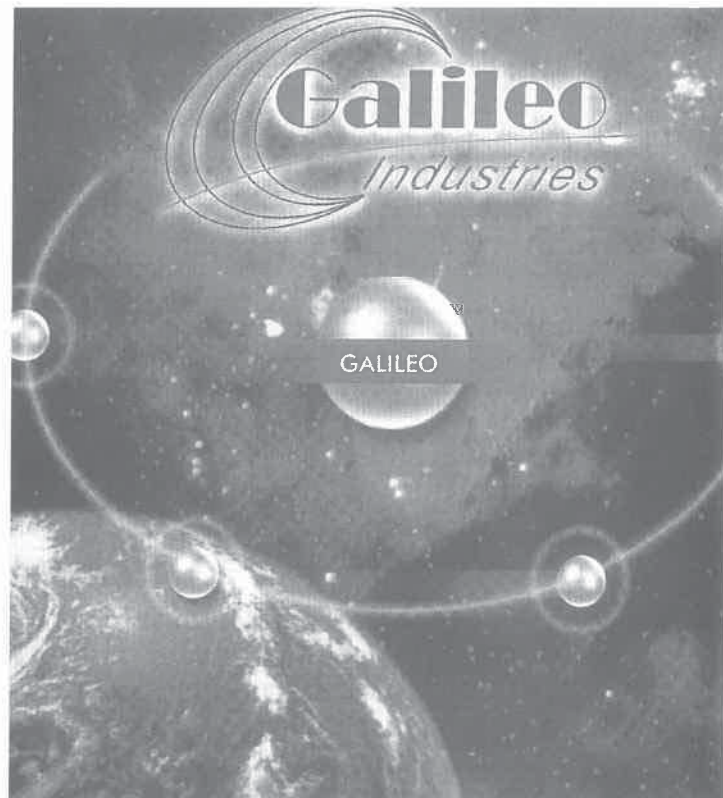


L'impact en géodésie des systèmes de radio-navigation par satellites GPS et GLONASS

Pascal Willis
ENSG/LAREG



Un défi pour galiléo

SALON NavSat 2000

Résumé

Dès le lancement des premiers satellites GPS, les géodésiens ont essayé d'utiliser au mieux les potentialités de ce système pour les applications de haute précision. Les précisions obtenues sont rapidement devenues centimétriques, puis millimétriques, d'abord pour des réseaux de taille locale, puis régionale et désormais mondiale. En particulier, la réalisation du service scientifique IGS (International GPS Service), mettant à disposition de tout utilisateur des orbites GPS de très haute qualité a été un facteur clé de succès pour ce type de résultat. Le but de cette présentation est de rappeler les différentes étapes qui ont été nécessaires à l'obtention de précision sub-centimétrique de localisation par GPS et d'essayer d'en tirer quelques recommandations qui pourraient être faites pour la réalisation d'un futur système européen de navigation par satellites: Galileo.

Mots clés: géodésie, localisation, radio-navigation par satellites, GPS, GLONASS, Galileo, IGS.

Summary

Since the very first launches of the GPS satellites, geodesists have tried to make the best use of the capacity of this system for high precision applications. The results obtained improved gradually from centimeter to millimeters, first for local networks and gradually for regional and now worldwide networks. In particular, the establishment of the scientific service IGS (International GPS Service), allowing users to have an easy access to high accuracy GPS orbits has been a key factor of success for obtaining these types of results. The purpose of this paper is to summarise the different steps that were needed to obtain sub-centimeter level of accuracy for GPS positioning and to try to make a few recommendations for the architecture of a new european satellite navigation system: Galileo.

Key words: geodesy, positioning, radionavigation by satellite, GPS, GLONASS, Galileo, IGS.

Le système américain GPS (*Global Positioning System*) génère de nombreuses applications de localisation à une précision de quelques mètres près pour le grand public, applications dont le nombre devrait encore augmenter à l'avenir avec l'arrivée de bases de données géographiques de grande précision et de faible coût facilement accessibles et régulièrement mises à jour. L'intégration des systèmes de localisation et des systèmes d'information géographique ne fera qu'accélérer encore ce phénomène.

