

Positionnement GPS par point unique : une solution de remplacement pour les levés par GPS différentiel

Ahmed El-Rabbany, Ph. D., Ing.
Département de génie civil (option géomatique)
Ryerson University

Pour effectuer un positionnement à l'aide du GPS, on peut recourir à l'une ou l'autre des deux méthodes suivantes : le positionnement par point unique ou le positionnement différentiel (c.-à-d. relatif). Le positionnement GPS par point unique n'utilise qu'un seul récepteur GPS, tandis que le positionnement différentiel emploie deux ou plusieurs récepteurs GPS qui suivent simultanément les mêmes satellites. Les travaux de levé avec le GPS sont habituellement réalisés en mode différentiel. Cela s'explique par le fait que le mode différentiel permet d'atteindre un degré d'exactitude plus élevé que ne le permet le positionnement GPS par point unique. Toutefois, un désavantage important du positionnement différentiel est qu'il dépend des mesures ou des corrections fournies par un récepteur de référence. En d'autres mots, on doit pouvoir disposer de deux ou plusieurs récepteurs GPS. Les progrès récents en positionnement GPS démontrent qu'un utilisateur pourvu d'un seul récepteur GPS peut obtenir une exactitude de positionnement comparable à celle du positionnement différentiel (c.-à-d., avec une exactitude de l'ordre de quelques centimètres à quelques décimètres). Dans cet article, nous traitons de ces nouveaux progrès en positionnement GPS et montrons comment nous pouvons atteindre ce degré élevé d'exactitude.

Technique classique de positionnement GPS par point unique

Le positionnement GPS par point unique, aussi appelé positionnement autonome, n'emploie qu'un seul récepteur GPS. En d'autres mots, un récepteur GPS unique suit simultanément quatre satellites GPS ou plus afin de déterminer ses propres coordonnées par rapport au centre de la Terre (Figure 1). Pour déterminer la position par point unique du récepteur en tout temps, les coordonnées des satellites ainsi qu'au moins quatre distances jusqu'à quatre satellites sont requises (El-Rabbany, 2002). Le récepteur obtient les coordonnées des satellites par l'intermédiaire des messages de navigation diffusés, tandis que les distances sont obtenues soit à partir du code C/A ou du code P, tout dépendant du type de récepteur. Comme on le sait bien, les pseudodistances mesurées sont contaminées par les erreurs de synchronisation des horloges des satellites et des récepteurs. La correction des erreurs d'horloge des satellites peut être effectuée en appliquant la correction d'horloge du satellite contenue dans le message de navigation, tandis que l'erreur d'horloge du récepteur est traitée comme paramètre inconnu additionnel dans le processus d'estimation (El-Rabbany, 2002). Le nombre total de paramètres inconnus est donc de quatre : trois pour les coordonnées du récepteur et un pour l'erreur d'horloge du récepteur. C'est là la raison qui justifie le recours aux données d'au moins quatre satellites. Si le récepteur suit plus de quatre satellites, on applique soit l'estimation par les moindres carrés, soit la technique de filtrage de Kalman. Comme les coordonnées des satellites sont fournies dans le Système géodésique mondial (SGM) 84, les coordonnées du récepteur seront également calculées dans le système SGM 84.

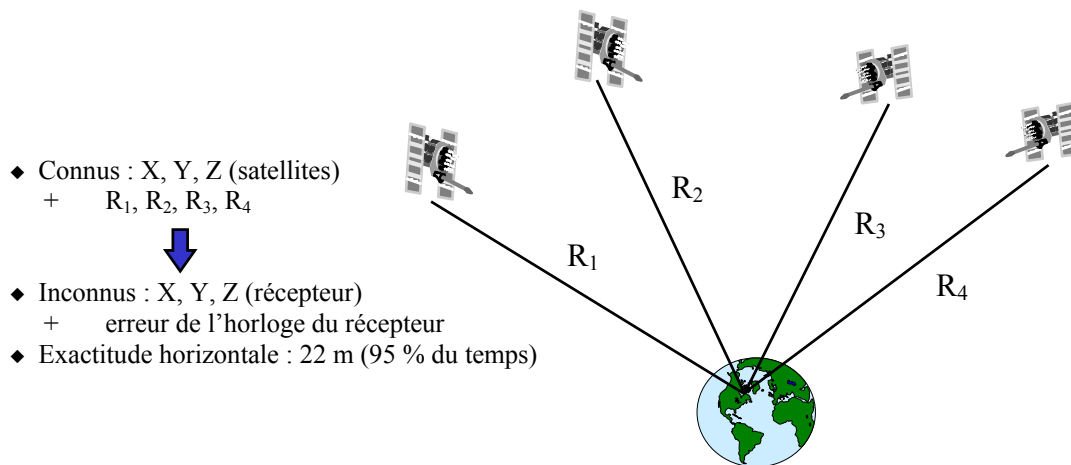


Figure 1. Principe du positionnement GPS par point unique.

