

ANALYSE COMBINÉE DE DONNÉES GPS ET LIDAR RAMAN ACQUISES LORS DE LA CAMPAGNE COPS POUR L'AMÉLIORATION DU POSITIONNEMENT VERTICAL PAR GPS

Société d'accueil : LAREG
PFE présenté par : **Martin Blocquaux**
Directeur du PFE : M. Pierre Bosser
Correcteurs : M. Gilbert Ferhat
M. Pierre Grussenmeyer



Introduction

Le Laboratoire de Recherche en Géodésie (LAREG) et le Laboratoire d'Optique, d'Electronique et de Micro-Informatique (LOEMI) de l'IGN ont développé un système de mesure de la vapeur d'eau. Ces mesures, habituellement exploitées en météorologie, ont, dans le cadre de cette étude, une utilité dans des applications géodésiques. En effet, ce système est censé fournir des informations sur l'évolution temporelle de la vapeur d'eau qui affecte la propagation des signaux GPS entre le satellite et l'antenne au cours de la traversée de la troposphère. Depuis 2004, un tel système a déjà été mis en œuvre sur trois expérimentations majeures, afin de vérifier l'apport de ces mesures. Tout d'abord en 2004, au cours de la campagne VAPIC, qui se déroulait en région parisienne. Ce jeu de données a notamment servi de base pour les travaux de thèse de mon directeur de PFE [Bosser, 2008]. Ensuite, en 2007, dans le cadre de la campagne internationale COPS, menée de juin à août 2007 en Alsace, le lidar RAMEAU a été déployé durant tout le mois de juillet sur un site proche de Strasbourg. Durant cette période, on dispose de neuf sessions d'observation lidar de 6 heures, qui ont été réalisées au zénith dans des conditions météorologiques favorables. Au cours de cette étude, il conviendra donc de se concentrer tout particulièrement sur l'analyse de ces sessions, à la lumière du cheminement méthodologique effectué au cours de travaux antérieurs. Enfin, la dernière expérimentation date de 2009, lors de la campagne Manitoul, à Toulouse. A ce jour, les données sont encore à l'état brut.

L'objectif du projet est de suivre la méthodologie mise en œuvre au cours des travaux de thèse de Pierre BOSSER en ce qui concerne l'analyse des mesures de vapeur d'eau réalisées durant la campagne COPS, puis d'exploiter les données lidar lors d'un traitement GPS réalisé en PPP (Precise Point Positioning) en utilisant le logiciel d'analyse GPS Gipsy-Oasis II, développé par le JPL/NASA.

1. Influence de la troposphère sur le positionnement GPS

Le GPS, devenu au cours de ces dernières années une technique de positionnement incontournable, est actuellement celle qui est la plus utilisée. Un exemple d'exploitation de cette technique dans le cadre d'activités de nivellement de précision en est le contrôle par GPS du réseau français de nivellement (IGN69). Cependant, alors que la précision du GPS en planimétrie est millimétrique, la précision verticale est quant à elle limitée à 3-15 mm, et les applications de nivellement se cantonnent alors aux précisions moyennes, en particulier dans le cas de longues lignes de base. Les erreurs influençant la détermination par GPS des altitudes sont en effet associées aux retards troposphériques, dus à la réfractivité de la troposphère, aux trajets multiples (qui dépendent fortement du choix du site) ainsi qu'aux variations des centres de phases.

Le retard troposphérique se décompose en deux parties : l'une, hydrostatique ; l'autre, humide. La composante hydrostatique représente la contribution de l'atmosphère en équilibre hydrostatique et retarde le signal GPS au zénith d'un peu plus de 2 mètres. Ce retard se calcule à partir de mesures de pression au sol. On utilise pour ce faire des capteurs statiques de pression, afin de garantir une précision de 0,3 hPa sur les mesures de pression au sol. De cette manière, et connaissant la valeur de l'accélération de la pesanteur au site, le retard hydrostatique suivant la direction zénithale peut être déterminé très précisément.