D'autres systèmes de radionavigation par satellites existent déjà, comme le système russe GLONASS, ou sont actuellement en phase d'élaboration comme le système européen

Galileo. Il faut noter que tous ces systèmes peuvent aussi être utilisés de manière encore plus précise pour obtenir des performances sub-centimétriques pour des applications scientifiques comme la géodésie.

Le but de cet article est de rappeler brièvement ce qui permet aux scientifiques d'utiliser ces systèmes bien au-delà des gammes de précision proposées en termes de service aux utilisateurs grand public et d'essayer de présenter la complémentarité de ces systèmes pour les utilisateurs scientifiques et enfin de s'interroger sur les points critiques de l'architecture du futur système européen Galileo qui permettront ou non son utilisation scientifique à l'avenir.

Applications géodésiques du système GPS

Bien avant que le système GPS ne soit déclaré opérationnel par le ministère de la défense américain, les géodésiens se sont intéressés à ce nouveau système, pratiquement dès les années 1980-1985. L'objectif était de tester les limites de performances du système en utilisant de nouvelles stratégies d'observations ou de calculs et aussi de l'utiliser pour réaliser des réseaux géodésiques nationaux ou mondiaux de meilleure précision.

Dès cette époque, il était clair que les performances désirées ne pourraient pas être atteintes par le service GPS standard (SPS = *Standard Positioning Service*, accessible au grand public), ni même par le service précis militaire (PPS = *Precise Positioning Service*) accessible uniquement aux organismes militaires habilités. C'est l'accès au signal GPS qui était le point essentiel et non l'accès à un service particulier: les scientifiques sont connus pour être des utilisateurs exigeants, cherchant toujours à pousser toujours plus loin les performances déjà existantes.

Plusieurs conditions nécessaires étaient indispensables:

- utiliser les mesures GPS de phase (et non plus seulement les mesures de pseudo-distances),
- traiter les mesures en mode différentiel (une station de référence étant stationnée sur un point géodésique connu),
- observer pendant un temps suffisamment long pour obtenir les performances souhaitées (de quelques dizaines de minutes à quelques heures, voire plusieurs jours).

On est donc loin de l'utilisation standard du GPS qui permet d'obtenir quelques dizaines de mètres en temps réel ou quelques mètres à présent, puisque la dégradation volontaire (SA = *Selective Availability* = Accès Sélectif) a désormais été retirée très récemment. Les récepteurs GPS utilisables pour les applications scientifiques sont beaucoup plus coûteux (actuellement d'environ un facteur 100) et les conditions d'observation assez contraignantes (beaucoup d'applications concernent la localisation de points mobiles, voitures, avions...). De plus, les calculs sont faits en temps différé et non plus en temps réel, ce qui était au départ un des atouts majeurs du système GPS nominal.

Il est aussi rapidement apparu que les performances obtenues se dégradaient progressivement en fonction de la distance au point de référence ainsi que des conditions ionosphériques particulières (plus défavorables de jour que de nuit, et plus défavorables en fonction du maximum d'activité solaire, phénomène d'une périodicité d'environ dix ans). Si le problème lié à l'ionosphère peut être réglé facilement en y mettant le prix et en utilisant des récepteurs GPS bi-fréquences, le premier problème ne peut être réglé qu'en utilisant pour les calculs de localisation géodésique, une orbite de meilleure qualité que l'orbite radio-diffusée par les satellites GPS eux-mêmes en temps réel.

Afin d'obtenir une orbite estimée de qualité suffisante pour les applications scientifiques, les géodésiens ont développé dans un cadre de coopération scientifique internationale, un réseau de stations de poursuite civiles des satellites GPS ainsi qu'une organisation complète (IGS = *International GPS Service*), basée sur la bonne volonté réciproque des organismes et sur la gratuité du service final [Beutler et al, 1995].

