

Choix Optimal du Modele Tropospherique Pour la Determination Precise des Coordonnees des Stations GPS

H. Naamaoui, S. Kahlouche, H. Dekkiche

Centre des Techniques Spatiales (CTS). Division de Géodésie Spatiale
BP 13. Arzew. 31200. Oran. Algérie

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 observations GPS utilisées dans le traitement comportant trois bases de différentes longueurs, à savoir "Oran-Murdjadjo", "Alger-Tamanrasset" et "Alger-Madrid". Les logiciels de traitement des données GPS utilisés dans le cadre de ce travail sont : Winprism V2.1 et Bernese V4.2.

Mots clés : *GPS, troposphère, vapeur d'eau, délai zénithal, station permanente.*

Abstract:

The theme developed through this article focuses on the comparative study of different models for applications tropospheric geodetic. The goal is to define a methodology for determining, depending on the length of bases observed, the tropospheric optimal model to be applied to the analysis of GPS measurements. The GPS observations used in the treatment involving three bases of different lengths, "Oran-Murdjadjo", "Alger-Tamanrasset" and "Algiers-Madrid."

The processing software GPS data used in the context of this work are: Winprism Bernese V2.1 and V4.2.

Key words: *GPS, troposphere, water vapor, zenithal delay, permanent network*

I. INTRODUCTION

Aujourd'hui, le GPS (Global Positioning System) fait parti de la panoplie des outils dédiés aux travaux géodésiques et

topographiques. L'existence de ce nouveau 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 (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

Nous avons bénéficié de l'opportunité et des avantages offerts par les logiciels Bernese V4.2 et Winprism V2.1. Ceci nous a permis de tester les différents modèles troposphériques.

II. FONDEMENTS THEORIQUES DU DELAI TROPOSPHERIQUE

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 [Frank K., 2004].

C'est un milieu non dispersif pour les ondes radio de fréquence supérieure à 30 GHz

[Kahlouche S., 1986]. 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 [Duquenne F., 2000].

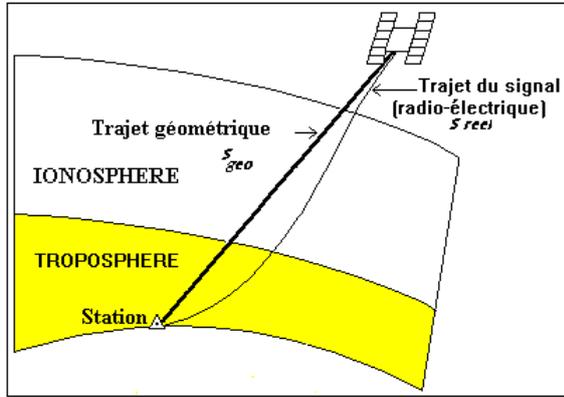


Fig.1: Trajet du signal GPS dans l'atmosphère.

La distance géométrique entre le satellite et le récepteur est :

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

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 est donnée par :

$$\int_{S_{reel}} ds$$

Le délai troposphérique est la différence entre le temps de propagation réel de l'onde et le temps de propagation géométrique de la même onde.

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

Avec :

$n(s)$: Indice de réfraction variant en fonction de la position spatiale.

C : Vitesse de la lumière dans le vide.

On peut faire le changement suivant :

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

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

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

Où Δ_{geo} représente la différence entre la trajectoire réelle et la ligne géométrique. Ce terme peut être négligé pour les grands angles d'élévation. En multipliant par la vitesse de la lumière c , on obtient

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

$N = 10^6 (n-1)$: 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 [Hoffmann-Wellenhof B. et al, 1994] :

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

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 s'exprime par [Hopfield., 1969]:

$$N = N_{sèche} + N_{humide}$$

$N_{sèche}$ représente la réfractivité de la partie sèche.

N_{humide} représente 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 [Ning L., 2001]. Une possibilité de s'affranchir de ce problème est l'estimation des paramètres troposphériques qui permet de

calculer une valeur approchée du délai zénithal [Legrand J., 2002].

