

Les applications météorologiques du système de positionnement satellitaire GPS

Erik Doerflinger

Laboratoire de géophysique, tectonique et sédimentologie
Institut des sciences de la Terre, de l'eau et de l'espace de Montpellier
Centre national de la recherche scientifique (CNRS) et université Montpellier 2
Case courrier 060
4, place Eugène-Bataillon
34095 Montpellier Cedex 05
Courrier électronique : erik@dstu.univ-montp2.fr

Résumé

Le système GPS (Global Positioning System) est aujourd'hui l'outil privilégié pour se positionner avec une grande précision et sert également en tant que référence temporelle. En météorologie, le GPS est couramment utilisé pour le positionnement et la synchronisation des mesures fixes ou mobiles (terrestres, maritimes et aériennes), mais aussi pour la mesure du vent en altitude par radiosondage. Ces applications sont présentées dans la première partie de l'article.

Depuis quelques années, de nombreuses études ont montré que le GPS est également un outil efficace pour la mesure du contenu intégré en vapeur d'eau dans l'atmosphère, quantité utile pour la climatologie et pour la prévision numérique du temps. La deuxième partie de l'article décrit le principe de cette nouvelle mesure et montre la précision et la résolution que l'on peut en attendre selon le dispositif GPS terrestre employé. On présente enfin brièvement la technique de radio-occultation utilisant des récepteurs GPS embarqués sur des satellites.

Abstract

Meteorological applications of the GPS

Global Positioning System (GPS) is nowadays the principal measurement technique for precise positioning, and a reference time system. This tool is currently used for positioning and synchronization of land, marine and aircraft meteorological measurements, and for radiosonde wind measurements. These applications are presented in the first part of the article.

In recent years, many studies have shown that GPS is an efficient tool for measuring the integrated water vapor content in the atmosphere, which is a useful quantity for climatological and weather forecasting applications. The second part of the article describes the principle of this new technique, and shows the accuracy and the resolution of the observations obtained from different land GPS strategies, as well as the radio-occultation technique using GPS receivers aboard satellites.

Le GPS (Global Positioning System) est aujourd'hui le système le plus couramment utilisé pour tous les types de localisation. On s'en sert actuellement en météorologie pour le positionnement des mesures en mer et pour le positionnement des sondes de radiosondage et le calcul du vent en altitude. Il est aussi utilisé comme référence temporelle pour les mesures nécessitant une parfaite synchronisation.



Figure 1 - Un satellite GPS.

Le GPS, un outil de référence pour le positionnement

Principe du positionnement par GPS

Mais, de plus, un grand nombre de nouvelles applications dérivées de l'analyse des données GPS peuvent être envisagées en météorologie. Reposant sur l'étude de la réfraction atmosphérique qui affecte les signaux GPS se propageant des satellites vers les récepteurs, ces nouvelles applications sont intéressantes pour la prévision numérique du temps, mais aussi pour l'étude des changements climatiques et de la chimie de l'atmosphère. L'emploi de réseaux GPS permet de mesurer le **contenu intégré en vapeur d'eau** dans l'atmosphère (voir encadré ci-dessous) suivant trois types de mode opératoire. D'abord, l'utilisation des réseaux GPS géodésiques existants donne accès au contenu intégré en vapeur d'eau au-dessus de chacune des stations. Ensuite, l'implantation de réseaux GPS à haute densité fournit une image à haute résolution et en trois dimensions de la distribution de la vapeur d'eau sur des zones d'étude limitées. Enfin, la technique de radio-occultation s'appuyant sur des récepteurs GPS embarqués sur satellite permet d'obtenir une estimation de la répartition spatiale de la température et de l'humidité dans l'atmosphère.

La mesure du contenu intégré en vapeur d'eau par GPS n'est pas encore utilisée de façon opérationnelle en météorologie. De nombreux programmes d'étude sont actuellement en cours aux niveaux national, européen et international pour fournir ce type de données en temps réel, afin de pouvoir les assimiler dans les modèles de prévision numérique du temps.

Le système Navstar GPS (Navigation System by Timing And Ranging - Global Positioning System), communément appelé GPS, est un système de positionnement à l'aide de satellites. Ce système est planétaire car il permet de se positionner à tout instant et en tout point du globe et de son environnement spatial.

Le programme GPS a été lancé vers la fin des années 1970, par le Département américain de la Défense, pour la navigation, le positionnement et la synchronisation des horloges. Le système a été pleinement opérationnel à partir du mois de février 1994. C'est aujourd'hui un outil indispensable pour un grand nombre d'applications civiles : navigation routière, maritime et aérienne, topographie, géodésie, géophysique et, récemment, météorologie.

Le positionnement repose sur la mesure de la durée de propagation des signaux radioélectriques (fréquences à 1 575,42 et 1 227,60 MHz) émis par au moins quatre des vingt et un satellites du système (figures 1 et 2), qui défilent à environ 20 200 km de la Terre, et reçus par des récepteurs GPS passifs.

Contenu intégré en vapeur d'eau Eau précipitable

On appelle **contenu intégré en vapeur d'eau** C au-dessus d'un point de la surface terrestre la masse totale de vapeur d'eau contenue dans la colonne atmosphérique de section unité située à la verticale de ce point. Si q est l'**humidité spécifique** (rapport de la masse de vapeur d'eau à la masse d'air humide dans un volume élémentaire) et ρ la densité de l'air humide à l'altitude z , on a :

$$C = \int q \cdot \rho \cdot dz$$

où l'intégrale s'étend de la surface jusqu'au sommet de l'atmosphère et où C est exprimé en kg/m^2 .

On appelle **eau précipitable** E la hauteur d'eau liquide qui serait obtenue si toute la vapeur d'eau contenue dans la colonne d'air était condensée et précipitée au sol. On montre aisément que :

$$E \text{ (mm)} = C \text{ (kg/m}^2\text{)}$$

On notera que la contribution de l'eau condensée (nuage, pluie, brouillard, neige...) contenue dans la colonne d'air est généralement négligeable en comparaison de la contribution de la vapeur d'eau, ce qui justifie cette notion d'eau précipitable.

Les études climatologiques sur la vapeur d'eau atmosphérique montrent que, selon la saison et la latitude, l'eau précipitable varie grosso modo entre 5 mm (aux pôles en hiver) et 60 mm (près de l'équateur). Aux latitudes moyennes, elle est souvent de l'ordre de 30 mm. La contribution de la stratosphère à l'eau précipitable est très faible, de l'ordre de 0,3 mm. Ainsi, dans la majeure partie des cas, l'eau précipitable est presque entièrement située dans la troposphère.



Figure 2 - La constellation des vingt et un satellites GPS.

Les éphémérides radiodiffusées (diffusées par les satellites avec le signal GPS vers les récepteurs) sont accessibles à tous et permettent de connaître à chaque instant la position des satellites dans un repère terrestre. Une station GPS réceptrice mesure la durée de propagation Δt du signal émis par chacun des satellites. La vitesse de propagation de ces signaux est celle de la lumière c . La distance satellite-récepteur D s'obtient alors simplement grâce à la relation :

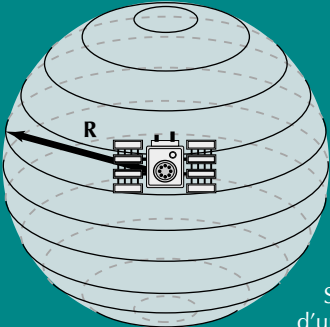
$$D = c \cdot \Delta t \tag{1}$$

Chaque mesure de distance obtenue sur un satellite définit une sphère dont le centre est le satellite et sur laquelle se trouve la station. Trois satellites sont donc nécessaires pour obtenir la position de la station d'après le principe du positionnement par trilatération (encadré ci-dessous). Un quatrième satellite est indispensable pour tenir compte de la non-synchronisation des horloges des satellites et du récepteur. Cette synchronisation est nécessaire pour la mesure précise de la durée de propagation Δt . Le recours à des satellites supplémentaires (jusqu'à une dizaine en tout et au maximum) permet d'accroître encore la précision du positionnement.