Dans le cadre de cette organisation informelle, plus d'une centaine de stations GPS enregistrent les mesures de phases et de pseudo-distances de manière continue, 24 heures sur 24, 7

jours sur 7, pour tous les satellites GPS. Ces données sont transmises par Internet sur plusieurs centres de données internationaux, dont celui de l'IGN en France (accès ftp igs.ensg.ign.fr). Ces données sont ensuite traitées en temps différé pour obtenir des orbites précises de très grande précision (actuellement environ 5 cm sur la composante radiale, soit presque un ou deux ordres de grandeur par rapport à l'orbite « officielle » GPS diffusée en temps réel par les satellites GPS eux-mêmes pour assurer le service SPS).

Il faut noter que l'IGS a été basée sur un principe de compétition/coopération [Feissel, Willis, 2000]. A titre d'exemple, les éphémérides précises sont obtenues actuellement par huit groupes indépendants afin d'assurer une meilleure fiabilité du service et aussi ne pas tomber dans une attitude de monopole dans laquelle le produit final (dans ce cas l'orbite) reste dans un état de précision donné et ne s'améliore pas constamment en fonction des améliorations successives des logiciels (modèles et stratégies de calcul).

Au cours des cinq dernières années, les orbites de l'IGS se sont régulièrement améliorées en termes de précision. De plus, les délais d'obtention de cette orbite ont été ramenés à une quinzaine de jours. Beaucoup plus récemment, afin de répondre à l'attente de nouveaux types d'utilisateurs, une orbite rapide est désormais disponible ainsi qu'une orbite prédite (donc utilisable en temps réel tout comme l'orbite radio-diffusée à condition de disposer d'un accès Internet au niveau de la station GPS sur le terrain). Ces orbites sont bien sûr de précision moins bonne que celle de l'orbite précise GPS, car disposant de moins de données GPS au moment de son calcul, mais de précision bien supérieure à celles des orbites radio-diffusées, même lorsque l'Accès Sélectif n'est plus activé comme à présent.

De plus, il faut noter que l'IGS propose depuis peu de nouveaux produits: des coordonnées de stations GPS, des paramètres de la rotation terrestre, voire encore plus récemment des modèles de correction ionosphérique ou encore des informations sur le contenu intégré en vapeur d'eau au-dessus de chaque station du réseau de poursuite de l'IGS.

Tous ces « produits scientifiques » [Beutler et al, 1999] deviennent des données de grande précision qui peuvent être utilisées seules ou en conjonction avec d'autres mesures ou éléments d'information pour obtenir des modèles géophysiques (tectonique des plaques, mouvements intra-plaques, déformations locales...), des informations sur l'intérieur de la Terre ou les mouvements de masse du système Terre-Océan-Atmosphère, ou des prédictions météorologiques plus fiables. Des informations complémentaires sont consultables sur le site Web du Bureau Central de l'IGS : (<http://igs.bjpl.nasa.gov>).

Les géodésiens utilisent couramment les produits de l'IGS (en particulier les éphémérides précises) pour estimer les coordonnées des points de réseaux géodésiques (régionaux voire nationaux). Les précisions obtenues nécessitent de fournir simultanément la position et la vitesse de déplacement de ces points dûs au mouvement de tectonique globale.

Plus récemment, les géodésiens estiment des séries temporelles de ces coordonnées de stations afin de pouvoir détecter d'éventuels mouvements transitoires ou non-linéaires. Au niveau français, des résultats sont consultables sur le site du RGP (Réseau Géodésique Permanent) de l'IGN : (<http://lareg.ensg.ign.fr/RGP>).

Conditions indispensables pour un GPS centimétrique

Comme on peut le voir, les précisions obtenues nous emmènent bien loin des applications grand public certainement mieux connues du GPS. Toutefois, le prix à payer pour obtenir ces précisions peut sembler trop important à certains :

- mesures de phases nécessitant des récepteurs GPS spécialisés et plus coûteux,
- récepteurs bi-fréquences en cas de réseaux étendus,
- orbites précises,
- temps d'observation important,
- logiciels de calculs sophistiqués.

