



# Modélisation des délais ionosphériques appliquée au traitement PPP-RTK centimétrique avec ambiguïtés entières de phase

■ Camille PARRA

*Geoflex est une entreprise fournissant un positionnement précis, fiable, continu et en temps réel à ses clients partout dans le monde. Ce positionnement GNSS (Global Navigation Satellite System) se base sur l'utilisation de la Technologie PPP Geoflex/CNES (Precise Point Positioning) développée en partenariat avec le CNES (Centre national d'études spatiales) et commercialisée par Geoflex. Avec cette solution, qui repose sur la résolution d'ambiguïtés entières de phase en zéro-différence, Geoflex diffuse des flux de corrections permettant à l'utilisateur de se positionner partout dans le monde et sans aucune infrastructure GNSS proche de l'utilisateur, en mode statique ou cinématique, en temps réel ou différé, avec une précision horizontale de 4 cm à 95 % du temps. L'inconvénient de cette technique est son temps de convergence relativement important, d'environ 30 min, avec des observations bi-fréquences et bi-constellations disponibles sur les récepteurs GNSS mass-market commençant à équiper les voitures pour des meilleurs systèmes d'aide à la conduite, voire de certains smartphones. Le but de cet article est de montrer l'impact que peut avoir un modèle ionosphérique sur le temps de convergence d'un calcul PPP grâce à la technique du PPP-RTK (Real Time Kinematic). Il sera montré que grâce à cet apport, il est possible de réduire le temps de convergence de 90 % par rapport à une solution PPP-IAR (Integer Ambiguity Resolution) classique, mais qu'une attention particulière doit être apportée aux biais électroniques.*

## ■ MOTS-CLÉS

GNSS, PPP, PPP-IAR, PPP-RTK, Ionosphère, Convergence, Biais électroniques

**L**e positionnement par GNSS (Global Navigation Satellite System) est aujourd'hui massivement utilisé dans de nombreuses applications industrielles, allant de l'agriculture de précision aux différents modes de transports (aéronautiques, ferroviaires, routiers). De nombreux services géolocalisés grand public, disponibles dans nos smartphones ou objets du quotidien, utilisent aussi cette technologie pour une meilleure mobilité ou encore plein d'autres applications. Beaucoup de ces applications ont besoin d'un positionnement précis, fiable, continu et en temps réel. Pour répondre à ces besoins, l'entreprise Geoflex [1] utilise la technologie PPP Geoflex/CNES, initialement développée par le CNES [2], dont elle a l'exclusivité mondiale d'industrialisation, de robustification et de commercialisation. Ainsi, Geoflex peut apporter à ses utilisateurs un positionnement mondial plus précis, fiable et continu, partout sur terre, en mer et dans les airs, sans aucune station GNSS permanente à proximité de l'utilisateur, en temps réel comme en temps différé.

Cette technologie PPP, dans son mode PPP-IAR (*Precise Point Positioning with Integer Ambiguity Resolution*), permet de résoudre les ambiguïtés entières des mesures de phase à des valeurs entières en "zéro-différence" sans procéder à aucune différenciation d'observations, pour une plus grande simplicité et donc une plus grande robustesse.

Cependant le temps de convergence de ce mode PPP-IAR est de plus trente minutes dans la majorité des cas. C'est en effet le temps nécessaire pour l'estimation de toutes les erreurs locales affectant les mesures GNSS, dont les erreurs

atmosphériques (réfractions ionosphériques et troposphériques) et récepteur (erreurs d'horloges et biais électroniques). Pour améliorer ce point pour les applications ne pouvant s'en satisfaire, Geoflex propose d'autres niveaux de service permettant de réduire ce temps de convergence, notamment en ajoutant des données atmosphériques, issues de bases atmosphériques, lors de l'initialisation du calcul PPP. Des travaux antérieurs au sein de l'entreprise [3] ont pu montrer que cette technique, dite PPP-RTK (*Precise Point Positioning with Real Time Kinematic*), pouvait améliorer le temps de convergence d'un facteur quatre. Cependant, ces travaux ont été faits dans des conditions idéales, c'est-à-dire en ayant une seule marque de récepteur et donc, des biais électroniques semblables.

L'objectif de cet article est de présenter différentes méthodes d'utilisation de données atmosphériques, avec ou sans prise en compte des biais électroniques et les résultats qui en découlent. Après une définition de cette technique, l'impact du matériel sur le SID (*Slant Ionospheric Delay*) d'une base sera montré et une présentation de la méthodologie employée sera faite. Ensuite, les différentes méthodes de modélisation de l'ionosphère seront comparées au PPP-IAR.

## Principe du PPP Real Time Kinematic

Le PPP, contrairement au RTK (*Real Time Kinematic*), est un positionnement absolu puisqu'il ne repose pas sur





la différentiation d'observations entre le mobile de l'utilisateur et une ou plusieurs stations permanentes dans le cas du NRTK (*Network Real Time Kinematic*). Cela implique que toutes les erreurs qui étaient éliminées par différences doivent, dans cette technique, être connues par modélisation ou estimation. La précision et la fiabilité du PPP ont ainsi l'avantage de ne pas dépendre d'une ou de quelques stations GNSS permanentes entourant l'utilisateur. Les équations d'observation de pseudo-distance et de phase pour un récepteur  $r$ , un satellite  $s$  et une fréquence  $f$  sont indiquées ci-dessous. Les variables estimées sont en rose, celles modélisées sont en bleu.