Positionnement absolu et positionnement relatif

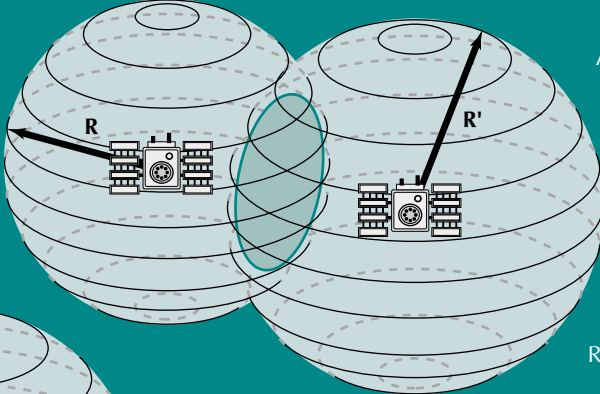
On distingue le **positionnement absolu** et le **positionnement relatif** (ou différentiel), tant du point de vue des acquisitions et du type de traitement effectué que de la précision des résultats.

Le positionnement par GPS



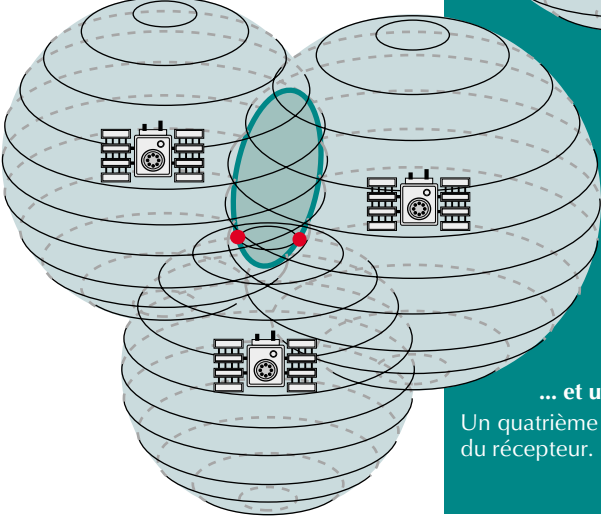
Avec un satellite

Si un récepteur détermine qu'il est à une distance R d'un satellite particulier, le récepteur se situe sur une sphère de rayon R centrée sur le satellite.



Avec deux satellites

Si ce même récepteur mesure sa distance R' à un deuxième satellite, les positions possibles du récepteur sont encore réduites : il se situe à l'intersection des deux sphères de rayon R et R' , qui forme un cercle.



Avec trois satellites

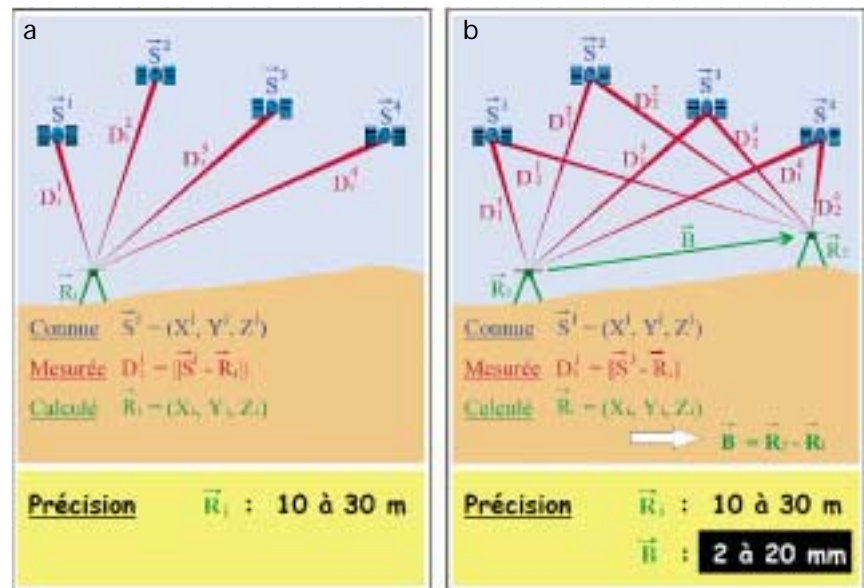
Une troisième mesure sur un nouveau satellite décrit une troisième sphère qui coupe le cercle formé par les deux autres sphères. La position possible du récepteur se réduit à deux points de l'espace. En pratique, l'un de ces deux points donne une position aberrante qui peut être facilement éliminée.

... et un quatrième satellite

Un quatrième satellite est nécessaire à la synchronisation des horloges du satellite et du récepteur. Il permet le transfert du « temps GPS » et élimine les points aberrants.

Le positionnement absolu (figure 3a) ne nécessite qu'un seul récepteur GPS et qu'une durée de mesure très courte (quelques secondes), mais ce positionnement est généralement peu précis (erreur comprise entre 10 et 30 mètres). La précision dépend principalement de la qualité des éphémérides radiodiffusées et des perturbations subies par le signal GPS lors de son trajet des satellites vers les récepteurs. Notons que la précision décimétrique est uniquement accessible depuis le 2 mai 2000. Avant cette date, le signal GPS était volontairement dégradé et la précision variait entre 100 et 300 mètres en positionnement absolu. Seuls les utilisateurs habilités avaient accès à la précision décimétrique. La suppression de l'accès sélectif aux données GPS a été décidée par le gouvernement américain pour des raisons d'ordre politique et commercial.

Figure 3 - Principe du positionnement GPS absolu (a) et du positionnement GPS relatif (b). Les satellites sont notés S^i et les récepteurs aux points de mesure, ainsi que le vecteur ligne de base reliant les deux points de mesure (pour le positionnement relatif) sont des quantités vectorielles exprimées dans un référentiel GPS donné. Les distances satellite-point de mesure D_i^j sont les quantités mesurées.



En positionnement relatif, les distances satellite-récepteur sont enregistrées en au moins deux stations observant simultanément les mêmes satellites. Le résultat est le vecteur joignant les deux stations (figure 3b), d'où le terme de positionnement relatif ou différentiel. Ce positionnement permet par différentiation d'éliminer l'influence des erreurs communes à chacun des sites de réception (erreurs d'orbite, de propagation du signal et de décalage des horloges satellite-récepteur). Il permet d'atteindre des précisions relatives meilleures que 10^{-8} fois la distance séparant les sites de mesure (quelques millimètres pour des distances de plusieurs centaines de kilomètres) en utilisant des éphémérides précises recalculées à posteriori. Il peut être effectué en mode statique ou dynamique (l'un des récepteurs est alors mobile), en temps réel ou différé. C'est ce type de positionnement, dans son utilisation la plus précise, qui permet de mesurer le contenu intégré en vapeur d'eau.

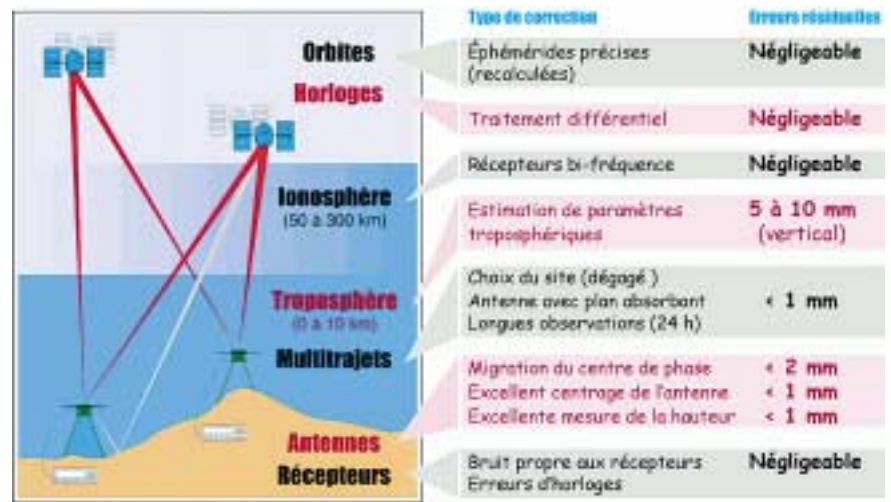
Les biais et les corrections des mesures GPS relatives

La mesure GPS en mode relatif comporte de nombreuses sources d'erreur (biais), qui interviennent en différents points du système : lors de l'émission du signal (horloge et position des satellites), lors de la propagation du signal (perturbations dues à l'ionosphère et à la troposphère, trajets multiples) et lors de la réception du signal et de son traitement (position exacte du point de mesure de l'antenne, horloge et bruit du récepteur, erreurs liées aux coordonnées approchées). Ces différents biais et les types de corrections utilisés pour s'en affranchir sont récapitulés figure 4. En mode GPS relatif, ces biais sont éliminés, soit par différentiation (une erreur identique en deux points est éliminée lors du traitement différentiel), soit après modélisation (mesures indépendantes ou paramètres estimés numériquement à partir des données GPS).

