

Les évolutions du PPP : l'apport d'une troisième fréquence pour réduire les temps de convergence

■ Denis LAURICHESSE

Le PPP est une technique de positionnement émergente qui possède de nombreux avantages. Parmi ceux-ci on pourra noter la facilité d'utilisation, le coût réduit de l'infrastructure réseau comparée à des techniques différentielles, la possibilité de n'utiliser qu'une liaison monodirectionnelle et à faible débit pour l'envoi des corrections. Un des défauts majeurs de la technique est la relative lenteur de convergence (environ 30 minutes dans le cas bi-fréquence). Nous montrons ici que, grâce à l'utilisation d'une représentation appropriée pour les corrections de biais (erreur systématique) de phases ainsi que grâce au traitement d'une troisième fréquence, il est possible de réduire ce temps à quelques minutes, dans le cas GPS.

■ MOTS-CLÉS

PPP, Résolution d'ambiguïtés Tri-fréquence

Introduction : Qu'est-ce que le PPP ?

L'acronyme PPP signifie "Precise Point Positioning" ou "Positionnement du Point Précis" en français. Bien que cette technique soit encore en développement, elle a évolué à un point où elle peut être considérée comme un outil viable parmi l'ensemble des techniques de positionnement par GNSS. De nombreux constructeurs de récepteurs proposent une option PPP et cette technique est aussi proposée par des services gratuits de positionnement en ligne.

L'utilisation du mot "précision", dans un contexte de positionnement GNSS, signifie en général obtenir une information de positionnement meilleure que celle proposée par l'utilisation de la mesure de code en mono-fréquence L1 C/A. Une amélioration typique peut ainsi être obtenue par l'utilisation des mesures de la fréquence L2 (pour GPS), ce qui permet de corriger de l'effet perturbateur de l'ionosphère, d'une amplitude de quelques mètres : c'est l'utilisation pour GPS du code P militaire. Les utilisateurs du GPS civil auront accès à un niveau de précision équivalent lorsqu'un nombre suffisant de satellites GPS transmet-

tant le signal civil L2 (L2C), seront en orbite. On pourra noter que le système Galiléo propose par construction trois fréquences civiles. Mais le PPP peut faire bien mieux que ça.

Le PPP propose en effet deux améliorations :

- La première consiste en l'utilisation d'une description précise des orbites et des horloges des satellites GNSS, beaucoup plus précises que celles définies dans le message de navigation. Ces données peuvent, par exemple, être fournies par le service GNSS International (IGS). Dans ce cas, elles sont obtenues grâce à un réseau mondial de stations et un certain nombre de centres de calculs d'orbites et d'horloges appelés centres d'analyses. Historiquement, ces données précises étaient utilisées par des récepteurs en post-traitement, bien que depuis quelques années ces mêmes produits sont disponibles en temps réel.
- La seconde consiste en l'utilisation de la mesure de phase (en plus de l'utilisation classique des mesures de code). La mesure de phase possède un bruit très faible (100 fois plus faible que la mesure de code). Le problème est que cette mesure est ambiguë par un entier multiple de cycle. Les algo-

ritmes de positionnement doivent résoudre cette ambiguïté et la fixer idéalement à sa valeur correcte entière. Malheureusement, il est difficile de le faire instantanément, et souvent de nombreuses époques sont nécessaires afin que la solution de positionnement converge à une précision suffisante, disons 10 centimètres.

Il est vrai qu'il existe d'autres techniques de positionnement précis comme le RTK (technique différentielle), où les données provenant d'une ou plusieurs stations de base sont combinées avec les données du récepteur à positionner. Cependant, la technique PPP, associée à un modèle très précis d'observables, s'affranchit complètement de la nécessité d'un accès direct à des stations de base.

Les chercheurs travaillent activement à réduire le temps de convergence du PPP, qui reste son point faible principal, et dans cet article, nous montrons une voie possible d'amélioration par l'utilisation d'une troisième fréquence.

