

PPP, la maturité ?

Laurent MOREL - François FUND - Romain LEGROS - Stéphane DURAND - Bernard FLACELIÈRE

La géolocalisation par GNSS (Global Navigation Satellite Systems) se développe régulièrement avec de nouvelles infrastructures comme les réseaux permanents, avec les nouvelles constellations, avec les nouveaux signaux et l'implémentation de nouveaux algorithmes. L'accumulation de ces progrès a récemment permis au PPP (Precise Point Positioning) de devenir une technique offrant une localisation de qualité centimétrique. Il ne s'agit pas d'une technique nouvelle mais elle s'affiche aujourd'hui comme une alternative au positionnement différentiel. Il est donc légitime de se demander quelle place elle occupera demain en topographie.

Afin de mettre en lumière les avantages et les inconvénients du PPP, nous présenterons dans un premier temps l'historique et les principes de cette technique. Nous nous intéresserons ensuite aux possibilités et à la qualité du positionnement en temps différé proposées par les logiciels de recherche et par les services disponibles gratuitement sur Internet. Enfin nous nous intéresserons au positionnement PPP en temps réel avant de discuter de son intérêt pour la topographie et de ses futures évolutions. Historiquement, cette technique a été employée dans des logiciels de recherche et notamment au JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) avec le logiciel GIPSY/OASIS depuis les années 1990 (Zumberge et al, 1997). Elle a montré qu'elle pouvait apporter des précisions quasi équivalentes aux méthodes différentielles lorsque la durée d'observation dépassait plusieurs heures. Son efficacité réside dans sa simplicité qui lui confère un temps de calcul très court en regard de celui des techniques différentielles. Pour les réseaux présentant des lignes de base de plus de 500 km, le gain de temps est tel qu'elle a été adoptée par de nombreux scientifiques dans leurs applications géophysiques. La mise à disposition fréquente de produits toujours plus précis pour les orbites et horloges des satellites par l'IGS (*International GNSS Service*) a soutenu le PPP jusqu'à rendre cette technique applicable en mode cinématique

et quasi-temps réel. Cette technique est devenue incontournable pour le suivi des glaces (King et al, 2003) ou la déformation des volcans (Larson et al, 2001), où les méthodes différentielles imposent des bases se trouvant parfois très éloignées du ou des mobiles. A partir des années 2000, des services commerciaux qui proposaient déjà des systèmes d'augmentation GPS différentiels ont complété leurs offres avec des solutions PPP temps réel principalement dans l'agriculture pour guider et autoguides les machines agricoles (services Omnistar XP et G2 et Starfire SF2 par exemple) mais aussi les services Starfix de Fugro et C-Nav de C&C Technology utilisés dans l'exploration et la production d'hydrocarbures. Enfin, très récemment, l'IGS a poursuivi son effort vers le PPP en mettant en place le service RTS (*Real Time - IGS*) qui délivre en temps réel des produits formatés précis d'orbites et horloges (<http://www.rtgs.net>) qui favorisent le développement d'applications PPP en temps réel.

Principe

■ Généralités

Dans le cadre du positionnement par GNSS, plusieurs types de mesures rentrent en œuvre mais on utilise essentiellement les mesures de pseudo-distance (R) et de déphasage (ϕ). Les mesures de pseudo-distance sont réalisées sur les codes envoyés

■ MOTS-CLÉS

Positionnement - Géolocalisation - PPP - Précis - Différentiel - Post traitement - Temps réel - GNSS - ITRF - ETRS - RGF93 Différentiel - Post traitement - Temps réel - GNSS - ITRF - ETRS - RGF93

par le satellite et permettent un positionnement d'une précision comprise entre 5 et 10 m à l'aide d'un seul récepteur. Il s'agit de la technique dite de SPP (*Single Point Positioning*). Ce type de positionnement s'apparente fortement au PPP mais n'atteint pas son niveau de précision car les mesures de pseudo-distance sur le code présentent un bruit de mesure de l'ordre du mètre.

La mesure de déphasage ϕ_i^j (en cycles) est convertie en unité de longueur par multiplication par la longueur d'onde. Sa modélisation simplifiée, pour un récepteur i et un satellite j est la suivante :

$$\Phi_i^j = \lambda \phi_i^j = \rho_i^j + c(dt^j - dt_i) - \lambda N_i^j + \rho_i^{j,tropo} - \rho_i^{j,iono}$$

Avec :

Φ_i^j : observation de pseudodistance (en m) entre satellite j et récepteur i
 ρ_i^j : distance géométrique entre le récepteur i et le satellite j
 dt^j : décalage horloge satellite par rapport au temps GPS
 dt_i : décalage horloge récepteur par rapport au temps GPS
 $\rho_i^{j,iono}$: correction de distance due à la traversée de l'ionosphère
 $\rho_i^{j,tropo}$: correction de distance due à la traversée de la troposphère
 N_i^j : ambiguïté entière entre satellite j et récepteur i

L'utilisation combinée des mesures de pseudo-distance et de déphasage permet de réaliser un positionnement précis à condition de lever le problème d'ambiguïté (N), paramètre qui est par définition entier. En effet, avec la mesure de déphasage les récepteurs GNSS mesurent précisément les variations de la distance entre le satellite et le récepteur mais ce dernier ignore le nombre entier de cycles initial que le signal a parcouru entre le satellite et le récepteur. L'estimation de ce paramètre est donc fondamentale pour se positionner à l'échelle du centimètre. Cependant, déterminer la valeur exacte des ambiguïtés entières impose une connaissance précise de la modélisation des erreurs de mesure. Le *tableau 1* résume les principaux termes de la modélisation, leur ordre de grandeur ainsi que les solutions pour les prendre en compte dans les traitements GNSS.



	Erreur	Ordre de grandeur	Solution
Satellite	Orbites	1 m en temps réel 2.5 cm en temps différé	Produits IGS
	Horloges	5 ns en temps réel 0.2 ns en temps différé	Produits IGS
	Effet relativiste	[0.15 – 0.45] m	Modèle
	Centre de phase	3 m et variations de +/- 5 mm	IGS - Fichier ANTEX de calibration
	Phase Wind-up	[2 – 4] cm	Modèle
Propagation	Troposphère	2.3 m au zénith	Modélisation et estimation
	Ionosphère	14 m au zénith	Produits externes ou combinaison linéaire
Récepteur	Centre de phase	Jusque 20 cm et variations de +/- 10 mm	IGS - Fichier ANTEX de calibration
	Marée solide	12 cm en vertical	Modèle (IERS 2010)
	Marée polaire	2.5 cm en vertical	Modèle (IERS 2010)
	Surcharge océanique	5 cm en vertical	Modèle (IERS 2010)
	Rotation de la Terre	3 cm	Modèle (IERS 2010)

Tableau 1. Principaux termes de la modélisation des mesures GNSS, ordre de grandeur et méthodes de prise en compte dans les traitements GNSS. A noter que plus un satellite sera bas sur l’horizon, plus la quantité de signal traversant l’atmosphère sera importante.