La perturbation la plus difficilement quantifiable est le délai troposphérique. En effet, ce délai n'est généralement pas identique en chacun des sites de mesure et ne peut donc être éliminé par simple différentiation. La perturbation est d'autant plus importante que la partie de la troposphère traversée par le signal d'un même satellite vers chacun des sites de réception est différente (grand dénivelé et grande différence de conditions météorologiques). Elle affecte principalement



Figure 4 - Récapitulatif des biais (erreurs) affectant la précision des mesures GPS bi-fréquence relatives. Les valeurs sont données à titre indicatif et doivent être comprises comme des ordres de grandeur.



l'altitude GPS (la composante verticale) en raison de la géométrie du système. Mais cette quantité, qui est source d'erreur pour le positionnement GPS, est une donnée riche en informations pour les météorologistes. Pour accéder à des précisions GPS millimétriques, on peut utiliser des orbites prédites (auquel cas la mesure pourra être effectuée en temps réel) ou des orbites plus précises mais recalculées à posteriori (auquel cas la mesure sera obtenue en temps différé).

Pour plus de détails sur le système GPS, le lecteur pourra se référer aux ouvrages de Seeber (1993) ou de Botton et al. (1997).

Les autres systèmes de navigation par satellite

Le système Glonass

Il existe d'autres systèmes de positionnement par satellite utilisables en météorologie pour la détermination du contenu intégré en vapeur d'eau.

Le système Glonass (Global Orbitography Navigation Satellite System) est l'analogue russe du système GPS. Ses performances sont comparables et il permet aussi de restituer le contenu atmosphérique en vapeur d'eau. Actuellement, seul un petit nombre de récepteurs et de logiciels permettent de traiter simultanément les données des deux systèmes et, ainsi, d'accroître la précision et la fiabilité des mesures.

Le système Doris

Le système Doris (Détermination d'Orbite et Radiopositionnement Intégré par Satellite) a été conçu et développé par le Centre national d'études spatiales (Cnes), le Groupe de recherche en géodésie spatiale (GRGS) et l'Institut géographique national (IGN), afin de répondre à de nouveaux besoins dans les domaines de la détermination précise d'orbite et de la localisation précise de balises au sol. Ce système est constitué d'un réseau permanent d'une cinquantaine de stations émettrices réparties sur la Terre. Un petit nombre de satellites (*Spot 1, 2, 3 et 4 ; Topex-Poseidon*) reçoivent ces signaux qui sont ensuite traités à l'IGN. Ce système permet aussi d'estimer le contenu troposphérique en vapeur d'eau (Willis et al., 1998), mais la quantité et la qualité des résultats sont limitées en raison du faible nombre d'émetteurs et de satellites récepteurs.

Le futur système Galileo

Le système Galileo est un projet européen qui serait une réplique civile sensiblement améliorée du GPS. Ce nouveau système devrait être opérationnel vers 2008. Il permettra bien entendu de restituer le contenu atmosphérique en vapeur d'eau avec une précision comparable ou supérieure à celle du système GPS actuel.

Les programmes de navigation par satellite GNSS

Pour ne pas dépendre des seuls systèmes américain (GPS) et russe (Glonass), l'Agence spatiale européenne et l'Organisation européenne pour la sécurité de la navigation aérienne (Eurocontrol) travaillent ensemble au développement d'un système mondial de localisation et de navigation par satellite, dénommé GNSS (Global Navigation Satellite System). Le programme GNSS se déroule en deux étapes. Débuté en 1995, le programme de navigation par satellite GNSS 1 reçoit des signaux des constellations existantes de satellites américains GPS et russes Glonass, tandis que le GNSS 2, actuellement à l'étude, fournira des services améliorés de navigation et de localisation aux utilisateurs civils. Galileo sera la contribution de l'Europe au GNSS 2.



Utilisations courantes du GPS en météo

Positionnement et navigation GPS en météorologie

Nous appelons « utilisations courantes » du GPS celles pour lesquelles ce système a été créé à l'origine, c'est-à-dire le positionnement et la synchronisation des horloges.

Comme nous l'avons vu, le système GPS permet de positionner instantanément des points de mesure avec une précision d'environ 10 mètres en mode absolu. En météorologie, cette précision est généralement suffisante et s'obtient avec un matériel GPS peu coûteux et simple d'utilisation. Le GPS est ainsi devenu l'outil privilégié pour positionner les mesures météorologiques fixes (positionnement) et mobiles (navigation), qu'elles soient terrestres (sites des réseaux d'observation, sites de mesure des campagnes temporaires), maritimes (navires, bouées) ou aériennes (position des avions avec un GPS en mode relatif et à haute fréquence d'acquisition pour obtenir une grande précision, attitude des avions en mesurant les positions relatives de leurs différentes parties).

Le temps GPS

Les signaux temporels diffusés par les satellites GPS sont synchronisés sur les horloges atomiques du centre principal de contrôle GPS (Colorado Springs, États-Unis). Cette échelle de temps GPS (appelée GPST) est reliée au temps UTC (Temps universel coordonné). L'origine du temps GPS est le 5 janvier 1980 à 0 h UTC. Le signal de chaque satellite GPS contient une correction à apporter au temps de l'horloge du satellite pour obtenir le temps GPS, ainsi que le décalage entre les temps GPS et UTC ($GPST = UTC + x \text{ secondes}$). Le système GPS permet d'accéder en temps réel au temps UTC avec une précision variant de quelques nanosecondes à 100 nanosecondes selon le mode de mesure.

La grande précision du temps GPS, sa diffusion en tout point du globe et son coût relativement peu élevé en ont fait un système de référence de synchronisation des horloges pour de très nombreuses applications. En météorologie, de nombreuses campagnes de mesure qui nécessitent des fréquences d'acquisition élevées ou des synchronisations précises entre différents lieux utilisent le temps GPS comme référence.

Une nouvelle mesure du vent pour les radiosondages

Le développement récent de nouvelles méthodes de mesure du vent par radiosondage a principalement été motivé par la disparition du système de positionnement **Omega** et par le souhait d'homogénéiser les techniques de mesure et, surtout, d'améliorer leur précision et leur résolution. Omega était un système de radionavigation à longue portée et à couverture planétaire, qui émettait à partir de huit stations réparties dans le monde entier et répondait aux besoins de la navigation maritime et aérienne. Son emploi pour le radiosondage conduisait à une incertitude sur la mesure de la vitesse du vent de l'ordre de 1,5 m/s avec une résolution verticale de l'ordre de 300 mètres. Ce système n'est plus en service depuis 1997.

Depuis la disparition du Omega, deux autres systèmes de positionnement sont utilisés pour la mesure du vent par radiosondage :

- Le **Loran-C** est un système de portée moyenne, reposant sur l'émission d'ondes de sol à basse fréquence. Ce système est composé de 34 chaînes (station maître et stations secondaires) essentiellement implantées dans l'hémisphère nord. Appliqué aux mesures de vent par radiosondage, son coût est comparable à celui du Omega et sa précision supérieure (incertitude sur la vitesse du vent de l'ordre de 0,7 m/s avec une résolution verticale de l'ordre de 150 mètres).
- La technique **GPS** est aussi largement utilisée pour la mesure du vent par radiosondage. Son coût est sensiblement supérieur à celui du Loran-C, mais sa précision et sa résolution sont bien meilleures. De plus, le système GPS est disponible partout sur le globe sans interruption dans le temps.