Équation de mesure de code ou pseudo-distance :

$$P_{r,f}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + I_{r,f}^s + T_0 + T_c + M_p + b_{r,p} - b_p^s + \varepsilon_p \quad (1)$$

Équation de mesure de phase :

$$L_{r,f}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) - I_{r,f}^s + T_0 + T_c + M_L + \lambda_f W_{r,f}^s + \lambda_f N_{r,f}^s + b_{r,L} - b_L^s + \varepsilon_L \quad (2)$$

Avec :

- $\rho_r^s$  : distance géométrique entre le récepteur et l'émetteur.
- $c$  : célérité.
- $dt_r, dt^s$  : décalage d'horloge récepteur et satellite respectivement.
- $I_{r,f}^s$  : délai ionosphérique entre le satellite et le récepteur.
- $T_0$  : délai troposphérique *a priori*, issu d'un modèle.
- $T_c$  : correction troposphérique à estimer.
- $b_{r,p}$  et  $b_p^s$  : biais électroniques de pseudo-distance pour le récepteur et le satellite respectivement. La notation peut être étendue à la mesure de phase en remplaçant l'indice P par L.
- $W_{r,f}^s$  : déphasage *Phase Wind-up*.
- $\lambda_f$  : longueur d'onde du signal à la fréquence  $f$ .
- $N_{r,f}^s$  : ambiguïté entière de la mesure de phase.
- $M_p, M_L$  : effets du multitrajet sur le code et la phase respectivement.
- $\varepsilon_p, \varepsilon_L$  : bruit de mesure sur le code et la phase respectivement.

La plupart des variables modélisées sont les corrections précises d'orbite et d'horloge, ainsi que les biais électroniques des satellites. Tous ces éléments sont calculés et diffusés en temps réel par Geoflex à l'aide d'un réseau mondial composé d'environ quatre-vingt stations permanentes. La qualité du positionnement PPP va ainsi dépendre de la qualité de ces corrections. De plus, elles sont compatibles avec la nature entière des ambiguïtés, ce qui permet, après un temps d'initialisation de 30 min, d'atteindre une précision centimétrique en PPP-IAR.

Les principaux éléments estimés sont la position, les horloges du récepteur, ainsi que les délais atmosphériques. Ces derniers sont dus à la traversée de l'atmosphère par les signaux GNSS (micro-ondes) et sont très variables, car ils dépendent de différents phénomènes comme l'élévation du satellite, l'activité solaire et le champ magnétique terrestre pour les réflexions et réfractions ionosphériques, ou encore la période de l'année pour les réflexions et réfractions troposphériques. Les estimateurs de ces délais atmosphériques étant corrélés avec ceux des ambiguïtés, ils ont un impact sur le temps de convergence du calcul PPP.

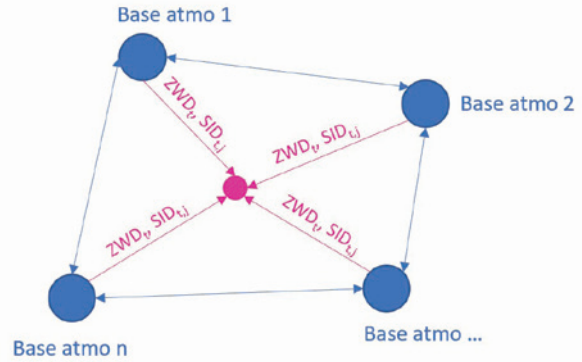


Figure 1. Fonctionnement du PPP-RTK à l'époque  $t$  et pour un satellite  $j$ .

Le PPP-RTK est issu de cette remarque, puisque l'idée de cette technique est d'injecter des valeurs *a priori* de délais troposphériques (ZWD, *Zenithal Wet Delay*) et ionosphériques (SID, *Slant Ionospheric Delay*) estimées à partir de bases atmosphériques dans le calcul du mobile (figure 1), afin de guider l'estimation des positions et accélérer la fixation des ambiguïtés entières de phase.

Le temps de convergence, qui a été défini comme l'instant (ou époque) à partir duquel l'écart à la position réelle est inférieur à un seuil (10 cm) et cela pendant au moins deux minutes, peut diminuer grâce à ces données atmosphériques *a priori*. La figure 2 montre ce phénomène. En effet, elle représente les écarts 2D de la station du RGP (Réseau GNSS