■ Approche différentielle

Le positionnement différentiel est une technique qui permet de s’affranchir d’une connaissance précise de chaque terme d’erreur. En appliquant le principe des doubles différences à une paire de satellites j, k et une paire de récepteurs référence et mobile, certains termes de la modélisation sont réduits voire éliminés. Ceci permet alors d’"isoler" les ambiguïtés et de les résoudre à des valeurs entières :

$$\Delta \nabla \phi_{ref, mob}^{j,k} = \Delta \nabla \rho_{ref, mob}^{j,k} + \lambda \Delta \nabla N_{mob, ref}^{j,k} + \Delta \nabla \rho_{ref, mob}^{j,k,iono} + \Delta \nabla \rho_{ref, mob}^{j,k,tropo}$$

Ce procédé implique d’abord la réalisation de simples différences, c’est-à-dire la différence entre les observations communes à une base et un mobile sur un même satellite. Cette première différence permet l’élimination des erreurs liées à la dérive de l’horloge du satellite et une forte réduction des erreurs atmosphériques et géométriques, inversement proportionnelles à la longueur de la ligne de base (distance base-mobile). Puis, la différence de ces simples différences réalisées sur deux satellites différents réduit les erreurs liées aux antennes et récepteurs, ce qui

permet alors d’isoler les ambiguïtés (ici des ambiguïtés de doubles différences) et de les résoudre en même temps que les positions du mobile après avoir modélisé (ligne de base longue) ou négligé (ligne de base courte) les doubles différences d’allongement ionosphérique et troposphérique. Les méthodes GNSS différentielles pour la topographie impliquent systématiquement l’utilisation d’au moins deux récepteurs relativement proches afin que les erreurs d’allongements atmosphériques des signaux GNSS lors de la traversée de l’atmosphère s’annulent par doubles différences. En résumé, pour bénéficier de la précision des mesures de déphasage, la résolution des ambiguïtés qui s’en trouve induite impose de réaliser un positionnement différentiel entre une base et un mobile. Cependant, il est possible de profiter des mesures de déphasage et d’obtenir un positionnement précis en ne mettant en œuvre qu’un seul récepteur, c’est la méthode PPP (*Precise Point Positioning* ou Positionnement Ponctuel Précis).

■ Approche zéro différence

Dans le cas du PPP, on ne procède à aucune différence des mesures. On

parle aussi de positionnement zéro-différence. Cette technique impose que toutes les erreurs affectant le positionnement par méthodes GNSS qui s’éliminaient par différence soient prises en compte de manière optimale, soit par l’utilisation de produits externes, soit par modélisation. La technique PPP est alors dite de type "SSR" pour "*State Space Representation*", soit littéralement "Représentation des paramètres d’état du système" par opposition à l’approche différentielle dite "OSR" pour "*Observation Space Representation*" consistant à prendre en compte sur la base la résultante globale de toutes ces erreurs dans le "champ ou espace des observations" sans être capable de les dissocier, avant de les appliquer au mobile.

Erreurs liées aux satellites

Pour un traitement PPP en temps différé, plusieurs produits d’orbites des satellites sont disponibles en ligne sur le site Internet de l’IGS (<http://igs.csb.jpl.nasa.gov/>). Ces produits sont issus d’une combinaison des orbites calculées par plusieurs centres d’analyse de l’IGS permettant de disposer des valeurs les plus fiables et les plus précises existantes. Les produits de meilleure qualité (produits finaux) atteignent des précisions centimétriques pour un échantillonnage de 900 s. Cependant, ces produits sont diffusés avec une latence minimum de 12 jours. Les produits diffusés les plus rapidement sont les produits ultra-rapides diffusés avec une latence minimum de 3 h et une précision de 5 cm.

On notera que le PPP ne s’affranchit pas complètement des méthodes GNSS différentielles puisque certains centres d’analyses estiment les paramètres orbitaux des satellites en utilisant des mesures de doubles différences.

Pour les décalages d’horloge satellite, la qualité et la fréquence de ces décalages sont cruciaux dans la technique PPP puisqu’ils ne s’éliminent plus par différence. Les décalages d’horloge ultra-rapides de l’IGS ont une précision de 0.1 ns et sont échantillonnés à 900 s. Pour les applications en temps différé, on peut récupérer des décalages d’horloge échantillonnés à 30 s depuis la





semaine GPS 1406 (17/12/2006) mais avec une latence de 12 jours minimum. Pour toutes les applications PPP en temps réel, la qualité, l'échantillonnage et la latence devront être optimales. Pour les décalages et les variations du centre de phase de l'antenne satellite, on utilise le fichier ANTEX de l'IGS (igs08.atx) qui contient les valeurs calibrées absolues de ces paramètres.

Erreurs liées à la traversée de l'atmosphère

Ionosphère : en l'absence de modèle ionosphérique précis permettant de corriger les mesures, la combinaison des mesures réalisées sur les deux fréquences permet d'obtenir une mesure dite lono-Free et de réaliser un positionnement de qualité. Cette méthode est applicable en temps différé comme en temps réel. Cependant, en temps réel et en présence d'un récepteur mono-fréquence, l'utilisation du modèle ionosphérique radiodiffusé avec les orbites ne permet pas d'obtenir un positionnement centimétrique. Une source de correction ionosphérique plus précise doit être utilisée. Les cartes ionosphériques globales produites par l'IGS ne peuvent être utilisées qu'en temps différé mais elles permettent d'atteindre des précisions de l'ordre de 10 cm en planimétrie et 40 cm en altimétrie (Choy et al, 2009).

Troposphère : les logiciels utilisent des modèles évolués pour la partie hydros-tatique, qui est alors corrigée *a priori*. Cependant, la partie humide de la troposphère étant difficilement modélisable car très variable dans le temps et dans l'espace, elle est considérée comme un paramètre supplémentaire à estimer.

Erreurs liées au récepteur

L'erreur dominante au niveau du récepteur est son décalage d'horloge. Etant difficilement prédictible, elle est estimée. Pour les erreurs d'antenne, on récupère les décalages et les variations de centre de phase absolues des antennes existantes dans le fichier ANTEX de l'IGS. Enfin, il faut tenir compte des mouvements naturels du mobile liés aux phénomènes de marées et à leurs effets qui peuvent représenter plusieurs centimètres d'amplitude au cours d'une journée.

