

IMPACT DU SYSTÈME GPS SUR LA TOPOGRAPHIE

Stratégies à court terme et perspectives d'avenir

Pascal Willis (I.G.N.)

1. INTRODUCTION

Depuis quelques années, le sigle GPS semble vouloir envahir la littérature scientifique et aussi, depuis peu, les revues et journaux destinés au grand public. De nombreux symposia sont organisés de par le monde sur ce seul sujet. Pour les uns, mot magique, système promis à un avenir grandiose; pour les autres, sigle porteur d'interrogations, de scepticisme, système porteur de désillusions. Lorsque l'on sait que ce système GPS n'est pas encore entièrement opérationnel, on peut se douter que toute cette agitation faite autour de ce système de navigation annonce des perspectives d'avenir importantes.

Le but de cette présentation est de rappeler brièvement les concepts et les applications du GPS, de faire l'état de l'art des résultats obtenus actuellement de manière opérationnelle, avant de s'interroger sur les perspectives d'avenir du GPS appliqué à la topographie.

2. LE SYSTEME GPS : RAPPELS DES CONCEPTS

Le système GPS (Global Positioning System) est un système militaire de navigation, réalisé et contrôlé par les Etats-Unis (Wells, 1986 ; Boucher et al, 1986). Le but fondamental du GPS est de fournir à un utilisateur terrestre sa position, vitesse et synchronisation instantanée dans un système de référence mondial bien spécifié (actuellement WGS 84), en tout lieu et à tout instant. Comme nous le verrons par la suite, ce système a de nombreuses applications civiles, en particulier pour la localisation relative de précision, qui nous intéressent tout particulièrement.

Pour réaliser le but initial de navigation, il est nécessaire de pouvoir observer en permanence quatre satellites GPS simultanément. Cette contrainte impose de disposer d'une constellation de satellites très importante (21 satellites + 3 de secours) à une altitude élevée (environ 20 000 km d'altitude). En novembre 1991, 11 satellites sont déjà lancés. Actuellement, en utilisant les 5 satellites prototypes déjà lancés précédemment, et toujours opérationnels, il est possible de disposer d'une constellation incomplète de 16 satellites. Ces satellites émettent des ondes radioélectriques

ultrastables sur deux fréquences proches ($L_1=1,5$ GHz et $L_2=1,2$ GHz), modulées par des codes pseudoaléatoires (Wells et al, 1986 ; Willis, 1989).

Tout utilisateur peut réaliser des mesures GPS à condition de disposer d'un récepteur GPS adapté. Actuellement, de nombreux constructeurs proposent plusieurs types de matériels GPS monofréquences ou bifréquences (c'est-à-dire, permettant d'effectuer des mesures sur une ou deux fréquences du système GPS). Tous ces récepteurs permettent d'effectuer des mesures simultanées (c'est l'un des concepts clés du GPS) sur plusieurs satellites. Deux types de mesures sont possibles (Boucher et al, 1986) :

- Les mesures de pseudodistances, qui correspondent à une mesure de la distance entre le récepteur et le satellite (mesure biaisée par un terme inconnu d'horloge qui sera déterminé par le fait que les mesures sont simultanées). Le bruit de ce type de mesure est de l'ordre 10 cm à 1 m. Ce sont les mesures qui sont utilisées pour effectuer une localisation absolue instantanée de type navigation.
- Les mesures de phase, qui correspondent aussi à une mesure de la distance entre le récepteur et le satellite. Le bruit de ce type de mesure est de l'ordre de 1 à 2 mm. Malheureusement cette mesure est ambiguë et n'est connue qu'à un nombre entier de longueur d'onde près ($\lambda=19$ cm). Ce sont ces mesures qui vont nous permettre d'obtenir des résultats de localisation relative (détermination de la position d'un ou plusieurs points à partir d'un point connu ancien à partir de mesures simultanées) de quelques millimètres à quelques centimètres, résultats directement exploitables pour des applications topographiques.

