

# Apport de données atmosphériques sur le temps de convergence du PPP centimétrique temps réel

■ Iris de GELIS - François FUND - Paulo Sérgio de OLIVEIRA Junior - Romain LEGROS

*L'entreprise GEOFLEX est opérateur de nouveaux services d'augmentation GNSS (Global Navigation Satellite System – GPS, GLONASS, BEIDOU, GALILEO). Elle propose à ses utilisateurs un positionnement en temps réel centimétrique fiable et continu partout dans le monde reposant sur la technologie PPP-CNES, industrialisée, codéveloppée, et commercialisée par GEOFLEX.*

*Cette solution innovante permet de positionner un récepteur GNSS en mode statique ou cinématique par PPP (Positionnement Ponctuel Précis) en temps réel ou en temps différé avec résolution des ambiguïtés entières de phase en vraie "zéro-différence". Grâce à cette technologie, l'entreprise propose des flux de corrections normalisés permettant de se positionner en mode cinématique en temps réel avec une précision horizontale de 4 cm à 95 % du temps. Cette précision est "classiquement" obtenue après 30 minutes de convergence. L'objectif de cet article est de présenter les résultats d'une analyse de performances d'une technique PPP à convergence rapide, dite PPP-RTK (Real Time Kinematic), dans diverses conditions. L'étude fait ressortir qu'il est possible de diviser le temps de convergence par quatre par rapport à une solution PPP-IAR (Integer Ambiguity Resolution) "classique".*

## MOTS-CLÉS

GNSS, PPP, PPP-IAR, PPP-RTK, convergence, ionosphère, troposphère

dans un contexte de réseau est présentée. La deuxième partie est consacrée à une analyse dans différentes conditions d'activités ionosphériques.

## PPP en temps réel centimétrique à convergence rapide

La technique PPP consiste à prendre en compte tous les termes de l'équation de mesure GNSS en modélisant de manière déterministe toutes les erreurs "satellites dépendantes", puis en estimant de manière stochastique toutes les autres erreurs dépendant du mobile et de son contexte d'observation. Contrairement au positionnement différentiel, aucune différentiation d'observation n'est réalisée pour éliminer des erreurs corrélées entre une ou plusieurs base(s) et le mobile. De ce fait, la précision du PPP a l'immense avantage de ne pas dépendre de l'éloignement à la première base ou station GNSS permanente.

Les équations d'observations de pseudo-distance et de phase pour un récepteur  $r$ , un satellite  $s$  et une fréquence  $i$  sont indiquées ci-dessous. En bleu sont indiquées les variables déterministes, en orange les variables stochastiques estimées et en rouge les variables dépendant de variables déterministes et stochastiques.

### Équation de mesure de pseudo-distance :

$$P_{r,i}^s = \rho_r^s + c(\delta t_{r,P_i} - \delta t_{P_i}^s) + I_{r,i}^s + T_r + M_{r,P_i} + b_{r,P_i} - b_{P_i}^s + \varepsilon_{P_i}$$

où  $P_{r,i}^s$  représente la mesure de pseudo-distance sur le code,  $\rho_r^s$  la distance géométrique entre le satellite et le

## Introduction

L'utilisation du positionnement par satellites GNSS (Global Navigation Satellites System) est aujourd'hui largement démocratisée. De plus en plus d'applications métier dans les domaines du géospatial, de la construction, de l'agriculture, de la mobilité automobile, maritime et aérienne, ainsi que dans les services géolocalisés grands publics sur Smartphone, requièrent aujourd'hui un positionnement temps réel et précis. L'entreprise GEOFLEX [1] est opérateur de nouveaux services d'augmentation de la précision, de l'intégrité et de la continuité d'opération des GNSS, afin de pouvoir répondre très facilement partout dans le monde à cette demande. Pour ce faire, GEOFLEX opère des services de corrections GNSS permettant de se positionner

en mode PPP-IAR temps réel (Precise Point Positioning with Integer Ambiguity Resolution ; [2]) avec une précision centimétrique sur terre, sur mer et dans les airs, utilisant la technologie PPP-CNES [3]. Cependant cette technique PPP-IAR nécessite un temps d'initialisation d'une trentaine de minutes avant de pouvoir fixer de manière fiable les ambiguïtés entières de phase pour fournir un positionnement très précis, ce qui peut parfois être contraignant pour certaines applications. Le CNES et GEOFLEX se sont donc penchés sur une technique de PPP à convergence rapide décrite dans la suite de cet article. L'objectif de cet article est d'évaluer les performances de cette technique dite PPP-RTK dans diverses situations. Après une présentation succincte de cette technique et de la méthodologie employée, une première analyse des performances

récepteur,  $c$  la célérité de la lumière,  $\delta t_{r,p_i}$  et  $\delta t^s_{p_i}$  les décalages d'horloge du récepteur et du satellite de code respectivement,  $I^s_{r,i}$  le délai ionosphérique sur la ligne de vue satellite-récepteur,  $T_r$  le délai troposphérique sur cette même ligne de vue,  $M_{r,p_i}$  l'erreur de multi-trajet,  $b_{r,p_i}$  le biais instrumental récepteur,  $b^s_{p_i}$  le biais instrumental satellite, et  $\varepsilon_{p_i}$  le bruit de la mesure de pseudo-distance.

**Équation de mesure de phase :**

$$L^s_{r,i} = \rho^s_r + c(\delta t_r - \delta t^s_{L_i}) - I^s_{r,i} + T_r + M_{r,L_i} + \lambda_i W^s_{r,i} + \lambda_i N^s_{r,i} + b_{r,L_i} - b^s_{L_i} + \varepsilon_{L_i}$$

où  $L^s_{r,i}$  est la mesure de phase sur la fréquence  $i$  en mètre,  $\delta t_r, L_i$  et  $\delta t^s_{L_i}$  les décalages d'horloge récepteur et satellite de phase respectivement,  $\lambda_i$  la longueur d'onde,  $W^s_{r,i}$  le déphasage "Phase Wind-Up",  $N^s_{r,i}$  l'ambiguïté entière sur la mesure de phase, et  $\varepsilon_{L_i}$  le bruit de la mesure de phase.