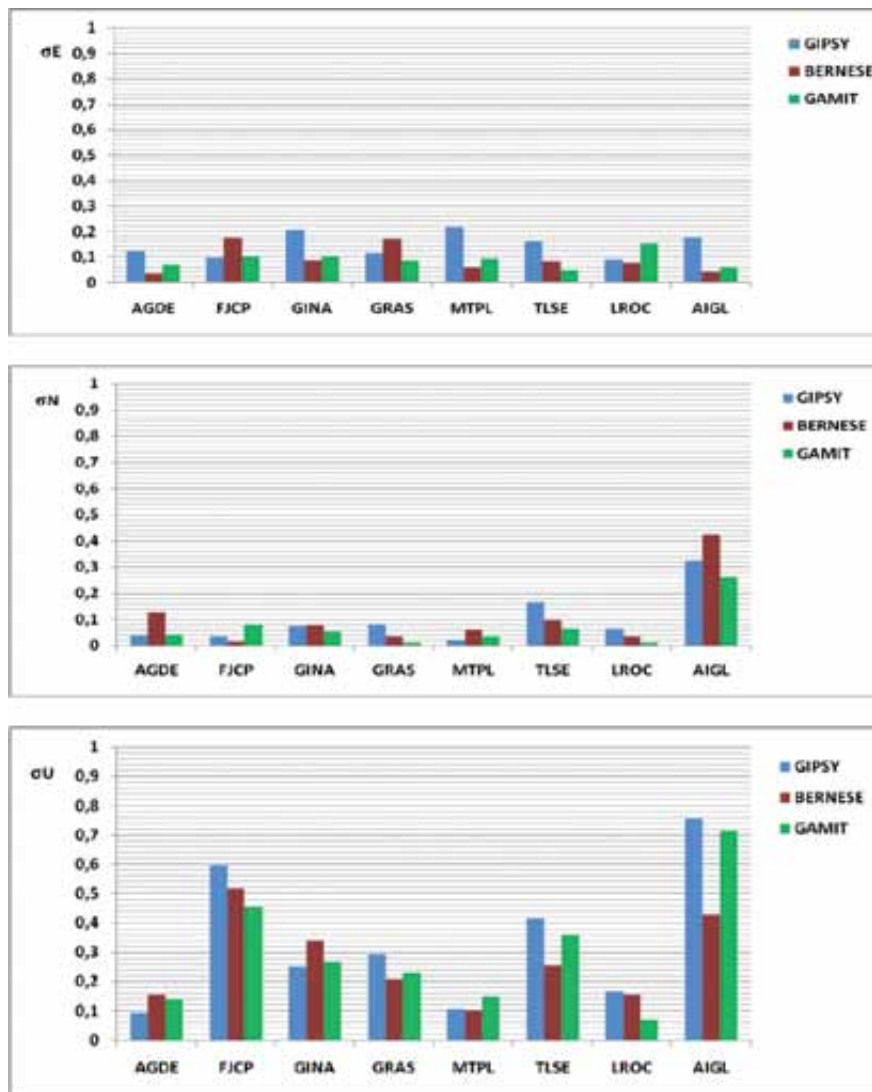


Figure 1. Répétabilités sur les composantes Est, Nord et hauteur en centimètres obtenues sur l'année 2008 avec les logiciels GIPSY (PPP), BERNESE et GAMIT (méthodes différentielles).

En pratique, les logiciels utilisent les modèles recommandés dans les conventions internationales de l'IERS (*International Earth Rotation Service*, <http://www.iers.org>).

Une fois que tous ces termes d'erreurs ont été pris en compte, la position, la dérive de l'horloge du récepteur, les retards troposphériques résiduels et les ambiguïtés peuvent être estimés. Les logiciels de recherche qui furent les premiers à mettre en œuvre des traitements PPP en temps différé se distinguent les uns des autres par leur manière d'estimer le décalage d'horloge du récepteur et les biais troposphériques résiduels. Le principe de leurs estimations repose sur l'utilisation de contraintes temporelles. Une méthode classique intégrant de telles

contraintes est le filtre de Kalman. Les ambiguïtés sont quant à elles estimées dans un premier temps comme des réels et éventuellement fixées à des valeurs entières dans un second temps par des méthodes sur lesquelles nous reviendrons plus loin.

■ Comparaison en post-traitement des performances du PPP avec les méthodes différentielles

Huit stations du RGP ont été traitées en PPP par session de 24 h sur l'année 2008 avec le logiciel GIPSY/OASIS du JPL lors d'un stage de Master à l'ESGT (Sahli, 2009). Les répétabilités de ces stations ont été comparées à celles obtenues avec des logiciels scientifiques utilisant les doubles différences,



BERNESE (Hugentobler et al, 2007) et GAMIT (Herring et al, 2010), pour des lignes de base de l'ordre de 1 000 km maximum. Les résultats sont présentés sur la *figure 1*. Notons qu'ici les traitements PPP ont résolu les ambiguïtés à des valeurs réelles tandis que les traitements différentiels les ont résolues à des valeurs entières.

Les résultats montrent la qualité comparable du PPP (GIPSY) par rapport aux méthodes différentielles (BERNESE et GAMIT) avec des sessions de 24 h. Même si l'on observe des résultats légèrement meilleurs avec le logiciel GAMIT, les valeurs de répétabilité en PPP restent inférieures à 4 mm en planimétrie et inférieures à 8 mm en altimétrie.

Ces résultats illustrent la qualité reconnue de la technique PPP depuis plus d'une dizaine d'années en post-traitement avec des durées d'observation supérieures à 12 h. De nombreux articles publiés dans des revues internationales ont utilisé cette méthode alternative pour des applications géodynamiques notamment lorsque la mise en œuvre d'un calcul réseau s'avérait délicate lorsque les lignes de bases sont très grandes.

■ Résolution des ambiguïtés entières en PPP

Les progrès permanents de la communauté géodésique internationale permettent aujourd'hui de disposer de produits géodésiques (orbites, horloges, biais d'antenne, systèmes de référence...) d'une qualité remarquable. Le raffinement de ces produits a ainsi augmenté notre connaissance de la modélisation des mesures GNSS, si bien que la fixation entière des ambiguïtés zéro-différence est devenue réalisable ces dernières années.

La résolution entière (fixation à des valeurs entières) avec zéro-différence est une tâche difficile car des biais électroniques satellites et récepteurs affectent les mesures de déphasage. Avec l'approche différentielle ces biais électroniques s'éliminent lors de la formation des doubles-différences rendant la résolution entière des ambiguïtés possible. En zéro-différence, la méconnaissance de ces délais conduit à une résolution flottante (fixation à des

valeurs réelles) des ambiguïtés. Pour résoudre les ambiguïtés entières, il est donc nécessaire de s'affranchir de ces biais. Plusieurs méthodes permettant la fixation des ambiguïtés entières zéro-différence en temps différé puis en temps réel sont apparues depuis, faisant progresser considérablement la technique PPP (la technique PPP avec ambiguïtés entières est appelée *Integer PPP* (IPPP)). Ces progrès expliquent le renouveau de la technique et son apparition dans le champ de la topographie car ils améliorent aussi bien la précision que les délais pour y parvenir.

