

## LES EFFETS IONOSPHERIQUES AFFECTANT LES SYSTEMES DE POSITIONNEMENT PAR SATELLITES

Sandrine LEJEUNE

### Résumé

La précision du positionnement d'un utilisateur du GPS peut être dégradée de manière significative par l'effet de l'ionosphère sur les signaux émis par les satellites GPS. L'erreur ionosphérique résiduelle affectant les techniques de positionnement relatives basées sur le GPS dépend du contenu électronique total (TEC) et de sa variabilité dans l'espace et dans le temps. En ce qui concerne la technique du « Real Time Kinematic (RTK) », l'impact de cette erreur ionosphérique résiduelle se traduit souvent par une mauvaise résolution des ambiguïtés entières et fait l'objet de la présente étude.

### Abstract

*The precision of the GPS positioning can be significantly degraded by the ionospheric effect on GPS satellite signals. The ionospheric residual error affecting the relative positioning techniques based on GPS depends on the Total Electron Content (TEC) and on its variability in space and time. In the case of the so-called Real Time Kinematic positioning technique (RTK), the impact of this ionospheric residual error results in a bad resolution of integer ambiguities and is the subject of the present study.*

### I. INTRODUCTION

Actuellement, l'effet de la réfraction ionosphérique reste la principale limitation à la précision du GPS en temps réel.

D'une manière générale, le calcul de positions par GPS est effectué en mode différentiel. En mode différentiel, on se base sur une station de référence dont la position est connue pour estimer différentes erreurs affectant les mesures GPS, comme celle liée à la traversée de l'atmosphère, par exemple. Une fois ces informations obtenues, elles vont être communiquées aux utilisateurs itinérants. Ainsi, le récepteur itinérant va utiliser les corrections qu'il reçoit d'une station de référence pour corriger ses mesures et affiner le calcul de sa position. Le GPS différentiel permet donc de s'affranchir des différentes sources d'erreurs tant que leur influence reste spatialement corrélée, c'est-à-dire tant que la distance de la station de référence au mobile demeure « suffisamment courte » et si le rayonnement électromagnétique traverse la même ionosphère (Parkinson & Enge, 1996). L'expression « suffisamment courte » a une signification différente selon l'application (c'est-à-dire suivant la

précision demandée) :

- pour atteindre une précision centimétrique (précision élevée), la distance ne devrait pas excéder 10 à 20 km ; cette application emploie des mesures de phase et s'appelle habituellement *Real Time Kinematic* ou RTK ;
- pour obtenir une précision métrique (basse précision), la distance peut atteindre 1000 km ; cette application emploie seulement des mesures de codes et s'appelle habituellement DGPS.

Dans cet article, nous considérons uniquement l'effet de l'ionosphère sur le RTK. Cette application est particulièrement sensible à l'effet de l'ionosphère. L'effet résiduel de l'ionosphère sur le RTK dépend essentiellement de la variabilité de l'ionosphère, ou plus exactement de la variabilité du Contenu Electronique Total (TEC) sur les distances de l'ordre de quelques kilomètres. Le TEC est l'intégrale de la concentration en électrons libres de l'ionosphère sur le chemin séparant le satellite du récepteur GPS. Il est extrêmement variable dans l'espace et dans le temps.

Le RTK est donc affecté par les gradients à petite échelle de l'ionosphère. Les phénomènes pouvant provoquer de tels gradients dans l'espace sont essentiellement

les *Travelling Ionospheric Disturbances* ou TID, les scintillations et la présence éventuelle d'une instabilité dans le plasma ionosphérique (bruit ionosphérique) (Warnant, 1996).

Les TID sont des irrégularités dans la densité électronique de l'ionosphère qui se propagent à la manière d'une onde. De nos jours, il est généralement accepté que les TID trouvent leur origine dans un couplage entre l'atmosphère neutre et l'ionosphère. Les scintillations quant à elles, sont des variations rapides en amplitude et en phase de signaux électromagnétiques traversant des zones de l'ionosphère où la concentration en électrons libres est fortement inhomogène. Les graphiques des figures 1 et 2 représentent pour différents jours, les variations du TEC vertical en fonction du temps, induites par le passage d'une TID d'une part, et d'une « scintillation », d'autre part. Les jours sont notés par un nombre qui reprend les jours écoulés depuis le premier janvier de l'année considérée, cette notation sera la même tout au long de l'article. Ainsi 303/95 dans la figure 1 représente le jour 303 en 1995 soit le 30 octobre 1995.