Les principaux éléments déterministes sont les corrections précises d'orbites, d'horloges et de biais de mesures satellites. Ces données sont calculées et diffusées en temps réel par GEOFLEX à l'aide d'un réseau mondial d'environ 80 stations GNSS permanentes. La qualité du positionnement PPP dépend ainsi de la qualité de ces corrections satellites avec typiquement une erreur d'orbite de l'ordre de 2.5 cm RMS et une erreur d'horloge satellite de l'ordre de 0.3 ns RMS, soit 9 cm en distance. D'autre part, l'accès à la précision centimétrique est conditionné par la résolution des ambiguïtés

entières des mesures de phase GNSS du mobile de l'utilisateur. Les corrections GEOFLEX sont compatibles avec la nature entière de ces ambiguïtés grâce à la technologie développée par le CNES [4]. L'utilisation de ces corrections permet alors de se positionner en mode PPP-IAR avec des ambiguïtés entières de phase résolues et une pleine précision et robustesse atteinte au bout de 30 min.

Les éléments estimés de manière statistique sont la position et les horloges (une par signal) du mobile de l'utilisateur ainsi que les délais ionos-

phériques et troposphériques affectant les signaux GNSS lorsqu'ils traversent l'atmosphère. Ces derniers ont une influence directe sur la convergence du PPP- IAR du fait que leurs estimateurs soient corrélés avec ceux des ambiguïtés. L'idée du PPP à convergence rapide est d'introduire des valeurs *a priori* aux délais atmosphériques, afin de guider l'estimation des positions et d'accélérer la fixation des ambiguïtés entières de phase en quelques minutes. On parle alors de PPP-RTK. Ces délais atmosphériques proviennent de stations nommées "bases atmosphériques"

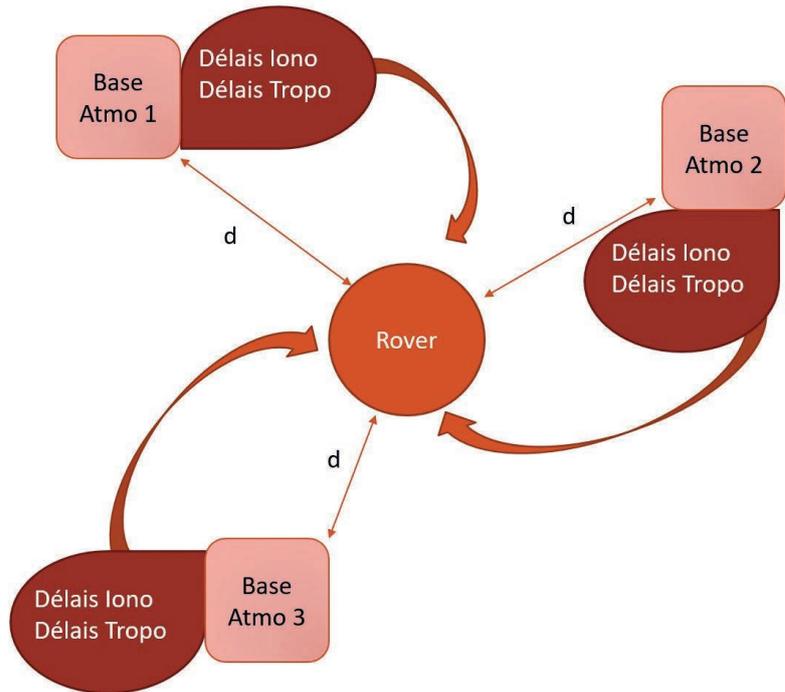


Figure 1. Schéma représentant les bases atmosphériques pour lesquelles sont calculés les délais troposphériques et ionosphériques introduits dans le traitement PPP-RTK du mobile.

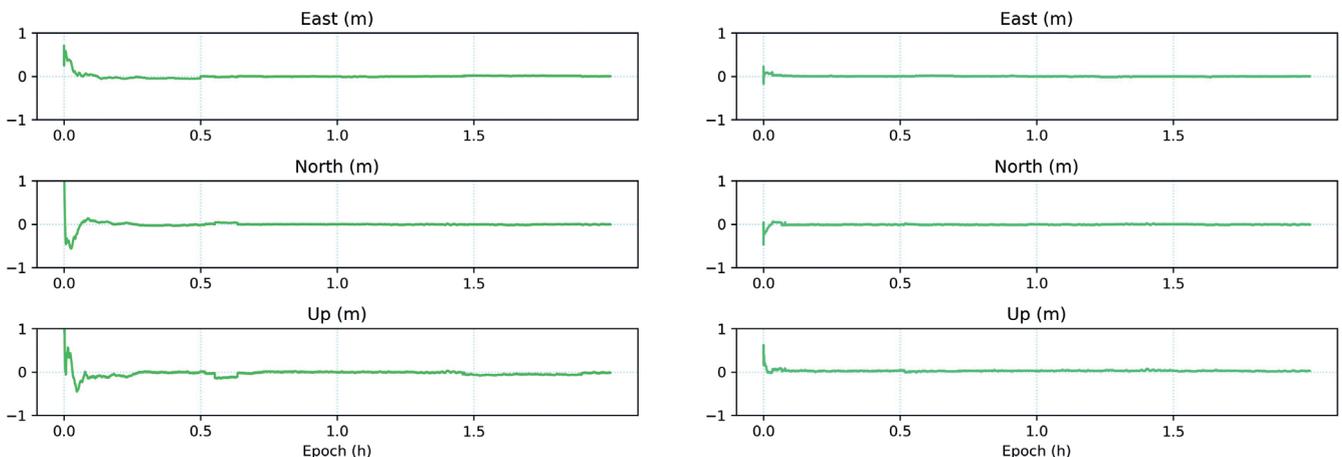


Figure 2. Séries temporelles typiques des composantes Est (haut), Nord (milieu) et de Hauteur (bas) obtenues en PPP-IAR (gauche) et en PPP-RTK (droite).