Principe de la mesure du vent par GPS

Pour des raisons de poids et de coût, le récepteur GPS associé à la radiosonde ne donne pas directement accès à la position du mobile. La mesure de la vitesse et de la direction du vent ne se fait donc pas à partir des positions successives de la radiosonde. La méthode repose sur la mesure de l'effet Doppler affectant le signal émis par le satellite GPS, effet qui est directement proportionnel à la vitesse relative entre l'émetteur et le récepteur. Avec les informations Doppler d'au moins quatre satellites, on peut ainsi déterminer la vitesse relative entre le satellite et la radiosonde. Ces informations sont transmises par radio depuis la radiosonde, deux fois par seconde, vers une station au sol.



Lâcher de ballon de radiosondage (a)
et vue détaillée de la radiosonde
PTU (b, à gauche)
et du module
de réception GPS (b, à droite).
(a, photo Météo-France, P. Taburet ;
b, photo Météo-France, C. Champaloux)



En utilisant un second récepteur GPS au sol, on mesure l'effet Doppler entre cette station de référence et le satellite. Les informations Doppler radiosonde-satellite et récepteur sol-satellite sont traitées en mode différentiel par la station de référence. Le résultat est le vecteur vitesse de la radiosonde par rapport à la station au sol. Cette vitesse est calculée en temps réel deux fois par seconde. Ces données sont ensuite filtrées pour éliminer l'effet pendulaire de la radiosonde par rapport au ballon. Certaines radiosondes larguées (dropsondes) utilisent aussi la technologie GPS pour la mesure du vent ; le principe est identique, mais la station de référence peut se trouver à bord de l'avion et non plus au sol.

Précision et résolution

De nombreux tests ont été réalisés afin de déterminer la résolution et la précision de la mesure du vent par les radiosondages utilisant la technique GPS. Ces tests montrent une incertitude sur la vitesse du vent comprise entre 0,1 m/s dans la troposphère et 0,3 m/s dans la stratosphère (Nash et al., 1998 ; Barat et al., 1998) avec une résolution verticale comprise entre 10 et 30 mètres après filtrage. En comparaison avec la méthode Loran-C, ces caractéristiques sont bien meilleures. Des tests similaires réalisés par l'entreprise Vaisala sur la mesure du vent par des dropsondes équipées d'un système GPS ont montré des résultats comparables.

Mesure de la vapeur d'eau par GPS terrestre

Le délai troposphérique

Examinons maintenant une retombée plus indirecte du GPS en météorologie, la mesure du contenu intégré en vapeur d'eau dans l'atmosphère.

En traversant la troposphère, l'onde électromagnétique émise par un satellite emprunte une trajectoire appelée chemin optique S. En raison de la réfraction dans l'atmosphère, cette onde subit un retard ΔL sensiblement proportionnel à la densité et dépendant du type des molécules rencontrées. Ce délai correspond à un allongement apparent du trajet du signal GPS, classiquement exprimé par :

$$\Delta L = 10^{-6} \cdot \int_s N \cdot ds \quad (2)$$

où ΔL est le délai GPS exprimé en mètres, N la réfractivité du milieu traversé [$N=10^6 \cdot (n-1)$, où n est l'indice de réfraction] et ds la distance élémentaire dans la direction du zénith.

Une bonne approximation de la réfractivité, valable dans le domaine des micro-ondes, est donnée par Smith et Weintraub (1953) :

$$N = 77,6 P/T + 3,73 \cdot 10^5 (e/T^2) \quad (3)$$

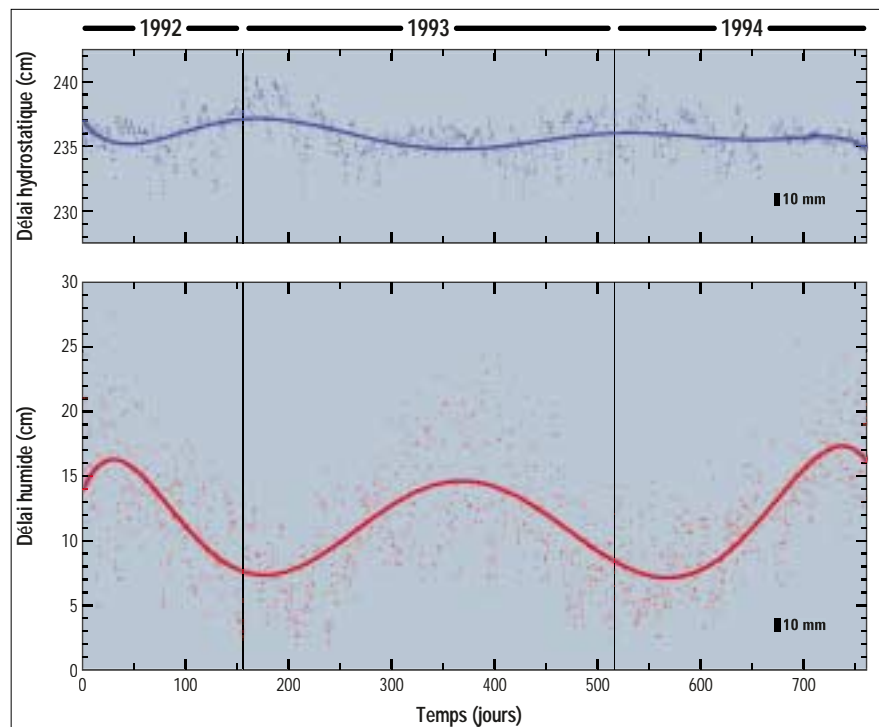
où P est la pression de l'air (hPa), T la température de l'air (K) et e la pression partielle de vapeur d'eau (hPa).

Le délai ΔL est donc la somme de deux termes : le premier, appelé **composante hydrostatique**, représente la contribution de l'atmosphère totale et retarde le signal zénithal GPS d'un peu plus de 2 mètres ; le second, appelé **composante humide**, représente la contribution de la vapeur d'eau et retarde le signal zénithal GPS d'une dizaine de centimètres (figure 5).

Comme nous l'avons dit, en raison de la géométrie du système GPS, le délai troposphérique ΔL affecte principalement la composante GPS verticale ΔH (altitude). Différentes études expérimentales ont montré que la précision de cette composante était de deux à dix fois inférieure à celle des composantes en latitude et en longitude. Ces mêmes études montrent que, pour un délai troposphérique ΔL donné, la conséquence sur la composante verticale est un biais trois fois plus important (Santerre, 1991) :

$$\Delta L = 1 \text{ mm} \Rightarrow \Delta H = 3 \text{ mm}$$

Figure 5 - Délais hydrostatiques (en haut) et délais humides (en bas) zénithaux calculés pendant deux ans à partir des radiosondages biquotidiens (0 h et 12 h UTC) de la station météorologique de Nîmes-Courbessac (Gard). Les points représentent les mesures, les courbes continues les variations annuelles (fonction polynomiale de degré 8).



La composante hydrostatique du délai

Une approximation de la composante hydrostatique ΔL_h couramment utilisée est (Elgered, 1993) :

$$\Delta L_h = (0,0022768 \pm 0,0000024) \cdot P_s / f(\Phi, H) \quad (4)$$

où P_s est la pression de l'air enregistrée au point de mesure (hPa), Φ la latitude du point de mesure, H l'altitude du point de mesure et $f(\Phi, H)$ une fonction proche de l'unité, sans unités, qui prend en compte les variations de la gravité en fonction de la latitude et de l'altitude du point de mesure.

L'erreur introduite par l'hypothèse de l'équilibre hydrostatique dépend du profil du vent au-dessus du site et vaut typiquement de l'ordre de 0,01 % (Holton, 1972). Cela correspond à 0,2 mm sur le délai zénithal. Pour des conditions extrêmes, les écarts à l'équilibre hydrostatique peuvent entraîner des erreurs de quelques millimètres sur le délai zénithal (Hauser, 1989). Un soin particulier doit être apporté aux mesures de pression au sol (précision de 0,3 hPa) ; il est nécessaire d'utiliser des capteurs statiques de pression (Akyüz et al., 1991).

La composante humide du délai

Le délai hydrostatique suivant la direction zénithale peut en conséquence être déterminé avec une grande précision à partir de la pression statique mesurée au sol et de la valeur de l'accélération de la pesanteur au site. La dépendance à l'altitude peut être définie par une fonction de projection (Herring, 1986). Cette fonction permet de reporter suivant la verticale les informations non zénithales.