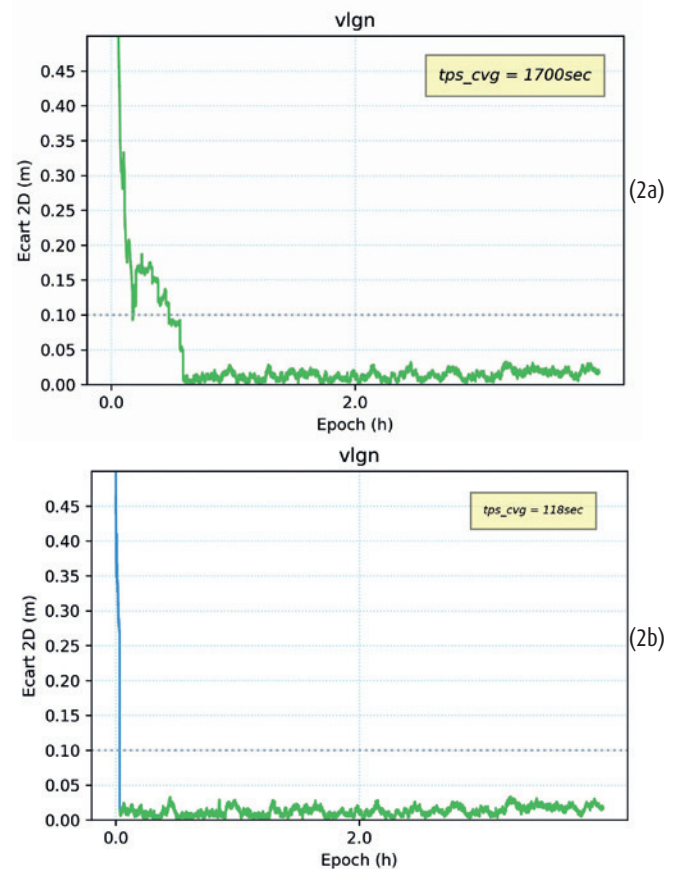


Figure 2. Séries temporelles en mètres de l'écart 2D (planimétrique ou horizontal) à la référence de la station permanente VLGN, dans le cas du PPP-IAR (2a) et du PPP-RTK (2b) ; Vert : mode "Fixed", Bleu : mode "Float" ; le critère de convergence est fixé à 2 min.

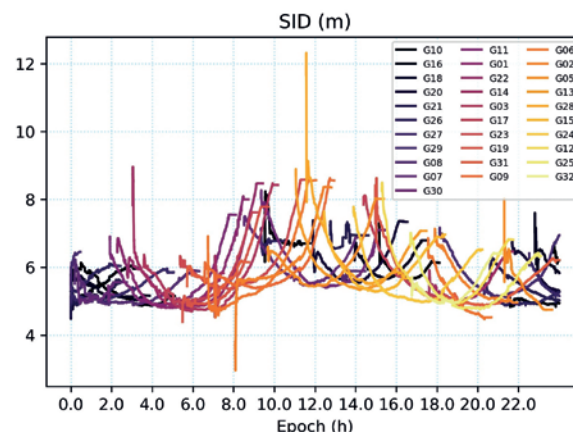
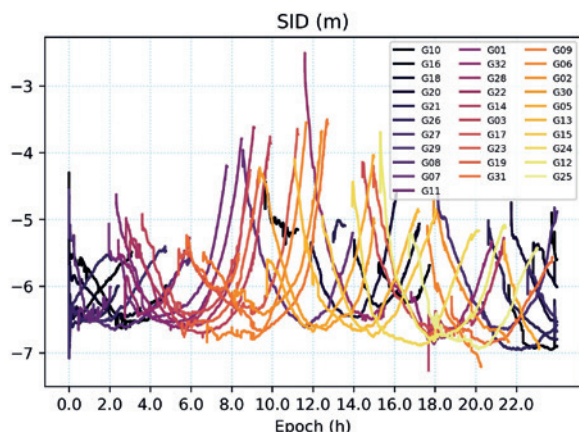


Figure 3. SID par satellites GPS (m) au cours d'une journée des stations permanentes ANDE (gauche) et CEVY (droite) distantes de 60 km.

Permanent) VLGN à sa position vraie dans le cas d'un calcul PPP-IAR (en haut) et un calcul PPP-RTK (en bas). L'ajout des données atmosphériques peut améliorer le temps de convergence de plus de 90 % et cela, sans dégrader la précision qui, dans les deux cas, est centimétrique.

## Impact du matériel sur les SID

Pour diminuer la convergence sans altérer la précision, il est nécessaire de prendre en compte les biais électroniques affectant les mesures. Ces biais, un par constellation, par type de mesure et par fréquence sont corrélés avec les estimateurs des délais ionosphériques et des ambiguïtés. Ils sont surtout uniques pour chaque base atmosphérique et chaque mobile. Effectivement, ces biais sont corrélés à la marque du matériel du récepteur, son modèle et son *firmware* ou micrologiciel. Ils sont particulièrement visibles lors de la comparaison des délais ionosphériques de deux stations proches géographiquement (figure 3). À cause de ces décalages de SID de plusieurs mètres, il est impossible d'interpoler les données ionosphériques correctement. Il est donc impératif d'isoler les biais récepteurs. Un procédé a été développé au sein de Geoflex pour s'affranchir de ce problème.

## Évaluation des performances du PPP-RTK

La technique du PPP-RTK est évaluée comparativement à celle du PPP-IAR, les corrections d'orbito-synchro et le moteur de positionnement PPP ou "PPP-Engine" synchronisant les corrections PPP aux mesures GNSS. Les traitements sont réalisés avec toutes les fréquences (L1/L2/L5) des constellations GPS (*Global Positioning System*) et GLONASS (*GLObalnaïa NAVigatsionnaïa Spoutnikovaïa Sistéma*). Deux réseaux sont simulés à partir des stations permanentes du RGP : un réseau de bases atmosphériques et un réseau de stations faisant office de mobiles. Ils sont répartis en France métropolitaine (figure 4) et composés de cinquante-six bases et de soixante-cinq mobiles de matériel différent. L'écart moyen entre les bases atmosphériques est de 150 km. Les sessions de calcul démarrent à 13 h, afin d'avoir la plus forte activité ionosphérique de la journée et durent 4 h dans le cas