L'exactitude prévue du positionnement horizontal, avec la méthode classique, est améliorée, passant d'environ 100 m (2 drms, c.-à-d. 2 fois l'erreur type en distance) quand l'accès sélectif (A/S) est activé, à environ 22 m (2 drms) ou mieux en l'absence du code A/S (Shaw *et alii*, 2000). Pour démontrer le rendement de la méthode classique, on a traité des données GPS recueillies par la station Algonquin, un site de suivi continu du réseau du Système canadien de contrôle actif (CACCS), en mode de positionnement par point unique. Les données, obtenues le 1^{er} novembre 2002, couvrent 24 heures et ont été traitées avec le logiciel GPSPACE, mis au point par la Division des levés géodésiques (DLG) de Géomatique Canada. Mentionnons que ce logiciel, et plusieurs autres, peuvent être obtenus gratuitement sur le site Web de DLG, à http://www.geod.mcan.gc.ca/index_f/products_f/software_f/software_f.html. La Figure 2 illustre l'erreur vraie en latitude, en longitude et en hauteur, quand la pseudodistance selon le code L1 et les éphémérides diffusées ont été utilisées. On voit que l'erreur dans l'une ou l'autre des composantes horizontales atteint une valeur maximale de 10 m, tandis que l'erreur en hauteur est d'environ 19 m. Il est manifeste que ce niveau d'exactitude n'est pas suffisant pour la plupart des travaux de levé.

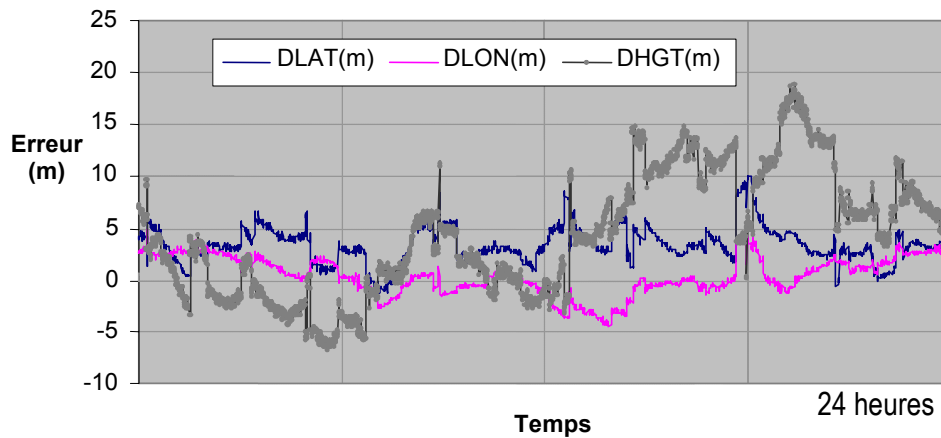


Figure 2. Résultats époque par époque (pseudodistance en code L1 et éphémérides diffusées).

Amélioration de l'exactitude du positionnement par point unique

L'exactitude de la technique classique du positionnement GPS par point unique est limitée par la présence d'erreurs non modélisées et d'erreurs systématiques (biais). Il s'agit des erreurs d'éphémérides, des erreurs résiduelles d'horloge des satellites, des erreurs de multitrajets, des retards ionosphériques et troposphériques, d'erreurs dans l'attitude du satellite et de l'effet dû au déplacement du site (pour plus de détails, consulter El-Rabbany, 2002). Depuis la levée de l'accès sélectif (A/S), c'est le retard ionosphérique qui contribue le plus au bilan des erreurs GPS (Shaw *et alii*, 2000). Comme l'ionosphère est un milieu dispersif, le signal GPS y subit un retard qui est fonction de la fréquence. Par conséquent, si on utilise un récepteur double fréquence, on peut combiner les mesures aux fréquences L1 et L2 pour générer la combinaison dite linéaire sans ionosphère, c'est-à-dire, exempte de l'erreur ionosphérique. La Figure 3 illustre l'erreur vraie en latitude, en longitude et en hauteur pour le même ensemble de données décrit ci-dessus, quand on utilise la combinaison exempte de retard ionosphérique, la pseudodistance non différenciée et les éphémérides diffusées. Par rapport aux résultats obtenus avec le positionnement classique par point unique, on constate que la solution est améliorée dans les trois composantes.