La composante humide, quant à elle, représente la contribution de la vapeur d'eau et retarde le signal GPS au zénith d'une dizaine de centimètres. Ce retard est beaucoup plus difficile à estimer que le retard hydrostatique. En effet, il n'existe aucune relation entre le contenu intégré en vapeur d'eau et la pression partielle de vapeur d'eau en surface. Pour caractériser ce retard, il n'existe qu'une formule à partir de mesures au sol, mais fournit une variabilité totalement imprécise. De ce fait, il est impossible d'obtenir une modélisation précise par ce moyen.

Il convient en outre de caractériser le retard troposphérique non pas uniquement au zénith, mais pour différentes élévations du satellite. L'utilisation de fonctions de projection permet de répondre à ce besoin. Si quatre modèles sont utilisés à l'heure actuelle, celui qui a été préféré dans cette étude est la VMF, ou *Vienna Mapping Function*, qui repose sur l'utilisation de profils de pression, température et humidité provenant de réanalyses du centre européen de prévisions météorologiques (ECMWF) ainsi que d'un algorithme de ray-tracing.

En dernier lieu, on peut s'interroger sur l'importance des gradients horizontaux. En effet, pour pouvoir modéliser l'atmosphère en élévation, il faut au préalable supposer que celle-ci soit à symétrie sphérique. Cette hypothèse se justifie en première approximation, mais peut conduire à des erreurs non négligeables lorsqu'une grande précision est recherchée, ces écarts pouvant atteindre 5 cm à 7° d'élévation. Il convient donc de modéliser ces gradients atmosphériques, qui reflètent la variabilité de l'atmosphère. Grâce à l'estimation d'un couple de gradients horizontaux (dans les directions Nord/Sud et Est/Ouest), on peut ainsi modéliser les asymétries en azimut de la troposphère.

2. Etudes préliminaires

Dans cette partie, il convient tout d'abord d'analyser, à l'aide de prétraitements GPS, l'évolution du retard troposphérique (humide et hydrostatique) au zénith sur l'ensemble du mois de juillet 2007. Pour la mesure du retard humide, les données suivantes ont été comparées : des mesures de retard humide par GPS, le modèle météorologique ainsi que les profils d'humidité restitués par radiosondages. Dans le cas du retard hydrostatatique, les données comparées sont des mesures au sol provenant de deux capteurs différents, le modèle météorologique et des profils d'humidité restitués par radiosondages.

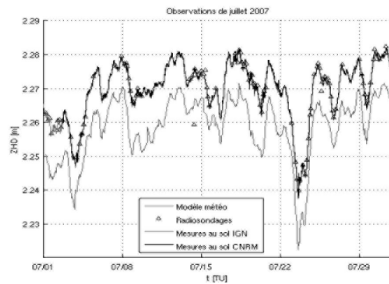


Fig.2.1 : Evolution du retard troposphérique hydrostatique mesuré par différentes techniques

Une fois que l'on a étudié les variations des retards troposphériques sur un mois entier, on peut dès lors se focaliser sur des sessions de six heures afin de comparer les valeurs de retard troposphérique humide mesurées par GPS à celles mesurées par lidar. Les différentes grandeurs statistiques relatives à ces comparaisons (moyenne, écart-type, indice de corrélation) sont répertoriées dans le tableau 2.1.

référence	test	Période	n	m [mm]	σ [mm]	c
Goa NIED	Lidar	13/07/07	71	15,4	3,8	-0,02
Goa NIED	Lidar	19/07/07	71	14,5	4,3	0,70
Goa NIED	Lidar	22/07/07	71	26,8	10,3	0,33
Goa NIED	Lidar	24/07/07	72	16,7	4,1	0,75
Goa NIED	Lidar	25/07/07	67	10,9	4,0	0,26
Goa NIED	Lidar	31/07/07	71	10,1	2,8	0,61
Goa NIED	Lidar	Juillet	629	16,7	8,4	0,42

**Tab.2.1 : Tableau comparatif des observations par GPS et par lidar
(m: moyenne, n : nombre d'observations, σ :écart-type, c: indice de corrélation)**

Enfin, pour chacune des sessions, on peut comparer l'évolution du retard troposphérique humide avec celle de l'humidité observée par lidar. Ainsi, pour la nuit du 13 juillet 2007, on peut lire de faibles variations d'humidité, avec toutefois une augmentation du retard humide causée par une humidification de la partie supérieure de la couche limite. La lecture en parallèle d'un bulletin d'observation météorologique permet d'autre part de mieux appréhender le comportement de la troposphère durant la session, ainsi que les conditions dans lesquelles les mesures ont été réalisées.