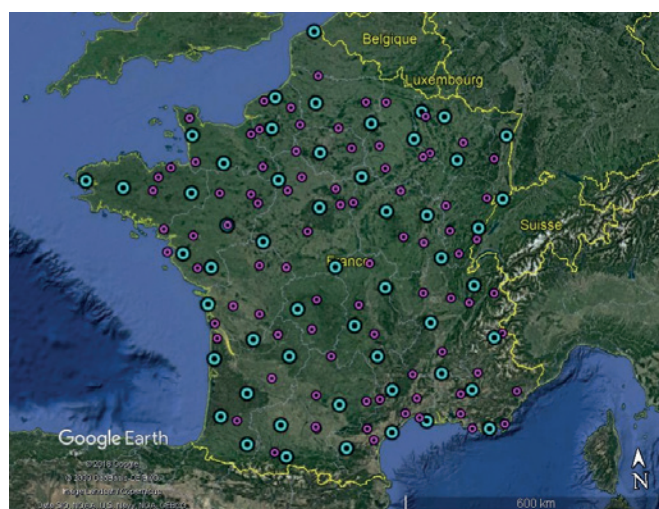


Figure 4. Réseaux simulés de bases atmosphériques (bleu) et de mobiles (rose).

d'une unique base et 30 min lorsque toutes les bases sont utilisées. Les résultats présentés sont ceux du 22 janvier 2018.

Le seuil de convergence a été fixé à 10 cm en 2D. La fixation des ambiguïtés est autorisée à partir de 2 min. Si ce temps est mal évalué, cela peut entraîner des "bad-fixed", c'est-à-dire que l'ambiguïté de phase sera fixée à un mauvais entier ce qui causera un saut dans le positionnement.

Cet article se focalisera sur les données ionosphériques, mais les données troposphériques sont aussi injectées dans le calcul en PPP-RTK.

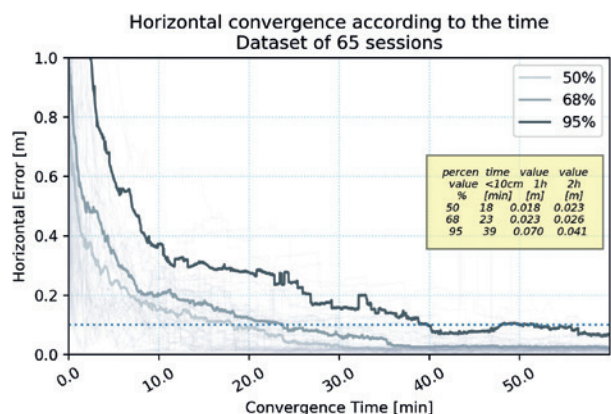
## Utilisation d'une seule base atmosphérique

### ■ Principe

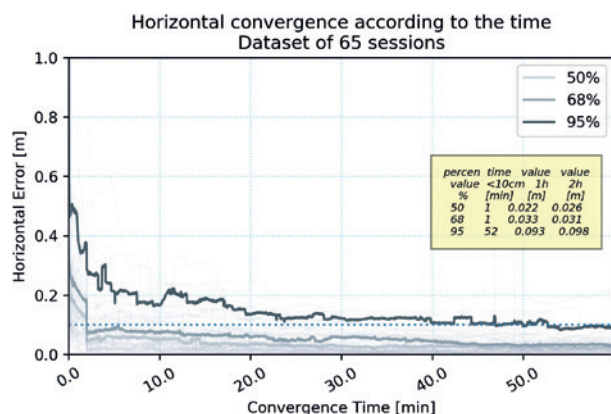
La technique du PPP-RTK a été testée dans un premier temps avec une base atmosphérique unique. Afin d'éviter les bases de mauvaise qualité, celle-ci n'est pas forcément la base la plus proche du mobile. La station sélectionnée est celle dont les séries temporelles PPP de sa position ont le meilleur RMS parmi les quatre bases les plus proches.

Dans ce cas, les données atmosphériques sont récupérées auprès de la base atmosphérique sélectionnée, puis injectées dans le calcul PPP du mobile. Afin de montrer l'importance

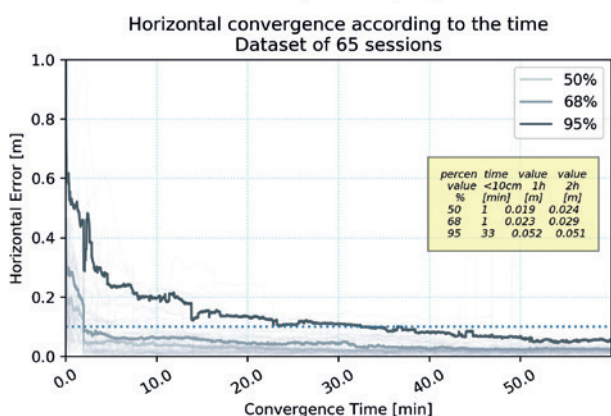




(5a)



(5b)



(5c)

Figure 5. Convergence horizontale des quantiles 50 %, 65 % et 95 % des méthodes PPP-IAR (5a), PPP-RTK Classique (5b) et PPP-RTK Geoflex (5c).

des biais électroniques, les performances obtenues avec deux méthodes de PPP-RTK sont présentées sur la figure 5. La première gère ces biais tel que classiquement décrit dans la littérature et est appelée PPP-RTK Classique, tandis que la seconde appelée PPP-RTK Geoflex les gère de manière innovante. Comme les ambiguïtés ne sont pas résolues à des valeurs entières pour GLONASS, seuls les satellites GPS sont utilisés dans l'injection des données ionosphériques, et cela même si le calcul est réalisé avec GPS et GLONASS.