III. METHODOLOGIE ADOPTEE

Afin de mener à bien notre étude qui consiste à une étude comparative des différents modèles troposphériques, nous avons effectué une campagne d'observations GPS comportant trois stations : Arzew, Oran et Murdjajo. Les récepteurs utilisés lors de cette campagne sont de type Ashtech ZXII-3.

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.

Nous avons aussi utilisé d'autres sessions d'observations GPS comportant trois stations du réseau ALGEONET (Algerian GEODynamical NETwork) : Alger, Tamanrasset et Madrid.

Les deux stations Alger et Tamanrasset ont été observées pendant 24 heures avec la station permanente Madrid. Les récepteurs utilisés sont de type Ashtech ZXII-3 bifréquences.

Lors des traitements, nous avons utilisé les éphémérides précises pour réduire les erreurs d'orbites et la combinaison linéaire L3 afin de s'affranchir de l'effet ionosphérique.

La méthodologie adoptée comporte trois grandes étapes :

- 1^{ère} étape : préparation des données (création de la campagne, téléchargement des fichiers généraux et préparation des fichiers des données).
- 2^{ème} étape : traitement des lignes de base (de la transformation des fichiers Ashtech en format Bernese jusqu'à l'ajustement par les moindres carrés)
- 3^{ème} étape : analyse et interprétation des résultats de l'expérimentation.

IV. ANALYSE DES RESULTATS

IV.1. RESULTATS OBTENUS PAR LE LOGICIEL WINPRISM V2.1

Dans notre campagne, nous avons procédé au calcul de la ligne de base Oran- Murdjajo qui a été traitée avec le logiciel Winprism Version

2.1 disponible au niveau de la division de géodésie spatiale du CTS.

Afin de mieux évaluer les effets de la troposphère sur les mesures GPS, nous effectués deux modes de traitement : Traitements avec prise en compte du délai troposphérique (modèle Hopfield) et sans correction du retard troposphérique. En ce qui concerne le traitement avec correction troposphérique, deux cas se présentent :

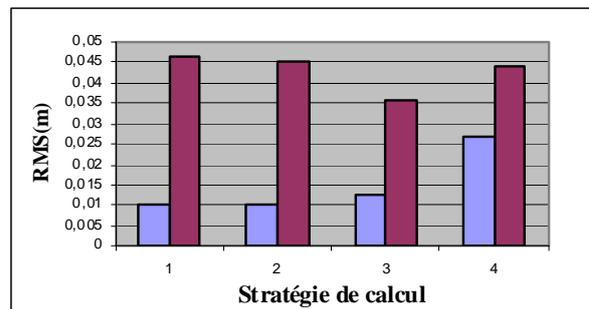
- Utilisation des données standards intégrées dans Winprism (T=20°C, P=1013.25 mbar et H=50%).
- Utilisation des données mesurées au sol.

Lors de l'analyse, les différents modes de traitement «L1C», «L1-L2», «L1Only» et «L2Only». Il a été constaté que :

- La variation entre les distances est de 4 cm à 28 cm.
- Le mode «L1» donne des résultats plus précis par rapport aux modes «L1C» et «L1-L2» car dans les lignes de bases inférieures à 15 km l'effet ionosphérique ainsi que les erreurs d'orbites sont les mêmes aux deux extrémités et peuvent être éliminées par les doubles différences.

Par conséquent, il est recommandé d'utiliser le mode L1 pour les courtes lignes de bases.

Le graphe suivant illustre la variation du RMS sur la ligne de base "Oran-Murdjado", en fonction de la stratégie du calcul utilisée et ce pour les deux modes de traitement (avec prise en compte ou non de la correction troposphérique).



■ : Sans modèle troposphérique.
■ : Avec modèle troposphérique.

Fig.2 : Variation du RMS en fonction de la stratégie de calcul

On remarque (figure 2) que pour toutes les stratégies de calcul, le RMS devient important (≈ 40 cm) lorsque le modèle troposphérique n'est pas appliqué. L'application de la correction troposphérique a permis d'améliorer le RMS (≈ 15 cm).

