuant à la réalisation des échelles de temps. Récemment, [6] a montré que les solutions IPPP, en assurant la continuité des ambiguïtés entières entre passages de satellites successifs, permet un gain de précision sensible. Ainsi que ce soit pour la réalisation des références d'espace et de temps ou la détermination du mouvement du pôle, les GNSS ont permis des avancées considérables et sont devenus incontournables.

## 8 De la géodésie à la navigation centimétrique

Si à la création de l'IGS, 3 ordres de grandeur de précision séparaient le monde des géosciences (positionnement statique en temps différé) du monde de la navigation (positionnement en temps réel) cette situation a depuis considérablement évolué. La densification des réseaux, les modernisations à la fois des systèmes eux-mêmes, des équipements et des moyens de communication et de calcul, ont fait que les délais pour positionner un récepteur GNSS se sont réduits et que la précision s'est améliorée. Les coordonnées GNSS des stations géodésiques étaient déterminées de façon hebdomadaire pour la réalisation de l'ITRF2008 par exemple. Aujourd'hui la cadence est journalière et diverses études sont menées sur la modélisation et la mesure des mouvements sub-diurnes de la Terre. [7] et [8] par exemple ont pu observer respectivement les déformations de charge océaniques à haute fréquence et des modes propres de vibration d'un glacier grâce au positionnement précis sub-diurne de stations GPS. Pour le calcul d'orbite précis de satellites embarquant un récepteur GNSS l'approche différenciée n'est pas adaptée car la vue commune entre une station terrestre et un satellite en orbite basse est très limitée. [9] avait démontré l'intérêt de la technique IPPP pour ce type de problème en déterminant avec une précision centimétrique la trajectoire des satellites GRACE et JASON-1 en temps différé. En utilisant cette même technique Fund [10] a montré que l'on pouvait calculer avec une précision similaire la trajectoire d'une bouée océanographique (en post-traitement). Au CNES, le projet PPP-Wizard (<http://www.ppp-wizard.net/>) a pour objectif de démontrer la faisabilité d'une navigation (en temps réel) en mode IPPP (centimétrique). Ce service est basé sur le calcul en temps réel des orbites précises des satellites GNSS, puis des corrections SSR et enfin de la position corrigée du récepteur (figure 2).

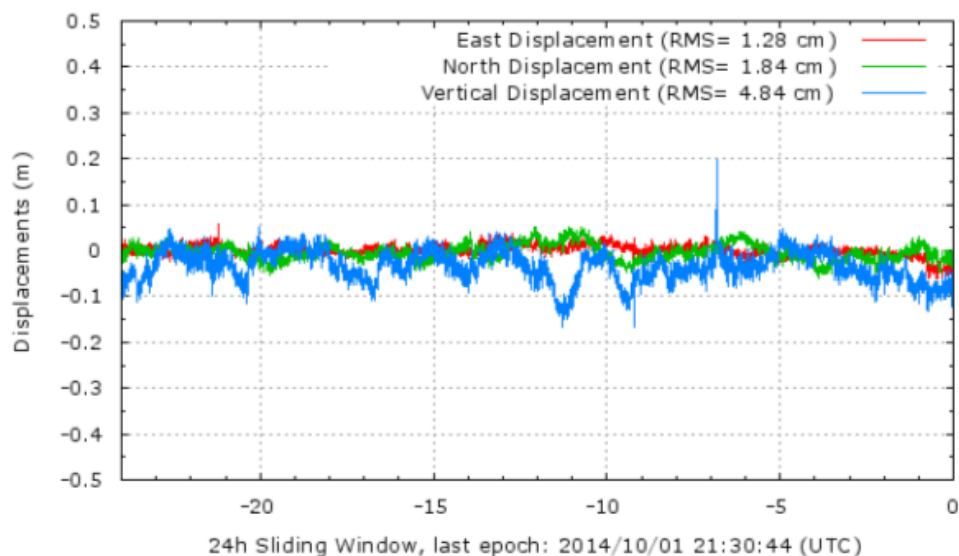


Figure 2 : Coordonnées temps réel du récepteur (fixe) KRGG (démonstrateur PPP-Wizard)

C'est sur ce principe que par exemple l'application pour smartphones « PPP-Wizlite » développée par le CNES [11] devrait permettre prochainement de se localiser instantanément avec une précision 10 à 100 fois meilleure que celle pour lesquelles les GNSS ont été spécifiés initialement.

Ainsi au-delà des enjeux économiques, technologiques ou de souveraineté les GNSS en révolutionnant le géopositionnement précis en temps différé et en temps réel ont un impact scientifique et sociétal majeur.

### Références bibliographiques

- [1] G. Wubben, M. Schmitz, A. Bagge, PPP-RTK: Precise Point Positioning Using State-Space Representation in RTK Networks, ION GNSS 18th International Technical Meeting of the Satellite Division, 13-16 September 2005, Long Beach, CA
- [2] S. Choy, S. Bisnath, C. Rizos, Uncovering Common Misconceptions in GNSS Precise Point Positioning and its Future Prospect, International Federation of Surveyors, Article of the Month – September 2016
- [3] D. Laurichesse D, F. Mercier, Integer ambiguity resolution on undifferenced GPS phase measurements and its application to PPP. ION GNSS 2007 20th International Technical Meeting of the Satellite Division, 25-28 September 2007, Fort Worth, TX
- [4] C. Velut, L. Jolivet, B. Garayt, T. Donal, J.P. Cardaliaguet. Regina, A CNES/IGN worldwide GNSS receivers network for IGS and navigation: overview and perspectives. 6th International Colloquium – Scientific and fundamental aspects of the Galileo programme, Technical University of Valencia, Spain, 25-27 October 2017
- [5] Z. Altamimi, P. Rebischung, L. Métivier, and X. Collilieux (2016), ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, 6109–6131, doi:10.1002/2016JB013098.
- [6] G. Petit, A. Kanj, S. Loyer, J. Delporte, F. Mercier and F. Perosanz.  $1 \times 10^{-16}$  frequency transfer by GPS PPP with integer ambiguity resolution. *Metrologia* 52 (2015) 301–309, doi:10.1088/0026-1394/52/2/301
- [7] S. Melachroinos, Biancale R., Llubes M., Perosanz F., Lyard F., Bouin M.N., Masson F., Nicolas J., Morel L., and Durand S., 2007, Ocean tide loading (OTL) displacements from global and local grids : comparisons to GPS estimates over the shelf of Brittany, France, doi: 10.1007/s00190-007-0185-6: *J. Geodesy*, v. 82, p. 357-371.
- [8] L. Lescarmonier, Legresy B., Coleman R., Perosanz F., Mayet C. and Testut L. (2012). Vibrations of Mertz Glacier ice tongue, East Antarctica. *Journal of Glaciology* 58(210): 665-676.
- [9] D. Laurichesse, F. Mercier, J.P. Berthias, P. Broca, L. Cerri, “Integer Ambiguity Resolution on Undifferenced GPS Phase Measurements and its Application to PPP and Satellite Precise Orbit Determination”, *Navigation, Journal of the institute of Navigation*, Vol. 56, N° 2, Summer 2009
- [10] F. Fund, Perosanz F., Testut L. and Loyer S. (2013). An Integer Precise Point Positioning technique for sea surface observations using a GPS buoy. *Advances in Space Research* 51(8): 1311-1322.
- [11] D. Laurichesse, C. Rouch, F.X. Marmet, M. Pascaud. Smartphone Applications for Precise Point Positioning. ION GNSS+ September 24-28, 2018 Miami, Florida.