Les méthodes de résolution des ambiguïtés entières sont résumées dans la thèse de Shi (2012). Il existe des méthodes qui utilisent les ambiguïtés réelles estimées pour les corriger ensuite : certaines sont basées sur des simples différences sur satellite (Ge et al, 2006 ; Geng et al, 2009) et d'autres reforment des doubles différences à partir des observations non différenciées de l'utilisateur et des observations non différenciées issues d'un réseau et fournies à l'utilisateur (Bertiger et al, 2010). Une autre méthode a été mise au point par les équipes du CNES (Centre National d'Etudes Spatiales ; Laurichesse et al, 2009). Ici, la résolution des ambiguïtés entière zéro-différence est rendue possible grâce à 1) la connaissance des biais électroniques satellites et 2) l'utilisation d'horloges satellites cohérentes avec la nature entière des ambiguïtés. Ces horloges sont calculées après estimation de ces biais et simultanément à la résolution des ambiguïtés entières zéro-différence d'un réseau global. Ces deux produits sont diffusés périodiquement (www.igsac-cnes.cls.fr). D'un point de vue utilisateur, le logiciel GINS du CNES permet d'utiliser ces deux produits pour réaliser un positionnement en mode IPPP, en

temps différé comme en temps réel. Un démonstrateur est consultable en ligne (www.ppp-wizard.fr).

■ Avantages et inconvénients du PPP

Cette technique PPP présente des avantages opérationnels pour les utilisateurs par rapport aux techniques différentielles :

- Mise en place d'une station de base inutile (pas d'observations simultanées, pas besoin de récupérer les données de la base).
- Positionnement directement dans le système de référence ITRF.
- Aucun problème lié à la stabilité des stations de base et à leur géoréférencement.

Néanmoins cette technique possède des inconvénients importants :

- Temps de convergence des ambiguïtés important, indispensable pour obtenir un positionnement de l'ordre du centimètre.
- Récepteurs bifréquences indispensables pour les applications sub-décimétriques afin de corriger les délais ionosphériques.
- Conversion des coordonnées dans la référence nationale.

PPP en temps différé (PP-PPP pour Post Processing PPP)

Au-delà des progrès techniques et des avantages opérationnels, une autre raison explique le renouveau du PPP et plus particulièrement son arrivée dans le monde de la topographie : la mise à disposition gratuite sur Internet d'outils de positionnement PPP. Auparavant, seuls quelques logiciels de recherche permettaient la mise en œuvre du PPP ce qui confinait cette technique au seul champ de la recherche. A présent, un



Figure 2. Fonctionnement des services Web PPP.

(source : <http://webppp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/index.php>)



utilisateur peut envoyer ses observations au format RINEX par courriel et recevoir quelques minutes plus tard les coordonnées précises de sa station (cf. figure 2). Plusieurs services de ce type existent :

- APPS (<http://apps.gdgps.net/>) : service basé sur le logiciel GIPSY du JPL.
- CSRS-PPP (<http://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php>) : service des Ressources Naturelles du Canada (NRCAN, Mireault et al, 2007).
- GAPS (<http://gaps.gge.unb.ca/>) : service de l'Université du New Brunswick (UNB, Leandro et al, 2007).
- Magic-GNSS (<http://magicgnss.gmv.com/ppp>) : service proposé par le groupe GMV (Piriz et al, 2008).

• Trimble Center Point RTX Post Processing (<http://www.trimblertx.com/Home.aspx>) : solution de positionnement proposé par Trimble en post-traitement (Doucet et al, 2011).

Par ailleurs, le site canadien, PPP online (<http://gge.unb.ca/Resources/PPP/SubmitData.html>) permet de recevoir les solutions des quatre services PPP : APPS, CSRS-PPP, GAPS et MagicGNSS. Leurs conditions d'utilisation étant différentes, il peut arriver que seuls certains de ces logiciels renvoient une solution.

Rappelons qu'il existe également des services Web proposant un calcul GNSS basé sur le positionnement différentiel à partir d'un réseau international

de stations. On peut notamment citer le service australien AUSPOS (<http://www.ga.gov.au/earth-monitoring/geodesy/auspos-online-gps-processing-service.html>), le service SCOUT proposé par la SOPAC (Scripps Orbit and Permanent Array Center) aux Etats – Unis (<http://sopac.ucsd.edu/cgi-bin/SCOUT.cgi>) et le service OPUS (*Online Positioning User Service*) proposé par le NGS (*National Geodetic Survey* des Etats-Unis) qui est basé sur des stations de références CORS (*Continuously Operating Reference Stations*) localisées aux Etats-Unis, Amérique Centrale, Antilles, Bénin, Ethiopie, Irak et Afghanistan, <http://www.ngs.noaa.gov/OPUS/> et http://www.ngs.noaa.gov/CORS_Map/.

Afin d'illustrer la qualité typique des solutions PPP des services Web, les coordonnées de la station permanente MAN2 ont été déterminées à partir du site CSRS-PPP pour différentes durées d'observation (cf. figure 3).

Sur la figure 3, on observe une dégradation significative de la qualité du positionnement de la station MAN2 lorsque la durée d'observation est inférieure à 40 min. Toutefois cette dégradation reste inférieure à 10 cm avec seulement 10 min d'observation. Des travaux plus complets de Grinter et Janssen (2012) ont montré, à l'aide d'une vingtaine de stations, que le PPP en temps différé via le service CSRS-PPP atteint une précision de 2.5 cm en planimétrie et 3.5 cm sur la composante verticale avec des durées de 4 h d'observation. Ils ont également montré que le gain de précision entre des durées d'observation de 12 h et de 24 h n'était pas significatif.

On a constaté dans l'exemple précédent que l'on obtenait une qualité utile pour la topographie à partir d'au moins 40 min d'observations. La figure 4 illustre les écarts de coordonnées entre les déterminations du service Web CSRS-PPP avec des sessions horaires et les coordonnées ITRF de cinq stations IGS du RGP.

