

# Choix Optimal du Modèle Troposphérique pour la Détermination Précise des Coordonnées des Stations GPS

H. NAAMAOU, S. KAHLOUCHE, S. TOUAM, H. DEKKICHE  
Centre des techniques spatiales (CTS), division de géodésie spatiale  
BP 13, Arzew, 31200, Oran, Algérie

**ملخص :** يتركز موضوع هذا المقال حول الدراسة المقارنة لمختلف نماذج التروبوسفير للتطبيقات الجيوديزية. إن الهدف من هذه الدراسة هو تحديد منهجية تسمح تبعا لطول القواعد الملاحظة بتعيين نموذج التروبوسفير المثالي لتطبيقه في تحليل مقاييس GPS تتضمن المعطيات المستعملة في المعالجة ثلاثة خطوط أساسية مختلفة الأطوال، وهران - مرجاجو، الجزائر - تمنراست و الجزائر مدريد. استعملت ملاحظات GPS مع البرنامج العلمي لجامعة برن. برنامج برنيس للأجهزة تحديد المواقع 2.4V.

**الكلمات الأساسية :** أجهزة تحديد المواقع GPS، التروبوسفير، الإنكسار، مكونة رطبة، مكونة جافة، محطة دائمة.

**Résumé :** Le thème développé à travers cet article porte sur l'étude comparative des différents modèles troposphériques pour des applications géodésiques. Le but est de définir une méthodologie permettant de déterminer, en fonction de la longueur des bases observées, le modèle troposphérique optimal à appliquer à l'analyse des mesures GPS. Les données GPS utilisées lors du traitement comportent trois lignes de base de différentes longueurs, à savoir "Oran-Murdjadjo", "Alger-Tamanrasset" et "Alger-Madrid". Le traitement des observations GPS a été effectué avec le logiciel scientifique de l'université de Berne "Bernese GPS Software Version 4.2".

**Mots clés :** GPS, troposphère, réfractivité, composante sèche, composante humide, station permanente.

**Abstract :** The developed theme through this article focuses on the comparative study of different tropospheric models for geodetic applications. The goal is to define a methodology for determining, according to the length of bases observed, the optimal tropospheric optimal model to be applied to the analysis of GPS measurements. The GPS data used in the treatment involving three bases of different lengths, "Oran-Murdjadjo", "Alger-Tamanrasset" and "Alger-Madrid." The processing of the observation GPS was executed with the scientific software of the University of Berne "Bernese GPS Software Version 4.2".

**Key words :** GPS, troposphere, refractivity, dry component, wet component, permanent network.

## 1. Introduction

Aujourd'hui, le GPS (Global Positioning System) fait parti de la panoplie des outils dédiés aux travaux géodésiques et topographiques. L'existence de cet outil plus évolué et plus précis, rend nécessaire la maîtrise de la technique GPS et son adaptation aux diverses applications utilisant des données localisées. Cependant, cette technique connaît un handicap majeur. Si la précision sur la détermination des coordonnées horizontales peut descendre en dessous du centimètre, il n'en est pas de même pour la composante verticale qui est principalement perturbé par la troposphère.

Bien que l'on puisse considérablement minimiser les effets atmosphériques sur les observations, le milieu de propagation, notamment la troposphère, demeure essentiellement la limite de précision du système. Plusieurs modèles et méthodes de correction troposphérique peuvent être utilisés.

C'est dans ce contexte, qu'une équipe au CTS s'est proposée de présenter à travers cet article une étude comparative des différents modèles troposphériques pour des applications géodésiques. L'objectif est de définir une méthodologie permettant de déterminer, en fonction de la longueur des bases observées, le modèle troposphérique optimal à appliquer à l'analyse des mesures GPS. Les données GPS utilisées lors du traitement comportent trois lignes de base de différentes longueurs, à savoir "Oran-Murdjadjo", "Alger-Tamanrasset" et "Alger-Madrid".

Le traitement des observations GPS a été effectué avec le logiciel scientifique de l'université de Berne "Bernese GPS Software Version 4.2" [4]. Nous avons bénéficié de l'opportunité et des avantages offerts par ce logiciel qui nous a permis de tester les différents modèles troposphériques.

## 2. Généralités sur le délai Troposphérique

La troposphère est la partie de l'atmosphère terrestre située entre la surface du globe et une altitude d'environ 8 à 18 km. Elle se compose principalement d'azote (78%) et d'oxygène (21%). Le quasi totalité de la vapeur d'eau et les aérosols se trouvent dans la troposphère [6].