(ou "bases atmo") et dont les données sont introduites dans un traitement PPP-IAR classique pour fournir une solution PPP-RTK (figure 1).

La figure 2 présente respectivement les séries temporelles typiques d'un positionnement obtenu en mode PPP-IAR et en mode PPP-RTK. Ces deux calculs ont été réalisés avec les données d'une station permanente appartenant au RGP [5] de l'IGN [6]. Le temps de convergence de la solution PPP-IAR est nettement plus élevé que pour la solution PPP-RTK. Les séries PPP-IAR évoluent plus lentement durant les premiers instants du calcul que celles de la solution PPP-RTK. De plus, lors des toutes premières époques du calcul, le positionnement PPP-IAR est plus éloigné de la réalité. Une fois les solutions convergées, les stabilités des positions sont semblables. La précision est alors centimétrique dans les deux cas.

## Méthodologie

Les performances du PPP-RTK relativement au PPP-IAR ont été évaluées en mode temps réel simulé. Les mêmes corrections et algorithmes que ceux utilisés en temps réel ont été utilisés. Des stations permanentes appartenant au RGP servent à simuler des mobiles et des bases atmosphériques. Leurs données, échantillonnées à 1 Hz, ont été validées pour éviter tout biais d'analyse, et traitées à différents moments de la journée. Pour chaque journée étudiée et chaque mobile, 21 sessions glissantes sur une heure et d'une durée de 2 heures ont été analysées statistiquement. Deux indicateurs ont été quantifiés :

- le temps de convergence calculé à partir de l'erreur sur la position ; la solution est considérée convergée lorsque l'erreur sur chaque composante est inférieure à 10 cm pendant au moins 2 minutes consécutives ;
- le temps de convergence calculé à partir d'un écart-type glissant sur 5 minutes pour chaque position à chaque époque ; la solution est considérée convergée, c'est-à-dire que la position est stable, lorsque l'erreur sur la position par composante est inférieure à 5 cm pendant au moins 2 minutes consécutives.

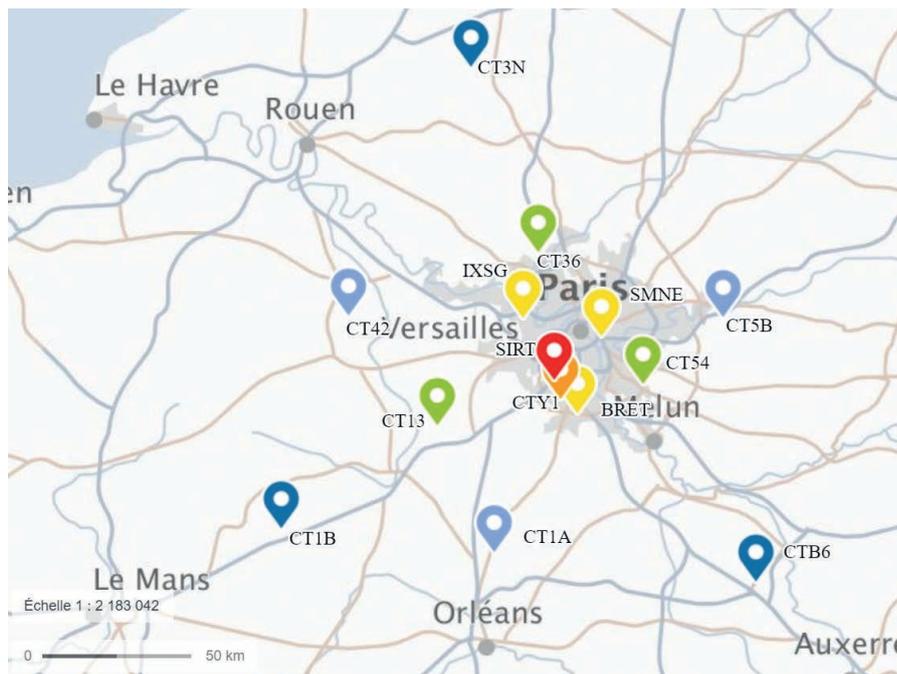


Figure 3. Exemple des différentes configurations testées avec un mobile (rouge) : une base atmo à moins de 10 km (orange), des bases atmo situées entre 10 et 30 km (jaune), des bases atmo situées entre 30 et 60 km (vert), des bases atmo situées entre 60 à 100 km (bleu clair), et des bases atmo situées à plus de 100 km (bleu foncé).

Dans le cas du mode PPP-IAR, la fixation des ambiguïtés entières de phase est autorisée à partir de 30 min. Cela permet à l'ensemble des paramètres stochastiques de converger suffisamment pour fixer les ambiguïtés entières avec une bonne confiance. Une fixation prématurée pourrait en effet introduire des fixations inexactes, ou "Bad Fix", pouvant se caractériser par un positionnement stabilisé mais biaisé, ainsi que par des sauts ponctuels du positionnement. Dans le cas du PPP-RTK, la levée des ambiguïtés est autorisée à partir de 2 min.

## Tests avec différentes configurations réseau

### Description

Plusieurs topologies de bases atmo ont été étudiées. Cinq configurations ont été retenues :

- 1) un mobile à moins de 10 km d'une base atmo ;
- 2) un mobile situé entre 10 et 30 km de 3 bases atmo ;
- 3) un mobile situé entre 30 et 60 km de 3 bases atmo ;
- 4) un mobile situé entre 60 et 100 km de 3 bases atmo ;
- 5) un mobile situé entre 100 et 150 km de 3 bases atmo.