On constate sur la figure 4 que les écarts entre les résultats du service Web CSRS-PPP et les coordonnées ITRF publiées de cinq stations IGS françaises sont inférieurs à 5 cm sur les

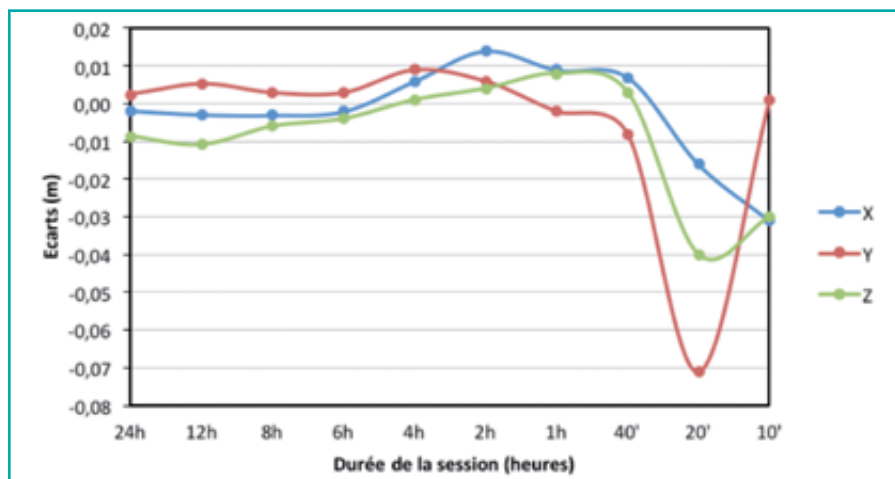


Figure 3. Écarts en mètres entre les coordonnées cartésiennes X, Y et Z de la station MAN2 calculées par l'IGN (solution IGS08 cumulée) et les coordonnées ITRF2008 obtenues par le service Web CSRS-PPP le 21 juin 2013 pour des durées d'observations variables.

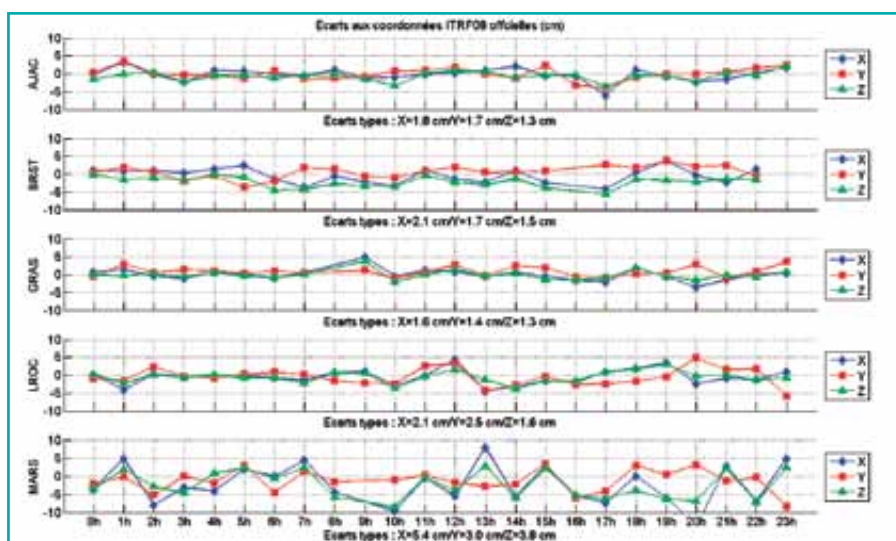


Figure 4. Écarts en centimètres entre les coordonnées cartésiennes X, Y et Z des stations IGS du RGP (AJAC, BRST, GRAS, LROC, MARS) calculées par l'IGN (solution ITRF2008) et les coordonnées ITRF2008 fournies par le service Web CSRS-PPP. Réalisé au cours de la journée du 21 juin 2013 avec des durées d'observations de 1 h.



trois composantes sauf pour la station de Marseille (MARS) qui présente des écarts plus importants mais inférieurs à 10 cm. Ce résultat illustre la capacité des services Web PPP à produire des résultats de qualité avec seulement une heure d'observation. Néanmoins, il ne s'agit que d'un exemple sur une journée qui ne permet pas une évaluation exacte du PPP en temps différé avec une seule heure d'observation.

D'autres travaux similaires comme ceux d'Ebner et Featherstone (2008) en Australie ont montré des différences non significatives entre les résultats CSRS-PPP et des calculs différentiels avec le logiciel BERNESE pour des durées d'observation supérieures à 24 h. Ces travaux confirment la capacité du PPP et plus particulièrement celle des solutions online à produire des résultats précis de positionnement à condition de respecter des temps d'observation suffisants.

Les comparaisons précédentes ont été calculées à partir de coordonnées en ITRF2008 car les résultats renvoyés par le service Web CSRS-PPP ainsi que par les autres sites sont la plupart du temps dans ce système de référence. En effet, il s'agit du système des orbites fixées dans le calcul. L'utilisateur topographe en Europe doit par conséquent convertir ces coordonnées en ETRS89 avec la transformation appropriée, le RGF93 correspondant à la réalisation française du système européen ETRS89. Ce passage est très bien expliqué dans un mémo technique (Boucher and Altamimi, 2011) et le site de l'EPN (EUREF Permanent Network) permet de le réaliser en ligne (cf. figure 5). Quelques précautions s'avèrent nécessaires lors de l'utilisation de cet outil, on doit renseigner :

- Le repère de référence (*Frame*) de départ. Actuellement il s'agit de l'ITRF2008 si les coordonnées sont issues d'un calcul récent d'un service Web PPP.
- L'époque des coordonnées de départ qui correspondra souvent à l'époque des données sauf si les coordonnées ont déjà subi une transformation.
- Le repère de référence (*Frame*) d'arrivée. On portera attention au fait que l'on doit utiliser la réalisation ETRF2000

de l'ETRS89. En effet de nombreuses réalisations (repères) d'un même système sont disponibles car la détermination des coordonnées de station (réalisation) peut être obtenue avec plus ou moins de durée d'observation, plus ou moins de stations et des techniques de calculs et de combinaison différente. Il est préconisé d'utiliser la réalisation ETRF2000 pour l'ETRS89, d'autant plus que le RGF93 est aujourd'hui cohérent avec cette réalisation.

- L'époque des coordonnées finales qui correspondra à l'époque des données. Dans ce cas le calcul utilisera un modèle de vitesses européennes. On peut raffiner le calcul si l'on a connaissance de vitesses estimées par ailleurs pour ce point. On peut alors les saisir en précisant l'époque 2009,0 pour les coordonnées finales (époque exacte de la réalisation du RGF93).

En plus de ces solutions en ligne et des logiciels de recherche, il existe des logiciels commerciaux comme Grafnav qui permettent également le traitement différentiel. Par ailleurs il existe de nombreux programmes développés par les universités à travers le monde et surtout une librairie ouverte très connue et simple d'utilisation : RTKLib (<http://gpspp.sakura.ne.jp/rtklib/rtklib.htm>), y compris pour le calcul différentiel. Le PPP en post-traitement peut donc

être considéré comme une technique très pertinente que tout bon topographe se doit désormais de considérer.