La stratégie poursuivie dans cet article se décompose

en trois étapes. Premièrement, l'activité ionosphérique est mesurée. Deuxièmement, un lien entre cette activité ionosphérique et l'erreur sur les positions est établi (un logiciel a été développé pour ce faire). Finalement, ce lien va aboutir à la possibilité de définir un indice ionosphérique permettant aux utilisateurs d'évaluer l'impact de l'activité ionosphérique sur leurs applications.

## II. ANALYSES

La variabilité ionosphérique à petite échelle est la principale limite à la fiabilité et à la précision du RTK. La figure 3 montre pour trois jours de l'année 2003, la variation ionosphérique différentielle (entre Bruxelles et Bree dont l'inter-distance est de 98,27 km) obtenue grâce à un logiciel développé dans le cadre de la présente étude.

C'est sur base des fluctuations que l'on peut noter entre les différents jours, jour calme (jour 150/03) et jours agités (jours 11 et 15/03), que l'on va établir les critères qui serviront à la mise en place d'un indice de variabilité ionosphérique. Cet indice permettra aux utilisateurs du GPS de connaître l'activité ionosphérique et d'évaluer son influence sur le calcul de positions.

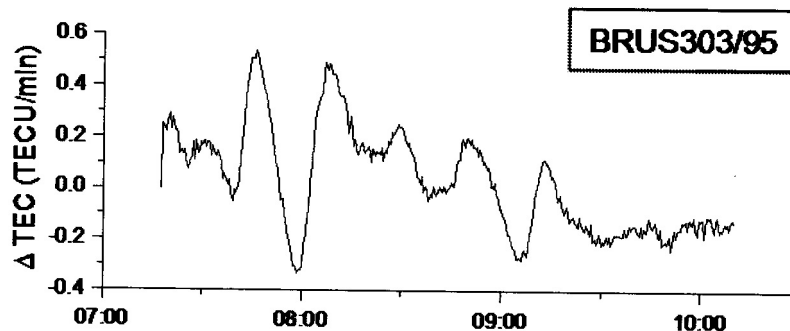


Figure 1. Effet d'une TID sur le TEC