3. ANALYSE DES POSTES D'ERREURS POUR LA LOCALISATION RELATIVE PAR GPS

Les applications du GPS que nous présentons ici ne concernent que la localisation relative effectuée à partir des mesures de phase du système GPS (mesures les plus précises, mais aussi les plus difficiles à interpréter).

Pour bien comprendre qu'avec un même système de localisation, et à partir des mêmes

mesures, il est possible d'obtenir des résultats très différents (de plusieurs ordres de grandeur), il est important de définir grossièrement le budget d'erreur relatif aux calculs GPS (tableau 1). En effet, lorsque l'on connaît la cause d'erreur prédominante, c'est bien sûr sur celle-là et non sur les autres qu'il faudra essayer de minimiser les erreurs ou d'améliorer les modèles de correction.

L'un des effets les plus pernicioeux est dû à la traversée de l'ionosphère. Mal corrigés, ces effets peuvent être de l'ordre de 5×10^{-6} (soit 5 cm pour des points distants de 10 km) et se traduisent, en grande partie, par une erreur d'échelle du réseau (Beutler et al, 1989). Cet effet, non corrigé, agit comme un systématisme dont la valeur du biais varie suivant l'heure de la journée (minimum la nuit) et l'activité solaire (le dernier maximum du pseudo-cycle solaire de 11 ans se situait en juin 1991, nous sommes donc encore, pour quelques années, dans une période d'activité solaire élevée). Fort heureusement, il est aussi possible de mesurer de manière précise cet effet lorsque l'on dispose de récepteurs GPS bifréquences. En effet, l'ionosphère se comportant pour ces fréquences comme un milieu dispersif (l'allongement du trajet satellite-récepteur dû à la traversée de l'ionosphère dépend de la fréquence du signal), on peut utiliser ces deux mesures pour calibrer le temps de propagation dans ce milieu (Willis, 1991).

Lorsque l'on effectue des calculs géodésiques standards, on utilise l'orbite radiodiffusée (dont les paramètres sont radiodiffusés par les satellites GPS eux-mêmes et décodés par tous les récepteurs). La qualité de l'orbite radiodiffusée rejaillira directement sur la qualité des résultats obtenus. Actuellement, cette orbite est de bonne qualité (mieux que 10^{-6}). De plus, les effets se font surtout sentir comme une désorientation des réseaux que l'on a déterminés.

Pour s'affranchir de ces effets, il convient soit d'effectuer des traitements plus complexes, mettant en œuvre des logiciels scientifiques permettant de recalculer précisément l'orbite des satellites GPS, soit d'effectuer, à posteriori, un recalcul des mesures avec un logiciel du commerce en utilisant une orbite précise calculée par d'autres personnes. Si la première approche ne peut convenir que pour des organismes scientifiques de recherche, la deuxième, par contre, peut être réalisée par tout utilisateur. Il suffit qu'une éphéméride précise soit disponible en temps différé (typiquement une quinzaine de jours).

Il faut noter à ce sujet que l'A.I.G. (Association Internationale de Géodésie) met actuellement en place un projet international appelé IGS (International GPS Geodynamics Service). La France a fait, concernant ce projet, des propositions sur plusieurs aspects :

- participation au réseau de poursuite internationale: 2 récepteurs bifréquences installés en 1991, 2 autres prévus (CNES/I.G.N.),
- participation à un centre de calcul opérationnel européen (Université de Berne, I.G.N., IFAG,...),
- centre d'archivage et de redistribution des données et résultats (I.G.N./CNES).

Actuellement, l'IGS est encore en phase de projet. Une première campagne opérationnelle internationale aura lieu pendant l'été 1992 (Neilan et al). On peut raisonnablement penser que ce service sera pleinement opérationnel en 1993-1994. Il sera donc possible à partir de cette époque, pour un topographe, d'utiliser les éphémérides précises GPS provenant de l'IGS (sous forme de disquette, accès minitel,...).

