

L'EFFET DE L'ATMOSPHÈRE TERRESTRE SUR LES GNSS : UNE PERTURBATION OU UN SIGNAL GÉOPHYSIQUE ?

René WARNANT

Résumé

Depuis 1988, l'Observatoire royal de Belgique (ORB) est impliqué dans des programmes de recherche internationaux en géodésie et en géophysique basés sur le Global Positioning System (GPS). L'utilisation du GPS pour la détermination de positions dans le cadre d'applications en géophysique où les précisions attendues sont centimétriques, voire sub-centimétriques, nécessite la correction des effets de l'atmosphère sur les signaux GPS. L'article décrit l'approche utilisée à l'ORB en vue d'étudier et de corriger ces effets et montre pourquoi les systèmes de positionnement par satellites sont aussi devenus des outils précieux en physique de l'ionosphère et en météorologie.

Abstract

Since 1988, the Royal Observatory of Belgium (ROB) is involved in international research programs in geodesy and in geophysics based on the Global Positioning System (GPS). The use of GPS to measure positions in the frame of applications in geophysics where centimetre or even sub-centimetre accuracies are expected requires the correction of the atmosphere effects on GPS signal propagation. The paper outlines the approach used at ROB in order to correct these effects and shows how Global Navigation Satellite Systems become also valuable tools in ionosphere physics and in meteorology.

I. LA GÉODÉSIE SPATIALE À L'OBSERVATOIRE ROYAL DE BELGIQUE

L'Observatoire royal de Belgique (ORB) possède une longue expérience dans l'étude de la rotation de la Terre sur elle-même car la relative stabilité de cette rotation a été, jusqu'en 1956, l'horloge de référence mondiale. La précision de l'heure était ainsi réalisée à quelques millièmes de seconde près. Depuis 1967, les horloges atomiques définissent la seconde à 10^{-14} près. Dotés de cette nouvelle référence temporelle, les astronomes essayent de comprendre les nombreuses irrégularités observées dans la rotation de la Terre. L'étude de ce genre de phénomènes nécessite, notamment, la définition de systèmes de référence tournant avec la Terre. Le lancement des satellites artificiels a grandement facilité l'accomplissement de cette tâche : dès le début des années 60, des réseaux internationaux d'observation des satellites artificiels se mirent en place. En 1966, un premier réseau européen (le réseau WEST) voyait le jour avec, comme objectif, de définir un système de référence à l'échelle européenne. L'Observatoire royal prit part à ce réseau dont les stations observaient les satellites ECHO et PAGEOS. Il s'agissait d'énormes ballons qui

réfléchissaient la lumière du soleil. Leur position était déterminée photographiquement par rapport à des étoiles de référence situées en arrière-plan. L'observation simultanée du même satellite dans les différentes stations permettait la mesure de la distance séparant ces stations. Pour pouvoir effectuer ces observations, il fallait disposer d'un ciel clair simultanément dans des stations distantes de plusieurs milliers de kilomètres. En outre, le dépouillement de ces mesures était très ardu ; après 5 ans d'efforts, la précision obtenue pour le positionnement des stations du réseau était de l'ordre de 2 mètres.

En 1972, l'Observatoire royal s'intégra dans le réseau TRANET : il s'agissait d'un réseau mondial d'observation d'une constellation de 6 satellites connus sous le nom de TRANSIT. Ces satellites émettaient des signaux radioélectriques. Contrairement au cas des satellites ballons, l'observation des satellites TRANSIT pouvait avoir lieu indépendamment des conditions météorologiques. Ainsi, la localisation du site de l'Observatoire gagna un ordre de grandeur en précision ; cette précision était acquise dans un repère, non plus local à l'échelle européenne, mais dans un repère mondial dont l'origine est située au centre de masse de la Terre. Ce réseau cessa son activité en septembre 1993. En 21 ans, près

de 400.000 passages de satellites furent observés à Uccle. La précision obtenue sur la position des stations calculée après une semaine de mesures était de l'ordre de 30 centimètres tandis qu'après quelques mois, elle avoisinait le décimètre.