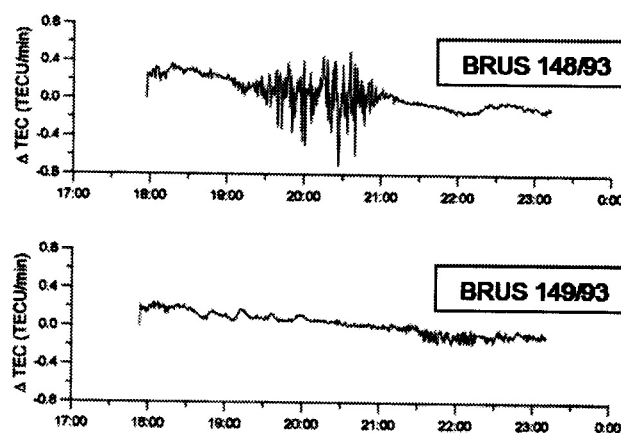


Figure 2. Effet de scintillations ionosphériques sur le TEC

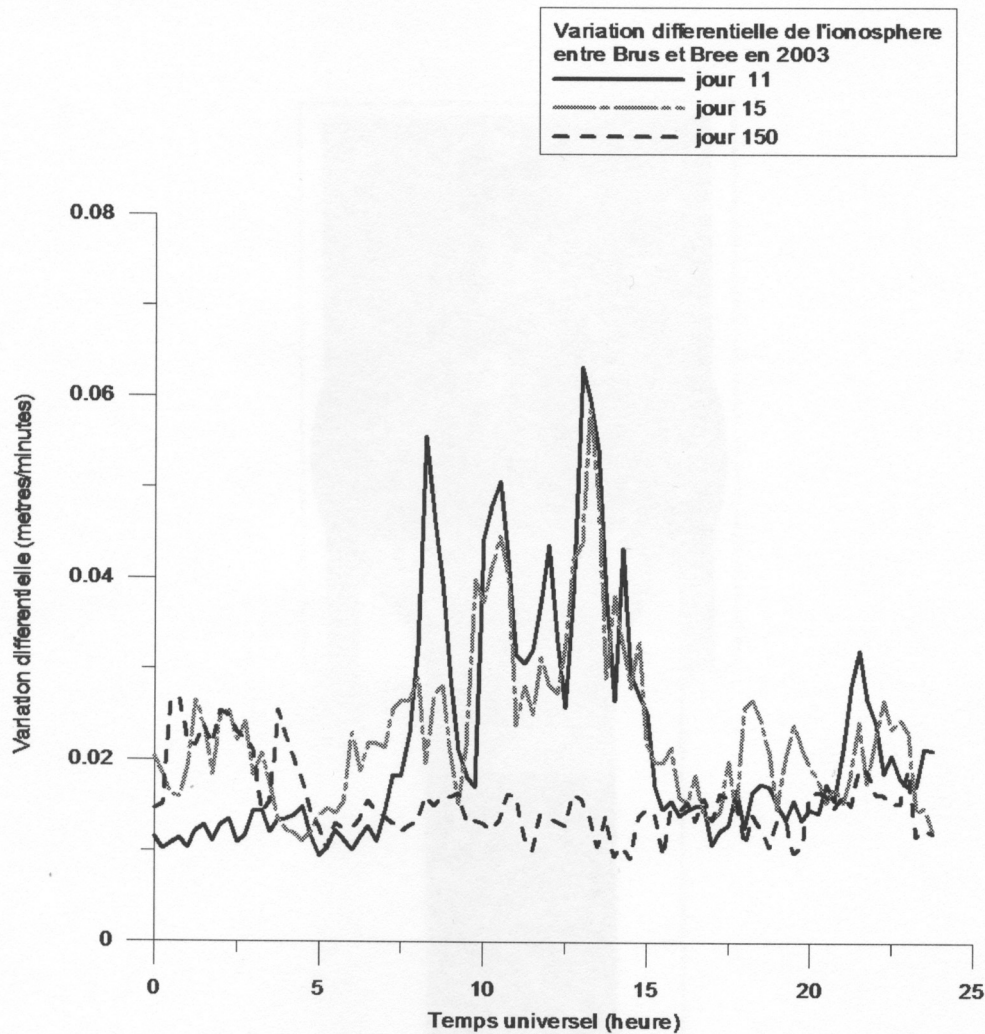


Figure 3. Variation différentielle de l'ionosphère pour différents jours

**A. Doubles différences**

Pour voir l'effet de l'ionosphère sur le positionnement RTK, un logiciel de traitement de données GPS semblable aux logiciels utilisés sur le terrain par les utilisateurs du RTK a été développé. Ce logiciel se base essentiellement sur des mesures différentielles de phases obtenues selon le principe des doubles différences.

La double différence est une combinaison linéaire de mesures de phase (ou de code) correspondant généralement à une différence entre deux *simples différences* effectuées au même instant sur deux satellites ( $i, j$ ) depuis deux récepteurs ( $p, q$ ).

Les simples différences sont, quant à elles, des combinaisons linéaires de mesures de phase (ou de code) correspondant généralement à une différence entre des mesures effectuées à partir de deux récepteurs sur un même satellite à un instant donné. Prises par rapport à une station de référence, elles correspondent au GPS différentiel classique. Pour que ces différences aient un sens, il faut les effectuer au même instant.