Pour les deux méthodes de PPP-RTK, le temps de convergence à 68 % est devenu quasi immédiat, avec une précision légèrement meilleure avec la technique PPP-RTK Geoflex. Avec la méthode PPP-RTK Classique, il y a bien une amélioration du temps de convergence dans 68 % des cas, mais il y a aussi une perte de précision pour un certain nombre de stations, ce qui ralentit la convergence à 95 %. Cela est dû à une mauvaise estimation des biais électroniques. La convergence à 95 % s'améliore donc avec la méthode PPP-RTK Geoflex, mais cela reste encore peu significatif, car l'amélioration est seulement de 15 %.

Le choix de la base atmosphérique est très important pour le PPP-RTK Geoflex (figure 6). Effectivement, plus la base est éloignée du mobile, plus le temps de convergence de ce dernier risque d'être important. Mais au-delà de leur distance

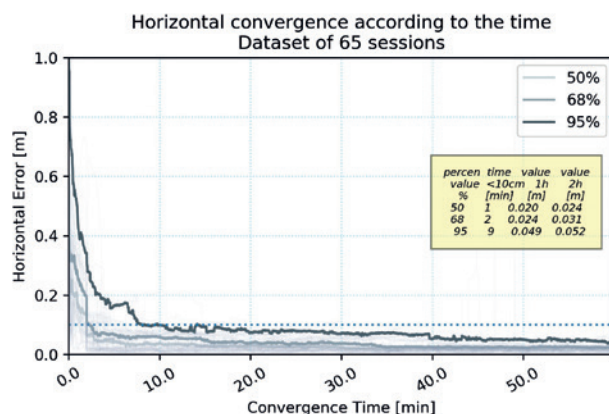
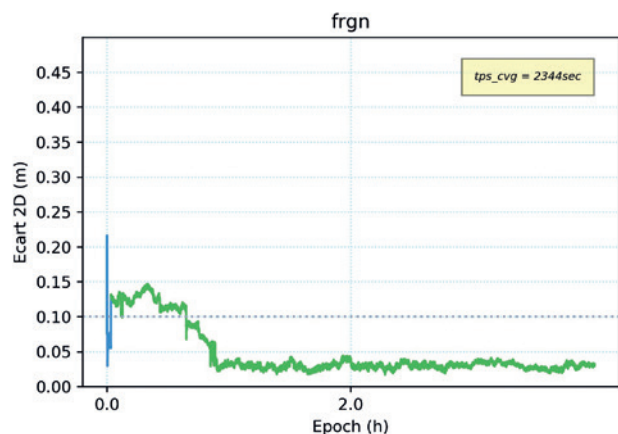
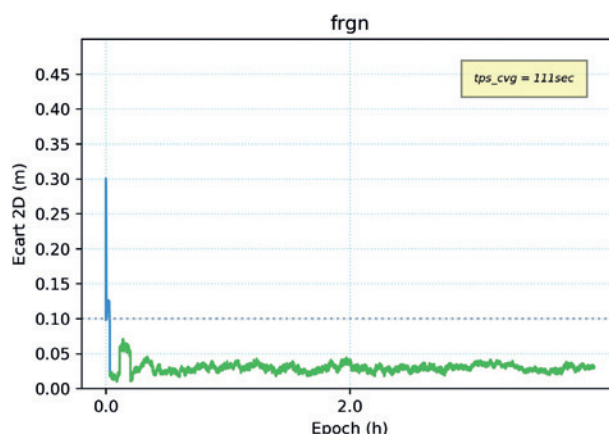


Figure 7. Convergence horizontale des quantiles 50 %, 65 % et 95 % de la méthode PPP-RTK Geoflex et changement de base atmosphérique.



(6a)



(6b)

Figure 6. PPP-RTK Geoflex ; séries temporelles en mètres de l'écart 2D à la référence de la station permanente FRGN en fonction de la base atmosphérique retenue, PERX (6a), DOCX (6b) ; Vert : solution en mode "fixed", Bleu : solution en mode "float".

du mobile, certaines bases ne sont pas aptes à diffuser des données atmosphériques.

En travaillant l'algorithme de sélection de la base, le temps de convergence a été amélioré de 77 % par rapport au PPP-IAR et 73 % par rapport à la première version du PPP-RTK Geoflex (figure 7).

Méthode	Temps de convergence (min)		
	50 %	68 %	95 %
PPP-IAR	18	23	39
PPP-RTK classique	1	1	52
PPP-RTK Geoflex avec méthode évoluée de sélection de la base atmo.	1	2	9

**Table 1.** Quantiles des temps de convergence avec l'utilisation d'une seule base atmosphérique

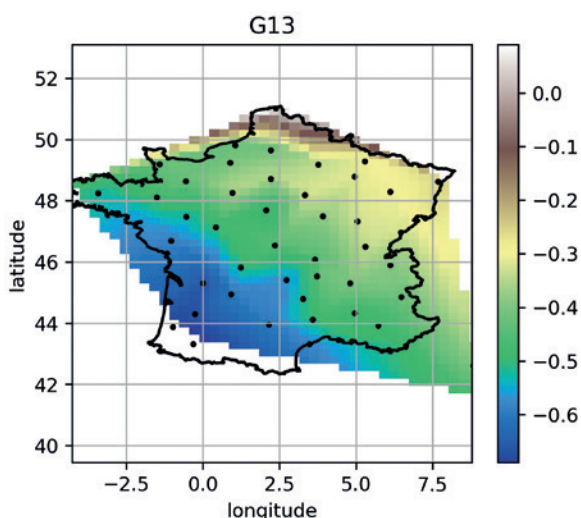
La table 1 résume les temps de convergence des quantiles 50 %, 68 %, 95 % pour les trois méthodes de PPP. L'intérêt du PPP-RTK y est bien visible, de même que l'impact des biais électroniques sur les données ionosphériques.