Le Global Positioning System (GPS) ou Système de Positionnement Global a succédé aux satellites TRANSIT. À l'origine, le GPS est un programme développé à la fin des années 70 par le Département de la Défense des États-Unis. Principalement destiné à la navigation (militaire) sur terre, sur mer et dans les airs, le GPS devait permettre à un utilisateur équipé du matériel adéquat de déterminer sa position en temps réel à tout moment dans un système de référence mondial à l'aide des codes de navigation C/A et P émis par des satellites en orbite moyenne (environ 20.200 km). Le signal GPS est essentiellement constitué de deux fréquences porteuses appelées L1 (1575,42 MHz) et L2 (1227,6 MHz) qui sont modulées par les codes C/A et P. Le code C/A est modulé sur la porteuse L1 et le code P est modulé sur L1 et L2. À l'origine, le rôle des fréquences porteuses est de « transporter » les codes C/A ou P utilisés pour la navigation. Très vite, les géodésiens se mirent à exploiter les fréquences porteuses pour la détermination de positions précises en post-traitement. Le terme « post-traitement » signifie que, contrairement à la navigation basée sur les codes, les positions mesurées à l'aide des porteuses n'étaient pas disponibles en temps réel.

En 1988, l'Observatoire royal de Belgique lançait un programme de recherche dont l'objectif était d'explorer et d'exploiter les nouvelles possibilités offertes par le système GPS dans le cadre d'applications en géodésie et en géophysique. En fait, tous les domaines de la géodésie et de la géophysique nécessitant la détermination précise de positions étaient potentiellement concernés par les nouvelles « fonctionnalités » du nouveau système GPS. Citons, à titre d'exemples, la réalisation de systèmes de référence terrestres et la détermination du géoïde (en combinaison avec le nivellement) en géodésie, la mesure précise des déformations locales, régionales et globales de la croûte terrestre en géophysique (tectonique, sismologie, volcanologie), etc. À la fin des années 80, l'objectif des géodésiens était de tenter d'atteindre une précision centimétrique en post-traitement sur le long terme (après plusieurs semaines, voire plusieurs mois d'observation). À l'heure actuelle, le GPS permet d'obtenir une précision centimétrique en temps réel pour des applications en géodésie de terrain ; en outre, l'exploitation des mesures collectées dans les stations permanentes participant aux réseaux internationaux d'observation des satellites GPS permet l'obtention de précisions de l'ordre de quelques millimètres en post-traitement. Les systèmes de positionnement par satellites, encore appelés GNSS (Global Navigation Satellite Systems), sont devenus des outils fiables, rapides et précis ce qui explique l'importance qu'ils ont prise non seulement pour des applications scientifiques, mais aussi dans de très nombreux secteurs de la vie économique.

De tels niveaux de précision n'ont pu être obtenus qu'après une modélisation adéquate de toutes les sources d'erreurs affectant les mesures effectuées sur les signaux GPS.

II. LES EFFETS ATMOSPHÉRIQUES AFFECTANT LES GNSS

D'une manière générale, l'effet de l'atmosphère (neutre et ionisée) sur la propagation des ondes radio reste une importante source de perturbations pour la recherche dans le domaine spatial. Dans le cadre de missions d'exploration du système solaire, les ondes émises par des sondes spatiales vers la Terre sont affectées tant par les plasmas terrestres (ionosphère) et interplanétaires (vent solaire) que par le contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère terrestre. En géodésie spatiale, les effets atmosphériques restent la principale limite à la précision et, surtout, à la fiabilité des applications précises basées sur les GNSS. Pour cette raison, un projet de recherche intitulé « Effets de l'atmosphère terrestre en géodésie spatiale » a été créé à l'Observatoire royal de Belgique. L'objectif de ce projet est de modéliser, de corriger et de prédire les effets de l'atmosphère sur les mesures de positions basées sur les GNSS.