La double différence  $\phi_{p,q}^{i,j}$  est donc obtenue en

soustrayant deux simples différences  $\phi_{p,q}^i, \phi_{p,q}^j$  effectuées au même instant et relatives à deux satellites différents  $i$  et  $j$ .

$$\phi_{p,q}^{i,j} = \phi_{p,q}^i - \phi_{p,q}^j \tag{Eq.1}$$

Avec  $\phi_{p,q}^i = \phi_p^i - \phi_q^i \tag{Eq.2}$

et  $\phi_{p,q}^j = \phi_p^j - \phi_q^j \tag{Eq.3}$

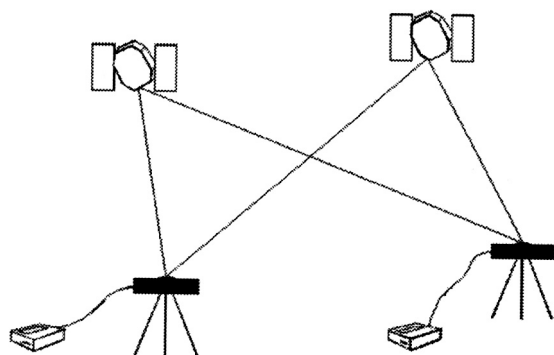


Figure 4. La double différence

### B. Combinaison « Geometric free »

Une fois, les doubles différences de phase sur L1 et sur L2 calculées, la quantité *geometric free* est formée de manière à mettre en évidence la variabilité ionosphérique (Leick, 1995). La combinaison *geometric free* (encore appelée L4) est une combinaison particulière de mesures de phases qui permet d'évaluer l'influence de l'ionosphère car elle dépend essentiellement du TEC, elle lui est proportionnelle.

Le test représenté sur la figure 5, est effectué entre les stations d'Ostende et Brugge (appartenant au réseau FLEPOS) qui sont distantes d'une vingtaine de kilomètres. On constate que la variabilité en L4 calculée toutes les 5 minutes, est stable pour un jour considéré comme calme d'un point de vue ionosphérique (jour 002 en 2004) mais connaît des valeurs importantes (exprimées en cycles) pour des jours plus agités (jour 325 et 326 en 2003).

*A priori*, la variabilité ionosphérique mesurée à l'aide de la combinaison *geometric free* pourrait constituer un critère pour l'établissement d'un indice ionosphérique. Il faut pour ce faire établir une relation entre la variabilité ionosphérique et l'erreur de position qui affecte les applications du GPS. Dans le cas du RTK, la phase la plus délicate est la résolution des ambiguïtés inhérentes aux mesures de phases. L'obtention de positions précises en temps réel passe par une résolution concrète de ces ambiguïtés. Or, l'ionosphère peut fortement affecter cette étape critique du traitement des données. Pour cette raison, l'effet de l'ionosphère sur la résolution des ambiguïtés pourrait constituer le critère recherché pour définir un indice de variabilité ionosphérique.

### C. Résolution des Ambiguïtés

Un des principaux problèmes qui résultent de l'analyse des mesures de phases est la résolution des ambiguïtés en temps réel (ou après un temps très court). La première mesure de phase effectuée par le récepteur se fait à un nombre entier de cycles près. Ce nombre entier inconnu

est appelé ambiguïté initiale (N).

La majorité des algorithmes de résolution des ambiguïtés se base sur une variabilité différentielle « *a priori* » de l'ionosphère : d'une manière générale, on suppose que l'effet résiduel de l'ionosphère sur les doubles différences est négligeable (sur de courtes distances). Si la variation réelle est trop différente de la variation différentielle supposée *a priori* dans l'algorithme, la résolution des ambiguïtés en sera fortement affectée. Pour tester la validité de cette hypothèse, le logiciel RTK qui a été développé est capable de mesurer la variation différentielle de phase (entre deux stations GPS) induite par l'ionosphère (cas de TID, scintillations...) grâce à la quantité *geometric free* et d'évaluer son effet sur la résolution des ambiguïtés.

En fait, la variation différentielle de la phase due à l'ionosphère affecte la résolution des ambiguïtés lorsque cette variation n'est pas négligeable par rapport à la longueur d'onde des signaux GPS.