C'est un milieu non dispersif pour les ondes radio de fréquence supérieure à 30 GHz [5]. En traversant cette couche basse de l'atmosphère, l'onde GPS subit un retard (figure 1) dépendant de la pression atmosphérique, de la température et de la teneur en vapeur d'eau. L'effet est le même pour les deux fréquences GPS [1].

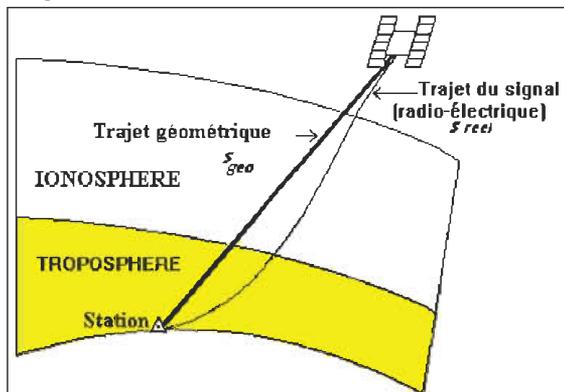


Fig. 1 Trajet du signal GPS dans l'atmosphère.

La distance géométrique,  $L_{geo}$ , entre le satellite et le récepteur est :

$$L_{geo} = \int_{S_{geo}} ds$$

Cependant, à cause de la variation de l'indice de réfraction de la troposphère et du principe de Fermat qui considère que le temps de propagation de la lumière entre deux points quelconques devrait être un minimum, la trajectoire réelle entre le satellite et le récepteur est légèrement courbée pour des angles inférieurs à 90°. Cette distance, notée  $L_{reel}$ , est :

$$L_{reel} = \int_{S_{reel}} n(s) ds$$

Où  $n(s)$  représente l'indice de réfraction variant en fonction de la position spatiale.

Le délai troposphérique  $\Delta\tau$  est la différence entre le temps de propagation réel de l'onde et le temps de propagation géométrique de la même onde, tel que :  
Où  $n(s)$  représente l'indice de réfraction variant en fonction de la position spatiale.

$$\Delta\tau = \frac{1}{c} \left[ \int_{S_{reel}} n(s) ds - \int_{S_{reel}} ds \right]$$

Avec :

$c$  : Vitesse de la lumière dans le vide.

Cette dernière relation peut se mettre sous la forme suivante :

$$\Delta\tau = \frac{1}{c} \left[ \int_{S_{reel}} n(s) ds - \int_{S_{reel}} ds + \int_{S_{reel}} ds - \int_{S_{geo}} ds \right]$$

$$\Delta\tau = \frac{1}{c} \left[ \int_{S_{reel}} (n(s) - 1) ds + \int_{S_{reel}} ds - \int_{S_{geo}} ds \right]$$

$$\Delta\tau = \frac{1}{c} \left[ \int_{S_{reel}} (n(s) - 1) ds + \Delta_{geo} \right]$$

Où  $\Delta_{geo}$  représente la différence entre la trajectoire réelle et la ligne géométrique. Pour des angles d'élévation importants, ce terme peut être négligé. En multipliant  $\Delta\tau$  par la vitesse de la lumière  $c$  et en négligeant  $\Delta_{geo}$ , on obtient [8] :

$$\Delta L = 10^{-6} \int_S N ds$$

Avec :

$N = 10^6 (n-1)$  : réfractivité du milieu traversé

$ds$  : distance élémentaire dans la direction du zénith.

Une bonne approximation valable dans le domaine des micros ondes est donnée par [2] :

$$N^{trop} = 77.6 \frac{P_s}{T} - 12.96 \frac{e_v}{T} + 3.73 \cdot 10^5 \frac{e_v}{T^2}$$

Avec :

$P_s$  : pression en millibars.

$T$  : température en degrés Kelvin.

$e_v$  : pression partielle de vapeur d'eau en millibars.

Du fait que la pression de vapeur d'eau devient négligeable à une altitude de l'ordre de 10 km, la réfractivité peut être définie de la manière suivante [3] :

$$N^{trop} = N^{sèche} + N^{humide}$$

Où  $N^{sèche}$  et  $N^{humide}$  représentent respectivement la réfractivité de la partie sèche et la réfractivité de la partie humide.

La partie sèche peut être déterminée avec une grande précision à partir des mesures de pression et de température au sol. Par contre, le délai humide est particulièrement difficile en raison de la forte variabilité de la vapeur d'eau en fonction de l'altitude. De plus, sa mesure par ballons sondes ne permet pas d'en suivre les variations temporelles [9]. Une possibilité de s'affranchir de ce problème est l'estimation des paramètres troposphériques qui permet de calculer une valeur approchée du délai zénithal humide [7].