La propagation des signaux émis par les satellites GPS est affectée, d'une part par l'atmosphère neutre, troposphère et stratosphère et, d'autre part, par l'atmosphère ionisée, ionosphère et protonosphère : on parle respectivement de l'effet troposphérique et de l'effet ionosphérique (Leick, 2004).

En pratique, une meilleure prise en compte de ces effets dans les algorithmes de traitement des données GNSS nécessite une meilleure connaissance de 2 « paramètres » atmosphériques :

- le Total Electron Content (TEC) de l'ionosphère ; le TEC est l'intégrale de la concentration en électrons libres de l'ionosphère sur le chemin satellite-station ;
- le contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère neutre (troposphère) ; le contenu en vapeur d'eau est l'intégrale de la concentration en vapeur d'eau sur le chemin satellite-station.

Ces 2 quantités sont extrêmement variables dans l'espace et dans le temps et sont, par conséquent, très difficiles à modéliser. En particulier, les modèles utilisés en géodésie spatiale ne sont pas adaptés lors du passage de fronts météorologiques, dans le cas de la vapeur d'eau, et lors de tempêtes ionosphériques, dans le cas du TEC.

Depuis près de 15 ans, l'ORB poursuit un programme de recherche visant à étudier l'influence de ces 2 paramètres atmosphériques sur le calcul de positions précises par GNSS. La stratégie utilisée dans ce projet est la suivante :

- dans un premier temps, on mesure « l'état de l'atmosphère » ou, plus exactement, l'ensemble des « paramètres » qui peuvent influencer la précision des GNSS, en particulier, le contenu en vapeur d'eau de la

troposphère et le TEC de l'ionosphère mais aussi tous facteurs qui peuvent avoir une influence sur ces deux quantités comme l'activité géomagnétique, l'activité solaire, le développement de foyers orageux...

- dans un deuxième temps, l'information collectée au sujet de l'état de l'atmosphère est utilisée pour évaluer, corriger et prédire les effets de l'atmosphère sur les GNSS.

Remarquons que l'information obtenue sur le comportement spatio-temporel du contenu en vapeur d'eau de la troposphère et sur le TEC de l'ionosphère constitue un sous-produit particulièrement intéressant pour la météorologie, la climatologie ou pour l'étude de l'ionosphère.

III. IONOSPHERE ET METEOROLOGIE SPATIALE

Notre étude de l'erreur ionosphérique se base sur la propriété suivante : les mesures effectuées sur les 2 fréquences porteuses émises par les satellites GPS peuvent être combinées en vue de calculer le contenu électronique total de l'ionosphère dans la direction de tous les satellites observés, c'est-à-dire sur chaque chemin satellite-récepteur (Warnant, 1996). Puisqu'à tout moment, en moyenne 6 à 8 satellites peuvent être observés suivant différents azimuts et élévations, cette technique permet de « sonder » l'ionosphère simultanément dans plusieurs directions. Dès le début des années 90, l'Observatoire royal a utilisé cette particularité du système GPS afin d'étudier le « comportement » du TEC : nous disposons d'une série de temps du TEC qui couvre plus d'un cycle solaire ; il s'agit de la série de temps la plus longue en Europe. À l'heure actuelle, les 6 stations GPS permanentes de l'ORB sont utilisées pour dresser, en temps réel, des cartes du TEC au-dessus de la Belgique. En pratique, l'information obtenue sur le TEC a permis de mieux cerner l'influence de l'ionosphère sur les algorithmes de calcul de positions précises par GPS et, par conséquent, de mettre au point une correction plus efficace de cet effet. En outre, puisque le système GPS permet d'obtenir des informations sur l'ionosphère (TEC), notre approche a permis d'établir, dès le début des années 90, une collaboration entre la communauté des géodésiens et la communauté des ionosphéristes. Dès 1994, l'Institut Royal Météorologique (IRM) et l'Observatoire royal de Belgique se sont associés à cet effort de collaboration internationale. À la fin des années 90, les GNSS étaient devenus des outils utilisés et acceptés par les ionosphéristes du monde entier pour l'étude de l'ionosphère, tant à l'échelle globale (mise au point de cartes du TEC mondiales), que pour l'étude de phénomènes locaux comme les Travelling Ionospheric Disturbances (Lejeune, 2006).