Le PPP au CNES : le démonstrateur PPP-Wizard

■ Les ambiguïtés entières de phase non différenciées

La principale motivation au démarrage du projet de démonstrateur (en 2010) était de faire la promotion d'une technique développée au CNES, la technique des ambiguïtés entières de phase non différenciées. Cette technique permet d'atteindre (sous réserve de bonnes conditions de réception) un positionnement temps réel centimétrique pour les récepteurs bi-fréquence, soit un gain d'environ un ordre de grandeur par rapport aux techniques

PPP classiques. Le cadre de développement de ce démonstrateur PPP est scientifique *best-effort* (projet IGS temps réel). L'acronyme PPP-Wizard signifie "PPP With Integer and Zero-difference Ambiguity Resolution Demonstrator".

Le service IGS

Le service IGS (*International GNSS Service*) consiste en un regroupement de laboratoires, d'agences spatiales ou autres organisations, mettant à disposition différents moyens de navigation (stations de réception, calculs de trajectoire, etc.). La vocation de ce service est de fournir des produits de qualité dans un cadre scientifique. Les produits principaux mis à disposition par l'IGS sont les mesures d'un réseau mondial de stations (plus de 300 stations), ainsi que les trajectoires et les horloges des constellations GPS et Glonass, calculées en temps différé. En 2014, ce service a fêté ses 20 ans d'existence. Depuis quelques années, un projet pilote a émergé, le projet IGS Temps Réel. Ce projet vise à fournir aux utilisateurs les mesures des stations et les trajectoires des constellations GNSS en temps réel. Après une phase de test, le projet pilote est devenu un service à part entière de l'IGS en 2013 : L'IGS RTS (pour IGS *Real Time Service*).

Le protocole de diffusion RTCM

Afin de promouvoir les produits temps réel, l'IGS s'est rapidement tourné vers un protocole de diffusion des informations. Ce protocole suit le standard RTCM (*Radio Technical Commission for Maritime Services*), qui était à l'origine utilisé pour le GNSS différentiel maritime. De nouveaux messages ont été nécessaires pour les besoins des techniques PPP promues par l'IGS. La standardisation des messages pour le PPP est assurée par la société allemande Geo++, qui est à l'origine du concept.

La déclinaison de démonstrateur PPP

Le démonstrateur de positionnement précis PPP-Wizard est articulé autour de 3 composantes principales (voir figure 1).

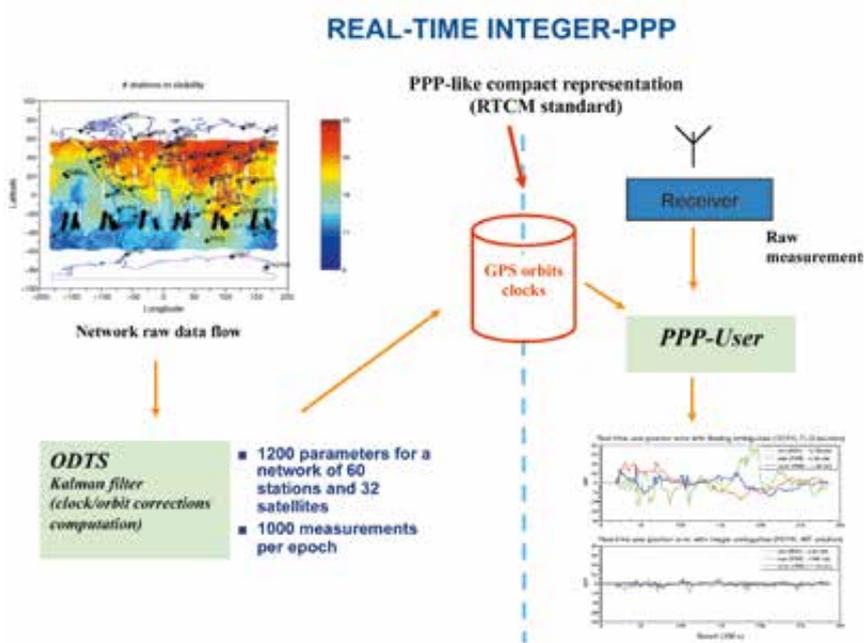


Figure 1. Les différents traitements du PPP

1. "Réseau ou ODS (*Orbit Determination and Time Synchronization*)" : calcul des corrections d'orbite et d'horloges et biais à transmettre à l'utilisateur : pour générer les corrections précises d'orbite et d'horloges, le démonstrateur s'appuie sur un réseau de stations, diffusant leurs mesures en temps réel. Le réseau IGS temps réel d'environ 60-70 stations est utilisé. Les mesures alimentent un filtre de Kalman qui se charge du calcul des corrections. Le filtre traite environ 1 000 mesures par constellation et par époque de 5 secondes.
2. "Protocoles" : les standards de communication de ces correc-

