

Analyse combinée de données GPS et lidar Raman acquises lors de la campagne COPS pour l'amélioration du positionnement vertical par GPS

■ **Martin BLOQUAUX**

Le GPS (Global Positioning System) connaît un succès grandissant au cours de ces dernières années. Néanmoins, alors que sa précision planimétrique est millimétrique, la composante verticale ne peut être déterminée qu'avec une précision de l'ordre du centimètre. Dans cette optique, il est nécessaire de mieux connaître l'influence de la troposphère sur la propagation des signaux GPS. Après qu'une première campagne, baptisée VAPIC, a été menée en 2004 en région parisienne, la campagne COPS s'est déroulée de juin à août 2007 entre le sud-ouest de l'Allemagne et l'est de la France. Cette campagne avait pour objectif d'améliorer la qualité des prévisions de précipitations convectives dues à l'orographie. Au cours de la campagne, le lidar RAMEAU a été déployé afin de mesurer, parallèlement au GPS, l'évolution du retard troposphérique humide. Ce lidar a par ailleurs permis de restituer des profils de rapport de mélange. L'étude porte donc sur l'apport du lidar et notamment sur la pertinence d'un traitement GPS couplé au lidar dans le but de modéliser plus finement ce retard.

Afin de mieux prendre en compte les hétérogénéités en vapeur d'eau de l'atmosphère, il est nécessaire d'opérer une correction externe du GPS par l'utilisation du lidar Raman. Cela suppose une restitution précise par la technique Raman de l'effet de la troposphère humide. On se concentrera exclusivement sur la campagne COPS, menée en juillet 2007 en Alsace, qui constitue une application de ces différents aspects.

Dans un premier temps, on s'intéressera à l'évolution des retards troposphériques sur l'ensemble du mois de juillet 2007, à l'aide de différentes techniques, avant d'étudier ces variations session par session. Dans notre cas, six sessions sont retenues pour cette étude. Dans une dernière partie, on comparera les différentes stratégies relatives aux traitements GPS, effectués à l'aide du logiciel Gipsy-OASIS II. On se situe en aval du projet, puisque les traitements effectués sont ceux de données collectées il y a 3 ans, au cours de la campagne COPS. Il conviendra donc d'analyser, de quantifier et, le cas échéant, de valider les résultats obtenus.

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.

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 (NGF 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 fournissant 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 [Miyazaki et al., 2003].

Comme il a été vu dans le chapitre ci-dessus, la modélisation de la troposphère atteint ses limites et il faut par conséquent chercher une source de correction externe de la troposphère. Dans cette optique, le Laboratoire d'Opto-Electronique et de Micro-Informatique (LOEMI) a développé, en collaboration avec le Service d'Aéronomie du CNRS (anciennement SA, LATMOS sous son nom actuel) un système de mesure de la vapeur d'eau : il s'agit d'un lidar Raman, nommé RAMEAU. Ces mesures, habituellement exploitées en météorologie, ont dans ce cas 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 : il s'agit des campagnes VAPIC (2004), COPS (2007) et Manitou (2009).

La technique du lidar Raman se base sur la détection de la variation de fréquence de la lumière rétrodiffusée par des molécules. Dans le cas de cette étude, la lumière est transmise à une longueur d'onde de 355 nm et reçue à 387 nm pour de l'azote et 408 nm pour de la vapeur d'eau. Afin d'éliminer les paramètres inconnus, on déduit le rapport de mélange de vapeur d'eau à partir du rapport entre ces deux signaux. On peut assurer le couplage entre les parties réception et détection soit de manière directe, soit par l'intermédiaire d'une fibre optique.