À l'heure actuelle, de nombreuses applications scientifiques (et civiles) du GPS nécessitent l'obtention de résultats précis en temps réel. En terme de positionnement, il est généralement admis qu'un niveau de précision

centimétrique peut être atteint en temps réel. Pour ce type d'applications, l'erreur ionosphérique a une grande influence sur les techniques de traitement des données, en particulier, sur la résolution des ambiguïtés de phase. En effet, les applications précises du GPS se basent sur des mesures de phases effectuées sur les fréquences porteuses L1 et L2 dont les longueurs d'ondes sont respectivement 19,05 cm et 24,43 cm. Physiquement, ces mesures de phases représentent la distance séparant le satellite du récepteur GPS considérée à un nombre entier de longueurs d'ondes près, c'est-à-dire à un nombre entier de fois 19,05 cm, pour L1, et 24,43 cm, pour L2. L'obtention de résultats précis nécessite la connaissance de ces nombres entiers appelés « ambiguïtés de phase ». D'une manière générale, les techniques utilisées pour résoudre les ambiguïtés requièrent une connaissance *a priori* de la variabilité spatiale et temporelle du TEC. Si la variabilité réelle de l'ionosphère s'écarte de manière significative de cette variabilité *a priori*, la résolution des ambiguïtés et, par conséquent, la précision du résultat final s'en trouvent affectées. En effet, soit l'algorithme ne réussit pas à résoudre l'ambiguïté, soit il la résout de manière erronée. Ce dernier cas est le plus grave car il peut mener, à l'insu de l'utilisateur, à des erreurs de plusieurs décimètres (plusieurs longueurs d'ondes) en terme de positionnement (Lejeune, 2006). Pour cette raison, l'erreur ionosphérique peut être considérée comme une importante limitation à la *fiabilité* des applications en temps réel des GNSS. Cette notion de fiabilité va jouer un rôle prépondérant dans la conception du futur système de navigation européen Galileo qui veut pouvoir offrir à ses utilisateurs un niveau de précision certifié à tout moment.

À l'heure actuelle, l'étude des effets de la météorologie spatiale, ou Space Weather, sur l'ionosphère est un sujet de recherche qui réunit à nouveau les géodésiens et les ionosphéristes. Ce thème fait l'objet de différentes collaborations multidisciplinaires au niveau international. En effet, des conditions perturbées du Space Weather (éruptions solaires, tempêtes géomagnétiques...) sont à l'origine d'une grande variabilité ionosphérique qui peut dégrader fortement, voire rendre impossible, la résolution des ambiguïtés de phase. Pour cette raison, l'IRM et l'ORB se sont à nouveau associés en vue d'évaluer et de prédire à court terme l'influence du Space Weather sur les applications en temps réel des GNSS. Ce programme de recherche a été financé par l'ESA dans le cadre d'un appel d'offres lié à l'effet du Space Weather sur les activités humaines. Il a permis la mise au point d'un service web (<http://www.gpsatm.oma.be>) permettant d'informer en temps réel les utilisateurs des GNSS quant à l'influence de la météorologie spatiale sur la précision et à la fiabilité de leurs résultats.