À titre indicatif, 30 km de distance entre le mobile et les bases atmo correspond à une configuration NRTK (Network Real Time Kinematic) de type Orphéon [7] ou Teria [8] pour laquelle les inter-distances entre les stations permanentes sont d'environ 60 km. La configuration 4 correspondant à une inter-distance entre stations permanentes de 120 km, d'une densité deux fois plus faible que les réseaux NRTK précités, conforme au réseau de base atmosphériques que

Bases atmo - mobile	0 – 10 km	10 – 30 km	30 – 60 km	60 – 100 km	100 – 150 km
Jours d'études	4 jours : 249/2017, 251/2017, 271/2017, 100/2018				
Nbre de mobiles	6				
Nbre de sessions	504	504	378	483	378
Durée des sessions	2h				

Table 1. Informations concernant les tests avec différentes configurations réseau.

GEOFLEX opérera dès 2019. La configuration 5 s'approche de la géométrie du sous-réseau temps réel des stations du RGP appartenant à l'IGN.

Dans les contextes en réseau (configurations 2 à 5), les bases atmosphériques ont été sélectionnées pour couvrir de manière homogène la zone dans laquelle se situent les mobiles (figure 2). Ces cinq tests ont été réalisés avec six stations simulant des mobiles, sur quatre jours, dans des conditions ionosphériques moyennes pour la période actuelle [9], comme indiqué dans la table 1.

### Résultats

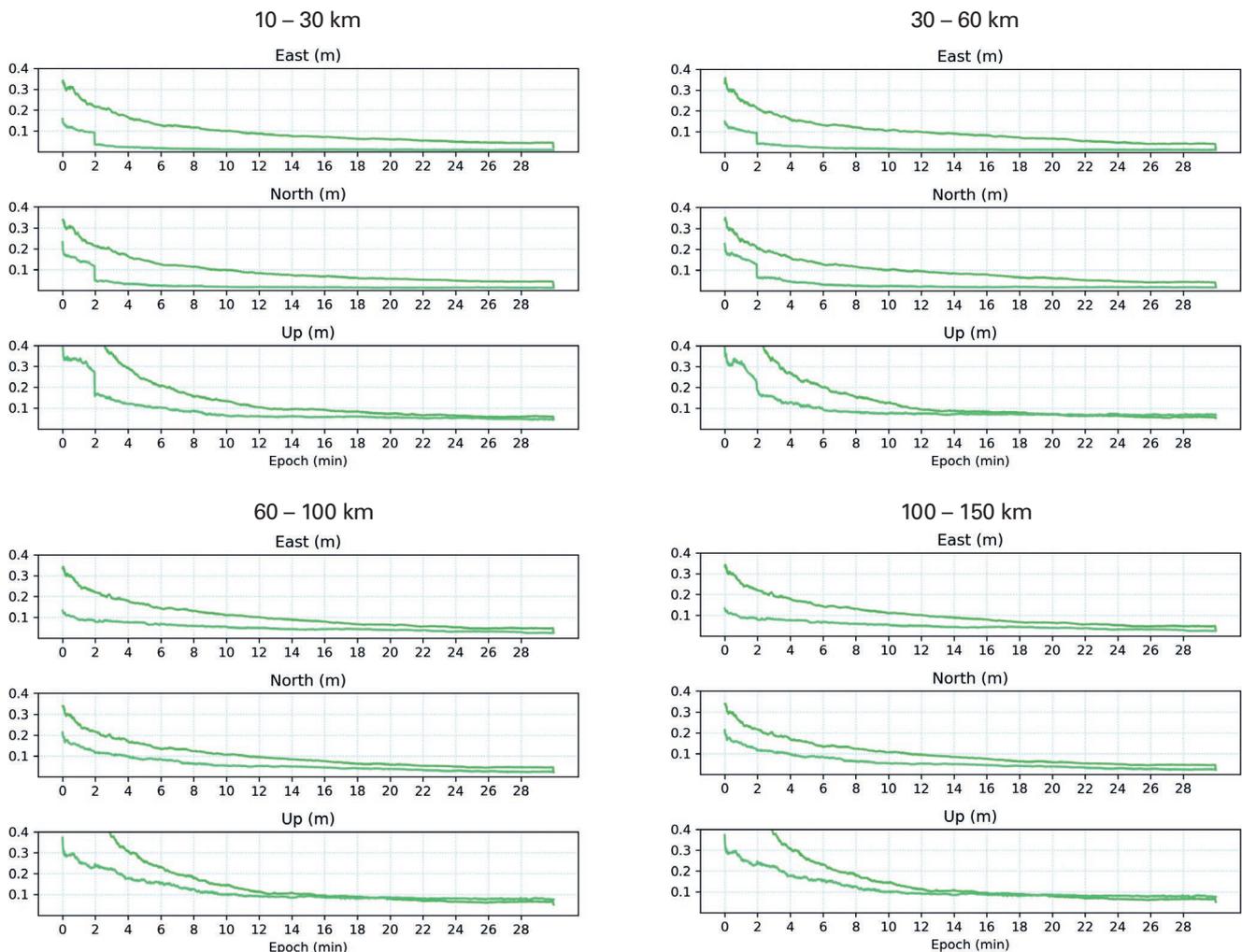
Les indicateurs de performances du PPP-IAR et PPP-RTK décrits dans la section précédente ont été quantifiés à partir de toutes les sessions calculées sur les différents jours et stations d'études. Pour chaque indicateur, la

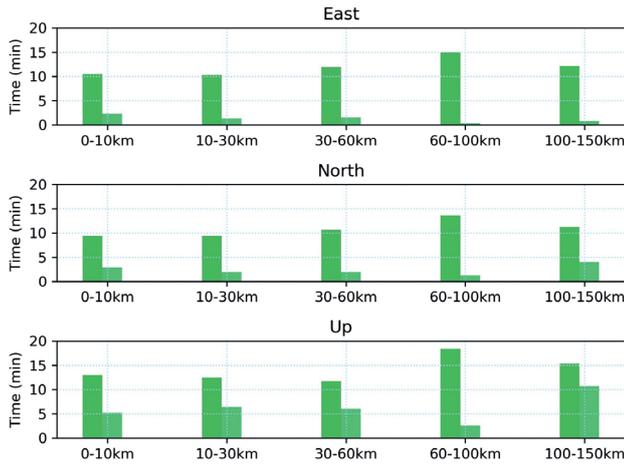
médiane et le percentile à 68 % ont été calculés à chaque époque de traitement.