Cette technique a néanmoins deux limites importantes. Tout d'abord, il est nécessaire de bien étalonner l'appareil pour que l'on puisse relier les rapports des signaux obtenus aux paramètres physiques que sont les densités de la vapeur d'eau et de l'air. En outre, étant donné que le rayonnement solaire peut dépasser la rétrodiffusion due au lidar et que des nuages peuvent atténuer le signal transmis, il est nécessaire d'effectuer les mesures de nuit et sous un ciel clair, ce qui rend l'utilisation de cette technique soumise à conditions.

Description de la campagne

La campagne COPS (*Convective and Orographically-induced Precipitation Study*) est une campagne d'observations météorologiques qui s'est déroulée durant trois mois, entre juin et août 2007 dans la vallée du Rhin (des Vosges à la Forêt Noire). Cette campagne visait à étudier les cycles de précipitations et de convection dans les régions montagneuses. Durant un mois (du 1^{er} au 31 juillet), le lidar RAMEAU, décrit précédemment, a été déployé sur le site "Vosges" de cette expérimentation, situé à Meistratzheim, à proximité de Strasbourg.

L'objectif premier de cette campagne était l'amélioration de la prévision des précipitations dans les régions de basse montagne. Pour ce faire, une mise en commun tout à fait unique de moyens s'est avérée nécessaire, avec notamment une exploitation de systèmes actifs de télédétection pendant une durée de trois mois. Une si longue période était en effet indispensable pour investiguer toute la chaîne de processus conduisant à l'élaboration, l'organisation et l'achèvement des précipitations. Pour présenter les précipitations convectives, on s'est concentré sur l'application de systèmes lidar permettant d'étudier l'environnement pré-convectif. De plus, le jeu de données de la campagne COPS a également été utilisé pour mieux comprendre la genèse et l'organisation du phénomène de convection [Wulfmeyer et al., 2008].

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.

La *figure 1* met en évidence ces trois déterminations du retard humide. On constate que les deux courbes ont sensiblement la même allure, ce qui démontre la corrélation existant entre le retard humide mesuré par GPS et l'humidité simulée par MesoNh.

En s'intéressant à présent à l'évolution de l'humidité observée par lidar, on constate que lorsqu'on observe des "pics" humides dans les couches inférieures de la troposphère, le retard humide observé est plus important. Cela permet de mettre en évidence la corrélation existant entre les variations du retard humide et celles de l'humidité observée dans les couches basses de la troposphère.

Dans le cas du retard hydrostatique, les données comparées sont des mesures au sol provenant de deux capteurs différents, le modèle météorologique et des profils d'humidité restitués par radiosondages (*figure 2*).

En établissant des comparaisons sur l'ensemble du mois de juillet, on constate que le biais entre les mesures lidar et les radiosondages est très faible (quelques millimètres) alors que les mesures par GPS présentent un biais de plus d'un centimètre avec chacune de ces deux techniques. Le bon étalon-