IV. L'EFFET DE L'ATMOSPHERE NEUTRE

Depuis 1998, l'ORB poursuit un programme de re-

cherche visant à mieux comprendre et corriger l'effet de l'atmosphère neutre et, en particulier, de la vapeur d'eau sur les applications du GPS en géophysique. La problématique liée à la vapeur d'eau est très semblable à celle liée au TEC. Pour cette raison, l'ORB a utilisé, pour l'erreur troposphérique, une démarche semblable à celle qui est utilisée pour l'erreur ionosphérique. L'idée est, à nouveau, d'obtenir une meilleure connaissance du comportement du contenu en vapeur d'eau afin de mieux comprendre son influence sur les algorithmes de calcul utilisés en géodésie spatiale. Cette étude se base sur les mesures effectuées par un radiomètre à vapeur d'eau, par les radiosondes de l'IRM et par les récepteurs GPS du réseau permanent de l'ORB. En particulier, dans une station dont la position est connue au niveau sub-centimétrique, il est possible d'utiliser le GPS afin de calculer le contenu en vapeur d'eau de la troposphère. Cette recherche fait l'objet d'une collaboration internationale avec la communauté des météorologistes. En effet, les météorologistes étudient la possibilité de tirer profit de l'information sur la vapeur d'eau obtenue par GPS dans leurs modèles de prévision numérique du temps. Dans ce type d'applications, l'intérêt du GPS est de fournir une information qui a une valeur ajoutée en terme de résolution spatio-temporelle. Actuellement, l'ORB calcule, en quasi temps réel, le contenu en vapeur d'eau des 6 stations du réseau de l'ORB et d'une soixantaine d'autres stations permanentes européennes pour des applications en météorologie dans le cadre d'un projet EUMETNET. Les valeurs du contenu en vapeur d'eau calculées dans le cadre de ce réseau sont assimilées dans les modèles numériques de prévision du temps utilisés par plusieurs instituts météorologiques européens en vue d'améliorer la qualité des prévisions.

À nouveau, les applications en temps réel du GPS sont affectées lorsque la variabilité spatio-temporelle de la vapeur d'eau est élevée, comme c'est le cas lors du passage de fronts météorologiques, de fortes précipitations ou lors d'orages violents. Il faut toutefois noter que la contribution de l'effet troposphérique au budget d'erreur est généralement moins élevée que la contribution de l'effet ionosphérique.

V. LE FUTUR : L'EXPLOITATION DE L'ACTIVE GEODETIC NETWORK

Jusqu'il y a peu, nos études des effets atmosphériques se basaient essentiellement sur les mesures collectées dans les 6 stations permanentes de l'ORB. Chaque chemin « satellite-station » permet de sonder l'atmosphère dans une direction particulière. En moyenne, chaque station observe simultanément 6 à 8 satellites au dessus de 10° d'élévation. Cependant, l'interdistance caractéristique entre les stations de l'ORB est de l'ordre de 100 km ce qui limite la résolution spatiale que l'on peut obtenir sur le TEC et surtout, sur le contenu en vapeur d'eau. Or, la précision des applications scientifiques du GPS est

principalement dégradée lors de l'apparition de structures à petite échelle (quelques km) dans le TEC et dans la vapeur d'eau.

Depuis la fin 2003, le territoire belge est couvert d'environ 60 stations GPS permanentes (en plus des stations de l'ORB) qui constituent un réseau de référence pour toutes les applications en temps réel du GPS. Il s'agit de l'Active Geodetic Network (AGN). Ce réseau est sous la responsabilité de la région wallonne (WALCORS), de la région flamande (FLEPOS) et de l'Institut Géographique National (GPSBru). Typiquement, ces stations sont distantes d'environ 20 km ce qui augmente très fortement la densité de chemins « satellite-station » sondés simultanément. Pour l'instant, des réseaux aussi denses ne se trouvent qu'à 2 endroits dans le monde (essentiellement, pour des raisons de surveillance sismique) : il s'agit du Japon et de la Californie. Dans l'avenir, de tels réseaux denses devraient couvrir toute l'Europe. À moyen terme, l'avènement du système Galileo va encore accentuer cette tendance. Pour ces raisons, les données du réseau de référence AGN offrent une opportunité unique de développer de nouvelles méthodes de traitement des données permettant d'exploiter une plus grande densité d'informations sur l'état de l'atmosphère. Ces méthodes pourraient ensuite être étendues à toute l'Europe au fur et à mesure du développement des réseaux denses.