La figure 4 montre les médianes des erreurs sur les positions du mobile pour chacune des configurations de base atmo durant les 30 premières minutes de calculs. L'erreur sur le positionnement du mobile est obtenue en comparant les coordonnées

obtenues aux coordonnées officielles fournies par le RGP. Ces résultats montrent que le PPP-RTK fournit des positions précises plus rapidement que le PPP-IAR, et ce pour n'importe quelle configuration réseau. En planimétrie, le seuil des 10 cm est atteint en 2 à 3 minutes selon les configurations.

**Figure 4.** Médianes des séries temporelles des composantes Est (haut), Nord (milieu) et de Hauteur (bas) des mobiles pour les solutions PPP-IAR, en vert foncé (haut), et PPP-RTK, en vert clair (bas), pour chaque configuration réseau.





**Figure 5.** Médianes des temps de convergence des composantes Est (haut), Nord (milieu) et de Hauteur (bas) des solutions PPP-IAR, en vert foncé (gauche), et PPP-RTK, en vert clair (droite), pour chaque configuration réseau.

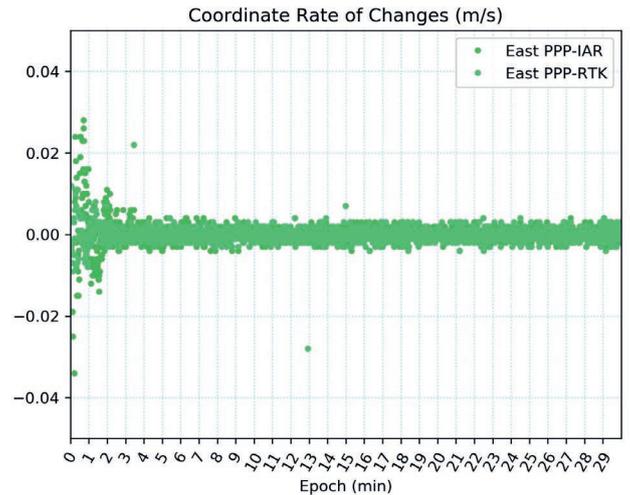
La *figure 5* présente les temps de convergence des solutions. Elle montre que le temps de convergence du positionnement planimétrique est bien plus rapide pour le PPP-RTK que pour le PPP-IAR. En effet, le temps de convergence du PPP-IAR est en général divisé par quatre avec la solution PPP-RTK.

Cette figure confirme aussi que la convergence est plus rapide même lorsque les bases sont situées à plus de 100 km. Seule la configuration avec trois bases à plus de 100 km présente des résultats un peu moins performants que pour les autres configurations. Mais, le temps de convergence du positionnement planimétrique reste inférieur à 5 minutes dans tous les cas. Ces résultats indiquent que les performances du PPP-RTK sont indépendantes de la géométrie des bases atmo. Les solutions PPP-RTK présentent dans

la plupart des cas un saut au bout de 2 minutes du fait que les ambiguïtés commencent à être fixées à des valeurs entières dès cet instant.

À noter que certaines stations jouant le rôle de mobiles et de bases atmosphériques avaient des données manquantes sur certaines sessions. Le nombre de sessions utilisées dans chaque cas n'était donc pas toujours rigoureusement identique.

La *table 2* indique les temps de convergence obtenus avec les solutions PPP-IAR et PPP-RTK de la configuration 4. Les deux indicateurs montrent que la solution PPP-RTK fournit des positions plus précises et plus stables pendant les premières minutes du calcul que le PPP-IAR, et ce pour les trois composantes. De plus, les médianes et percentiles 68 % des temps de convergence sont très proches pour les composantes planimétriques. Cela signifie que les



**Figure 6.** Taux de variation (CROC pour Coordinate Rate Of Change) de la composante Est de la station CHEZ en mode PPP-RTK avec des bases atmosphériques distantes entre 60 et 100 km.

séries de chacune des sessions sont centrées autour d'une même tendance et présentent une faible dispersion. En effet, le ratio entre les percentiles 68 % et les médianes est d'environ 2. En revanche, ce rapport peut être supérieur à 2 pour la composante de hauteur, indiquant que les séries temporelles correspondantes peuvent être plus dispersées que celles des composantes planimétriques.

La *figure 6* montre un exemple d'un autre indicateur. Il s'agit du taux de variation de la composante Est pour un mobile situé à 60-100 km des bases atmo sur une session. Ce taux de variation correspond à la dérivée temporelle première de la position [10]. Il tend vers zéro lorsque la position se stabilise. Cette figure confirme également que les coordonnées calculées durant les premières minutes de calcul sont moins dispersées avec le PPP-RTK qu'avec le PPP-IAR.