IV.2. RESULTATS OBTENUS PAR LE LOGICIEL BERNESE V4.2

Les observations utilisées lors des traitements sont composées de 2 tests :

- Le 1ère test : il s'agit de la ligne de base Oran-Murdjadjo. (de l'ordre de 9 km).
 - Le deuxième test : il s'agit de deux lignes de bases (Alger-Tamanrasset) et (Alger-Madrid)
- L'analyse des résultats est basée sur les valeurs de l'écart type RMS.

La base "Oran-Murdjadjo"

Les trois figures 2, 3 et 4 montrent la variation du RMS en fonction de la stratégie du traitement adoptée pour le choix du modèle troposphérique. Elles correspondent respectivement à la hauteur ellipsoïdale, la latitude et la longitude. Les chiffres de 1 à 6 correspondent aux différents modèles troposphériques utilisés. Ces modèles sont :

Stratégie	Modèle troposphérique
1	Sans modèle troposphérique.
2	Saastamoinen sans fonction de projection.
3	Hopfield sans fonction de projection.
4	Saastamoinen avec la fonction de projection.
5	Essen et Froome.
6	Fonction de Dry Niell sans modèle à priori.

- Pour les deux composantes (φ, λ), l'utilisation des modèles de Saastamoinen avec ou sans sa fonction de projection donne des résultats équivalents. (4mm sur la latitude et 9mm sur la longitude).

- L'emploi du modèle de Froome donne des résultats précis sur les trois composantes.
- Pour la composante verticale, l'utilisation des modèles de Saastamoinen et de Hopfield avec ou sans leurs fonctions de projections donne des résultats équivalents. Le RMS atteint (1 mm pour la 4^{ème} stratégie.).
- La non utilisation des modèles troposphériques ainsi que l'emploi de la fonction de Dry Niell sans modèle à priori donnent des résultats moins précis (1cm 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.

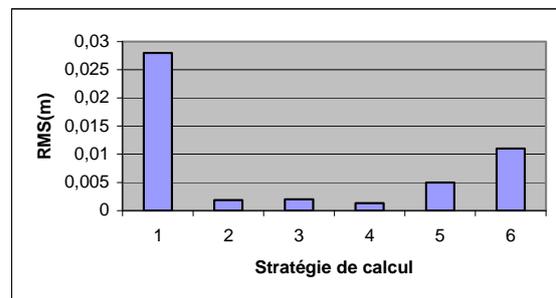


Fig.3: RMS sur l'altitude

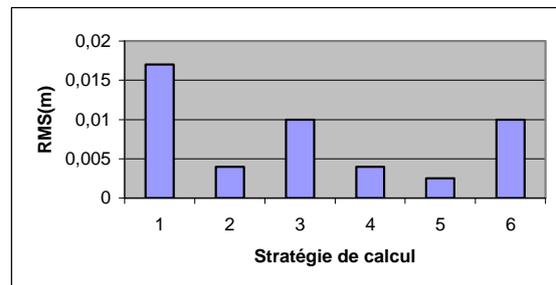


Fig. 4 : RMS sur la latitude

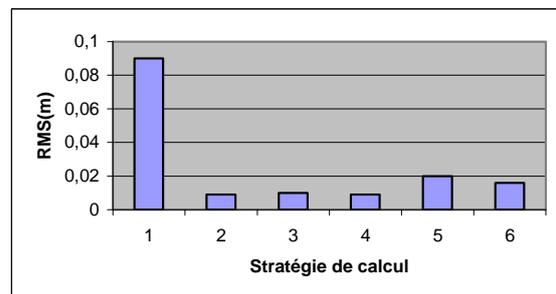


Fig.5: RMS sur la longitude.

La base "Alger- Tamanrasset"

Les trois figures 6, 7 et 8 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 à travers ce travail 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.