## Utilisation d'un réseau de bases atmosphériques

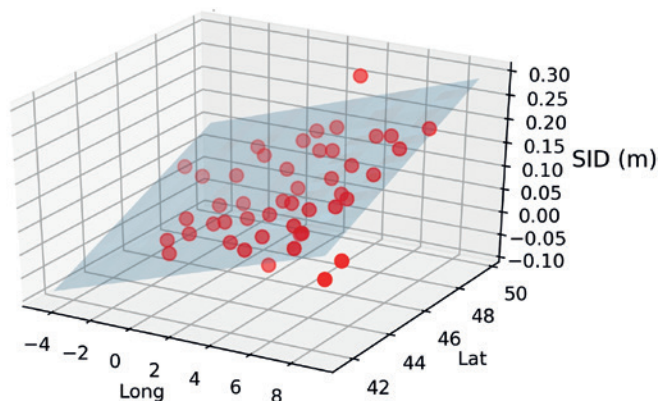
### ■ Principe

Au vu des résultats du PPP-RTK Geoflex, et surtout dans le but d'atténuer l'influence des mauvaises bases, les performances du PPP-RTK Geoflex ont été évaluées en prenant en compte toutes les stations du réseau afin de réduire la complexité algorithmique (important en termes de charge de calcul) et ainsi faire du "PPP-NRTK". Deux modélisations ont été implémentées afin de représenter les délais ionosphériques sur toute la France.

La première méthode est une interpolation linéaire des délais ionosphériques, à la position approchée du mobile, avec pondération par l'inverse des distances le séparant des bases



**Figure 8.** Interpolation des délais ionosphériques (en mètre) à la position du réseau de mobiles ; Satellite : G13 ; Époque : 50400, le 22 janvier 2018.



**Figure 9.** Modélisation plan des délais ionosphériques pour le satellite G05 ; Époque : 50400, le 22 janvier 2018.

(figure 8). Cette interpolation se fait par satellite et à chaque époque.

La seconde méthode repose sur l'estimation d'un plan modélisant les délais ionosphériques estimés à chaque époque et à chaque base atmosphérique pour chaque satellite (figure 9). Les paramètres du plan sont les coordonnées géographiques des bases atmosphériques. Ainsi, plus le satellite est bas sur l'horizon, plus la pente du plan est importante, car l'épaisseur de la couche ionosphérique traversée varie plus fortement d'une station à l'autre. Une fois les paramètres du plan déterminés, ils sont utilisés afin de calculer les délais ionosphériques à la position approchée du mobile à une époque donnée avec l'équation du plan :

$$SID(s,t) = a_{s,t} * x_t + b_{s,t} * y_t + c_{s,t} \quad (3)$$

Avec :

- $t$  : époque
- $s$  : satellite
- $(x_t, y_t)$  : position du mobile à l'époque  $t$
- $(a_{s,t}, b_{s,t}, c_{s,t})$  : paramètres du plan à l'époque  $t$ , pour le satellite  $s$ .

### ■ Modélisation par interpolation

La figure 10 présente la comparaison des délais ionosphériques interpolés linéairement à la position des mobiles et ceux estimés avec un calcul PPP-IAR. Les résidus obtenus sont compris entre -35 cm et 10 cm, mais la majorité sont inférieurs à 10 cm en valeur absolue. La seule valeur aberrante est celle de la station GRAS, mais il faut noter que ce résultat est ponctuel, car cette station ne présente pas des résidus élevés pour tous les satellites et à toutes les époques. Ces faibles résidus démontrent la justesse de la modélisation des délais ionosphériques, cependant il reste à savoir si la précision de 10 cm est suffisante pour l'injection des données atmosphériques dans le calcul PPP-IAR.

Pour cela, les temps de convergence des soixante-cinq mobiles ont été calculés en utilisant la méthode du PPP-RTK Geoflex et avec cette modélisation des délais ionosphériques par interpolation. Les temps de convergence sont représentés sous forme de quantiles (50 %, 68 % et 95 %) sur la figure 11. Il ressort que les temps de convergence à 68 % et 95 % ont diminué respectivement de 97 % et 56 % par rapport au traitement PPP-IAR.

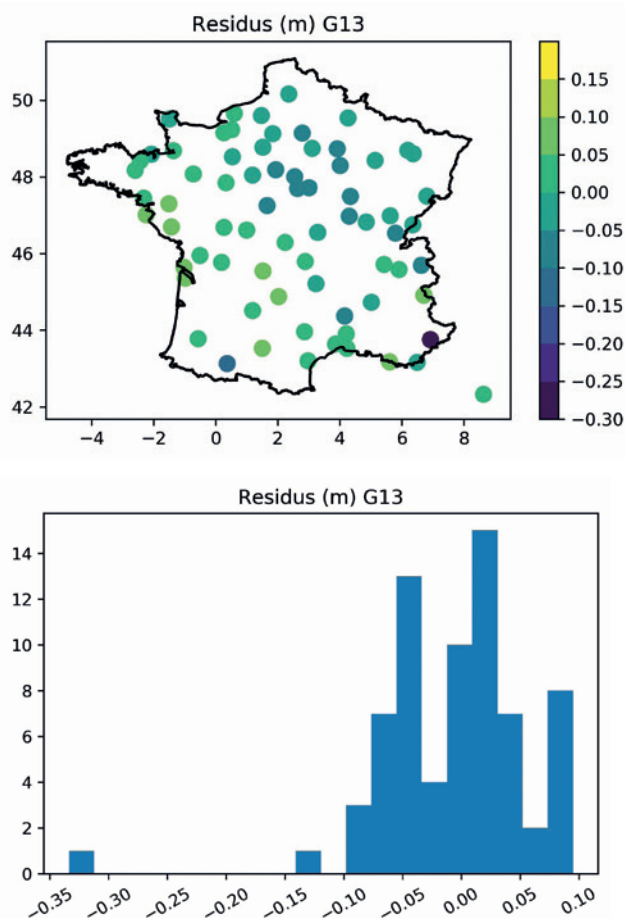


Figure 10. Résidus SID utilisant la modélisation par interpolation et les estimations en PPP-IAR ; Époque : 50400, le 22 janvier 2018.