L'ORB et l'IRM viennent de signer un contrat avec Galileo Joint Undertaking. Galileo JU est une entreprise co-financée par la Communauté européenne et par l'ESA dont le rôle est la mise en oeuvre pratique du système Galileo. Cette entreprise est chargée de placer des contrats, essentiellement avec les industriels européens, pour la « construction » de tous les éléments qui constitueront Galileo. L'ORB et l'IRM ont été sélectionnés lors d'un appel d'offres lancé par Galileo JU pour un projet appelé GALOCAD ou « GALileo Local Component for the detection of Atmospheric Disturbances ». Le but de ce projet est de développer un service permettant d'informer les utilisateurs de Galileo (en temps réel) au sujet de l'effet de l'atmosphère sur la fiabilité (l'intégrité) de la position affichée par leur récepteur Galileo. Ainsi, par exemple, le service proposé par l'ORB pourrait informer les utilisateurs de Galileo du fait qu'une tempête géomagnétique ou une orage violent en cours risque de dégrader la précision de la position affichée par leur récepteur Galileo. Cette étude se basera essentiellement sur les données collectées dans l'AGN. Les études qui seront effectuées par l'ORB et l'IRM porteront aussi sur des applications telles que le guidage d'avions en phase d'atterrissage. Si le projet produit les résultats attendus, le service prototype proposé par l'ORB et l'IRM pour la Belgique pourrait devenir un standard qui serait généralisé au niveau européen.

Les premiers résultats obtenus avec les données de l'AGN montrent tout l'intérêt de ce réseau pour l'étude de l'effet de phénomènes très localisés dans l'atmos-

phère sur les GNSS. À titre d'exemple, nous avons sélectionné une journée où un orage relativement violent et très localisé a été observé. L'idée est, d'une part, de constater si l'orage est à l'origine de l'apparition de structures locales dans la vapeur d'eau qui sont mesurables sur base des données du réseau AGN et, d'autre part, d'évaluer quantitativement la variabilité locale des délais troposphériques. Les premiers résultats sont très prometteurs : les données du réseau dense permettent de caractériser des structures dans la vapeur d'eau dues à un orage local. En outre, nous avons pu mesurer l'effet de ces structures sur les délais troposphériques pour de courtes distances. Il apparaît déjà clairement que de telles structures ne pouvaient pas être détectées sur base du seul réseau permanent de l'ORB. Les résultats obtenus en ce qui concerne les effets ionosphériques sont tout aussi prometteurs.

VI. CONCLUSIONS

De nos jours, les systèmes de positionnement par satellites sont devenus des outils bon marché, rapides et fiables pour la mesure de positions, tant pour des applications scientifiques que dans de nombreux secteurs de la vie économique. L'Observatoire royal de Belgique s'est spécialisé dans l'étude et la correction des effets atmosphériques qui restent l'une des principales limitations à la précision et à la fiabilité des GNSS. Pour le géodésien, l'effet de l'atmosphère sur la propagation des ondes radio émises par les GNSS est une perturbation qu'il faut éliminer mais pour les ionosphéristes et les météorologistes, il s'agit d'un « signal » contenant de l'information au sujet de l'état de l'atmosphère. Ainsi, les études dont le but initial était la correction des effets atmosphériques ont aussi permis de reconstruire de l'information sur le TEC de l'ionosphère ou encore sur la distribution de la vapeur d'eau dans l'atmosphère neutre

pour des applications en physique de l'ionosphère ou en météorologie. Pour cette raison, les systèmes de positionnement par satellites sont aussi devenus des outils privilégiés pour l'étude de l'atmosphère terrestre.

BIBLIOGRAPHIE

- LEICK A., 2004. *GPS Satellite Surveying*, 3^e édition, John Wiley & Sons, New York, 435 p.
- LEJEUNE S., 2006. Les effets ionosphériques affectant les systèmes de positionnement par satellites, *Bulletin de la Société géographique de Liège*, même volume.
- SEEBER G., 2003. *Satellite Geodesy*, 2^e 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 :

René WARNANT
Observatoire Royal de Belgique
Avenue Circulaire, 3
B-1180 Bruxelles
R.Warnant@oma.be
et
Unité de Géomatique
Université de Liège
17, Allée du 6 Août (B5)
B-4000 Liège
Rene.Warnant@ulg.ac.be