tions. Les données calculées doivent être transmises à l'utilisateur en temps réel : en effet, les corrections d'horloges ne sont pas extrapolables et doivent donc être rafraîchies à cadence rapide (toutes les 5 secondes), avec une latence faible (moins de 20 secondes). Pour ce faire, un nouveau protocole de transmission et des messages spécifiques (RTCM) ont dû être définis. Les corrections calculées par le CNES en temps réel sont diffusées librement à l'IGS au travers d'un caster (composant logiciel qui joue le rôle d'un relais de communication). Le tableau suivant représente la liste des différents messages

Table 1. Les différents messages PPP

Nature du paramètre	Message RTCM	Occurrence (sec)	Flux
GPS : orbites/horloges	1060	5	CLK91, CLK93
Glonass : orbites/horloges	1066	5	CLK91, CLK93
Galiléo : orbites/horloges	1243	5	CLK93
GPS : biais de code	1059	5	CLK91, CLK93
Glonass : biais de code	1065	5	CLK91, CLK93
Galiléo : biais de code	1242	5	CLK93
GPS : biais de phase (L1, L2)	1265	5	CLK91, CLK93
GPS : biais de phase (L5)	1265	5	CLK93
Ionosphère VTEC	1264	60	CLK93



calculés par le CNES pour le PPP : deux flux sont disponibles sur le caster : CLK91 et CLK93. Le flux CLK91 est un flux basé sur les constellations opérationnelles GPS et Glonass en bi-fréquence. Le flux CLK93 est expérimental et permet de tester les nouveaux concepts : Tri-fréquence GPS et nouvelles constellations comme Galileo.

3. "Utilisateur" : il s'agit de l'implémentation d'algorithmes de positionnement compatibles dans un récepteur utilisateur. Le CNES développe et met à disposition en open-source un module logiciel permettant le calcul du point. Ce module est appelé PPP-User. Le tableau suivant présente les principales fonctionnalités de ce module (Table 2).

Le démonstrateur propose un monitoring permanent de quelques stations réparties autour de la terre. Ce monitoring consiste à calculer la position en temps réel d'une station fixe et à tracer les écarts (qui doivent être nuls). Ces écarts donnent une bonne idée de la précision atteignable par la méthode. La figure suivante donne un exemple de tels écarts (en mode bi-fréquence GPS + Glonass) obtenus par le démonstrateur (Figure 2).

Table 2. Les fonctions du module PPP-User

Modèle fonctionnel	Non différencié et non combiné
Mesures	Code, Phase, Doppler
Constellations	GPS, Glonass en cours Galileo et Beidou
Fréquences	Mono, Bi, Tri
Résolution d'ambiguïtés	Bi ou Tri (GPS) fréquence Méthode Bootstrap
Source ionosphère	SBAS via RTKLIB
Corrections Orbits/Horloges	RTCM ou SBAS via RTKLIB
RAIM	amélioré
Gap-bridging	OUI
Architecture portable	OUI (C++, STL)
Compatibilité	BNC, RTKLIB
Lissage Doppler	OUI
Source des biais de code	RTCM, Tgd(BRDC), DCB via RTKLIB
Source des biais de phase	RTCM
Augmentation régionale	OUI (via RTROVER interface)
Synchronisation d'horloge	OUI
Plates-formes	Linux, windows