Cependant à 95 %, on accuse une perte de performance qui peut s'expliquer par le fait que certaines bases atmosphériques non optimales sont prise en compte dans le modèle.

### ■ Modélisation de type "plan"

La figure 12 montre la comparaison des délais ionosphériques modélisés par un plan à la position des mobiles et ceux estimés en PPP-IAR. Les résidus obtenus sont compris entre 15 cm et 10 cm, sauf pour une station (GRAS). De même que pour la modélisation par interpolation, ce résultat est ponctuel.

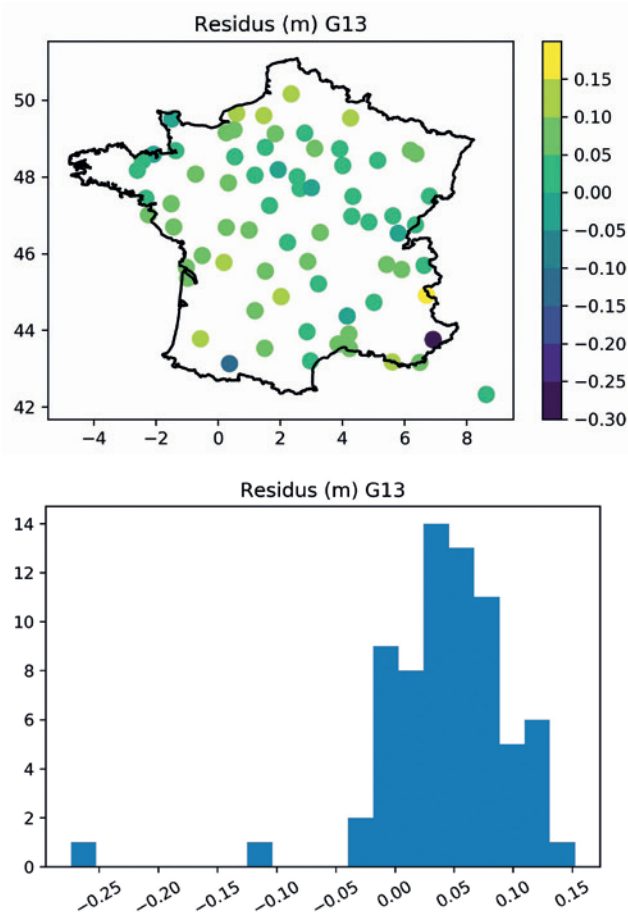


Figure 12. Résidus SID entre la modélisation de type "plan" et l'estimation lors du PPP-IAR ; Époque : 50400, le 22 janvier 2018.

Afin de vérifier que la précision des délais ionosphériques était suffisante, comme pour la modélisation par interpolation, les temps de convergence des soixante-cinq mobiles ont été calculés en utilisant la méthode PPP-RTK Geoflex et la modélisation des délais ionosphériques par un plan. Les temps de convergence sont représentés sous forme de quantiles (50 %, 68 % et 95 %) sur la figure 13.

Les temps de convergence atteignent alors 3 min dans 95 % des cas, cela donne une amélioration de 92 % par rapport au PPP-IAR. Cette méthode est aussi robuste aux mauvaises

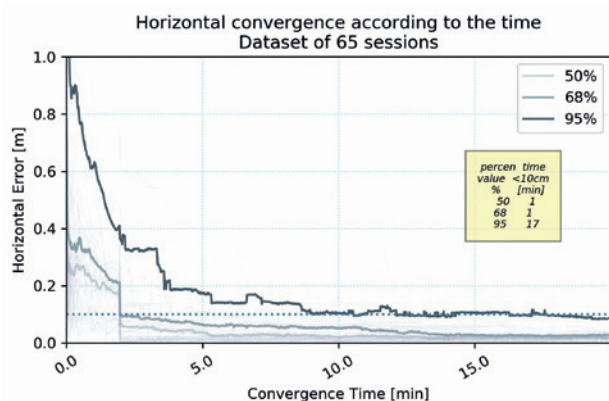


Figure 11. Convergence des quantiles 50 %, 65 % et 95 % du PPP-RTK Geoflex utilisant la modélisation par interpolation.

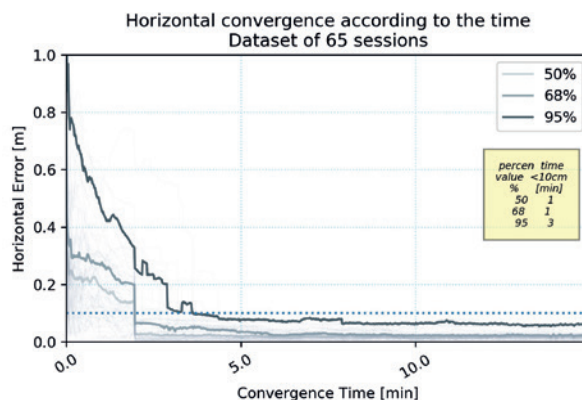


Figure 13. Convergence des quantiles 50 %, 65 % et 95 % du PPP-RTK Geoflex utilisant la modélisation de type "plan".





bases, car un filtre est appliqué dans le but d'ôter les stations ayant des résidus trop élevés par rapport à l'estimation par plan. Ainsi, la détermination du mobile n'est plus entièrement dépendante de la qualité des bases atmosphériques les plus proches, mais est soumise à l'état de l'ensemble des bases du réseau.