Pour tester l'impact de l'ionosphère sur la résolution des ambiguïtés, le logiciel RTK qui a été développé permet la résolution des ambiguïtés de phase. Dans un premier temps, les ambiguïtés flottantes sont résolues par moindres carrés. Les ambiguïtés sont dites flottantes car à cette étape, elles ne sont pas encore fixées à un nombre entier. En effet, la valeur d'une inconnue estimée par moindres carrés ne correspondra pas tout à fait à la valeur « réelle » de l'inconnue. En particulier, l'ambiguïté estimée par moindres carrés ne sera pas exactement un nombre entier à cause des erreurs résiduelles non modélisées comme l'erreur résiduelle due à l'ionosphère. Or, le meilleur niveau de précision est atteint lorsque les ambiguïtés sont fixées à leur valeur entière. Il existe de nombreuses techniques de résolution des ambiguïtés (Seeber, 2003). Dans ce cas-ci, une fois les ambiguïtés flottantes obtenues ainsi que la matrice de covariance de l'ajustement, la méthode Lambda (Joosten & Tiberius, 2000) est utilisée pour le calcul des ambiguïtés entières.

La méthode Lambda a été créée pour déterminer les valeurs entières des ambiguïtés. Les entrées nécessaires à la mise en oeuvre de cette méthode sont, comme nous pouvons le voir sur la figure 6, la matrice de variance-covariance ainsi que le vecteur des ambiguïtés flottantes estimées. Comme sortie, cette méthode fournit les ambiguïtés entières estimées (les plus probables au sens des moindres carrés) qui une fois fixées, vont permettre de calculer les inconnues  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$  correspondant à la différence entre la position calculée et la position connue.

## III. RÉSULTATS

Lors de cette étude, la méthode décrite en II a été testée sur de courtes distances où seule l'erreur ionosphérique peut affecter la résolution des ambiguïtés. Les stations considérées sont celles de Bruxelles et de Saint-Gilles