	Erreurs sur la position (seuil 10 cm)				Stabilité de la position sur 5 min (seuil 5 cm)			
	Médiane		Percentile 68 %		Médiane		Percentile 68 %	
	PPP-IAR	PPP-RTK	PPP-IAR	PPP-RTK	PPP-IAR	PPP-RTK	PPP-IAR	PPP-RTK
<b>Est</b>	14 min 59 s	0 min 21 s	21 min 35 s	1 min 58 s	3 min 20 s	0 min 40 s	5 min 16 s	2 min 4 s
<b>Nord</b>	13 min 38 s	1 min 12 s	21 min 18 s	1 min 58 s	3 min 22 s	1 min 28 s	5 min 18 s	2 min 46 s
<b>Hauteur</b>	18 min 23 s	2 min 36 s	28 min 43 s	14 min 15 s	7 min 40 s	2 min 14 s	11 min 14 s	6 min 58 s

**Table 2.** Médianes et percentiles 68 % des temps de convergence des solutions PPP-IAR et PPP-RTK calculés à partir des erreurs sur la position et à partir de la stabilité de la position sur 5 minutes ; configuration réseau avec trois bases atmo situées entre 60 et 100 km du mobile.

Activité ionosphérique	Faible	Moyenne	Forte
Jours d'étude	252/2017, 60/2018, 61/2018, 62/2018	249/2017, 251/2017, 271/2017, 100/2018	250/2017, 270/2017
Nombre de mobiles	6		
Nombre de sessions	474	483	189
Durée des sessions	2 h		

Table 3. Informations concernant les tests sur l'influence des conditions ionosphériques.

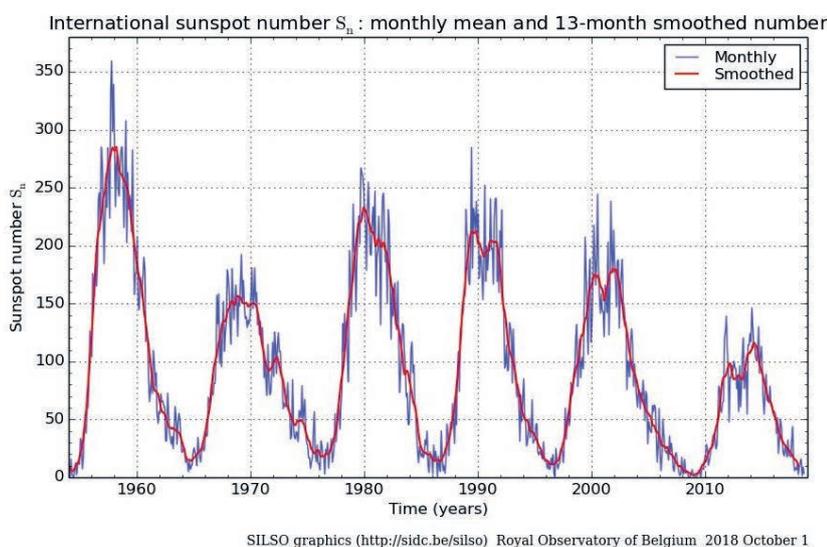


Figure 7. Nombre de taches solaires au cours des dernières décennies [13]. Ces cycles impactent directement l'activité ionosphérique.

## Influence des conditions ionosphériques

### Description

Les résultats suivants sont focalisés sur les performances que pourra fournir le réseau GEOFLEX, c'est-à-dire des bases atmosphériques interdistantes de 120 km (mobile à 60 km des bases atmosphériques les plus proches, cas 3 et 4 précédents), sous

différentes conditions ionosphériques. Quatre jours de faible activité, quatre jours de moyenne activité et deux jours de forte activité ionosphérique ont été testés (table 3). Ces jours ont été choisis en 2017 et 2018. Ils ont été classifiés selon l'activité ionosphérique au regard de divers indices comme l'indice d'activité géomagnétique du soleil ( $A_p$ ) ainsi que le contenu total vertical en électron

(VTEC) [11]. Cependant, cette classification a été réalisée relativement à la période actuelle. L'activité ionosphérique est sujette à de nombreux cycles [12] et les années 2017 et 2018 se situent dans une période de basse activité ionosphérique. L'activité ionosphérique est liée aux cycles des taches solaires. La figure 7 montre ces cycles au cours des dernières décennies. Ainsi les jours de forte activité ionosphérique selon notre classification correspondraient à des jours d'activité moyenne il y a quelques années. Les calculs ont été réalisés avec les mêmes stations que précédemment.