PPP en temps réel (PPP-RTK ou RT-PPP)

Les techniques temps réel précises que l'on peut utiliser en topographie sont des techniques différentielles qui mettent en œuvre une ou plusieurs stations de référence. Selon les méthodes, ces stations de référence transmettent leurs observations, leurs corrections ou un sous-produit issu de ces corrections au mobile de l'utilisateur. Les moyens de transmission peuvent être par VHF/UHF, par GSM, par GPRS et même par satellite géostationnaire. Ces méthodes, RTK et NRTK, ont précédemment été décrites dans cette revue (Legros et al, 2013).

Depuis peu, la technique PPP émerge également dans le positionnement précis en temps réel avec une qualité proche des 10 cm, voire meilleure pour certaines solutions. Comme en temps différé, le récepteur doit posséder les corrections d'orbites et d'horloge suffisamment précises des satellites (mieux que 10 cm, pour les orbites et inférieur à 1 ns pour les horloges). Un service temps réel PPP doit minimiser le temps entre les observations réalisées dans le réseau (transférées au centre de

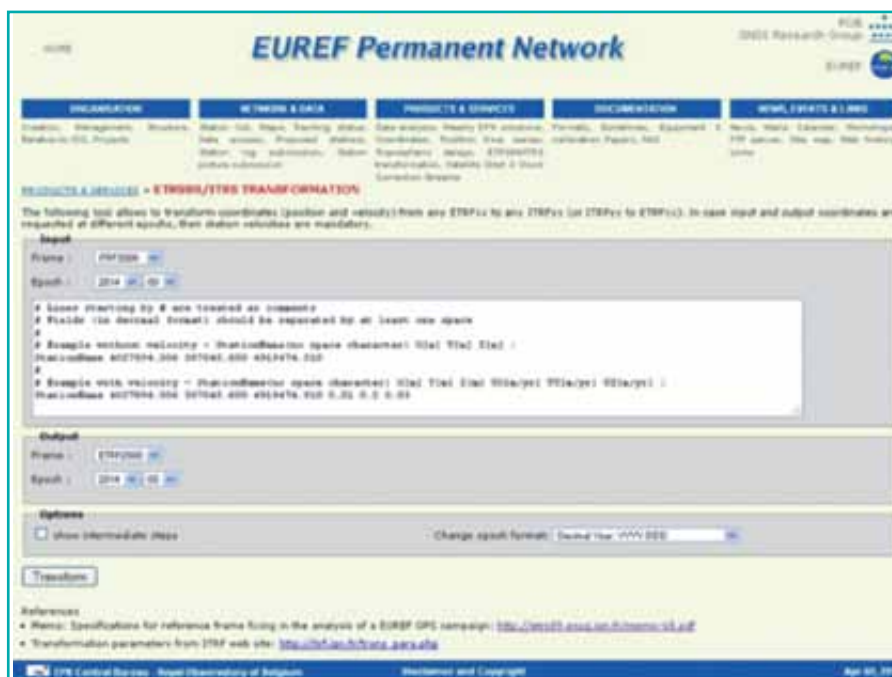


Figure 5. Outil en ligne de l'EPN pour la transformation de coordonnées (http://www.epncb.oma.be/_productservices/coord_trans).

calcul du service pour l'estimation des corrections d'orbites et d'horloges des satellites) et la mise à disposition de ces produits aux utilisateurs : en moins de quelques secondes.

Les sociétés commerciales qui proposaient des solutions d'augmentation du GPS basées sur la diffusion de corrections par satellites géostationnaires ont élargi leur offre initialement DGPS grâce au PPP. Différentes sociétés développent et commercialisent des services PPP-RTK. On peut citer entre autres les services :

- OMNISTAR XP et G2 (<http://www.omnistar.com/>).
- C-Nav (1 et 2) de C&C Technology (<http://www.cnavgss.com/site.php>).
- Starfire de Navcom (<http://www.navcomtech.com>).
- Starfix de Fugro (<http://www.starfix.com>).
- PP-RTK de Nexteq Navigation (<http://www.nexteqnav.com>).
- Trimble CenterPoint RTX (<https://www.trimble.com/positioning-services/centerpoint-RTX.aspx>).
- Apex2 et Ultra2 de Veripos (<http://www.veripos.com>).

Ces services sont basés sur des réseaux mondiaux de stations permanentes dont ils peuvent être propriétaires ou non. Les précisions annoncées sont de l'ordre du décimètre environ et les temps de convergence sont variables : entre 30 et 60 min. Pour leurs calculs PPP, ils utilisent les orbites et horloges précises calculées par des centres comme le JPL mais peuvent également selon les cas les calculer eux-mêmes à partir de leur propre réseau de stations. La diffusion de ces produits et d'autres corrections additionnelles (augmentation régionale constituée de modèles ionosphérique et troposphérique) s'effectue par Internet via NTRIP ou la plupart du temps par satellite géostationnaire. Il est nécessaire d'acquérir les récepteurs spécifiques pouvant fonctionner avec ces services.

Par ailleurs, depuis 2012, l'IGS a mis en place un service temps réel après avoir mené un projet pilote pendant plusieurs années (<http://rtigs.igs.org>). Ce service assure la diffusion des produits nécessaires au PPP dans un format standardisé (RTCM) et rend

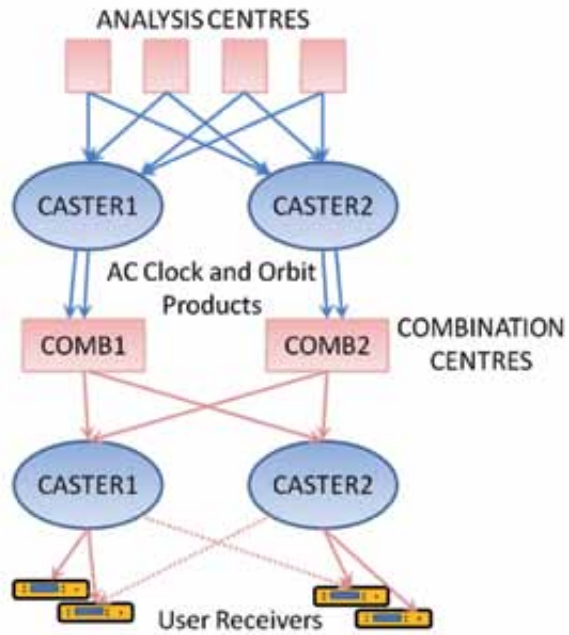


Figure 6. Organisation simplifiée du service temps réel de l'IGS.

possible un positionnement zéro-différence. Huit centres d'analyse calculent des corrections d'orbites et d'horloge (à appliquer aux éphémérides radio-diffusées) à l'aide de données provenant d'un réseau global de stations permanentes. Ces produits sont alors combinés par trois centres : le BKG (*Bundesamt für Kartographie und Geodäsie*), l'ESA (*European Space Agency*) et le NRCAN. Trois principaux produits sont ensuite diffusés auprès des utilisateurs par différents NTRIP Caster (cf. figure 6) : IGS01/IGC01, IGS02 et IGS03. Ils diffèrent par la méthode de combinaison mais ils présentent dans tous les cas des précisions inférieures à 5 cm pour les corrections d'orbites et inférieures à 0.5 ns pour les corrections d'horloges. D'un point de vue utilisateur, trois flux sont nécessaires au positionnement zéro-différence :

- le flux des observations d'un récepteur,
- le flux des éphémérides des satellites,
- le flux des corrections d'orbites et d'horloges (par rapport aux éphémérides).