### 3. Méthodologie Adoptée

Afin de mener à bien notre travail qui consiste à une étude comparative des différents modèles troposphériques pour des applications géodésiques, nous avons effectué une campagne d'observations GPS comportant trois stations : Arzew, Oran et Murdjajo. L'objectif est de déterminer, en fonction de la longueur des bases observées, le modèle troposphérique optimal à appliquer à l'analyse des mesures GPS. Les récepteurs utilisés lors de cette campagne sont de type Ashtech ZXII-3 bifréquences. Les deux premières stations (Arzew et Oran) ont quasiment la même altitude et la distance les séparant est d'environ 38 km. Par contre, la ligne de base "Oran-Murdjado" d'une longueur de 9 km, présente une dénivelée de 550 m. D'autres sessions d'observations GPS comportant trois stations du réseau ALGEONET (ALgerian GEOdynamical NETwork) ont été utilisées : Alger, Tamanrasset et Madrid. Les deux stations Alger et Tamanrasset ont été observées pendant 24 heures avec la station permanente Madrid. Lors des traitements, nous avons utilisé d'une part, les éphémérides précises pour réduire les erreurs d'orbites, et d'autre part, la combinaison linéaire L3 afin de s'affranchir de l'effet ionosphérique. Le logiciel de traitement de données GPS utilisé dans le cadre de ce travail est Bernese Version 4.2. La méthodologie adoptée comporte trois grandes étapes :

- 1<sup>ère</sup> étape : préparation des données.
- 2<sup>ème</sup> étape : traitement des observations GPS.
- 3<sup>ème</sup> étape : analyse des résultats obtenus.

### 4. Traitement et Analyse des Résultats

Les observations GPS traitées sont constituées de trois lignes de base de différentes longueurs. Il s'agit des bases "Oran-Murdjado" ( $\approx 9$  Km) de forte dénivelée ( $\approx 550$  m), "Alger-Tamanrasset" ( $\approx 2000$  Km) et "Alger-Madrid" ( $\approx 760$  Km).

Les tests effectués ont porté sur la détermination, en fonction de la longueur de la ligne de base mesurée, du modèle troposphérique optimal à appliquer à l'analyse des données GPS. L'analyse des résultats est basée sur les valeurs de l'écart type (RMS).

#### Base "Oran-Murdjado"

Les figures 2, 3 et 4 illustrent la variation du RMS sur les coordonnées géographiques ( $\lambda$ ,  $\phi$ ,  $h_c$ ) des deux stations en fonction de la stratégie de traitement adoptée pour le choix du modèle troposphérique. En abscisse, les chiffres de 1 à 6 représentent la stratégie de traitement, telle que :

- 1 : Sans modèle troposphérique
- 2 : Saastamoinen sans fonction de projection.

- 3 : Hopfield sans fonction de projection
- 4 : Saastamoinen avec fonction de projection.
- 5 : Essen et Froome
- 6 : Fonction de Dry Niell sans modèle à priori

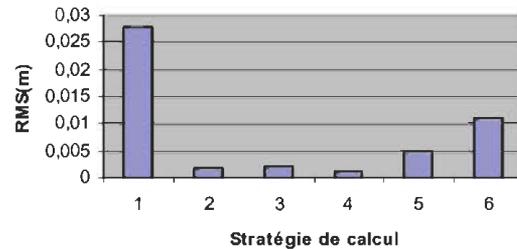


Fig. 2 RMS sur l'altitude.

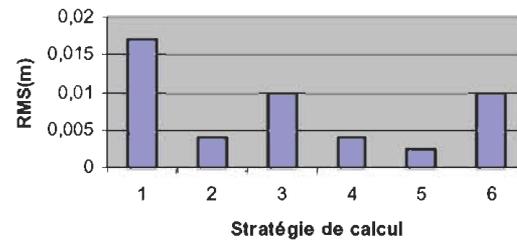


Fig. 3 RMS sur la latitude.

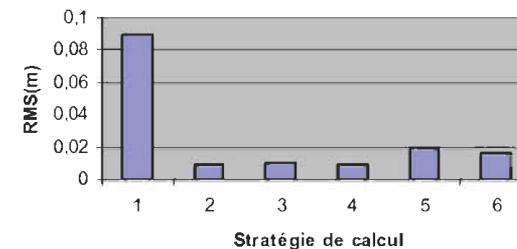


Fig. 4 RMS sur la longitude.