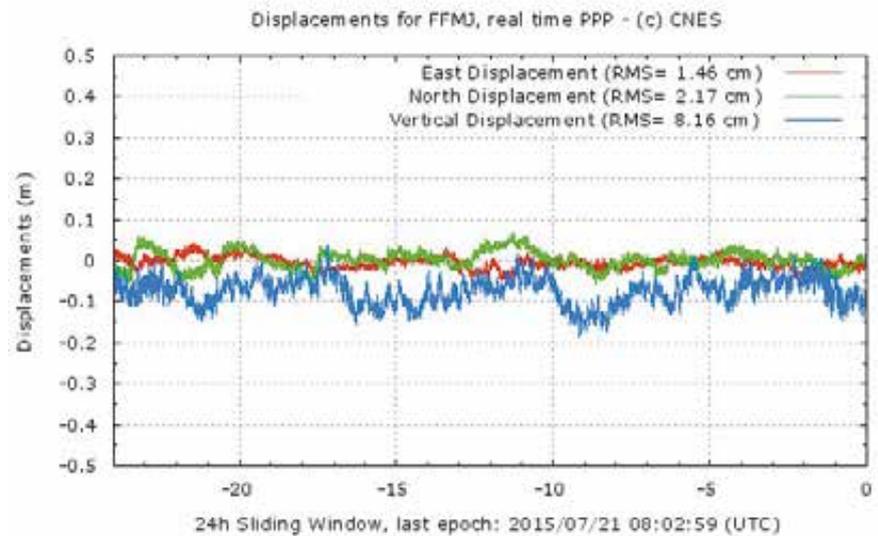


Figure 2. Monitoring PPP bi-fréquence avec résolution d'ambiguïtés

La résolution des ambiguïtés de phase

■ Le modèle traditionnel

La résolution des ambiguïtés de phase non différenciées est bien connue depuis quelques années maintenant. Les modèles utilisés, dans une configuration bi-fréquence, sont basés sur l'identification des biais de phase au sein de la charge utile satellite. Ces biais de phase sont identifiés au travers de combinaisons d'observables, typique-

ment la combinaison *widelane* et la combinaison *narrow-lane*.

- La combinaison *widelane* est une combinaison des 4 observables de code et de phase qui permet d'annuler la contribution de la géométrie et de l'ionosphère. Cette combinaison a l'avantage d'avoir un bruit faible comparé à la longueur d'onde, ce qui facilite l'identification des biais de phase.
- La combinaison *narrowlane* est la combinaison des deux observables de phase qui annule la contribution de l'ionosphère, d'une longueur d'onde de 10.7 cm (une fois l'ambiguïté *widelane* résolue).

Une fois identifiés les biais de phase de ces deux combinaisons grâce à une solution réseau, ils sont transmis au récepteur utilisateur. Ces biais vont ensuite être associés aux mesures de phase utilisateur pour résoudre les ambiguïtés, et ainsi disposer de l'équivalent d'une mesure de code mais avec un bruit 100 fois plus faible, ce qui va permettre le positionnement centimétrique.

■ Les limitations du modèle traditionnel

Le modèle présenté ci-dessus, bien que fonctionnel, possède les défauts suivants :

- La représentation choisie (*widelane*, *narrowlane*) est dépendante de la méthode implémentée. Même si la nature des biais est la même, leur



représentation peut être différente en fonction des méthodes sous-jacentes, ce qui peut rendre difficile la standardisation des messages de biais de phase.

- Le côté utilisateur doit implémenter la même méthode que celle utilisée pour le côté réseau. Si ce n'est pas le cas, l'utilisateur doit convertir les quantités d'une méthode à l'autre, ce qui peut engendrer des bugs potentiels ou des erreurs d'interprétation.
- Cette représentation est limitée au cas bi-fréquence. Dans le cas bi-fréquence, seules deux quantités doivent être calculées, mais dans le cas tri-fréquence par exemple, à cause des différentes possibilités de combinaison des observables, il existe près de 10 possibilités de biais, toutes aussi valables les unes que les autres !

■ Le nouveau modèle proposé par le RTCM

Conscient de ces problèmes, le consortium RTCM a proposé une nouvelle formulation pour les biais de phase : la formulation non combinée. L'idée principale est de représenter un biais de phase par fréquence. Ces biais de phase sont, comme pour les biais de code, ajoutés à chaque observable indépendante. Les observables ainsi dé-biaisées permettent de faire apparaître la nature entière des ambiguïtés de phase, et ceci sur toutes les combinaisons dont le bruit est faible comparé à la longueur d'onde. On passe ainsi, dans une configuration tri-fréquence, de 10 biais potentiels à seulement 3 biais.