La composante humide du délai ΔL_w est donnée par l'équation :

$$\Delta L_w = [1 + (6 \pm 3) \cdot 10^{-5} \cdot T_m] \cdot (0,3754 \pm 0,003) \int_s (e \cdot Z_w^{-1} / T^2) ds \quad (5)$$

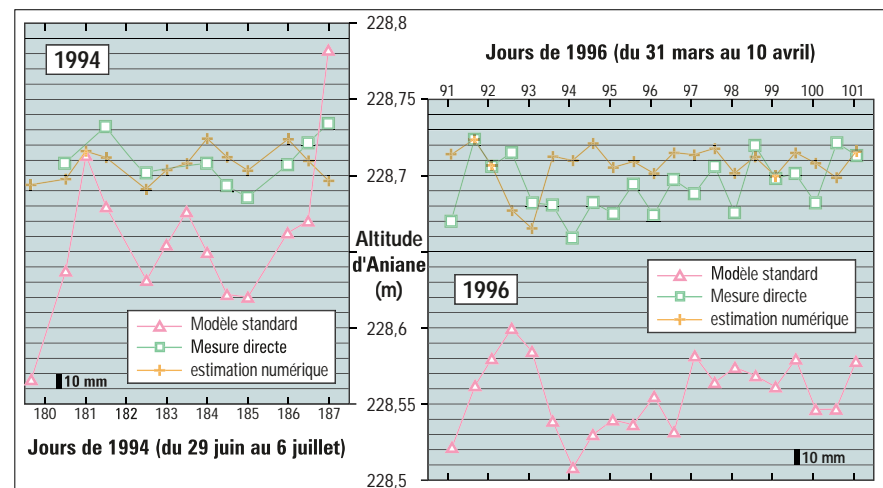
où T est la température de l'air (K), e la pression partielle de vapeur d'eau (hPa), T_m la température moyenne de l'atmosphère et Z_w^{-1} l'inverse du facteur de compressibilité de la vapeur d'eau.

Le délai humide ΔL_w est beaucoup plus difficile à estimer que le délai hydrostatique, car il n'y a pas de relation entre le contenu intégré en vapeur d'eau et la pression partielle de vapeur d'eau en surface. Dans la plupart des cas, il est donc très difficile d'estimer la distribution en altitude de la vapeur d'eau à partir des données au sol.

C'est ce délai troposphérique humide qui est la principale source d'erreur sur le positionnement GPS vertical. Pour pouvoir en corriger les effets, il est nécessaire de pouvoir quantifier ce délai. On distingue pour cela trois types de méthodes : les modèles standard, les mesures directes de la vapeur d'eau et les estimations numériques du délai humide (Bock et Doerflinger, 2001).

Ces différentes méthodes sont illustrées sur la figure 6 par quelques résultats obtenus sur la ligne de base Aniane (Hérault) - Mont Aigoual (Gard), au cours de deux campagnes de dix jours de mesures en 1994 et en 1996. Cette ligne de base de 50 km est orientée nord-sud ; elle a un fort dénivelé (1 380 m) et les conditions météorologiques sont contrastées à ses extrémités. Chacun des deux sites a été équipé d'un récepteur GPS, d'un radiomètre ETH-Captec bifréquence orientable et de stations météorologiques de mesure de la pression, de la température et de l'humidité (Doerflinger et al., 1998).

Figure 6 - Évolution en 1994 (à gauche) et en 1996 (à droite) de l'altitude apparente du site d'Aniane (Hérault) lorsque l'altitude du site du mont Aigoual (Gard) est fixée à 1 609,374 m, pour les solutions utilisant un modèle standard, des mesures directes ou une estimation numérique du délai humide. Chaque symbole représente une solution GPS altimétrique pour 12 heures de mesures. L'évolution de ces solutions est principalement due aux variations de la vapeur d'eau atmosphérique.



Les modèles standard

Les modèles atmosphériques standard sont les outils le plus couramment utilisés (Saastamoinen, 1972). Ils permettent de donner une première approximation du délai humide en utilisant, soit des mesures météorologiques de surface (pression P, température T et humidité relative U), soit des paramètres d'atmosphère standard (généralement $P = 1\ 013$ hPa, $T = 18$ °C et $U = 50$ % au niveau de la mer). L'emploi de ces modèles ne permet généralement pas d'atteindre des précisions de l'ordre du centimètre pour le GPS altimétrique relatif (figure 6).

Les mesures directes du délai humide



Différents outils existent pour mesurer au sol, de façon plus ou moins directe, le contenu intégré en vapeur d'eau atmosphérique afin de le traduire en termes de délai. Ces méthodes sont généralement lourdes à mettre en place et trop onéreuses pour être utilisées de façon systématique avec les mesures GPS. En revanche, elles peuvent être très utiles pour étalonner et contrôler une autre technique d'estimation du délai humide :

- Les radiosondages offrent une mesure directe des paramètres météorologiques en altitude, mais suivant une direction unique.

- Les radiomètres permettent d'estimer le contenu intégré en vapeur d'eau et en eau liquide suivant une direction donnée en mesurant, à l'aide d'antennes, le rayonnement thermique émis par l'atmosphère. Ce rayonnement peut être assimilé à celui d'un corps noir équivalent qui émettrait à une température souvent appelée **température de brillance**. Pour la mesure de la vapeur d'eau, les radiomètres travaillent à des fréquences voisines du centre de la raie spectrale de la vapeur d'eau à 22,235 GHz (Elgered, 1993). Pour séparer les contributions dues à la vapeur d'eau et à l'eau liquide, les radiomètres mesurent les émissions atmosphériques à deux fréquences. Ces radiomètres peuvent être portables ou fixes et, pour certains, orientables. L'emploi de cette technologie pour améliorer la précision du positionnement GPS est récente (Rocken et al., 1991 ; Bürki et al., 1992 ; Doerflinger et al., 1998 ; voir aussi figure 6) et ce type d'appareil, adapté au GPS, reste très limité en nombre (quelques unités) et souvent proche du prototype.
- D'autres méthodes sont en cours d'étude pour mesurer le contenu intégré en vapeur d'eau afin de corriger les signaux GPS. Citons pour exemple la spectrométrie solaire (Sierk et al., 1997), les radiomètres profileurs à 12 canaux (Solheim et al., 1998) et à 18 canaux (Scheve et Swift, 1999), le développement d'un lidar à l'IGN et les sondeurs infrarouges AIRS (Atmospheric Infrared Sounder), destiné au futur satellite américain *EOS-Aqua*, et Iasi (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer), destiné aux satellites européens *Metop* (Cayla, 2001).