Causes	Conséquences sur le résultat	Solutions possibles
ionosphère	effet systématisme sur le facteur d'échelle du réseau	récepteur bifréquence
orbite	perte d'exactitude suivant la qualité de l'orbite (rotation)	utilisation à posteriori d'une orbite précise
troposphère	effet aléatoire s'appliquant principalement sur la composante verticale du résultat de localisation	traitement adapté des mesures GPS
multitrajets	perte d'exactitude	précautions opératoires (choix des points stationnés, observations en mode statique)
dégradations volontaires du système GPS	perte d'exactitude (principalement pour la localisation absolue et instantanée)	récepteur adapté (permettant un mode de fonctionnement "codeless")

Tableau 1: Analyse simplifiée des postes d'erreurs relatifs à la localisation statique par GPS.

De manière analogue à la traversée de l'ionosphère par les signaux GPS, la traversée de la troposphère (partie basse de l'atmosphère) perturbe le temps de propagation de ces signaux. La troposphère étant un milieu non dispersif, utiliser des récepteurs GPS bifréquences n'apporte donc aucune information nouvelle et ne permet pas de mesurer le retard de propagation. Il faut alors utiliser des modèles de correction (dépendant de paramètres météorologiques locaux tels que pression, température sèche et humidité). L'effet d'une mauvaise correction troposphérique se traduit, en grande partie, par une erreur aléatoire sur la composante verticale des résultats de localisation (Beutler et al, 1989). Il faut toutefois modérer quelque peu ce problème car ces effets ne sont que peu sensibles pour des réseaux de faibles dimensions (quelques kilomètres) et de faibles dénivelées (quelques dizaines de mètres). Pour la localisation relative par GPS, c'est en fait l'erreur sur la différence des erreurs de correction de propagation troposphérique qui est importante. Sans rentrer dans de plus amples détails techniques, cet effet se fait surtout sentir en zone montagneuse, où les différences d'altitudes des différents points à localiser sont très importantes (pour des dénivelées de plusieurs centaines de mètres, les erreurs atteignent rapidement plusieurs centimètres). De plus, les logiciels de recherche les plus avancés permettent d'estimer cette erreur troposphérique lorsqu'une grande quantité de mesures est disponible (plusieurs heures à plusieurs récepteurs) en utilisant des techniques de filtrage appropriées. Pour des logiciels de production, même pour des distances courtes et des faibles dénivelées, il est, en tout état de cause, très difficile d'estimer la composante verticale à mieux qu'un centimètre.

Enfin, et c'est probablement l'effet qui cause le plus de perplexité et d'indignation chez les utilisateurs, le système GPS est volontairement dégradé. C'est à dire que les utilisateurs civils doivent obtenir des performances de localisation moins bonnes que les utilisateurs habilités (militaires

américains,...). Ces dégradations volontaires sont de deux types (Wells, 1986; Willis, 1989):

- Accès sélectif = SA (Selective Availability). Cette dégradation doit normalement avoir lieu en permanence. Cela ne signifie pas qu'elle a lieu tout le temps, mais plutôt qu'elle peut être effective sans aucun avertissement préalable. Pour des travaux de production courante, il vaut donc mieux faire l'hypothèse que cette dégradation a lieu en permanence, quitte à obtenir parfois des résultats plus optimistes que les prévisions. L'effet de cette dégradation se traduit surtout par une dégradation d'un facteur 10 de la localisation absolue instantanée, qui est le but militaire de ce système: pour un utilisateur non habilité, les performances passent de 10 m à 100 m (à 1s). Pour les applications topographiques (localisation relative), la dégradation est, fort heureusement, nettement moins sensible. Néanmoins, cette dégradation pourrait se traduire par des éphémérides radiodiffusées de plus mauvaise qualité (problème qui, comme nous l'avons vu, peut être résolu par l'utilisation ultérieure d'éphémérides précises).
- Anti-brouillage = AS (Anti-Spoofing). La politique américaine concernant la mise en œuvre de cette dégradation n'est pas actuellement totalement connue. Toutefois, on peut raisonnablement penser qu'elle n'aurait lieu qu'en cas de crise internationale grave. Cette dégradation se traduirait, en particulier pour les applications topographiques, par l'impossibilité d'effectuer des mesures de phases sur la fréquence L2 pour certains types de récepteurs (récepteurs nécessitant la connaissance du code précis GPS). La plupart des constructeurs proposent désormais, pour les modèles bifréquences, des récepteurs pouvant fonctionner en mode "codeless" (ne nécessitant la connaissance du code précis GPS). Néanmoins, l'implication réelle de ce type de dégradation sur les résultats de localisation relative a été encore peu étudié.