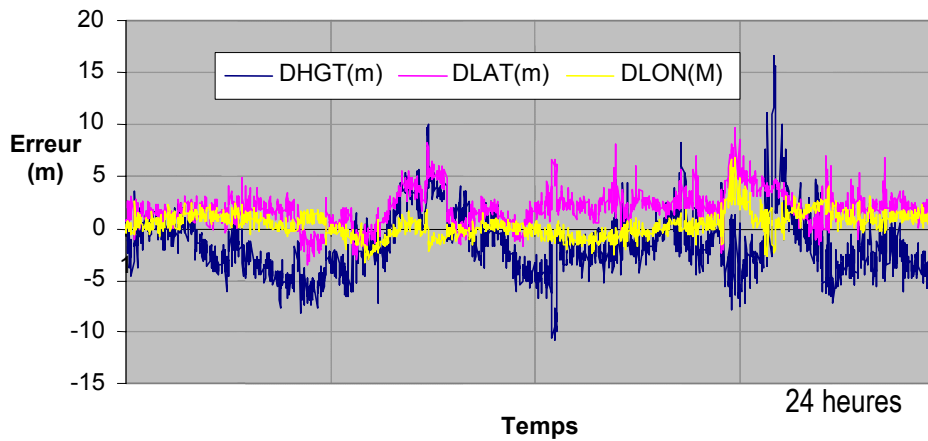


Figure 3. Résultats pour la solution exempte de retard ionosphérique, avec pseudodistance non différenciée et éphémérides diffusées

On pourrait améliorer davantage la solution de positionnement par point unique en utilisant les données précises d'éphémérides et d'horloges satellite produites, par exemple, par le Service international de GPS pour la géodynamique (IGS). Le service IGS est composé de nombreuses agences nationales qui soutiennent les activités géodésiques et géophysiques mondiales. Ce service s'appuie sur un réseau mondial de stations de suivi équipées de récepteurs double fréquence fonctionnant en permanence (Figure 4). Les données précises d'horloge et d'éphémérides satellite de l'IGS sont actuellement offertes gratuitement en trois formats différents : 1) produit final, offert avec un délai de 12 jours; 2) produit rapide, offert avec un délai d'environ 17 heures; et 3) produit ultra rapide, généré deux fois par jour (à 3 h et à 15 h, UTC) et contenant 48 heures d'information orbitale (IGS, 2002). L'exactitude des trois types de produits diffère en fonction des délais dans la mise en disponibilité des données, les produits avec orbite finale étant les plus exacts. L'erreur type de l'orbite IGS finale est de l'ordre de 3 à 5 cm, par rapport à 260 cm pour l'orbite diffusée (IGS, 2002). De la même manière, l'erreur type de la correction d'horloge satellite IGS finale est de l'ordre de 0,1 nanoseconde (ce qui équivaut à une erreur de 3 cm en distance), par rapport à environ 7 nanosecondes (équivalente à une erreur de 210 cm en distance) pour la correction d'horloge satellite diffusée.

On doit souligner que les éphémérides précises de l'IGS sont présentées dans le système de référence ITRF (El-Rabbany, 2002). En d'autres mots, si un utilisateur emploie des éphémérides précises de l'IGS, les coordonnées de sa solution seront dans le système de référence ITRF. Pour obtenir une solution dans le système NAD 83 (SCRS), les utilisateurs peuvent employer les éphémérides précises produites et distribuées par Géomatique Canada. La Figure 5 indique l'erreur vraie en latitude, en longitude et en hauteur pour le même ensemble de données décrit ci-dessus, quand on utilise la solution exempte de retard ionosphérique, avec pseudodistance non différenciée et avec les données d'éphémérides et d'horloges précises de l'IGS. On constate que la solution est encore meilleure dans les trois composantes, par rapport aux deux scénarios

ci-dessus. En fait, la solution est comparable à ce qu'on obtient avec le positionnement GPS différentiel basé sur les codes.