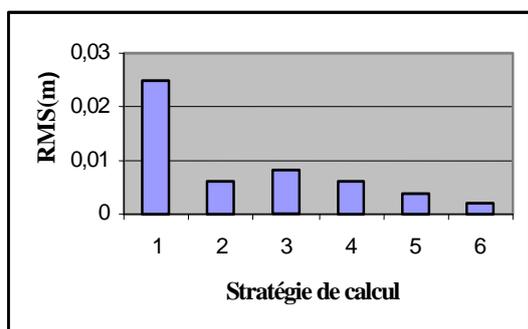


Fig. 6 : RMS sur l'altitude

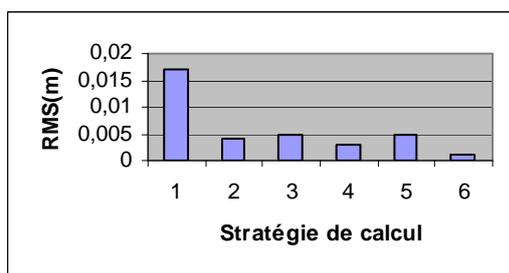


Fig. 7: RMS sur la latitude

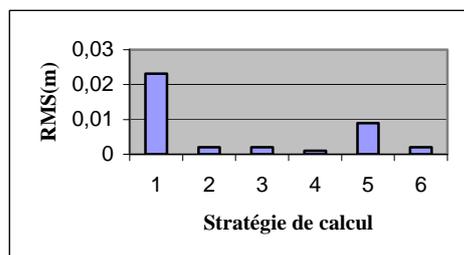


Fig. 8 : RMS sur la longitude

fonction de projection, donnent presque les mêmes résultats mis à part le RMS qui atteint son minimum lorsque on utilise le modèle de Saastamoinen avec sa fonction de projection (1mm).

L'utilisation du modèle d'Essen et Froome donne des résultats moins précis par rapport à ceux obtenus pour la base Oran-Murjadjo, ceci s'explique par le fait que les deux points Alger et Arzew ne sont pas dans le même horizon. (RMS atteint 9mm sur l'altitude et la longitude)

L'emploi de la fonction de Dry Niell a permis d'obtenir le meilleur résultat qui approche au mieux la solution de référence. (RMS atteint 1mm sur l'altitude).

La base "Alger- Madrid"

L'analyse est basée sur les valeurs du RMS sur les trois composantes.

Le calcul de la ligne de base Alger-Madrid (≈ 760 km) a été effectué avec les mêmes conditions que le traitement de la base Alger-Arzew.

Les figures 8, 9 et 10 montrent la variation du RMS en fonction de la stratégie de calcul. L'analyse du RMS nous a permis de vérifier la qualité du traitement.

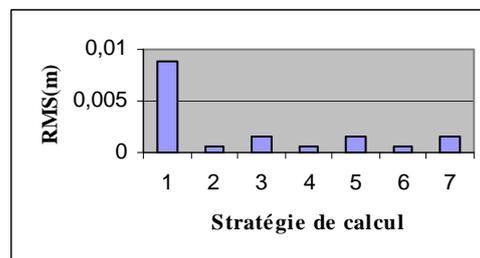


Fig. 9: RMS sur l'altitude

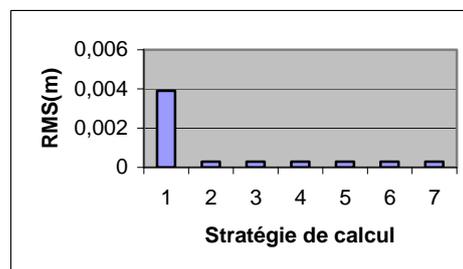


Fig. 10: RMS sur la latitude.

Pour la latitude et la longitude, les deux modèles de Saastamoinen et de Hopfield, sans

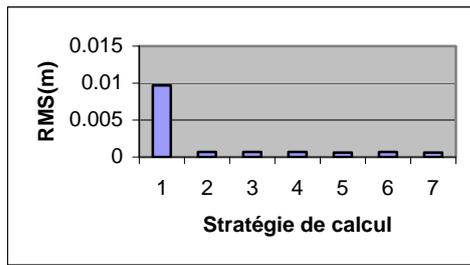


Fig. 11 : RMS sur la longitude.

On remarque que :

- Pour les deux composantes horizontales, l'emploi des modèles troposphériques de Saastamoinen et de Hopfield avec ou sans leur fonctions de projections donnent presque les mêmes résultats. (le RMS atteint 0.7mm sur la longitude et 0.3mm sur la latitude)
- Le modèle d'Essen et Froome et la fonction de Dry Niell donnent presque les mêmes résultats sur les deux composantes horizontales où le RMS atteint 0.0003 m sur la latitude et 0.0007 m sur la longitude. Par contre, sur la composante verticale, l'emploi de la fonction de Dry Niell a donné des résultats moins précis par rapport au modèle d'Essen et Froome dont le RMS atteint 0.0006 m.