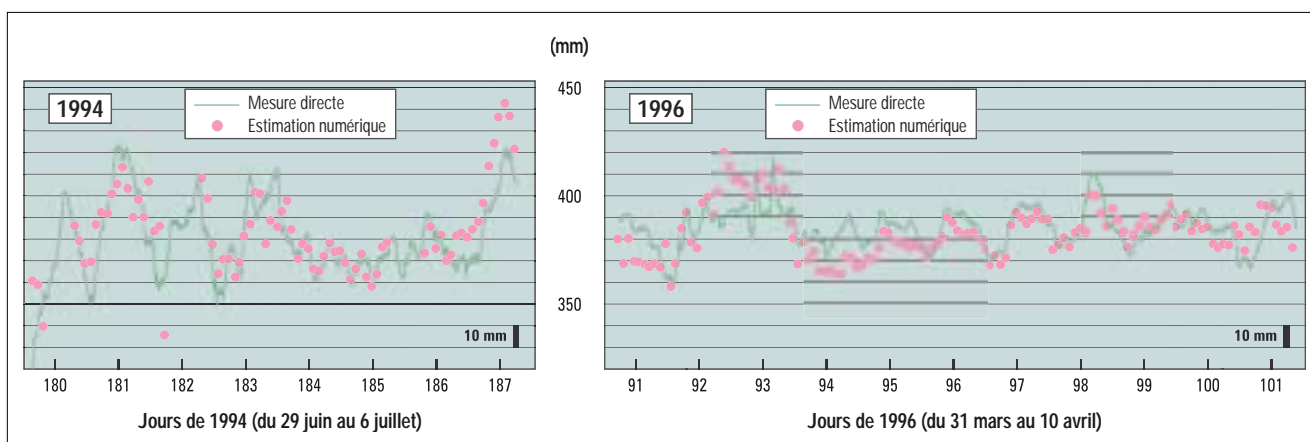
L'estimation numérique du délai humide

Comme nous l'avons vu, la majeure partie des perturbations affectant le positionnement relatif GPS peuvent être éliminées. Les mesures GPS restent alors entachées de l'erreur due au délai troposphérique total (hydrostatique et humide), plus des perturbations résiduelles généralement négligeables. Au cours du traitement numérique des données GPS, il est possible d'estimer un paramètre moyen représentatif de l'ensemble de ces biais. Comme la principale contribution à ce paramètre provient de la réfraction troposphérique totale, il est aussi appelé paramètre troposphérique estimé. Le délai hydrostatique ΔL_n pouvant être déduit de mesures de température et de pression au sol, une simple différence donne alors accès au délai humide ΔL_w . Généralement, ces paramètres troposphériques humides sont calculés suivant la direction zénithale pour chaque couple de stations et pour une durée prédéfinie (typiquement une heure). Les deux principales méthodes utilisées par les logiciels GPS pour l'estimation des paramètres troposphériques sont celle des moindres carrés et celle des filtres prédictifs (filtre de Kalman). Il existe d'autres approches, telle l'estimation du délai troposphérique par des polynômes, et des approches spécifiquement adaptées aux très petits réseaux (ligne de base kilométrique).

La figure 6 illustre l'influence des trois types de méthodes de correction sur les résultats GPS altimétriques. On observe l'important décalage entre les solutions standard de 1994 et de 1996, qui s'explique par l'écart entre les valeurs standard utilisées et les conditions de pression, de température et d'humidité rencontrées au cours des deux campagnes (anticyclonique et chaud en 1994, dépressionnaire et froid en début de campagne en 1996). On observe aussi l'influence directe d'un passage frontal les jours 91 à 93 en 1996.

Figure 7 - Différence entre le délai troposphérique zénithal mesuré à Aniane (Hérault) et au mont Aigoual (Gard) en 1994 (à gauche) et 1996 (à droite). Ces données sont comparées à la différence des délais estimés numériquement au cours du traitement GPS (une estimation toutes les deux heures).

L'introduction dans le traitement GPS du délai troposphérique mesuré donne des solutions moins dispersées et plus cohérentes entre les deux campagnes (1994 et 1996). La précision de ces solutions est améliorée d'un facteur 3 à 5 par rapport aux solutions utilisant un modèle d'atmosphère standard.



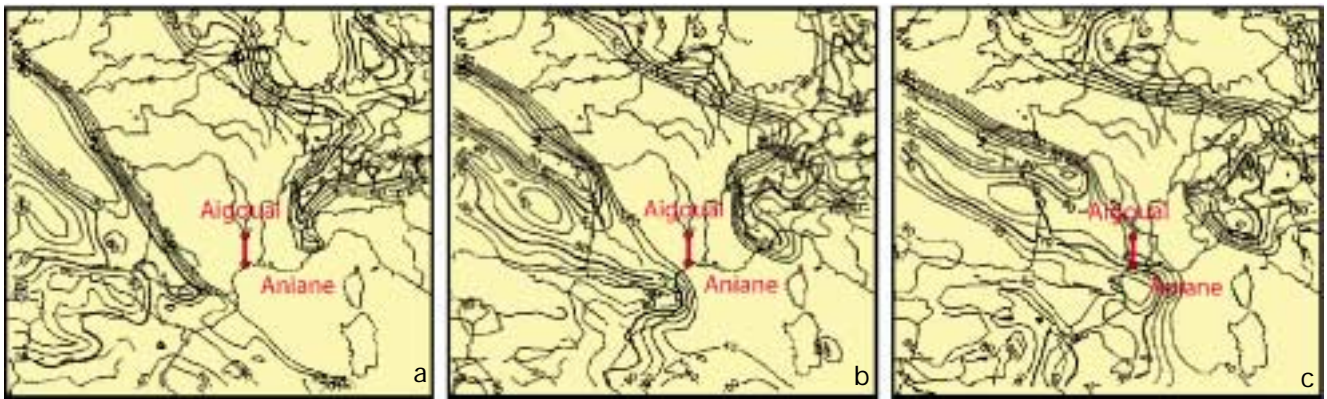


Figure 8 - Champs d'humidité relative (%) à 700 hPa prévus à 36 heures (a), 42 heures (b) et 48 heures (c) d'échéance par le modèle numérique Arpège de Météo-France, pour un instant initial fixé au 30 mars 1996 à 0 h UTC. La ligne de base (Aniane - Mont Aigoual) est représentée par un trait rouge vertical à l'ouest de la Camargue. Les isoignes d'humidité relative sont tracées de 10 % en 10 % et sont omises en dessous de 40 %.

La comparaison des délais mesurés et estimés par le calcul (figure 7) montre une cohérence à quelques millimètres près. La dépression observée les jours 91 à 93 en 1996 est associée à un front pluvieux (figure 8). La croissance correspondante de l'humidité atmosphérique est correctement rendue par l'estimation numérique du délai humide ; elle atteint en premier lieu le site d'Aniane, puis celui du mont Aigoual.

Mesure de l'eau précipitable

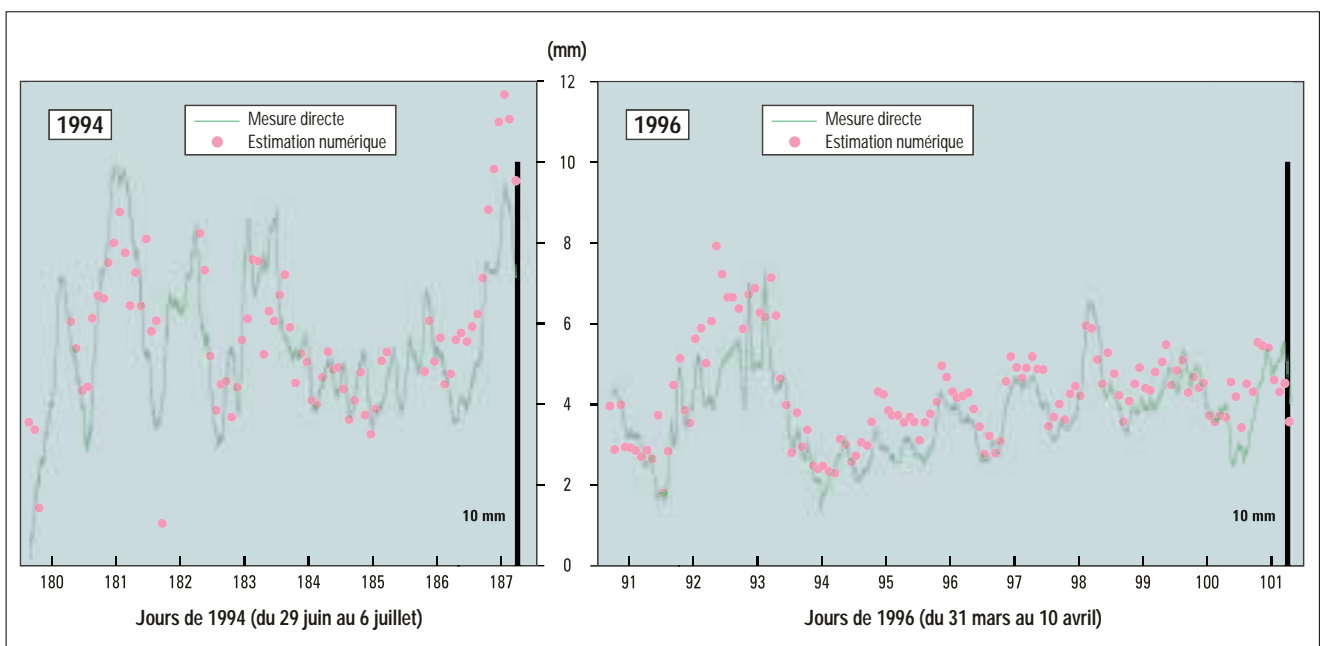
Une bonne approximation de la relation existant entre le contenu intégré en vapeur d'eau C et le délai humide zénithal ΔL_w est donnée par Davis et al. (1985) :

$$C = \Delta L_w / \kappa \quad (6)$$

où κ est une constante sans dimension dont la valeur est approximativement 6,5. Des mesures de température de surface peuvent être utilisées pour estimer κ avec une erreur inférieure à 1 % (Bevis et al., 1992). Ainsi, 1 kg.m⁻² de contenu intégré en vapeur d'eau (ou 1 mm d'eau précipitable) correspond approximativement à 6,5 mm de délai troposphérique humide (Rocken et al., 1993). La figure 9 montre un exemple de différences de quantités d'eau précipitable obtenues sur la ligne de base Aniane-Aigoual.