Tableau 2 : Classification des performances actuelles de la localisation statique et cinématique par GPS.

type de localisation	résultats standards obtenus	dimensions du réseau	conditions particulières
géodésique monofréquence dégradée	1 cm + 10 ⁻⁵		< 1 h (ambiguïtés libres)
cinématique	5 mm + 5x10 ⁻⁶	< 20 km	instantané
géodésique monofréquence	2 mm + 2x10 ⁻⁶	< 20 km	< 1 h
rapide statique	5 mm + 2x10 ⁻⁶	< 20 km	de 1 à 10 mn
géodésique bifréquence	2 mm + 10 ⁻⁶	100 km-1 000km	1 h
ultraprécis	2 mm + 2x10 ⁻⁷	>500 km	1 à 3 h

4. CLASSIFICATION DES PERFORMANCES ACTUELLES DU GPS

Connaissant désormais les différents postes d'erreurs concernant la localisation relative par GPS, il est plus simple de comprendre les différentes gammes de résultats qu'il est possible d'obtenir en localisation relative avec le système GPS (tableau 2).

Les résultats présentés ci-dessous correspondent à des résultats standards qui peuvent être obtenus par des utilisateurs non spécialistes et peuvent être considérés comme des exactitudes (validés par des comparaisons avec d'autres systèmes de localisation estimés être plus précis). Les résultats provenant des écarts types estimés par les logiciels (millimétriques voire submillimétriques) ainsi que les résultats de répétitivité sont entachés d'erreurs systématiques et sont beaucoup trop optimistes (et donc moins réalistes que les exactitudes données ci-dessous) :

- Localisation géodésique monofréquence dégradée ($1 \text{ cm} + 10^{-5}$). Cette technique peut être utilisée pour des réseaux de taille très variable et ne nécessite pas d'observer très longtemps (typiquement moins d'une heure). Les ambiguïtés entières (nombre entier de longueurs d'onde) ne doivent pas nécessairement être fixées dans le calcul et, par conséquent, la qualité des résultats dépend de la durée des observations (Willis, 1989).
- Localisation géodésique monofréquence ($2 \text{ mm} + 2 \times 10^{-6}$). C'est l'application standard du GPS pour la topographie et la géodésie. Il est nécessaire d'observer environ 1 heure en mode statique (afin de pouvoir déterminer la valeur exacte des ambiguïtés entières). Cette méthode n'est applicable que pour des réseaux de faibles dimensions (typiquement quelques kilomètres) (Willis, 1989).
- Localisation rapide statique ($5 \text{ mm} + 2 \times 10^{-6}$). C'est une variante très intéressante de l'application précédente pour laquelle seules quelques minutes de mesures sont nécessaires. Cela est dû au mode de calcul utilisé (mesures obtenues sur les deux fréquences L1 et L2, utilisation conjointe des mesures de pseudodistances et de phases dans un ajustement combiné astucieux). Cette méthode récente devient caduque pour des réseaux de dimensions trop importantes. Néanmoins le gain en productivité apporté pour les applications topographiques mérite d'être mentionné ici.
- Localisation géodésique bifréquence ($2 \text{ mm} + 10^{-6}$). Variante de l'utilisation en mode géodésique permettant d'observer des réseaux de dimensions plus importantes (de 100 à 1 000 km).
- Localisation ultraprécise ($2 \text{ mm} + 2 \times 10^{-7}$). C'est l'application la plus précise du GPS géodésique (Blewitt, 1989 ; Dixon, 1991) qui nécessite, à l'inverse des applications précédemment citées, un logiciel de traitement de recherche sophistiqué (traitements bifréquences, calcul d'orbite de précision, estimations de paramètres troposphériques, filtres adaptés (Lichten, 1990),...). Elle est tout particulièrement utilisée pour traiter de grandes campagnes internationales pour lesquelles les distances entre points sont de plusieurs centaines à plusieurs milliers de kilomètres.
- Localisation cinématique ($5 \text{ mm} + 5 \times 10^{-6}$). Cette dernière application est actuellement plus marginale pour les applications topographiques. Elle consiste à localiser en temps différé un mobile (véhicule terrestre), grâce à des logiciels adaptés. Néanmoins, la plus grande critique que l'on puisse faire à cette méthode est qu'elle peut être mise en défaut dans un environnement radioélectrique perturbé (présence de multitrajets), par exemple en environnement urbain. De plus, elle est très sensible au nombre de satellites GPS en visibilité (Willis, 1989).