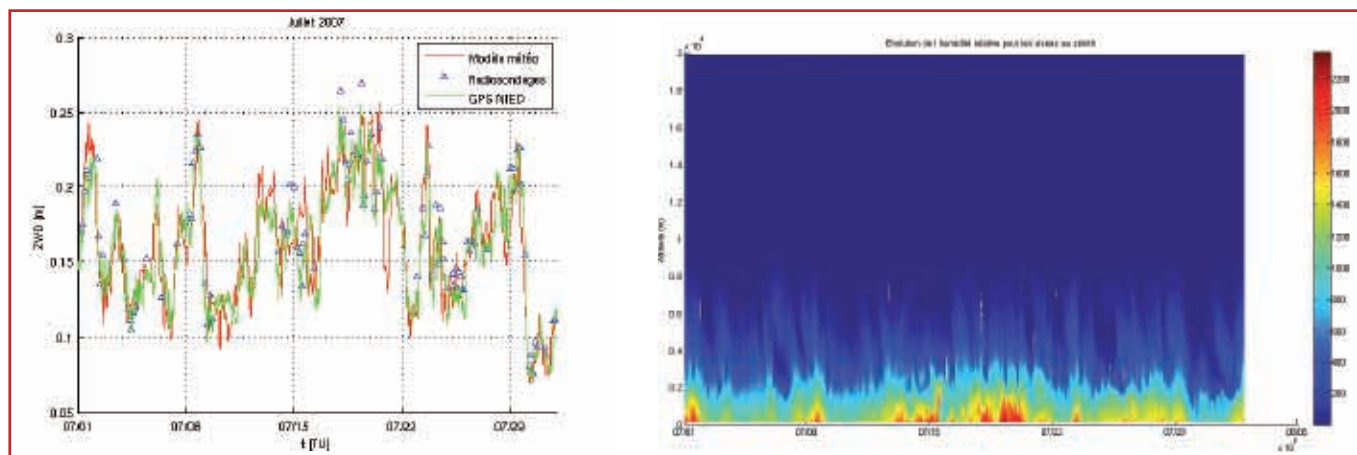


Figure 1. Comparaison du retard humide au zénith et de l'humidité observée par lidar durant le mois de juillet 2007.

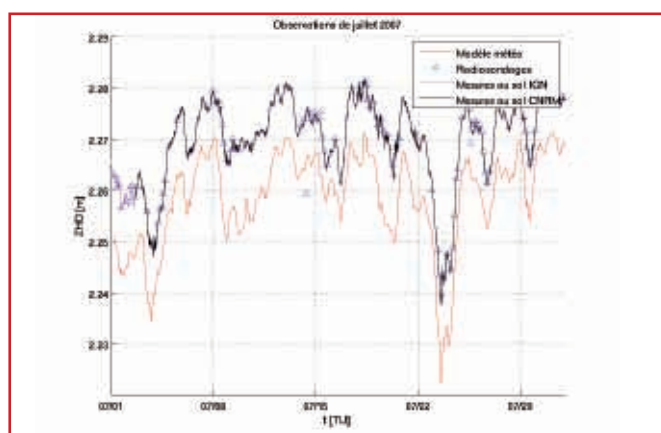


Figure 2. Evolution du retard troposphérique hydrostatique mesuré par différentes techniques.

nage du lidar ainsi que la détermination satisfaisante du complément permettaient de prévoir cette bonne adéquation. En se basant à présent sur l'observation de six sessions, on note que dans l'ensemble, les écarts entre lidar et GPS sont biaisés (entre 10 cm et 25 cm), avec un écart-type assez faible, de l'ordre de quelques millimètres. En revanche, la corrélation n'est pas toujours très bonne, ce qui peut s'expliquer par un mauvais étalonnage du lidar, dont la précision est de l'ordre de 5 %, ce qui génère des écarts pouvant atteindre 1 cm. De plus, compte tenu de l'incertitude associée à la solution GPS, les résultats se situent dans les barres d'erreur.

Couplage GPS – lidar

Les traitements dont les résultats sont exposés dans cette partie ont été effectués à l'aide du logiciel GIPSY/OASIS II en mode PPP. Ceux-ci ont fait l'objet de quatre stratégies différentes. Avec une première méthode, le signal GPS n'a subi aucune correction, et la valeur du retard humide a priori est fixée à 100 millimètres. La fonction de projection utilisée dans le traitement est alors la VMF (*Vienna Mapping Function*) ; c'est le traitement de référence qui suit les recommandations en vigueur en matière de traitement GPS. Dans une seconde approche, on cherche à corriger les trajets multiples ainsi que les variations de phase de l'antenne GPS. Cette correction est réalisée à partir de la carte de résidus moyens obtenue par

cumul des résidus sur la période d'intérêt. La valeur du retard humide a priori ainsi que la fonction de projection sont les mêmes que dans la première méthode. Une troisième stratégie consiste ensuite à appliquer à ce traitement corrigé un retard humide a priori non plus fixé à une valeur constante, mais basé sur des estimations lidar. La fonction de projection associée est toujours la VMF. Cette stratégie doit pouvoir améliorer très nettement la cohérence entre les estimations lidar et GPS en ce qui concerne les variations rapides.