Il peut maintenant être utile de se projeter plus avant dans le futur et d'essayer de voir si certaines de ces conditions ne seront pas amenées à disparaître ou à devenir moins contraignantes dans un futur proche.

Concernant l'utilisation de récepteurs bi-fréquences, on peut dire que cette condition n'est nécessaire qu'à grande distance (typiquement au-delà de la centaine de kilomètres dans nos régions). De plus, l'IGS fournit récemment des cartes de corrections ionosphériques qui sont bien supérieures aux modèles radio-diffusées par le système GPS, car ces cartes sont basées sur des observations précises et nombreuses. De plus, si les pays continuent à installer des récepteurs GPS géodésiques permanents [Boucher et al, 1999] à une distance inter-station convenable, il conviendra alors de poser le problème de l'achat d'un récepteur bi-fréquence par rapport à celui d'un récepteur mono-fréquence en termes de coûts et de performances (le doublement de l'électronique par deux étant loin d'impliquer le doublement du prix du récepteur).

Concernant le temps d'observation nécessaire aux précisions géodésiques, cette durée minimum d'observation n'a fait que diminuer au cours des dernières années pour faire place à des applications précises de type cinématique (un récepteur fixe comme référence et un récepteur mobile). Il faut toutefois noter que ces méthodes ont encore actuellement leurs limites : elles ne marchent pas tout le temps et, dans certains cas, elles peuvent même fournir des résultats erronés (manque d'intégrité).

Pourtant ces problèmes, de notre point de vue, devraient s'amenuiser pour plusieurs raisons :

- disponibilité de mesures de pseudo-distances non biaisées (absence de SA) permettant un contrôle accru de la solution, voire une convergence plus rapide;
- disponibilité de nouveaux satellites (GLONASS, Galileo);
- nouvelles méthodes mathématiques de détermination rapide des paramètres d'ambiguïtés entières pour les mesures de phases.

Enfin, le problème de la distance maximum au point de référence peut aussi certainement être réglé en utilisant des éphémérides un peu moins précises mais utilisables directement sur le terrain, soit au moment des mesures (orbite prédite), soit en temps légèrement différé (inférieur à une heure), ce qui permet encore un calcul et un contrôle des résultats sur le terrain pour un grand nombre d'applications professionnelles comme la topographie.

Cette remarque a des implications opérationnelles importantes pour l'IGS et pour les réseaux permanents d'observations GPS, car elles poussent les récepteurs à transférer leurs données de manière beaucoup plus rapide (typiquement heure par heure au lieu de le faire uniquement une fois par jour). Cette évolution est en cours de réalisation pour un nombre

croissant de stations permanentes GPS en France et dans le monde.

Il faut de plus noter qu'une limite actuelle à ces nouveaux types d'applications est la difficulté d'accéder à des informations complémentaires (orbites précises, corrections ionosphériques...) directement sur le terrain. On peut penser que les nouvelles technologies de transfert d'informations à haut débit devraient profondément changer cet état de fait et permettre de développer de nouvelles applications. De plus, il pourrait être utile pour un nouveau système, comme le futur système Galileo, de fournir à l'utilisateur un accès facile à un moyen de télécommunication, même réduit au minimum, ce qui amènerait dans ce cas une claire amélioration technique par rapport au système GPS qui, conçu comme un système militaire, ne prévoit que des liaisons descendantes vers l'utilisateur.

Le système russe GLONASS : performances scientifiques actuelles et réelle utilité

Il existe actuellement un autre système de navigation par satellites qui est certainement beaucoup moins connu que le système GPS. Il s'agit du système russe GLONASS qui n'est toujours qu'en phase de développement, plusieurs satellites ont été lancés depuis plusieurs années mais leur nombre n'est pas suffisant pour que le système soit déclaré pleinement opérationnel.