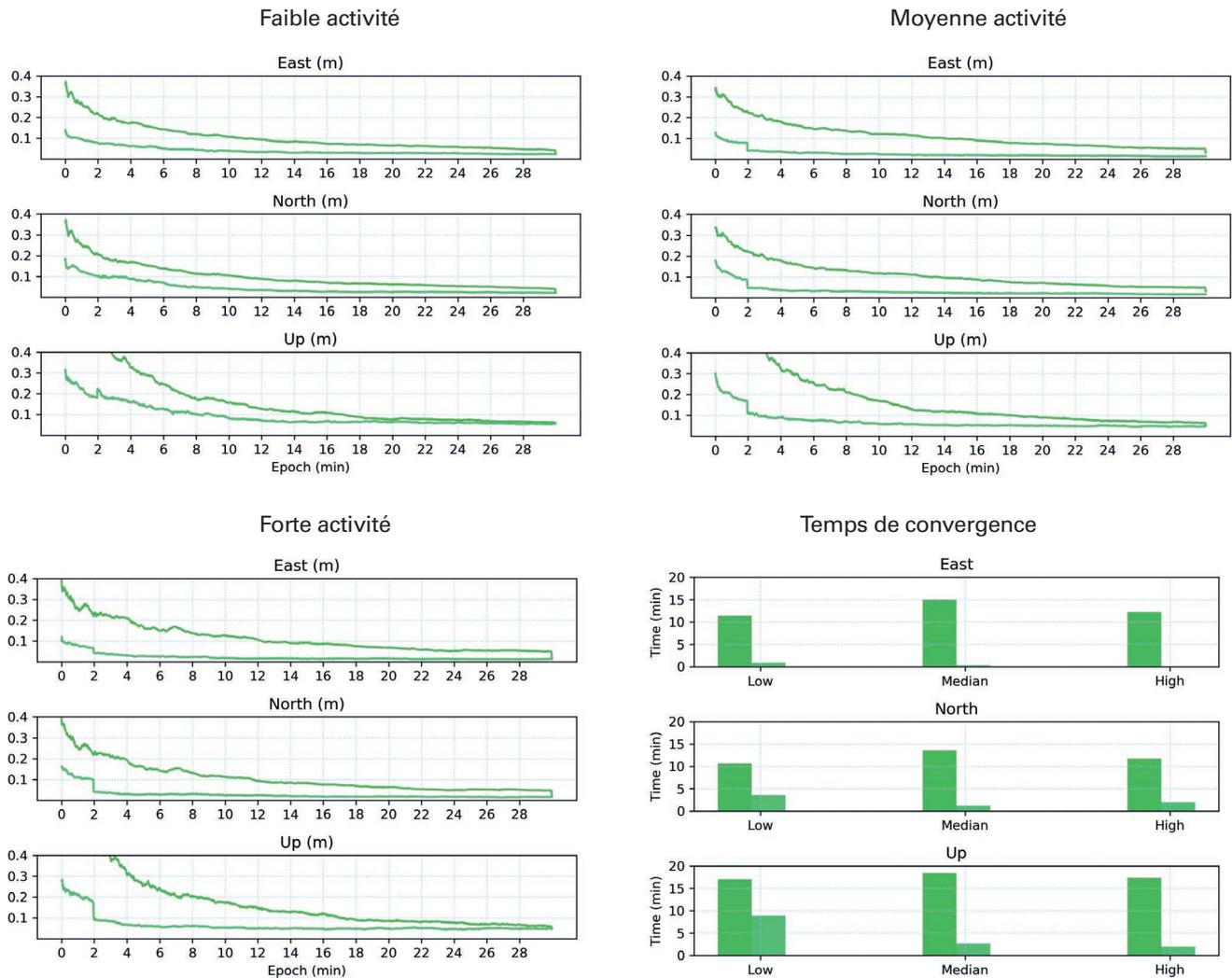
## Résultats

La figure 8 présente la médiane des erreurs sur la position pour chacune des différentes conditions d'activités ionosphériques ainsi que les temps de convergences associés. Comme précédemment, les positions calculées en mode PPP-RTK convergent plus rapidement qu'en mode PPP-IAR. Ces résultats montrent aussi que les performances obtenues lorsque l'activité ionosphérique est moyenne ou forte sont très semblables. En revanche la vitesse de convergence sous une activité ionosphérique faible apparaît moins rapide et plus variable. Ce résultat peut s'expliquer par le fait qu'il est d'autant plus difficile d'estimer un signal que son amplitude est faible.

La table 4 présente les temps de convergence calculés à partir des erreurs sur la position et ceux calculés à partir des écarts-types glissants sur 5 minutes lors d'une forte activité iono-

	Erreurs sur la position (seuil 10 cm)				Stabilité de la position sur 5 min (seuil 5 cm)			
	Médiane		Percentile 68 %		Médiane		Percentile 68 %	
	PPP-IAR	PPP-RTK	PPP-IAR	PPP-RTK	PPP-IAR	PPP-RTK	PPP-IAR	PPP-RTK
Est	12 min 44 s	0 min 5 s	20 min 11 s	1 min 58 s	3 min 13 s	0 min 10 s	4 min 49 s	1 min 27 s
Nord	11 min 38 s	1 min 44 s	18 min 35 s	1 min 58 s	3 min 16 s	0 min 57 s	4 min 55 s	1 min 51 s
Hauteur	17 min 13 s	1 min 58 s	28 min 19 s	8 min 51 s	7 min 8 s	1 min 58 s	9 min 10 s	5 min 20 s

Table 4. Médianes et percentiles 68 % des temps de convergence des solutions PPP-IAR et PPP-RTK calculés à partir des erreurs sur la position et à partir de la stabilité de la position sur 5 minutes ; cas d'une forte activité ionosphérique.



**Figure 8.** Médianes des séries temporelles des composantes Est (haut), Nord (milieu) et de Hauteur (bas) des solutions PPP-IAR, en vert foncé (courbe supérieure), et PPP-RTK, en vert clair (courbe inférieure), pour chaque condition d'activité ionosphérique. Les temps de convergence des positions sont présentés pour PPP-IAR à gauche et PPP-RTK à droite.

sphérique. Les médianes et percentiles 68 % des temps calculés avec les erreurs sur la position sont assez proches. Le ratio entre les percentiles 68 % et les médianes est de 2 pour les composantes planimétriques. Il y a donc une bonne répétabilité des résultats entre les sessions. Les temps de convergence calculés avec les écarts-types glissants servant à déterminer la stabilité de la position sur 5 minutes font ressortir que la solution PPP-RTK se stabilise trois à quatre fois plus rapidement que la solution PPP-IAR sous de fortes conditions ionosphériques.

Les résultats obtenus lors d'une activité ionosphérique moyenne sont semblables à ceux obtenus lors d'une activité ionosphérique forte. Les écarts entre les médianes et percentiles 68 %

sont faibles en planimétrie et ce pour les trois types d'activités ionosphériques.

## Conclusions

Dans tous les cas étudiés testant différentes configurations réseaux et activités ionosphériques, la technique du PPP-RTK développée par GEOFLEX présente un temps de convergence nettement réduit par rapport à la technique du PPP-IAR. Les écarts entre les positions estimées et la position de référence diminuent de manière significative durant les premières époques de calcul. Ainsi, la durée de convergence sous les 10 cm obtenue avec un réseau d'une inter-distance deux à trois fois moins dense qu'un réseau NRTK

classique est inférieure à 5 minutes pour les trois composantes. Dans cette configuration extrême, les durées de convergence des composantes planimétriques sont jusqu'à quatre fois plus courtes qu'en PPP-IAR. L'amplitude de l'activité ionosphérique ne semble pas impacter les performances du PPP-RTK, mais ce point mérite d'être approfondi avec des données provenant de régions proches de l'équateur géomagnétique où l'ionosphère a une activité plus intense.