Les résultats obtenus lors des traitements des observations des stations permanentes sont en général meilleurs par rapport à ceux enregistrés sur les autres lignes de bases et ce pour les différents modèles troposphériques utilisés. Ceci s'explique par le fait que les stations permanentes permettent de s'affranchir des erreurs systématiques liées à la mise en station sur trépied par exemple; elles permettent également l'analyse complète des erreurs qui affectent les mesures.

V. ESTIMATION DU DELAI ZENITHAL

Les figures ci-dessous illustrent les valeurs du délai zénithal pour les deux stations permanentes (Alger et Madrid) et du RMS sur chaque coordonnée, en fonction des dates suivantes :

1: 27/03/04 (0h - 4h); **2:** 27/03/04 (4h -8h);

3: 27/03/04 (8h -12h); **4:** 27/03/04 (12h -16h);
5: 27/03/04 (16h - 20h); **6:** 27/03/04 (20h - 24h)

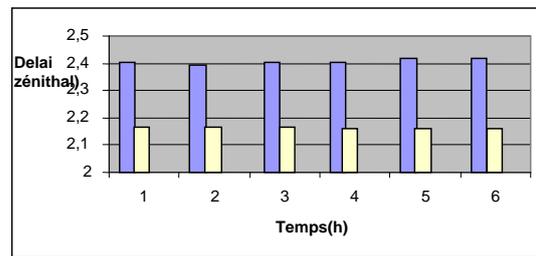


Fig. 12: Variation du délai zénithal en fonction du temps.

■ : Alger ■ : Madrid

Il est à remarquer que :

- Les valeurs du délai zénithal sur la station Alger sont en général plus élevées que celles enregistrées à la station Madrid.
- Le délai atteint le maximum pour la station Alger vers minuit, soit 2.419 m et le minimum pour la station Madrid, soit 2.158 m.
- Cette variation s'explique par le fait que la station Alger se situe près de la mer et le taux d'humidité y est très élevé par rapport à la station Madrid. De plus, la station Madrid étant à 800 m d'altitude, la troposphère est moins épaisse au dessus de ce site.

VI. CONCLUSION

L'objectif scientifique de notre étude est d'analyser les divers problèmes liés à la détermination de la composante verticale de la mesure GPS et proposer une stratégie de calcul permettant d'améliorer la précision de cette composante.

En conclusion, nous pouvons dire que la qualité des résultats aurait été meilleure si on avait utilisé des technologies récentes pour la détermination du délai dû à la composante humide (Lidar, radio occultation, etc.).

Les conclusions préliminaires de ce travail sont:

- Le paramètre troposphérique est très corrélé avec la composante verticale 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.
- les meilleurs résultats sont obtenus en employant les modèles de Saastamoinen et de Hopfield avec leurs fonctions de projections.
- La non utilisation des modèles troposphériques donne des résultats moins précis, ceci s'explique par le fait qu'on traite une ligne de base dont les deux extrémités ne sont pas dans la même atmosphère, ce qui ne permet pas aux doubles différences d'éliminer totalement l'effet.
- Pour le réseau permanent, les résultats sont en général meilleurs par rapport aux autres lignes de bases.
- L'utilisation des modèles de Saastamoinen et de Hopfield avec l'estimation du retard troposphérique donne presque les mêmes résultats: l'écart est de 5 mm pour la composante verticale et de 3 mm pour les deux autres composantes.

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

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

Les sites webs

<ftp://ftp.unibe.ch/aiub/papers/>

<http://igs.cb.jpl.nasa.gov>

<http://lareg.ensg.ign.fr>

<http://www.esgt.cnam.fr>

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Duquenne F., 2000 : Les techniques de positionnement précis par GPS. ESGT

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

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

Hofmann-Wellenhof B., Lichteneger H., Collins J., 1994 : Global Positioning System. Theory and Practice, Springer-Verlag, New York, Third edition.

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

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