5. PERSPECTIVES D'AVENIR DU SYSTÈME GPS APPLIQUÉ À LA TOPOGRAPHIE

Tout d'abord, il faut noter que le système GPS est encore en évolution. Actuellement, la constellation des satellites est toujours incomplète, ce qui ne permet pas de pouvoir l'utiliser à sa guise, mais seulement quelques heures par jour. À terme, ce système pourrait être utilisé en topographie 24h/24 et 7j/7. Ceci va donc améliorer très rapidement la productivité de ces différentes techniques et diminuer, à matériel constant, le coût d'obtention des points à localiser.

Les constructeurs GPS perçoivent actuellement cette évolution future de ce marché des récepteurs et de gros investissements ont été réalisés, ces dernières années, sur la qualité des récepteurs GPS géodésiques (fiabilité, miniaturisation, automatisation, diminution des prix,...). D'autres évolutions sont déjà prévisibles (adaptation des récepteurs à l'environnement urbain, couplage avec des moyens de télécommunications de données de manière à permettre un traitement temps réel,...).

Du côté des logiciels, il faut noter aussi, pour les logiciels du commerce des évolutions significatives (automatisation des traitements, début de normalisation de format d'échange de données, augmentation des applications cinématiques et surtout des applications en mode rapide statique, possibilité d'incorporation d'éphémérides précises provenant d'une source extérieure, aides à

l'interprétation des résultats et à l'intégration des résultats dans des réseaux préexistants,...).

De plus certains problèmes liés à l'incorporation des résultats GPS au réseau géodésique national existant devrait disparaître à terme avec la disponibilité du nouveau réseau géodésique français (R.G.F.) (Le Pape, 1991). Ce nouveau réseau, réalisé par l'I.G.N. avec l'aide des techniques de géodésie spatiale les plus modernes (GPS, DORIS, VLBI,...) devrait permettre une incorporation facile des futurs résultats GPS obtenus par des utilisateurs non spécialistes.

Enfin, avec l'arrivée de ce nouveau système, des nouveaux profils de personnel sont à former. Il est important que l'information, actuellement disponible parmi une poignée de spécialistes, puisse être diffusée le plus largement possible au sein de la communauté des futurs utilisateurs. Il faut noter à ce sujet que le groupe permanent du CNIG "Positionnement Statique et Dynamique" s'est donné pour tâche dans les mois et les années à venir de rédiger et de remettre à jour régulièrement des documents techniques d'aide aux futurs utilisateurs du GPS (Willis et al, 1992 ; G.T.P. du CNIG, à paraître).

6. CONCLUSIONS

En conclusion, le GPS est, d'ores et déjà, une excellente technique de densification, particulièrement adaptée aux travaux topographiques concernant les réseaux de faible dimension. Dans le cas de réseau de dimension plus importante (au delà de la centaine de km), le GPS reste une technique très intéressante mais un peu plus difficile à mettre en oeuvre: récepteurs spécifiques (bifréquences), logiciels de recherche nécessitant des compétences particulières), etc.