3. Traitements des données GPS

Les traitements ont été réalisés sur l'une des deux stations d'étude, en l'occurrence la station NIED. En effet, l'autre station (MEIS) présentait des variabilités temporelles trop importantes pour que l'on puisse lui accorder autant de crédit qu'à la station NIED.

Ces traitements ont alors été élaborés selon plusieurs stratégies, ou plusieurs niveaux. Le premier niveau correspond au traitement standard, sans aucune correction apportée. Puis, par la prise en compte des résidus moyens quadratiques, on arrive à corriger les trajets multiples. Dans un troisième niveau, outre cette première correction, on prend en compte les observations lidar, au lieu de fixer une valeur a priori pour le retard humide (de 10 cm), comme c'était le cas pour les premiers procédés. Enfin, dans une dernière stratégie, on utilise une fonction de projection lidar, en lieu et place de la VMF. On peut alors comparer l'apport, en termes de précision sur les résultats, de chacun des paramètres.

Si l'on considère, par exemple, la comparaison des traitements avec et sans prise en compte des données lidar, on obtient, tout d'abord, des informations sur les répétabilité des coordonnées estimées pour chaque session :

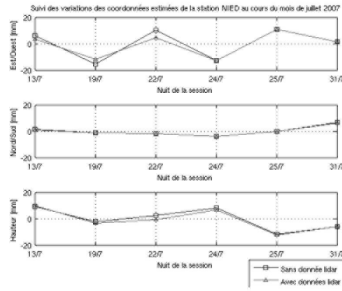


Fig.3.1 : Variation des coordonnées estimées de la station au cours du mois de juillet 2007

Puis, en raisonnant par session, on compare les évolutions du retard troposphérique humide en fonction du temps. Pour une comparaison plus fine des résultats, on a procédé à une décomposition en hautes et en basses fréquences. Dans l'exemple en figure 3.2, on étudie la session du 13 juillet. Même si les courbes ont globalement la même allure, on détecte des écarts à certaines périodes de la session, ce qui prouve que le choix d'une méthode de traitement n'est pas neutre.

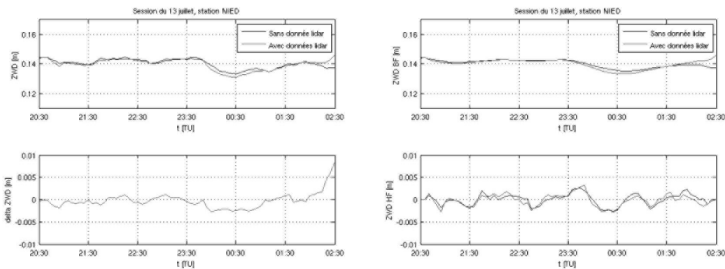


Fig.3.2 : Comparaisons des mesures de retard humide et décomposition en hautes et basses fréquences, session du 13 juillet 2007

Conclusion

La modélisation de la troposphère par GPS permet d'obtenir de bonnes estimations sur les retards troposphériques, hydrostatiques et humides. On peut même rendre celles-ci particulièrement robustes en prenant en compte les gradients horizontaux dans le modèle. Cependant, dans tous les cas, les résultats obtenus ne sont pas satisfaisants pour autant : on ne peut pas se contenter des modélisations effectuées ici ; de plus, il y a une forte corrélation avec les sources d'erreurs générées par la troposphère. C'est pourquoi il est apparu nécessaire d'adopter à la modélisation GPS une correction externe de la troposphère, réalisée à l'aide d'un lidar Raman. Les résultats obtenus durant cette étude montrent bien qu'un tel procédé permet de gagner en précision, mais il serait pour autant illusoire de penser que cette technique constitue une fin en soi.