On remarque que les trois limitations décrites dans le chapitre précédent sont levées.

Le CNES calcule les biais de phase dans cette nouvelle représentation depuis juin 2014, en bi-fréquence GPS (L1, L2) sur le flux CLK91. Les biais de phase tri-fréquence GPS (L5) sont disponibles sur le flux CLK93 depuis octobre 2014. Le logiciel PPP-User est compatible de cette représentation, mais le code a été commenté dans la configuration tri-fréquence car il y a pour l'instant trop peu de satellites bloc IIF (compatibles tri-fréquence) disponibles.

■ Le PPP tri-fréquence

Le faible nombre de satellites GPS tri-fréquences disponibles à ce jour ne permet pas de proposer un service PPP tri-fréquence permanent. Par contre, il est possible de choisir une époque et une région où plusieurs satellites tri-fréquences étaient visibles simultanément. C'était le cas sur l'Europe le 10 janvier 2015 autour de 11h UTC, avec 4 satellites GPS IIF en vue. Il a alors été possible de calculer les biais tri-fréquence sur la zone, en respectant la représentation du nouveau modèle, et de tester l'apport du tri-fréquence sur la convergence de la solution PPP. La figure suivante montre la station à positionner (REDU, en vert), ainsi que le réseau de stations utilisées pour calculer les biais (en rouge).

Une fois les biais tri-fréquence calculés, ils sont utilisés par le module

PPP-User afin de tester la rapidité de la convergence. Une heure de données était disponible et 4 runs d'1/4 d'heure ont pu être conduits. La figure suivante représente le profil typique de convergence du PPP, pour ces 4 runs (séries de traitements) (Figure 3).

On remarque que la convergence centimétrique est obtenue au bout de 8 minutes sur tous les runs, ce qui est une amélioration importante par rapport au cas bi-fréquence, où il est communément admis que le temps de convergence moyen se situe entre 30 minutes et une heure.

Grâce à ces nouveaux résultats, il est possible de tracer une représentation caractéristique de la convergence PPP entre les contextes bi et tri-fréquence. Pour ce faire, un ajustement polynomial sur des convergences typiques a été effectué, et permet de tracer