Figure 9 - Différence (en mm) entre les quantités d'eau précipitable mesurées par radiométrie à Aniane (Hérault) et au mont Aigoual (Gard) en 1994 (à gauche) et en 1996 (à droite). Ces données sont comparées à la différence des quantités d'eau précipitable estimées numériquement au cours du traitement GPS (une estimation toutes les deux heures).

Pour les lignes de base de longueur inférieure à quelques centaines de kilomètres, le contenu intégré en vapeur d'eau estimé numériquement à partir des données GPS est une quantité relative entre les deux sites et non absolue. Dans cette configuration, les délais mesurés sont fortement corrélés car le signal d'un même satellite est observé en chacune des stations avec un angle d'élévation similaire. Pour ce type de réseau à maille fine ou moyenne (inférieure à 500 km),



l'estimation du contenu intégré en vapeur d'eau à chacun des sites est donc sujette à un biais constant dans l'espace (identique en chaque station), mais variable dans le temps. Pour connaître ce biais, deux solutions peuvent être utilisées : soit l'on mesure en au moins un site du réseau le contenu intégré en vapeur d'eau avec un instrument indépendant (radiomètre, radiosondage...), soit l'on inclut dans le réseau des stations distantes de plus de 500 km dont la position est fixée lors du traitement (Rocken et al., 1993). Si les précisions absolues obtenues avec des stations lointaines s'avèrent suffisantes, les mesures de vapeur d'eau de référence par les radiosondages pourront être éliminées des réseaux GPS.

Récemment, le développement de ces méthodes numériques a permis d'estimer les délais humides pour chacune des directions des satellites. Des paramètres de gradient horizontal sont alors obtenus et conduisent à un champ à deux dimensions du contenu intégré en vapeur d'eau de l'atmosphère (Bar-Sever et al., 1998).

Cette technique a été validée à de nombreuses reprises en comparant les contenus intégrés en vapeur d'eau déduits du GPS à des mesures directes de la vapeur d'eau troposphérique (Bevis et al., 1992 ; Yuan et al., 1993 ; Rocken et al., 1995 ; Businger et al., 1996 ; Doerflinger et al., 1998).

Applications à la prévision numérique du temps et à la climatologie

Les données GPS disponibles

Le contenu intégré en vapeur d'eau mesuré à l'aide des réseaux géodésiques GPS est utile pour la prévision numérique du temps et pour la climatologie. Ces deux objectifs requièrent des chaînes d'acquisition et de traitement des données relativement similaires. Cependant, la prévision numérique du temps demande une densité de mesures plus élevée et des délais d'obtention proches du temps réel, alors que la climatologie nécessite une stabilité millimétrique des installations dans le temps et des mesures météorologiques précises au sol.

Par rapport à de nombreux pays industrialisés, la France a pris un retard important pour l'installation et la gestion d'un réseau GPS permanent de grande précision. On comptait en effet seulement deux stations de ce type en 1997 (Grasse et Toulouse). Depuis trois ans, ce retard tend à se combler et il existe actuellement de 20 à 25 stations GPS permanentes sur le territoire national. En comparaison, la Suède a depuis 1993 un réseau de 21 stations permanentes, réseau utilisé pour de très nombreuses applications. De même, la Norvège, la Finlande, la Belgique et la plupart des pays européens ont depuis longtemps leur réseau national permanent de grande précision. Notons aussi l'existence d'un réseau japonais de plus de 1 000 stations GPS, initialement destiné à la surveillance sismique du pays, mais utilisé pour un très grand nombre d'autres applications, en particulier la recherche en météorologie.



Les stations GPS utilisables pour l'estimation du contenu intégré en vapeur d'eau doivent être parfaitement stables dans le temps (stabilité submillimétrique à l'échelle d'une décennie pour la climatologie) et offrir un accès facile et rapide aux données (voir un exemple d'une telle station sur les figures 10 et 11). Leur nombre devrait croître très rapidement dans les années à venir en raison des nouvelles applications du GPS (aviation civile, positionnement des mobiles terrestres, topographie, applications géodésiques...). Notons que les stations à vocation industrielle ne répondront pas forcément aux critères de stabilité essentiels pour la mesure de la vapeur d'eau. Enfin, pour les applications à la prévision numérique du temps, les stations doivent fournir les données en temps quasi réel, ce qui est encore rarement le cas bien que cela soit simple à réaliser.

Les principaux réseaux géodésiques aux niveaux national (figure 12) et européen offrent un libre accès aux données avec un délai de quelques jours. On distingue :

Figure 10 - Un monument géodésique, constitué d'un piédestal ancré dans les calcaires et surmonté d'un pilier en béton. Le pilier est entouré d'une buse en béton (vert) et d'une buse en plastique (blanc). L'antenne GPS se trouve en haut du pilier (cône blanc). (Photo E. Doerflinger)



Figure 11 - Un récepteur GPS et son PC d'acquisition utilisé pour le téléchargement, la diffusion et l'archivage quotidien des données. (Photo E. Doerflinger)

Les données météorologiques au sol

- **Le réseau permanent français** : le Laboratoire de recherche en géodésie de l'IGN a mis en place en 1997 un réseau GPS permanent pilote, appelé RGP. Les objectifs assignés à ce réseau couvrent l'ensemble des utilisations offertes par le GPS, aussi bien scientifiques qu'industrielles. Ce réseau comprend actuellement une quinzaine de stations (voir le site Internet à l'adresse lareg.ensg.ign.fr/RGP/).

- **Le réseau permanent dans les Alpes** : dans le cadre d'une collaboration scientifique entre les universités de Nice, Grenoble, Chambéry et Montpellier, l'IGN et l'Institut de protection et de sûreté nucléaire, des stations GPS permanentes opérant en continu ont été installées dans les Alpes franco-italiennes et à leur pourtour (réseau Regal). Le premier objectif est de mesurer directement la déformation active observée dans la chaîne alpine et de mieux comprendre ses relations avec la sismicité. Le réseau comprend actuellement une quinzaine de stations dont la moitié est commune à celles du RGP (voir le site Internet à l'adresse kreiz.unice.fr/regal/).

- **Le réseau de référence européen** : le réseau Euref a démarré en 1995 pour réaliser et maintenir un système de référence européen. Il regroupe les principales stations GPS permanentes de plus de trente pays et compte actuellement une centaine de sites de mesure (figure 13 et site Internet homepage.oma.be/euref/). Il est partiellement intégré au réseau mondial de référence IGS (International GPS Service for Geodynamics, voir site Internet www.epncb.oma.be).

Pour obtenir la valeur précise du contenu intégré en vapeur d'eau, il faut soustraire le délai hydrostatique du délai total estimé numériquement à partir des données GPS. Pour calculer ce dernier, il est nécessaire d'enregistrer les paramètres de pression et de température au niveau de l'antenne de réception GPS. La précision requise est de 0,3 hPa (avec une dérive inférieure à 0,1 hPa/an) pour la pression, de 1 K pour la température et de 3 % pour l'humidité relative (Rocken, 1995). Ces données météorologiques devront être intégrées aux données GPS à peu près toutes les heures. Il est aussi possible de soustraire le délai hydrostatique du délai total en utilisant les données de pression et de température enregistrées par les stations météorologiques les plus proches des sites GPS, ce qui permet d'éviter l'installation d'une station météorologique sur la station GPS, mais peut introduire des biais locaux.

Une autre solution est de fournir uniquement le délai total qui sera directement assimilé dans les modèles. Cette deuxième alternative permet de s'affranchir des mesures de pression et de température dédiées au GPS et offre des résultats satisfaisants pour la prévision numérique du temps.