Le lidar est ici utilisé en a priori afin d'avoir une estimation plus conforme à la réalité. En effet, les écarts entre les retards humides zénithaux mesurés par lidar et par GPS ne sont pas négligeables. De plus, la calibration du lidar et le complément par radiosondage constituent des sources d'erreur à hauteur de 5 %. Il est donc nécessaire d'estimer un complément.

Les profils de rapports de mélange de vapeur d'eau issus du lidar sont complétés par des radiosondages colocalisés au-delà de la portée du lidar, soit 5 kilomètres. On utilise alors une méthode de ray-tracing [Rocken et al., 2001] qui a été définie précédemment. Une fonction de projection lidar prend alors en compte la structure verticale de la troposphère et son évolution au cours du temps à la résolution temporelle de 5 minutes. Une dernière méthode consiste justement à remplacer la VMF par cette dernière fonction de projection, les autres paramètres n'étant pas modifiés par rapport au traitement précédent.

Enfin, on peut établir un parallèle entre les variabilités sur les coordonnées estimées et les variations des résidus moyens. En effet, le *tableau 1* montre bien que si, d'un traitement à l'autre, les variabilités sur les coordonnées diminuent, alors les résidus moyens quadratiques obtenus sont eux aussi plus faibles, et vice-versa.

Le traitement standard fournit les moins bons résultats, alors que celui prenant en compte la correction des trajets multiples et les observations lidar donne les résultats les plus satisfaisants.

Si les valeurs de retards humides diffèrent d'une session à l'autre, on a cependant remarqué certaines similitudes entre plusieurs de ces sessions. Ainsi, pour la première comparaison, faisant intervenir les traitements avec et sans correction des trajets multiples, les écarts n'excèdent jamais 2 mm. La comparaison suivante, mettant en jeu des traitements



moyenne	Résidus moyens quadratiques (mm)		
	Sans correction	Avec correction	Avec lidar
var. Est	12,3	11,5	9,5
var. Nord	4,0	3,6	3,4
var. Hauteur	8,9	8,2	8,1
var. 3D	15,7	14,6	12,9
résidus moy.	8,9	8,0	8,0

Tableau 1. Influence du mode de traitement sur la valeur des résidus moyens quadratiques.

corrigés des trajets multiples, mais prenant en compte ou non les observations lidar, a permis d'observer des écarts très variables et plus importants que dans le traitement précédent (jusqu'à 8 mm). Enfin, la dernière comparaison, visant à étudier l'influence du choix de la fonction de projection, expose des résultats très similaires, les courbes se superposant quasi parfaitement.

La décomposition du retard en basses et hautes fréquences est également riche en enseignements : les variations sur les basses fréquences sont cohérentes, et le GPS, notamment, fournit de très bons résultats. En revanche, on a relevé des écarts sur les variations des hautes fréquences. Cela est dû à la difficulté qu'a le GPS à restituer des variations rapides si celui-ci n'est pas assisté ([Bossier et al., 2010]). Les écarts alors induits sont de l'ordre de ± 5 mm.