## Synthèse des résultats

La table 2 résume les temps de convergence des quantiles 50 %, 68 %, 95 % pour les méthodes PPP-IAR, PPP-RTK Classique avec une base unique et prise en compte des biais électroniques et PPP-RTK Geoflex avec une modélisation interpolée ou de type "plan".

Méthode	Temps de convergence (min)		
	50 %	68 %	95 %
PPP-IAR	18	23	39
PPP-RTK Monobase	1	2	9
PPP-NRTK Geoflex avec interpolation	1	1	17
PPP-NRTK Geoflex avec modélisation	1	1	3

**Table 2.** Quantiles des temps de convergence avec l'utilisation d'un réseau de bases atmosphériques.

En plus de ces résultats, l'avantage des modélisations de type "plan" est sa mise en production. Le serveur doit juste fournir les délais ionosphériques propres à chaque satellite. Le mobile calcule alors les délais ionosphériques à prendre en compte comme *a priori* à sa position approchée. Cette stratégie fonctionne de manière monodirectionnelle et n'impose qu'un flux de données supplémentaire par rapport au PPP-IAR, contrairement au PPP-RTK Monobase qui doit avoir une connexion bidirectionnelle avec le serveur pour n'avoir qu'un flux de données supplémentaire.

## Conclusions

Pour 68 % des cas et quelle que soit la méthode de PPP-RTK, cette technique permet de réduire le temps de convergence d'un calcul PPP et ainsi converger en moins de 5 min. Cependant, pour que le PPP-RTK ne dégrade pas la précision de la solution, il est nécessaire de bien prendre en compte les biais électroniques et notamment ceux des stations du réseau. Dans le cas de l'utilisation d'une base atmosphérique unique, la qualité de cette base ainsi que sa distance du mobile sont essentielles puisque, selon la base choisie, le temps de convergence peut augmenter de 95 %.

À cause de ces variations, deux méthodes exploitant toutes les stations du réseau ont été testées, ces modélisations montrant une meilleure robustesse. La modélisation ressortant avec les meilleurs résultats est celle représentant les délais ionosphériques comme un plan, unique à chaque satellite et englobant la France. Effectivement, les résultats utilisant cette modélisation présentent une convergence de 3 min dans 95 % des cas, c'est-à-dire une amélioration de 92 % par rapport au PPP-IAR et cela, sans dégradation de la précision.

Ainsi, une fois le réseau de bases atmosphériques de Geoflex opérationnel, tout d'abord en France, l'utilisation du PPP deviendra conforme aux attentes d'applications métier exigeantes, notamment dans le marché des transports. Cette technique sera aussi une avancée pour les relevés cadastraux. Il est important de savoir que les résultats présentés dans cet article sont issus de calculs PPP GPS et GLONASS et seules les valeurs des délais ionosphériques *a priori* des satellites américains sont utilisées. Or, avec l'avènement de la constellation européenne Galileo et le développement des satellites trifréquences [4] voire quadrifréquences [5], le PPP-RTK pourra encore être amélioré en termes de précision, rapidité de convergence et robustesse. Le PPP-RTK pourra aussi être utilisé dans le cas de la méthode de résolution d'ambiguïtés instantanée afin de donner un *a priori* sur les délais atmosphériques et ainsi de possiblement améliorer la convergence du PPP. ●

## Contacts

François FUND - Docteur en géodésie spatiale, Université de Nantes/L2G(ESGT, CNAM) - francoisfund@gmail.com

Camille PARRA - Ingénieure ENSG, spécialité Photogrammétrie, positionnement et mesures de déformation (PPMD), Promotion 2019 c-parra@laposte.net

Romain Legros - Directeur général, Geoflex romain.legros@geoflex.fr

## Références

- [1] Entreprise Geoflex, [En ligne]. Available: <http://www.geoflex.fr/>
- [2] D. Laurichesse, "Phase Biases Estimation for Undifferenced Ambiguity Resolution" 2012
- [3] I. d. Gelis, "Apport de données atmosphériques sur le temps de convergence du PPP centimétrique temps réel", rapport de stage de l'ENSG, 2018
- [4] D. Laurichesse, "Les évolutions du PPP : l'apport d'une troisième fréquence pour réduire les temps de convergence." XYZ, 2015
- [5] S. Banville, D. Laurichesse, "Innovation: Instantaneous centimeter-level multi-frequency precise point positioning" GPS World, 2018

## ABSTRACT

*The company Geoflex is supplying GNSS augmentation services for a simple, accurate, reliable, continuous and real-time positioning. The company's solution is based on the PPP-CNES technology (Precise Point Positioning) and provides to the customer an accurate positioning at the 4cm level everywhere in the world, without any GNSS permanent station close to the user. The drawback of the PPP technique is the long convergence time of about 30min. This is why Geoflex develops original PPP-RTK solutions (PPP with Real Time Kinematic capabilities) to reduce this convergence time by adding a priori atmospheric data in the PPP calculation. This article shows the results of those developments.*