Nous remarquons que :

- les RMS sur les coordonnées ( $\lambda$ ,  $\phi$ ,  $h_c$ ) obtenus avec la stratégie (1) de traitement sans modèle troposphérique, sont importants ( $\approx 10$  cm sur  $\lambda$ ).
- L'utilisation des modèles troposphériques avec ou sans leurs fonctions de projections (stratégies 2, 3 et 4) donne des RMS similaires sur les trois composantes ( $\phi$ ,  $\lambda$ ,  $h_c$ ), ( $\approx 4$ mm sur  $\phi$ ,  $9$ mm sur  $\lambda$  et  $2$ mm sur  $h_c$ ).
- L'emploi du modèle de Froome (stratégie 5) fournit des résultats plus précis sur ( $\phi$ ,  $h_c$ ) ( $\approx 2$ mm sur  $\phi$  et  $5$ mm sur  $h_c$ ) que sur la longitude ( $\approx 2$ cm).
- l'emploi de la fonction de Dry Niell sans modèle à priori (stratégie 6) donnent des résultats moins précis ( $1$ cm sur les trois composantes); ceci s'explique par le fait que l'on traite une ligne de base dont les deux extrémités ne sont pas dans la même couche atmosphérique.

#### Base "Alger-Tamanrasset"

Les figures 5, 6 et 7 montrent la variation du RMS en fonction de la stratégie de traitement adoptée pour le choix du modèle troposphérique.

Notre analyse porte sur la comparaison des résultats obtenus avec ceux de la campagne GPS du projet ALGEONET-1998, considérés comme une solution de référence. L'analyse du RMS a permis de vérifier la qualité du traitement.

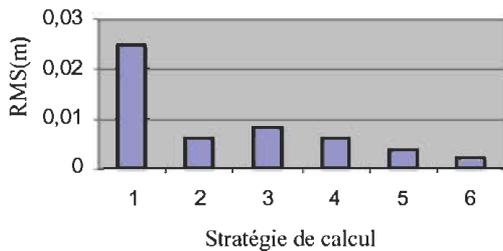


Fig. 5 RMS sur l'altitude.

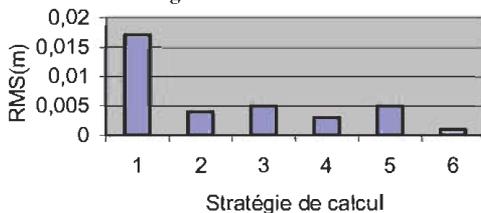


Fig. 6 RMS sur la latitude.

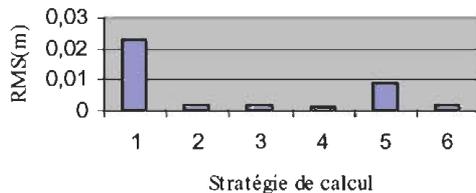


Fig. 7 RMS sur la longitude.

Les figures 2, 3 et 4 montrent que :

- les RMS sur les coordonnées ( $\varphi$ ,  $\lambda$ ,  $h_e$ ), obtenus sans l'application du modèle troposphérique (stratégie 1), sont importants ( $\cong 3$ cm).
- L'utilisation des modèles troposphériques avec ou sans leurs fonctions de projections (stratégies 2, 3 et 4) donne des RMS similaires ( $\cong 3$  mm sur ( $\varphi$ ,  $\lambda$ ) et 7mm sur  $h_e$ ).
- L'utilisation du modèle d'Essen et Froome (stratégie 5) donne des résultats moins précis par rapport à ceux obtenus pour la base Oran-Murjadjo ; ceci s'explique par le fait que les deux stations (Alger et Arzew) ne sont pas dans le même horizon ( $\cong 1$  cm sur  $\lambda$ , et 6 mm sur  $\varphi$  et  $h_e$ ).
- L'emploi de la fonction de Dry Niell (stratégie 6) a permis d'obtenir de meilleurs résultats (RMS  $\cong 2$ mm sur les trois composantes).

### Base "Alger- Madrid"

Le calcul de la ligne de base Alger-Madrid ( $\cong 760$  km) a été effectué avec les mêmes conditions que celui de la base Alger-Arzew. Les trois figures 8, 9 et 10 montrent la variation du RMS en fonction de la stratégie de traitement adoptée pour le choix du modèle troposphérique.

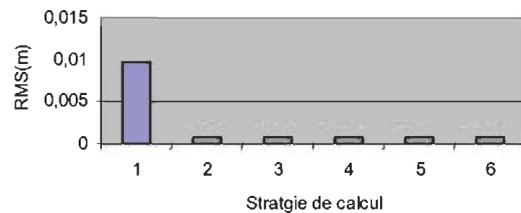


Fig. 8 RMS sur l'altitude.