Conclusion

Afin d'améliorer la précision altimétrique du positionnement par GPS, il est nécessaire, comme on l'a vu, de bien modéliser le retard troposphérique, et en particulier le retard humide, qui, du fait de sa forte variabilité dans le temps et dans l'espace, est particulièrement difficile à apprécier. Après avoir décrit les objectifs et le déroulement de la campagne COPS, point de départ de cette étude, on a cherché d'une part à décrire les évolutions des retards humide et hydrostatique pendant le mois de juillet 2007, et d'autre part, en se focalisant sur six sessions, à modéliser les variations du retard humide à partir des mesures du GPS, du lidar et des radiosondages. On a alors pu s'apercevoir, d'une part, que les mesures GPS étaient biaisées, et d'autre part, que les contraintes fixées au GPS l'empêchaient de mesurer les variations rapides du retard humide. En superposant les courbes de variations de ce retard mesuré par lidar et l'évolution du rapport de mélange, on note que ces données sont très bien corrélées, ce qui est tout à fait logique étant donné que les profils de rapport de mélange sont utilisés pour le calcul du retard troposphérique humide. On peut alors envisager l'exploitation des mesures lidar comme source d'information au cours du traitement GPS. Dans une dernière partie consacrée aux traitements GPS, différentes stratégies de traitements sont comparées. On peut ainsi, en premier lieu, noter l'importance de la correction des trajets multiples. Puis, la thèse de l'utilisation du lidar, expliquée précédemment, au lieu de fixer une valeur de retard a priori arbitraire (en l'occurrence, 10 cm) se trouve confortée. Enfin, le choix de la fonction de la projection influe très peu sur les résultats obtenus. ●

Bibliographie

- Boehm, J., Mendes Cerveira, P.-J. et Schuh, H. [2005] *The impact of tropospheric mapping functions based on numerical weather models on the determination of geodetic parameters.*
- Bossier, P., Bock, O., Pelon, J. et Thom, C. [2007] *Study of the statistics of water vapor mixing ratio determined from Raman lidar measurements.*
- Bossier, P. [2008] *Développement et validation d'une méthode de calcul GPS intégrant des mesures de profils de vapeur d'eau en visée multi-angulaire pour l'altimétrie de haute précision.* Thèse de Doctorat pour obtenir le titre de Docteur de l'Université Pierre et Marie Curie. 264 pages.
- Bossier, P., Bock, O., Thom, C., Pelon, J. et Willis, P. [2009] *A case study of using Raman lidar measurements in high-accuracy GPS applications.* Journal of Geodesy, DOI 10.1007.
- Herring, T. [1992] *Modelling atmospheric delays in the analysis of space geodetic data.*
- Miyazaki, S., Iwabuchi, T., Heki, K. et Naito, I. [2003] *An impact of estimating tropospheric delay gradients on precise positioning in the summer using the Japanese nationwide GPS array.* Journal of Geophysical Research, VOL. 108, NO. B7, 2335.
- Wulfmeyer, V., Behrendt, A., Bauer, H.-S., Kottmeier, C., Corsmeier, U., Blyth, A., Craig, G., Schumann, U., Hagen, M., Crewell, S., Di Girolamo, P., Flamant, C., Miller, M., Montani, A., Mobbs, S., Richard, E., Rotach, M., Arpagaus, M., Russchenberg, H., Schlusser, P., König, M., Gärtner, V., Steinacker, R., Dorninger, M., Turner, D., Weckwerth, T., Hense, A. et Simmer, C. [2008], *The Convective and Orographically induced Precipitation Study : A Research and Development Project of the World Weather Research Program for Improving Quantitative Precipitation Forecasting in Low- Mountain Regions.*

Contact

Martin BLOCCQUAUX

martin.blocquaux@insa-strasbourg.fr

ABSTRACT

The GPS (Global Positioning System) has become increasingly popular in the last few years. However, while the horizontal accuracy is millimetric, the vertical component cannot be determined with an accuracy better than one centimeter. In this context, it is necessary to increase our understanding of the influence of the troposphere on the propagation of GPS signals. After a first campaign, dubbed VAPIC, was conducted in 2004 near Paris, a further campaign (COPS) was held from June to August 2007 between south-western Germany and eastern France. This campaign aimed to improve the quality of forecasts of convective precipitation due to orography. During the campaign, the RAMEAU lidar was deployed to measure the evolution of wet tropospheric delay, in conjunction with GPS. This lidar has also helped restore the profiles of mixing ratio. This study therefore focuses on the lidar contribution and especially on the relevance of GPS processing coupled with lidar in order to model the delay more accurately.