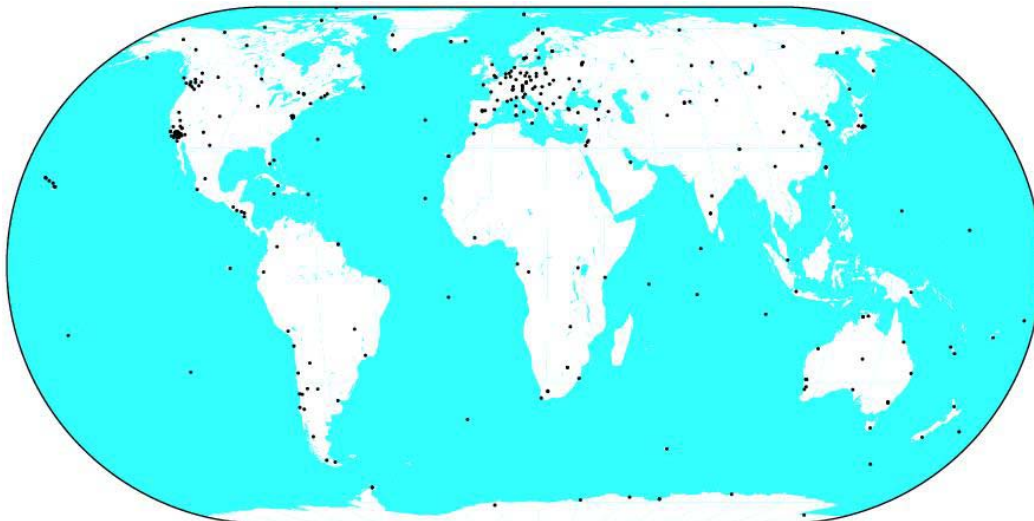


Figure 4. Réseau de suivi IGS (tiré de <http://igsceb.jpl.nasa.gov/network/netindex.html>).

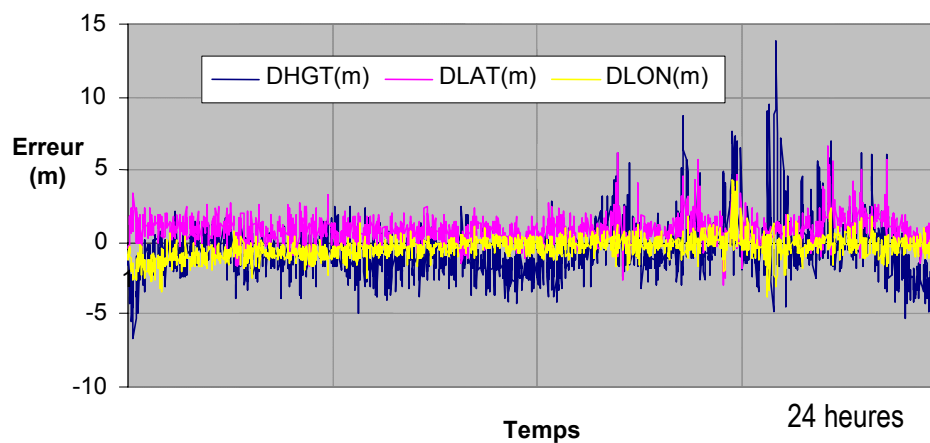


Figure 5. Résultats pour la solution exempte de retard ionosphérique, avec pseudodistance non différenciée et avec éphémérides et horloges précises.

Positionnement GPS par point unique (PPP)

On a démontré que la solution de positionnement par point unique basé sur les codes pourrait être améliorée afin de correspondre à la solution DGPS, en utilisant une solution exempte de retard ionosphérique, ainsi que la pseudodistance non différenciée et les données d'éphémérides et d'horloges précises. Pour obtenir la plus grande exactitude possible pour le positionnement par

point unique, on devrait également utiliser les mesures de la phase de la porteuse et de la pseudodistance. De plus, on doit également tenir compte du reste des erreurs non modélisées, c'est-à-dire le retard troposphérique, l'erreur dans l'attitude du satellite et l'effet dû au déplacement de site. Cette approche est communément connue sous le nom de positionnement par point unique, ou PPP (Héroux *et alii*, 2001).