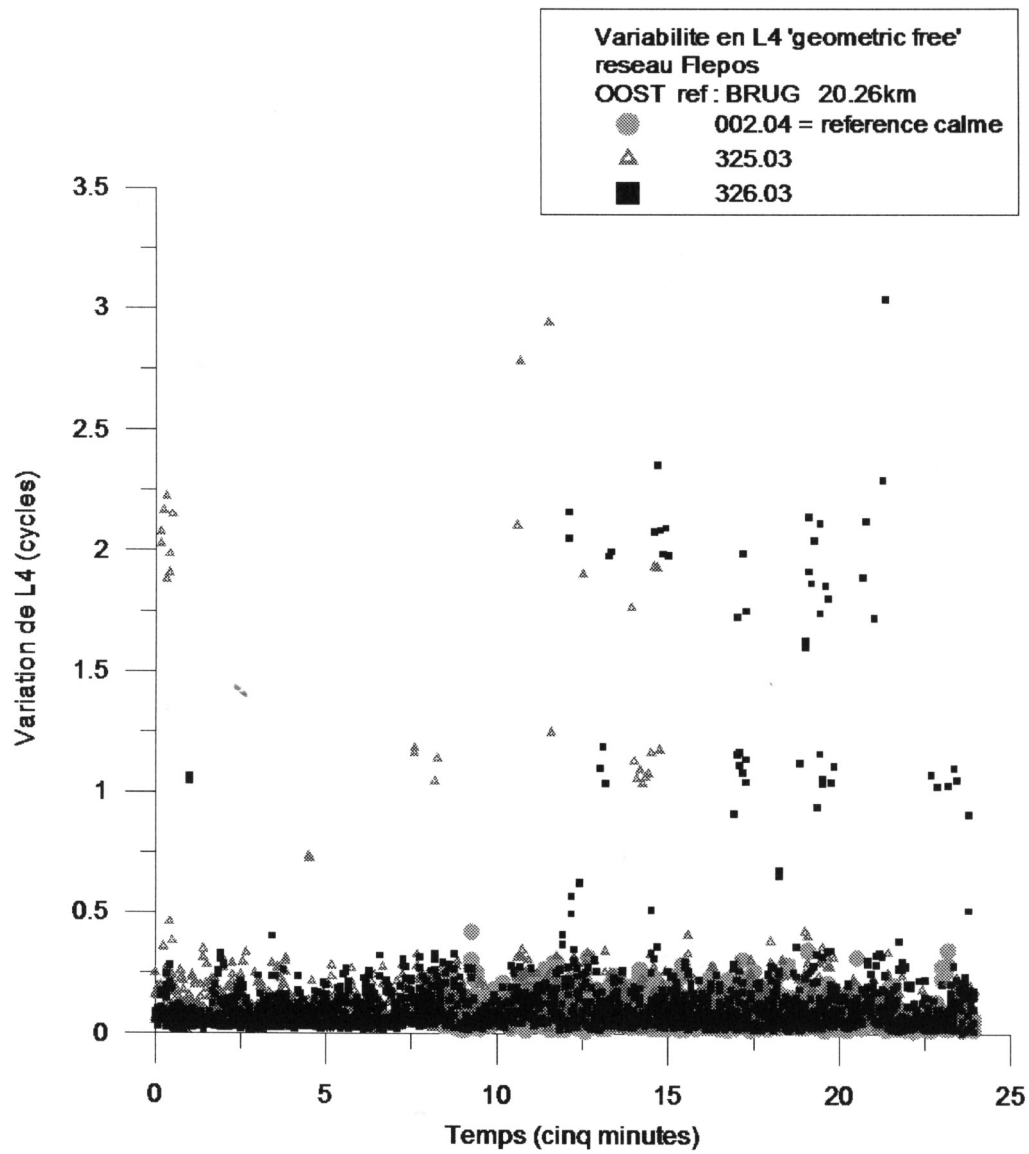


Figure 5. Variabilité en L4 pour deux stations distantes de 20,26 km

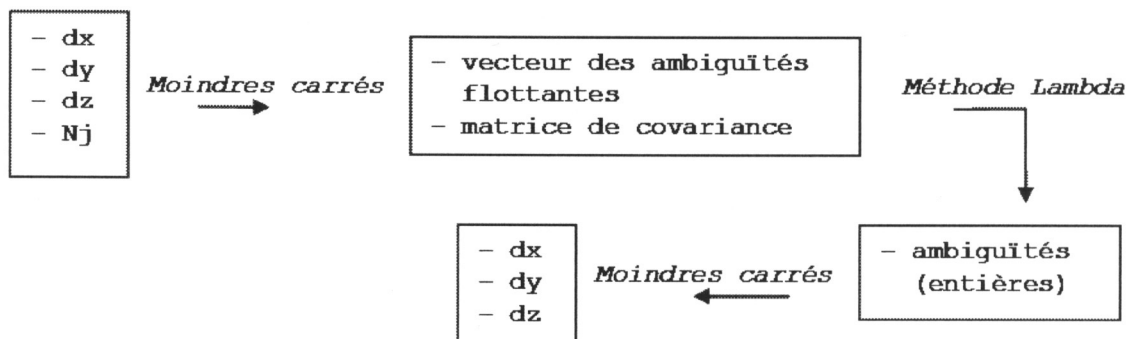


Figure 6. Procédé utilisé pour résoudre les ambiguïtés

appartenant au réseau FLEPOS, l'inter-distance entre ces stations est de 4,08 km.

Le tableau 1 reprend les valeurs en mètres de dx, dy, dz (nos inconnues de position) avant et après résolution des ambiguïtés par la méthode Lambda pour le cinquième jour de l'année 2004 soit le 5 janvier. Les périodes considérées (exprimées en heure décimale) sont des périodes de cinq minutes qui comportent 90 observations et 6 ambiguïtés. Elles ont été choisies de manière à être réparties sur l'ensemble de la journée.

Sur ce tableau, on constate que pour un jour calme à savoir le 5 janvier 2004, et pour des heures non perturbées par des TID, l'amélioration des résidus de position après l'insertion des ambiguïtés entières est notable.

On passe en effet pour des mesures effectuées à 3h30 du matin par exemple, suivant la composante x d'une erreur résiduelle (à savoir position connue moins position calculée) de 53 mm à 5 mm. La précision se voit donc améliorée d'un facteur 10.

Par contre, lorsqu'on détecte la présence de TID à Bruxelles, l'impact sur la précision se fait tout de suite ressentir. Cette dégradation des résultats est due au fait que les ambiguïtés sont résolues à un entier incorrect à cause de la variation ionosphérique résiduelle. La TID provoque donc une variation différentielle suffisante pour affecter la résolution des ambiguïtés. Le critère d'ambiguïtés correctement résolues semble donc pouvoir servir d'outil pour l'établissement d'un indice ionosphérique.