Figure 3. Réseau pour les essais PPP tri-fréquence

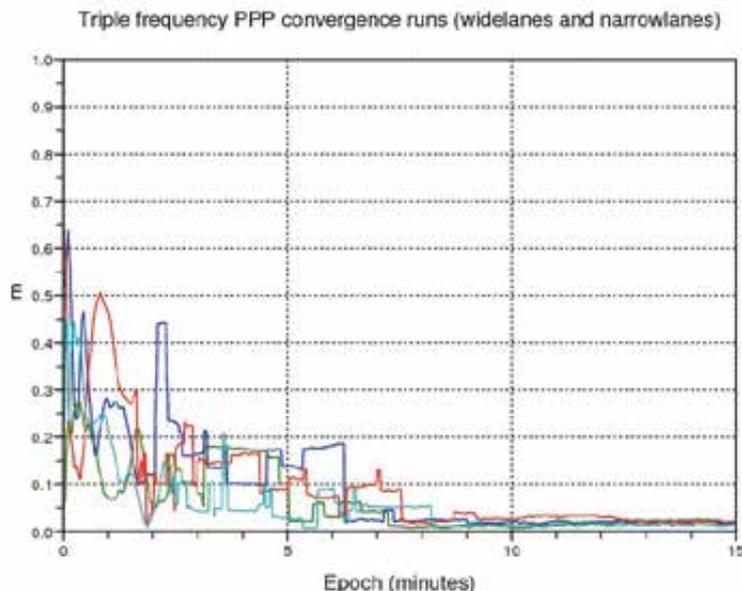


Figure 4. Convergence du PPP tri-fréquence

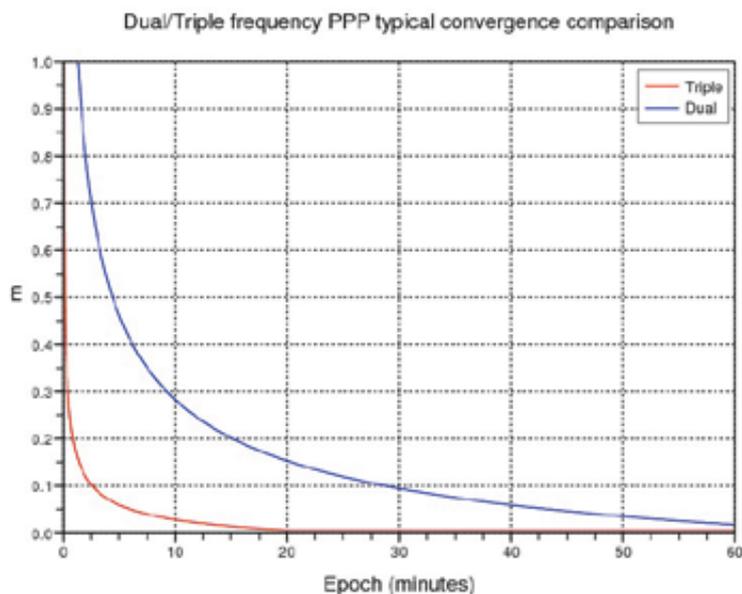


Figure 5. Comparaison de la convergence PPP bi/tri-fréquence

les profils de convergence dans les contextes bi (10 satellites en vue) et tri-fréquence (10 satellites en vue dont 4 tri-fréquences).

L'apport de la nouvelle fréquence GPS L5 pour la réduction du temps de convergence est clairement visible ici.

Conclusion

L'utilisation d'une troisième fréquence, rendue possible grâce à la modernisation des constellations GNSS existantes comme GPS et à l'essor des nouvelles constellations comme Galiléo ou Beidou, va permettre d'améliorer

considérablement les temps de convergence de la technique PPP. Nous pouvons d'ores et déjà montrer que la convergence centimétrique est réduite à quelques minutes dans le cas GPS avec 4 satellites tri-fréquence en vue. Ces résultats ne pourront que s'améliorer avec l'augmentation du nombre de satellites compatibles. ●

Contact

Denis LAURICHESSE
Ingénieur expert navigation Centre National d'Études Spatiales (CNES), service "Systèmes de Navigation" - Toulouse
Denis.Laurichesse@cnes.fr

Références

- 1) PPP-Wizard : <http://www.ppp-wizard.net/>
- 2) GPS-World: <http://gpsworld.com/innovation-carrier-phase-ambiguity-resolution/>
- 3) "Integer Ambiguity Resolution on Undifferenced GPS Phase Measurements and Its Application to PPP and Satellite Precise Orbit Determination" by D. Laurichesse, F. Mercier, J.-P. Berthias, P. Broca, and L. Cerri in Navigation, Journal of The Institute of Navigation, Vol. 56, No. 2, Summer 2009, pp. 135-149, doi: 0.1002/j.2161-4296.2009.tb01750.x.
- 4) "Coming Soon: The International GNSS Real-Time Service" by M. Caissy, L. Agrotis, G. Weber, M. Hernandez-Pajares, and U. Hugentobler in GPS World, Vol. 23, No. 6, June 2012, pp. 52-58.
- 5) "PPP with Ambiguity Resolution (AR) Using RTCM-SSR" by G. Wübbena, M. Schmitz, and A. Bagge, presented at IGS Workshop, Pasadena, Calif., June 23-27, 2014.
- 6) Improved Convergence for GNSS Precise Point Positioning by S. Banville, Ph.D. dissertation, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, Technical Report No. 294, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada.

ABSTRACT

The PPP is an emerging positioning technique and has many advantages. Among them we can note the ease of use, the reduction of the cost of network infrastructure compared to differential techniques, the possibility to use only one-way stream for sending corrections. A major shortcoming of the technique is the relatively high time of convergence (about 30 minutes in the dual-frequency case). Here we show that thanks to an appropriate representation for phase bias corrections and through the processing of a third frequency, it is possible to reduce this time to a few minutes, in the GPS case.