Le logiciel BNC du BKG (téléchargeable à l'adresse <http://igs.bkg.bund.de/ntrip/download>) permet de rapatrier ces flux et de calculer une solution de positionnement PPP en temps réel. Une table des sources pour les flux

de stations permanentes est visible à l'adresse igs-ip.net, port 2101. La table des sources de correction contient également le flux des éphémérides (RTCM3EPH).

Cependant, d'autres centres d'analyse comme le CNES diffusent d'autres produits permettant de fixer les ambiguïtés à des valeurs entières. Le CNES propose une version modifiée du logiciel BNC permettant de réaliser un positionnement avec ambiguïtés entières (www.ppp-wizard.net). Cette version utilise un flux RTCM spécifique de corrections contenant les corrections d'orbites, les corrections d'horloges "entières" et les biais électroniques de phase, indispensable pour déterminer les valeurs entières des ambiguïtés. Le site Internet de ce service permet de visualiser les performances du positionnement sur quelques stations IGS.

Pour illustrer les performances dans des conditions opérationnelles, une station a été déployée sur un point RBF durant 90 min (cf. figure 7). Les observations de cette station ont été récupérées par BNC en utilisant le protocole TCP. En même temps, BNC récupérait les éphémérides et le flux de corrections CLK9B généré par le CNES. La figure 8 illustre les performances obtenues.

Le logiciel BNC en mode "Initialisation" fixe les ambiguïtés entières au bout

de 1 h. Une fois ces ambiguïtés fixées, l'algorithme passe en régime cinématique. Les répétabilités obtenues en mode cinématique ont été de 0.4 cm, 1.0 cm et 4.9 cm sur les composantes Est, Nord et Hauteur respectivement.

Futur

A travers les services récents proposés par les sociétés commerciales citées précédemment, on peut suivre l'évolution de cette technique en temps réel. Ainsi Trimble proposait initialement une solution globale Trimble CenterPoint RTX pour un positionnement PPP temps réel en annonçant une précision de 4 cm pour un temps de convergence de 30 min. Récemment cette société propose pour des utilisateurs situés dans 4 états des USA un service local plus performant annoncé avec une durée de convergence de 1 min. Ce résultat est obtenu grâce à l'utilisation conjointe d'horloges et d'orbites



précises et de corrections supplémentaires liées à l'atmosphère obtenues via un réseau dense de stations (75 stations espacées de 120 km). Nul doute que ce type d'offre viendra compléter prochainement les méthodes de travail en réseau GNSS utilisées en topographie (Legros et al, 2013) d'autant que l'architecture existante des réseaux denses de



© GEODATA DIFFUSION

Figure 7. Antenne Trimble déployée sur un point RBF (à gauche) et récepteurs utilisés (à droite).

stations permanentes pour le NRTK s'y prête totalement.

Par ailleurs, l'utilisation des satellites Glonass peut s'avérer précieuse dans des zones masquées ou dans des situations avec une configuration géométrique médiocre des satellites. Des centres comme l'IAC et l'ESOC ont déjà fourni des produits d'horloge des satellites Glonass suffisamment précis (1.5 ns) mais leur échantillonnage, 5 min, impliquait une interpolation pour toutes les applications cinématiques. Il a été montré que l'ajout de Glonass améliorerait le temps de convergence à condition que cette interpolation soit inférieure à 30 s (Hesselbarth and Wanninger, 2008).

Conclusion

Les récentes évolutions du PPP (résolution des ambiguïtés, services Web, temps de convergence de plus en plus rapide en temps réel) et les futures évolutions de cette technique l'amènent sur le devant de la scène du positionnement par GNSS ces dernières années et en font une technique mature (Rizos et al, 2012). Néanmoins cette technique s'appuie sur les réseaux de stations permanentes car elle utilise des produits d'orbite et d'horloge issus des observations de ces réseaux. D'autre part la résolution des ambiguïtés en PPP passe par l'utilisation d'un réseau quelle que soit la méthode. Ceci permet la réduction du temps de convergence et les applications cinématiques et temps réel précises.

Dans le futur, il est probable que l'arrivée de la troisième fréquence

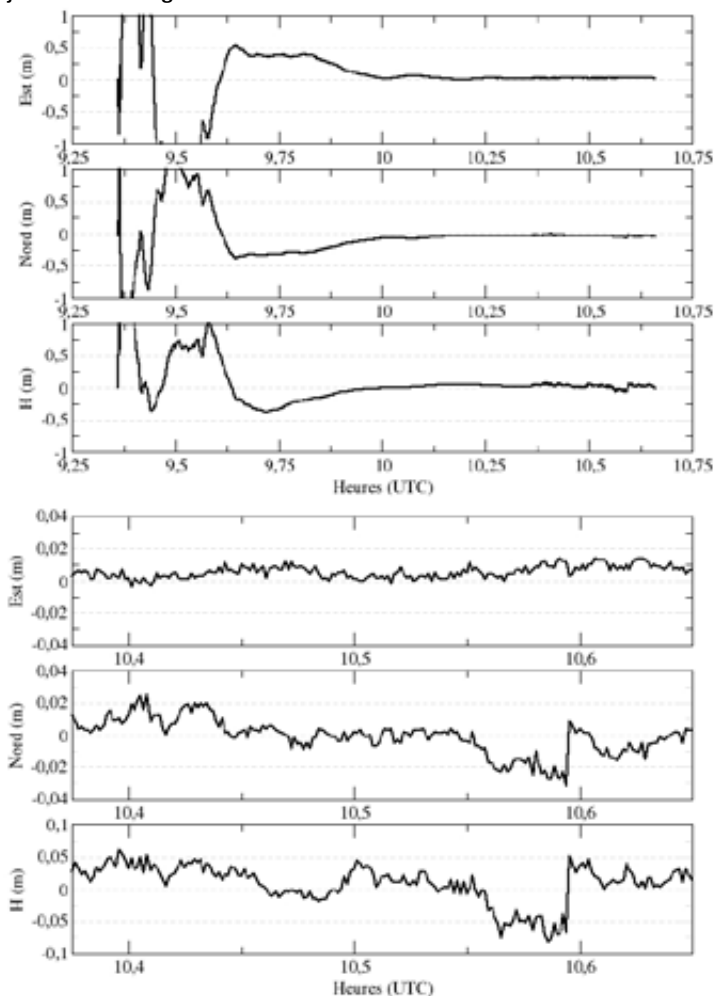


Figure 8. Composantes Est, Nord et Hauteur obtenues sur 90 min (en haut) et zoom sur les séries temporelles après résolution des ambiguïtés entières (en bas).



améliorera aussi ce temps de convergence mais seulement à condition que les quatre constellations soient pleinement opérables sur ces trois fréquences.