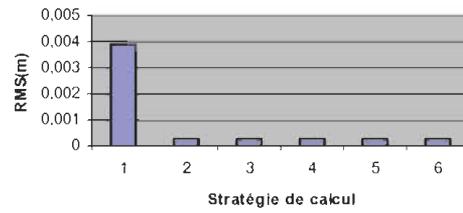


Fig. 9 RMS sur la latitude.

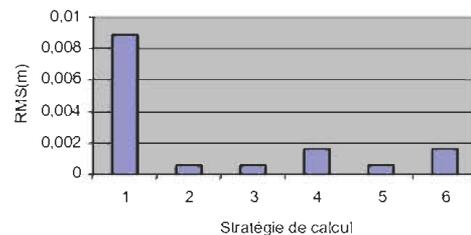


Fig. 10 RMS sur la longitude.

D'après les figures 8, 9 et 10, nous remarquons que :

- Pour les trois composantes, l'emploi des modèles troposphériques de Saastamoinen et de Hopfield avec ou sans leur fonctions de projections (stratégies 2, 3 et 4) donnent presque les mêmes résultats ( $\cong 7$  mm sur  $h_e$  et  $\lambda$ , et 3 mm sur  $\varphi$ ).
- Le modèle d'Essen et Froome et la fonction de Dry Niell (stratégies 5 et 6) donnent presque les mêmes résultats sur les composantes ( $\lambda$ ,  $\varphi$ ) ( $\cong 0.3$ mm sur  $\varphi$  et 0.7 mm sur  $\lambda$ ). Par contre, sur la composante  $h_e$ , le RMS atteint 1.6 mm avec la fonction de Dry Niell.

### 5. Conclusion

Le but de cette étude vise principalement à proposer une stratégie de traitement des données GPS permettant d'améliorer la précision de la composante verticale. Les résultats obtenus des traitements nous ont permis de conclure que:

- Le paramètre troposphérique est très corrélé avec les trois composantes de la ligne de base.
- L'effet de la troposphère ne peut pas être négligé dans la détermination des altitudes précises par la technique GPS.
- La non utilisation des modèles troposphériques donne évidemment des résultats de mauvaise qualité. Bien que l'on puisse considérablement minimiser les effets troposphériques sur les observations GPS, le milieu de propagation demeure essentiellement la limite de précision du système.

- Les meilleurs résultats sont obtenus en employant les modèles de Saastamoinen avec sa fonction de projection.

- L'utilisation du modèle de Hopfield donne pratiquement des résultats similaires à ceux obtenus avec le modèle de Saastamoinen.

- La fonction de Dry Niell sans modèle à priori permet d'avoir des résultats meilleurs sur les 3 composantes pour les longues lignes de bases.

En perspective, il est intéressant d'appliquer la méthodologie proposée dans cet article avec d'autres jeux de données effectuées en différentes époques de l'année (quatre saisons). Ceci, nous permet de mieux étudier l'évolution de la troposphère qui pourra servir à la détermination de l'intervalle de temps optimal d'ajustement du retard zénithal dû à la composante humide.

### Références Bibliographiques

Duquenne F., 2000 : *Les techniques de positionnement précis par GPS*. Rapport technique, ESGT/France.

Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J., 1994 *Global Positioning System. Theory and Practic*. Springer-Verlag, New York, Third edition.

Hopfield H., 1969 : *Two quadratic refractivity profile of correcting satellite data*. Journal of Geophysical Research.

Hugentobler U., Schaer H., Fridez P., 2001 : *Bernese GPS Software Version 4.2*. Université de Berne.

Kahlouche S., 1986 : *Performances de la technique Doppler sur satellites pour le positionnement absolu et différentiel*. Thèse de doctorat IGN/ France.

Kleijer F., 2004 : *Troposphere Modeling and Filtering for Precise GPS Leveling*. PHD Thesis. University of Delft.

Legrand J., 2000 : *Utilisation du logiciel de l'université de berne pour le traitement des données GPS*. Mémoire d'ingénieur ESGT. France.

Naamaoui H., 2005 : *Modélisation de l'effet troposphérique pour la détermination précise des réseaux GPS. Cas des stations permanentes*. Mémoire de Magister, CNTS, Arzew.

Ning L., 2001 : *Precise Relative Positioning of Multiple Moving Platforms using GPS Carrier Phase Observables*. PHD Thesis. University of Calgary.