Ce système est en fait très proche du GPS : orbites d'altitude proche, signaux sur deux fréquences en bande L, mesures possibles de pseudo-distances et de phases, horloges atomiques à bord des satellites. Bien que beaucoup d'incertitudes existent toujours sur l'avenir réel de ce système (le nombre de satellites a plus tendance à décroître qu'à augmenter, probablement pour des raisons financières liées au coût financier de la construction de ces satellites et de leur lancement), il a paru utile aux géodésiens d'essayer de tester dès à présent les performances potentielles de ce système, soit seul, soit comme complément au système GPS.

Dans ce contexte une importante campagne d'observations géodésiques des satellites GLONASS a été organisée entre octobre 1998 et avril 1999 (IGEX-98 = *International GLONASS Experiment 1998*). Cette campagne avait de nombreux buts scientifiques et opérationnels qu'il serait trop long de rappeler ici dans le détail [Willis et al, 1999] :

- paramètres de transformations entre les systèmes géodésiques propres à chaque système (WGS-84 pour le GPS et PZ-90 pour le GLONASS),
- idem pour le rattachement des échelles de temps,
- calculs d'orbites précises GLONASS,
- localisation géodésique précise à l'aide du système GLONASS seul ou comme complément au système GPS.

Cette campagne qui a réuni environ une trentaine de pays a permis de mettre en place un réseau d'environ 70 récepteurs GLONASS/GPS géodésiques (actuellement une trentaine de récepteurs bi-fréquences continuent à observer depuis cette date). Cette campagne a permis de confirmer les performances techniques des horloges atomiques embarquées à bord des satellites GLONASS et d'obtenir dans un premier temps des éphémérides GLONASS comprises entre 10 et 20 cm, et ceci avec un réseau de poursuite beaucoup moins dense et homogène que celui de l'IGS pour le GPS [Slater et al, 1999]. Il faut noter que ces résultats ont été confirmés par des observations de télémétrie laser qui ont été faites simultanément et de manière indépendante.

De plus des performances de localisation sub-centimétriques ont été obtenues même à grande distance (au-delà du millier de kilomètre). Des résultats de localisation de stations au sol GPS/GLONASS ont aussi été obtenus, montrant tout l'intérêt d'une constellation complémentaire au GPS, même réduite à une dizaine de satellites et même non opérationnelle. Certaines études sont d'ailleurs encore en cours.

Dans ce contexte, l'IGS a décidé d'aller de l'avant à ce sujet et de projeter d'intégrer GLONASS au GPS dans ses observations (récepteurs mixtes GPS/GLONASS) ainsi que dans ses calculs (toutes les mesures GPS et GLONASS seront utilisées et les résultats seront obtenus dans un unique système de référence géodésique: l'ITRS [Boucher et al, 1996; Sillard et al, 1999]. Cette évolution se fera progressivement d'ici à 2003, en espérant que d'ici là d'autres lancements GLONASS auront lieu, à commencer par le lancement des 3 satellites prévus d'ici l'été 2000.

Quelles conséquences pour le futur système européen Galileo

Quelles conclusions peut-on tirer des utilisations actuelles du GPS et du GLONASS pour les applications géodésiques? Tout d'abord, il paraît clair que le système GPS a fait ses preuves et fourni déjà des résultats d'intérêt géodésique considérable. Il est donc fort probable que l'arrivée du système Galileo sera perçue par les géodésiens, tout comme le système GLONASS, comme une complémentarité par rapport au système GPS (augmentation du nombre de satellites observables simultanément) plutôt que comme un nouveau concurrent au système GPS.

De plus, il n'est pas utile d'attendre la fin de développement du système, actuellement prévu pour 2006, pour obtenir des résultats pour la géodésie.

Enfin, il faut noter que les géodésiens et les utilisateurs scientifiques en général sont des utilisateurs à part du futur système. A la différence de la majorité des utilisateurs, ils ne souhaitent pas avoir accès à un service (qui leur fournirait directement les résultats espérés), mais ils souhaitent simplement avoir accès à un système de radio-navigation par satellites ou plutôt à un signal dans l'espace qui leur permettra d'effectuer des mesures et les traiter avec les logiciels appropriés et suivant des méthodes à mettre en place.