Finalement, le PPP en temps différé constitue déjà un outil supplémentaire pour les applications topographiques et il ne demande qu'à être un peu plus démocratisé. Le PPP temps réel trouvera peut-être sa place dans un futur proche en complément des techniques actuelles mais ne les remplacera pas dans la mesure où les infrastructures nécessaires sont très similaires. ●

Contacts

Laurent MOREL

Maître de conférences à l'ESGT
laurent.morel@esgt.cnam.fr

François FUND

Ingénieur système à GEODATA DIFFUSION
francois.fund@geoaction.eu

Romain LEGROS

Directeur Général de la société GEODATA
DIFFUSION
romain.legros@geoaction.eu

Stephane DURAND

Maître de conférences à l'ESGT
stephane.durand@esgt.cnam.fr

Bernard FLACELIÈRE

Ingénieur topographe EGEOPOS
bernard.flaceliere@orange.fr

Bibliographie

Bertiger W, Desai S.D., Haines B., Harvey N., Moore A.W. (2010). *Single receiver phase ambiguity resolution with GPS data*. J Geod 84(5):327-337.

Boucher C. and Z. Altamimi (2011). *Memo: Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign* (<http://etrs89.ensg.ign.fr/memo-8.pdf>).

Choy S.L. (2009). *An investigation into the accuracy of single frequency PPP*, Ph.D. Thesis, School of Mathematical and Geospatial Sciences, RMIT University, Melbourne, Australia.

Collins P. and S. Bisnath (2011). *Issues in ambiguity resolution for Precise Point Positioning*, Proc. ION GNSS 2011, Portland, Oregon, 19-23 September, 679-687.

Doucet K., Herwig M., Kipka A., Kreikenbohm P., Landau H., Leandro R., Moessmer M., Pagels C. (2011). *Introducing Ambiguity Resolution in Webhosted Global Multi-GNSS Precise*

Positioning with Trimble RTX-PP. Trimble TerraSat GmbH, Germany.

Ebner R. and W.E. Featherstone (2008). *How well can online GPS PPP post-processing services be used to establish geodetic survey control networks?* Journal of Applied Geodesy, 2(3), 149-157.

Ge M., Gendt G., Rothacher M., Shi C., Liu J. (2006). *Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with daily observations*, Journal of Geodesy, 82(7), 389-399.

Geng J., Meng X., Dodson A.H., Teferle F.N. (2009). *Integer ambiguity resolution in Precise Point Positioning: Method comparison*, Journal of Geodesy, 84(9), 569-581.

Grinter T., Janssen V. (2012). *Post-processed Precise Point Positioning: A viable alternative?* Proc. APAS2012, Wollongong, Australia, 19-21 March, 83-92 (e.g. accessible from http://www.lpi.nsw.gov.au/surveying/corsnet-nsw/education_and_research).

Herring T.A., R.W. King, S.C. McClusky (2010). *Reference manual for the GAMIT GPS software, release, 10.3.*, Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, Boston, U.S.A., 182 pp.

Hesselbarth A, Wanninger L. (2008). *Short-term stability of GNSS satellite clocks and its effects on Precise Point Positioning*, Proc. ION GNSS 2008, Savannah, Georgia, 16-19 September, 1855-1863.

Hugentobler U., Dach R., Fridez P., Meindl M. (2007). *Bernese GPS Software, Version 5.0*, Astronomical Institute, University of Bern.

King, M. and S. Aoki (2003). *Tidal observations on floating ice using a single GLP receiver*. G.R.L. (Geophysical Research Letters) 30 (3), 1138, doi:10.1029/2002GL016182.

Larson K.M., Cervelli P., Lisowski M., Miklius A., Segall P., and Owen S. (2001). *Volcano monitoring using the Global Positioning System: Filtering strategies*. Journal of Geophysical Research 106, NO. 0 (0), 1-12.

Laurichesse D., Mercier F., Berthias J.P., Broca P., Cerri L. (2009). *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.

Leandro R.F., Santos M.C., Langley R. B. (2007). *GAPS: The GPS Analysis and*

Positioning Software - A Brief Overview. Proc. ION GNSS 2007, 1807-1811.

Legros R., L. Morel, F. Viguier, F. Birot. (2013). *Méthodes de travail dans les réseaux GNSS*. Rapport de la commission Geopos du CNIG. Téléchargeable sur <http://geopos.netne.net/spip.php?rubrique55>.

Mireault Y., Tetreault P., Lahaye F., Heroux P., Kouba J. (2007). *"Online Precise Point Positioning"*. GPS World, pp. 59-64.

Piriz R., Mozo A., Navarro P., Rodriguez D. (2008). *"magicGNSS: Precise GNSS products out of the box."* Proceedings ION GNSS 2008, 1242-1251.

Rizos C., Janssen V., Roberts C. and Grinter T. (2012). *Precise Point Positioning: Is the Era of Differential GNSS Positioning drawing to an End ?* FIG Working Week. Rome, Italy.

Sahli M. (2009). *Analyse du traitement GPS du RENAG avec les logiciels BERNESE, GIPSY et la solution GAMIT*. Rapport de Projet Pluridisciplinaire. Mastère spécialisé Photogrammétrie, Positionnement et Mesures de Déformations (PPMD).

Shi J. (2012). *Precise Point Positioning Integer Ambiguity Resolution with Decoupled Clocks*. University of Calgary. Ph. Thesis.

Zumberge J.F., Hefflin M. B., Jefferson D.C., Watkins M.M., Webb F.H. (1997). *Precise Point Positioning for the Efficient and Robust Analysis of GPS Data from Large Networks*, J. Geophys. Res., Vol. 102, pp. 5005-5017.

ABSTRACT

Does PPP (Precise Point Positioning) reach maturity ? Geolocation using GNSS (Global Navigation Satellite Systems) is constantly in development through new infrastructure such as permanent networks, thanks to new constellations and new signals and also the implementation of new algorithms. This paper investigates the improvements accumulated that have recently allowed the PPP becoming a technology offering an advanced positioning accuracy at a centimeter level, both in post-processed and real-time modes. It is shown that is not a new technology but now PPP appears as an alternative to differential positioning. Finally the question is asked by the authors: how will PPP used in the near future?