Cette technique est encore actuellement en plein développement (améliorations techniques des récepteurs, normalisation des procédures de traitements, automatisation des logiciels). Il faut noter de plus, un effort international important de la communauté civile afin de mettre en place à terme un service civil (IGS) d'obtention et de rediffusion d'éphémérides GPS précises.

Néanmoins, ce n'est pas la solution à tous les problèmes topographiques. Il ne faut pas, malheureusement, sous-estimer les possibilités de dégradation volontaire de ce système par le ministère de la défense des Etats-Unis. De plus, il ne faut pas oublier non plus les contraintes opérationnelles dues à la présence de masques radioélectriques (en particulier, en milieu urbain).

Enfin, l'incorporation actuelle des résultats GPS dans les réseaux géodésiques nationaux pose encore de nombreux problèmes délicats qui ne seront résolus de manière satisfaisante

qu'après la réalisation de nouveaux réseaux géodésiques nationaux de haute précision (du type du R.G.F.).

On peut penser que le GPS se trouve actuellement à une période charnière de son évolution. Les résultats obtenus commencent à intéresser une communauté de plus en plus large, qui, n'en doutons pas, permettra elle aussi de contribuer au développement et à l'amélioration des performances de ce système.

7. RÉFÉRENCES

G. Beutler, I. Bauersima, S. Botton, W. Gurtner, M. Rotacher, T. Schildknecht (1989), Accuracy and biases in the geodetic application of the Global Positioning System, *Manusc. Geod.*, 14, 1, 28-35.

G. Blewitt (1989), Carrier phase ambiguity resolution for the Global Positioning System applied to geodetic baselines of up to 2000 km, *J. Geophys. Res.*, 94, B8, 10187-10203.

C. Boucher, P. Willis (1986), Le système GPS et son impact en géodésie topométrie et cartographie, *revue X,Y,Z, A.F.T.*, 29, 23-29.

T.H. Dixon (1991), An introduction to the Global Positioning System and some geophysical applications, *Rev. of Geophys.*, 29, 2, 249-276.

Groupe de Travail Permanent du CNIG "Positionnement Statique et Dynamique", Guide de l'utilisateur du GPS pour la localisation, 4 fascicules (le système GPS: notions fondamentales; Guide de l'utilisateur GPS pour la localisation statique; Guide de l'utilisateur du GPS pour la localisation dynamique et cinématique; Glossaire des termes relatifs à la localisation par GPS), en cours de rédaction.

M. Le Pape (1991), Le R.G.F.: Applications des recommandations du CNIG, Programme de mise en oeuvre du nouveau réseau, 4ème journée nationale de la recherche géographique, "Repères du futur", Nouveau système de référence géodésique en France et en Europe, Techniques de positionnement, CNIG, à paraître.

S.M. Lichten (1990), Estimation and filtering for high-precision GPS positioning applications, *Manusc. Geod.*, 15, 159-176.

R. Neilan, J.M. Bosworth, M. Chin, T.A. Herring, W. Prescott, C. Röcken, W. Schluter, M. Bevis, S.S. Fisher, B. Schupler, P. Willis, GPS network operations for the International GPS Geodynamics Service, Springer-Verlag, à paraître.

D.E. Wells et al (1986), Guide to GPS positioning, Canadian GPS Associates, University of New Brunswick, Canada, 500 p.

P. Willis (1989), Méthodes de traitement de la phase GPS pour la localisation relative (statique et cinématique), Applications à la géodésie, Thèse de doctorat de l'Observatoire de Paris, 177 p.

P. Willis (1991), Le système GPS, 4ème journée nationale de la recherche géographique, "Repères du futur", Nouveau système de référence géodésique en France et en Europe, Techniques de positionnement, CNIG, à paraître.

P. Willis, J.G. Affholder, M. Le Pape, S. Botton, F. Bourassin, L. Daniel, D. Marcel, I. Veillet (1992), Glossaire des termes relatifs à la localisation par GPS, I.G.N./LAREG n° 92009.