De ce côté, l'attrait possible du système Galileo pour ce genre d'utilisateur viendra probablement du nombre de satellites réellement disponibles, du nombre de fréquences potentiellement exploitables pour effectuer des mesures de phases (à partir de méthodes « sans code » pour bénéficier de toutes les fréquences possibles) et de l'exactitude des horloges atomiques embarquées à bord des satellites. Il faut même souhaiter de plus que l'IGS étende encore ses attributions pour intégrer le système Galileo à ses préoccupations afin de générer une compétition positive et productive sur ces problèmes de localisation de grande précision.

Conclusions

En conclusion, il est clair que les systèmes de radio-navigation par satellites ont des performances potentielles en termes de localisation très supérieures à celles qui sont fournies par les différents services opérationnels de localisation en temps réel. Sous certaines conditions, qui deviennent d'ailleurs de plus en plus faciles à satisfaire, on passe de résultats décimétriques ou métriques à des résultats de précision centimétrique voire millimétrique. La frontière entre les applications précises obtenues en temps différé et les applications « normales » fournies par le service en temps réel se fait de plus en plus mince de jour en jour.

De plus, pour les utilisateurs scientifiques, si le prix des récepteurs mixtes (GPS/GLONASS/Galileo) peut rester très proche de celui d'un récepteur GPS seul, le nombre de satellites visibles simultanément est un attrait très important, tant pour assurer l'intégrité du résultat, que pour obtenir de meilleurs précisions, ou plus simplement encore pour diminuer certaines contraintes d'utilisation comme le temps minimum d'observation.

Il faut toutefois noter que certains points techniques liés à l'architecture et au signal Galileo ne sont pas encore définitifs et qu'ils pourraient avoir des conséquences importantes pour les applications scientifiques (disponibilités de mesures de phases de grande précision, dégradation volontaire des horloges des satellites pour des objectifs commerciaux...)

Si les financements opérationnels de ces systèmes de radio-navigation par satellites peuvent être assurés sur le long terme, il semble établi que, pour les applications scientifiques, une utilisation combinée et raisonnée de tous les systèmes disponibles sera la clé pour obtenir les résultats attendus.

Références

- Beutler, G., R. Neilan, and I.J. Mueller, The International GPS Service for Geodynamics (IGS): the story, in IAG Symp. n° 115, GPS trends in precise Terrestrial, airborne and spaceborne applications, Springer-Verlag, pp. 3-13, 1995.
- Beutler G, M. Rothacher, S. Schaer, T.A. Springer, J. Kouba, R.E. Neilan, The International GPS Service (IGS): An interdisciplinary service in support of Earth Sciences, Adv. Space Res., Volume 23, Number 4, pp. 631-663, 1999.
- Boucher C., Z. Altamimi, International Terrestrial Reference Frame, *GPS World*, 7, 9, pp. 71-74, 1996.
- Boucher C., l'expérience pilote Réseau GPS Permanent (RGP), *Revue XYZ*, 79, 2, pp. 24, 1999.
- Feissel M., P. Willis, Interaction between scientific research and Services, Proc. DORIS Day 2000, Toulouse, France, 8 p., Mai 2000.
- Sillard P, Z. Altamimi, C. Boucher, The ITRF96 realization and its associated velocity field, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 17, pp. 3223-3226, 1998.
- Slater J.A., P. Willis, W. Gurtner, W. Lewandowski, C. Noll, R. Weber, G. Beutler, R. Neilan, G. Hein (1999). The International GLONASS Experiment (IGEX-98): Organization, preliminary results and future plans. In *Proc ION GPS-99*, pp., Institute of Navigation, Nashville, USA, Septembre, 1999.
- Willis P, G. Beutler, W. Gurtner, G. Hein, R. Neilan, C. Noll, J. Slater, IGEX: International GLONASS Experiment, Scientific Objectives and preparation, *Adv. Space Res.*, 659-654, 1999.
- E-mail : pascal.willis@ensg.ign.fr.