Le retard troposphérique est habituellement scindé en deux composantes : sèche et humide (El-Rabbany, 2002). La composante sèche représente environ 90 % du retard et peut être prévue avec un grand degré d'exactitude par modélisation mathématique, c'est-à-dire à l'aide du modèle de Hopfield. La composante humide du retard troposphérique dépend de la concentration de vapeur d'eau le long de la trajectoire parcourue par le signal GPS. À la différence de la composante sèche, la composante humide n'est pas facile à prévoir, et on la traite habituellement comme paramètre inconnu additionnel dans le processus d'estimation. L'erreur dans l'attitude du satellite comprend un décalage entre le centre de masse du satellite et le centre de phase de son antenne, un accroissement progressif de la phase attribuable à la rotation relative des antennes du satellite et du récepteur, ainsi qu'à la rotation rapide pendant les saisons d'éclipse. Quant à l'effet dû au déplacement de site, il comprend les marées de la Terre solide, l'effet du mouvement des pôles et les charges océaniques (Héroux *et alii*, 2001). Le même ensemble de données décrit ci-dessus a de nouveau été utilisé avec la méthode de positionnement GPS par point unique. Toutefois, à la différence des scénarios ci-dessus, on a utilisé, cette fois-ci, un filtre séquentiel. La Figure 6 illustre l'erreur vraie en latitude, en longitude et en hauteur. On peut voir que la solution PPP converge après un faible nombre d'époques, et s'approche à quelques centimètres près des coordonnées véritables de la station. Toutefois, on doit souligner que la solution PPP était basée sur un traitement séquentiel et que le récepteur était en position stationnaire connue (c.-à-d. statique). Comme l'ont démontré Abdel-Salam *et alii* (2002), le fait de ne pas tenir compte de la dynamique du récepteur nuit assurément à l'exactitude des résultats.

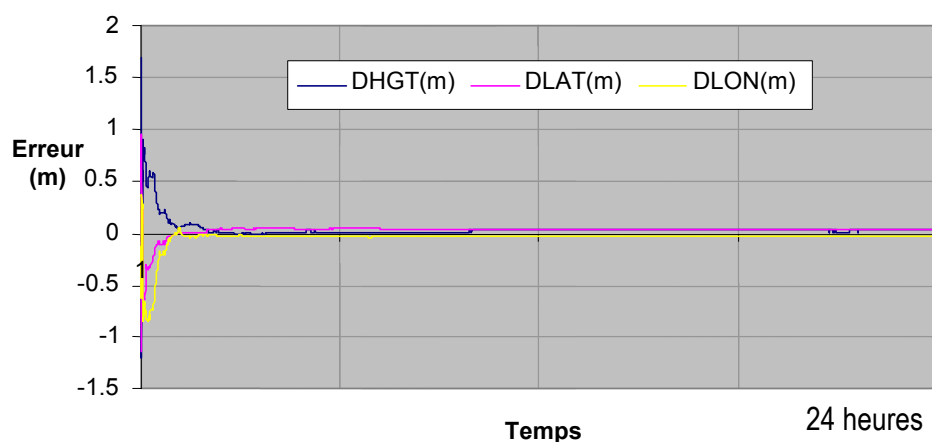


Figure 6. Résultats pour le positionnement GPS par point unique

Conclusions et perspectives d'avenir

Dans cet article, nous avons présenté plusieurs méthodes de positionnement GPS par point unique. Il a été démontré qu'une exactitude de positionnement de l'ordre de quelques centimètres à quelques décimètres est possible avec le positionnement par point unique. Pour atteindre ce niveau élevé d'exactitude, on doit utiliser des éphémérides et des données d'horloges satellites précises, qui, malheureusement, ne sont disponibles à l'heure actuelle qu'avec un certain délai. Toutefois, plusieurs chercheurs et institutions mettent au point des modèles qui, permettant la prévision des corrections des éphémérides et des données d'horloges satellites, rendront possible le PPP en temps réel.

Remerciements :

L'auteur désire remercier la Division des levés géodésiques de Géomatique Canada pour lui avoir fourni la plus récente version du logiciel GPSPACE, ainsi que les données utilisées pour cet article.

Références :

Abdel-Salam, M., Y. Gao et X. Shen (2002). "Analyzing the Performance Characteristics of a Precise Point Positioning System." Proceedings of the ION GPS-2002, Oregon Convention Center, Portland, Oregon, USA, 24-27 septembre. CD-ROM.

Héroux, P., J. Kouba, P. Collins et F. Lahaye (2001). "GPS Carrier-Phase Point Positioning with Precise Orbit Products." Actes du colloque KIS 2001, Banff (Alberta), Canada, 5-8 juin, CD-ROM.

IGS service (2002). <http://igsceb.jpl.nasa.gov/>. Consulté le 3 décembre 2002.

Shaw, M., K. Sandhoo et D. Turner (2000). "Modernization of the Global Positioning System." *GPS World*, septembre, vol. 11, n° 9, pp.36-44.