La méthode présente donc l'avantage de pouvoir couvrir de vastes territoires qui ne pourraient l'être en NRTK, avec des zones plus ou moins denses en fonction de l'intensité de l'activité économique par exemple. La problématique réside sur la fourniture de suffisamment bons



*a priori* aux effets de l'atmosphère sur la propagation des signaux GNSS, afin de pouvoir accélérer le temps de convergence et/ou fiabiliser la fixation des ambiguïtés entières de phase, avec un temps majoré à 30 minutes en ne disposant que de corrections déterministes d'orbito-synchro.

À noter également que la diffusion récente de signaux sur la bande GALILEO E6 (22 satellites en fin d'année 2018 – 20 FOC & 2 IOV) et à venir de la bande BEIDOU B3 (18 MEO 3S) permet de nouvelles combinaisons de fréquences E5a, E6, E1 compatibles d'une fixation des ambiguïtés entières de phase instantanée comme l'a montré l'expérimentation du CNES réalisée en juin 2018 [14]. L'appui d'un réseau de bases atmosphériques à 120 km permettra alors une meilleure intégrité pour les récepteurs E5a, E6, E1, tout en permettant une convergence rapide pour tous les autres récepteurs, monofréquences compris. ●

NDLR : Cet article a été soumis dans le cadre du prix de l'AFT 2018.

## Remerciements

L'auteur tient particulièrement à remercier la société GEOFLEX et notamment son directeur général, Romain LEGROS, ainsi que le directeur technique Développement GNSS, François FUND, pour leur accompagnement dans la bonne réalisation du projet et pour leur relecture attentive. L'auteur

adresse également ses remerciements à Paulo DE OLIVEIRA JR., professeur assistant à Université fédérale du Paraná à Curitiba (Brésil), qui a épaulé ce projet pour la partie réalisée au Brésil.

## Contact

### Iris de GELIS

Diplômée du cycle des Ingénieurs de l'ENSG, spécialité Acquisition 3D télédétection et technologies de géolocalisation. Promotion 2018  
iris.de-gelis@ensg.eu

## Bibliographie

- [1] Entreprise GEOFLEX - <http://geoflex.fr>
- [2] Laurent Morel et al. "PPP, la maturité". In : Revue XYZ n° 138 (2014), p. 39-47.
- [3] White Paper sur la technique de résolution des ambiguïtés entières de phase du CNES - <http://www.ppp-wizard.net/Articles/WhitePaperL5.pdf>
- [4] Accord GEOFLEX – CNES - <http://gpsworld.com/cnes-and-geoflex-sign-agreement-on-satellite-positioning>
- [5] Réseau GNSS Permanent opéré par l'IGN - <http://rgp.ign.fr>
- [6] Institut national de l'information géographique et forestière <http://rgp.ign.fr>
- [7] Réseau Orphéon opéré par GEODATA DIFFUSION <http://reseau-orpheon.fr>
- [8] Réseau Teria opéré par Exagone <https://www.reseau-teria.com>
- [9] Solar Cycle Prediction - NASA <https://solarscience.msfc.nasa.gov/predict.shtml>

- [10] Miso Kim et Kwan-Dong Park. "Development and Positioning Accuracy Assessment of Single-Frequency Precise Point Positioning Algorithms by Combining GPS Code-Pseudorange Measurements with Real-Time SSR Corrections". Dans : Sensors 17.6 (2017), p. 1347.
- [11] Ian Poole. "Understanding Solar Indices". In : QST (2002).
- [12] Oliveira Junior PS. "Definition and implementation of a new service for precise GNSS positioning". Doctoral dissertation, Paris, CNAM (2017)
- [13] Observatoire royal de Belgique <http://sidc.be/silso>
- [14] Denis Laurichesse et Simon Banville. "Innovation: Instantaneous centimeter-level multi-frequency precise point positioning". Dans : GPS World (2018).

## ABSTRACT

*GEOFLEX is a company which operates new global augmentation GNSS services. For this, GEOFLEX signed an exclusive and global agreement relative to the industrialization and commercialization of the PPP-CNES technology. This solution makes real-time PPP with integer phase ambiguities achievable all over the world with a precision of up to 4 cm (2D-95%) with a 30 minutes convergence time. This paper evaluates performances of a fast convergence PPP technic developed by GEOFLEX in several conditions. The study points out that it is possible to divide PPP convergence time by four.*

### Olivier Reis

Ingénieur géomètre-topographe  
ENSAI Strasbourg - Diplômé de l'Institut  
de traducteurs et d'interprètes (ITI) de Strasbourg  
9, rue des Champs  
F-57200 SARREGUEMINES  
Téléphone / télécopie : 03 87 98 57 04  
Courriel : o.reis@infonie.fr

### Reinhard Stölzel

Ingénieur géomètre-topographe  
Interprète diplômé de la  
Chambre de commerce et d'industrie de Berlin  
Heinrich-Heine-Straße 17, D-10179 BERLIN  
Téléphone : 00 49 30 97 00 52 60  
Télécopie : 00 49 30 97 00 52 61  
Courriel : stoelzel@aol.com

Pour toutes vos traductions d'allemand  
et d'anglais en français en topographie –  
géodésie – géomatique – GNSS

Pour toutes vos traductions de français  
et d'anglais en allemand en géomatique  
– GNSS – infrastructures de transport

Des topographes traducteurs d'expérience à votre service