De manière à confirmer les résultats obtenus, d'autres jours et d'autres périodes ont été analysés pour la même distance. Les effets de la variabilité ionosphérique ressortent tout aussi clairement que pour les cas traités dans le tableau 1. Parallèlement, le taux de succès de résolution des ambiguïtés pour les différents cas traités a été calculé. Le taux de succès est un nombre compris entre 0 et 1,

ou entre 0 et 100 pourcent, qui exprime la probabilité que les ambiguïtés entières soient correctement résolues (Joosten & Tiberius, 2000).

En toute logique, la dégradation de la précision de la position notée lors de la présence de TID dans le tableau 1 devrait s'accompagner d'un taux de succès différent de 1. En effet, les écarts résiduels sur les doubles différences augmentant, on en déduit que les ambiguïtés entières ne sont pas correctement résolues. Or le calcul du taux de succès donne pour toutes les mesures effectuées dans le tableau 1, une valeur égale à 1 soit le maximum indiquant que le calcul des ambiguïtés est fiable. L'obtention de telles valeurs indique qu'un utilisateur GPS ne pourrait pas de lui-même se douter qu'une perturbation ionosphérique affecte la qualité de ses mesures, d'où l'importance du travail effectué ici.

#### IV. CONCLUSIONS

L'étude développée dans cet article met en évidence l'importance de la variabilité ionosphérique (TID) sur une technique de positionnement relatif, le RTK, même sur une courte distance où l'on considère généralement que l'effet résiduel de l'ionosphère est négligeable. On constate que sur une distance de 4,08 km, la présence d'une TID va empêcher la résolution correcte des ambiguïtés, ce qui va se traduire par une dégradation de la précision du positionnement de 0,063 m à -0,411 m en X par exemple.

Ce résultat pose les prémices de l'établissement d'un indice ionosphérique, outil capable de servir d'indicateur de variabilité ionosphérique pour les utilisateurs GPS.

#### Remerciements

Ce projet de recherche a été financé par le F.R.I.A. (Fonds de Recherche Industrielle et Agricole).

**Tableau 1.** Évolution des résidus de position après l'insertion des ambiguïtés entières

BRUS -GILL		4,08 km				
Jour 00 5.04	Inconnues de position exprimées en mètres					
	Avant résolution des ambiguïtés			Après résolution des ambiguïtés		
Heure	dx	dy	dz	dx	dy	dz
	Par 5 minutes, avec 90 observations et 6 ambiguïtés					
Sans TID						
3,583	0,053	0,221	-0,094	0,005	-0,019	0,014
6,583	0,174	0,225	0,169	0,014	-0,021	0,019
12,2 50	0,041	-0,098	0,128	0,010	-0,015	-0,015
14,8 33	-0,017	-0,368	-0,148	0,018	-0,024	0,000
Avec TID détectées						
20,5 83	0,063	-0,535	0,034	-0,411	-1,281	0,095
22,5 83	0,121	-0,056	0,018	-0,223	0,179	0,131

**BIBLIOGRAPHIE**

- JOOSTEN P. & TIBERIUS, C., 2000. Fixing the Ambiguities : Are You Sure They're Right ? *GPS World*, 11 (5), pp. 46-51.
- LEICK A., 1995. *GPS Satellite Surveying Second Edition*. John Wiley & Sons, New York, 560 p.
- PARKINSON B.W. & ENGE P.K., 1996. *Differential GPS. Global Positioning System: Theory and Applications* (PARKINSON B.W. & SPILKER J.J., Eds.), American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington D.C., II, pp. 3-50.
- SEEBER G., 2003. *Satellite Geodesy*, 2<sup>e</sup> édition, de Gruyter, New-York, 589 p.
- WARNANT R., 1996. *Étude du comportement du Contenu Electronique Total et de ses irrégularités*

*dans une région de latitude moyenne. Applications aux calculs de positions relatives par GPS.* Thèse de Doctorat, Série Géophysique ORB.

Adresse de l'auteur :

Sandrine LEJEUNE  
Observatoire Royal de Belgique  
Avenue Circulaire, 3  
B-1180 Bruxelles  
sandrine.lejeune@oma.be

et

Unité de Géomatique  
Université de Liège  
17, Allée du 6 Août (B5)  
B-4000 Liège