Pour les utilisations climatologiques, l'installation d'une station météorologique sur place reste nécessaire.

Les éphémérides précises

En positionnement GPS relatif, l'erreur radiale dD sur la distance D d'un satellite entraîne une erreur db sur l'estimation de la longueur b de la base séparant deux stations, dont l'ordre de grandeur est donné par :

$$db/b = dD/D \quad (7)$$

où D est la distance satellite-récepteur (environ 20 000 km). L'estimation du contenu intégré en vapeur d'eau à partir des « éphémérides radiodiffusées » par les satellites avec le signal GPS, de précision décimétrique, est possible si les lignes de base sont inférieures à 50 km. Il est dans ce cas nécessaire d'avoir un autre moyen de mesure du contenu intégré sur au moins un site pour donner une valeur de référence. Pour des longueurs de ligne de base plus importantes, il faut utiliser des éphémérides plus précises.

Les éphémérides produites par l'IGS sont généralement considérées comme les plus précises et sont donc les plus utilisées. On peut disposer, soit des éphémérides précises calculées par l'un des sept centres d'analyse de l'IGS (écart type d'environ 10 cm), soit de la moyenne pondérée de ces données (écart type proche de 5 cm) après un délai de sept à dix jours. Ce sont ces éphémérides qui sont utilisées pour les applications climatologiques.

Pour répondre à certaines applications nécessitant des éphémérides précises en temps quasi réel, l'IGS a mis en place les « éphémérides superrapides » au début de l'année 1996. Les délais sont encore de plus de douze heures avec des précisions de 10 à 15 cm. Depuis le début de l'année 2000, des « éphémérides

Figure 12 - Carte des stations GPS permanentes en France. (Image Regal)





Figure 13 - Carte des sites GPS permanents du réseau européen Euref.

ultrarapides » sont produites deux fois par jour par l'IGS, avec comme principal objectif la prévision numérique du temps. Leur précision tend à se rapprocher de celle des éphémérides superrapides avec un délai de quelques heures.

Un certain nombre de centres IGS proposent depuis peu des « éphémérides prévues » bien meilleures que les éphémérides radiodiffusées. Par exemple, le centre CODE (Centre for Orbit Determination in Europe) propose des éphémérides prévues à 24 et 48 heures d'échéance avec des précisions respectives de 40 à 50 cm et de 100 à 150 cm.

Dans une perspective de mesure en temps quasi réel du contenu intégré en vapeur d'eau, un traitement automatisé est possible. Sur station de travail Unix, le temps de calcul, de contrôle et de validation des résultats peut être de quelques minutes à quelques dizaines de minutes, en fonction du nombre de sites à traiter.

Il existe au niveau international de nombreux programmes de mesure du contenu intégré en vapeur d'eau à l'aide du GPS (encadré page 35). À l'échelle européenne, l'action

Cost 716 vise à fournir des observations en temps réel pour la prévision numérique du temps et la climatologie (encadré page 35). En France, un projet pilote de ce type, s'appuyant sur une partie du réseau GPS permanent national, est en cours dans le cadre d'une collaboration entre Météo-France, l'IGN et le Laboratoire de géophysique, tectonique et sédimentologie de Montpellier (voir encadré page 35).

Réseaux denses de stations GPS

L'implantation d'un réseau GPS de haute densité (sites espacés de quelques kilomètres) permet d'obtenir la distribution spatiale à trois dimensions (technique dite de « tomographie ») de la vapeur d'eau de la basse atmosphère, ce qui donne accès à des informations précises sur la dynamique de situations météorologiques complexes dans lesquelles des phénomènes de mésoéchelle interagissent avec des phénomènes locaux. Pour des raisons de coût de mise en œuvre, seules quelques campagnes de ce type ont été conduites à ce jour pour des études météorologiques très locales (Elosegui et al., 1999).

Une campagne de ce type est prévue dans le cadre du programme Escompte dont l'expérience de terrain doit se dérouler du 4 juin au 16 juillet 2001 sur le site de Berre-Marseille (voir encadré page 36).

La technique de radio-occultation

La technique de **radio-occultation** a été développée pour étudier l'atmosphère des planètes à l'aide d'ondes électromagnétiques. Lorsque le faisceau se propage au travers d'une atmosphère, il se courbe en raison de la réfraction dans le milieu traversé et subit un retard. Dans le cas du GPS, on analyse le signal émis par un satellite GPS et reçu par un récepteur placé sur un satellite en orbite basse (figure 16). La technique de radio-occultation est particulièrement prometteuse, car elle donne accès à des informations sur les profils d'humidité, mais aussi sur les profils de température, en tout point du globe ; à chaque instant, un grand nombre de mesures peuvent être effectuées, autant que de satellites visibles par le satellite en orbite basse.

Quelques programmes en cours ou en projet

Actuellement, il existe seulement quelques satellites en orbite basse permettant ce type de mesures, mais de nombreux projets sont en cours.

La première mise en application importante de la radio-occultation GPS pour la météorologie a été à l'initiative des Américains au travers du programme GPS-MET (Global Positioning System - Meteorology). L'objectif est de tester cette technique pour obtenir des profils d'humidité et de température à haute résolution spatiale et temporelle, à faible coût et sur toute la surface du globe. Depuis le lancement du projet en 1995 avec le satellite *Microlab 1*, de nombreux développements du système et du traitement des données ont eu lieu.



L'action Cost 716

L'action Cost 716 (Cost désigne la Coopération européenne scientifique et technique) a pour but d'exploiter un réseau européen de stations GPS permanentes (reposant sur les différents réseaux existants) pour fournir des observations en temps réel pour la prévision numérique du temps et la climatologie. Cette action est planifiée sur cinq ans (de 1999 à 2003) et quatorze pays y participent.

Plan de travail de l'action Cost 716

Début 2000 : état des lieux et spécifications techniques, recommandations pour un réseau de démonstration.

Été 2000 : préparation des systèmes d'assimilation.

Été 2000 - été 2001 : périodes d'observation sélectionnées et études d'impact.

Été 2001 : tests en temps quasi réel.

GPS et météorologie sur Internet

Cosmic	Constellation Observing System for Meteorology Ionosphere & Climate www.cosmic.ucar.edu
Cost action 716	Exploitation de récepteurs GPS au sol destinés à des applications de climatologie et de prévision numérique du temps www.oso.chalmers.se/geo/cost716.html
GPS-MET	Radio-occultation par GPS www.cosmic.ucar.edu/gpsmet
Magic	Meteorological Applications of GPS Integrated Column Water Vapor Measurements in the Western Mediterranean www.acri.fr/magic
SuomiNet	Réseau GPS pour déterminer l'eau précipitable en temps réel www.unidata.ucar.edu/suominet
Wavefront	GPS Water Vapour Experiment For Regional Operational Network Trials metix.nottingham.ac.uk/wavefront

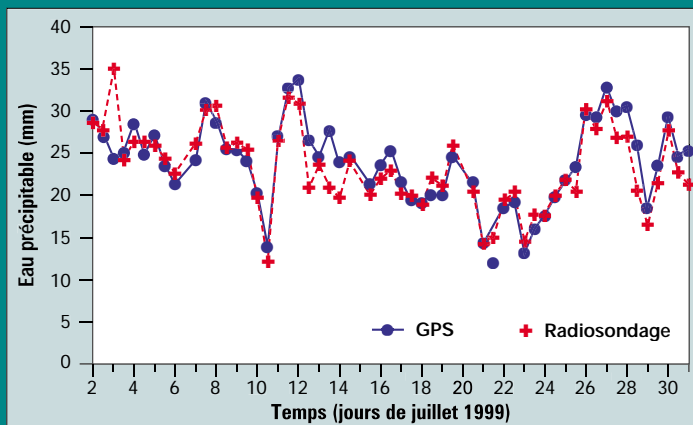
Parmi les projets actuellement en cours, on peut citer le programme allemand Champ (Challenging Minisatellite Payload), qui a lancé en juillet 2000 un satellite du même nom équipé, entre autres, d'instruments dédiés à la radio-occultation GPS pour la météorologie. Citons aussi le nouvel instrument de sondage Gras (Global Navigation Satellite System Receiver for Atmospheric Sounding) développé par l'Agence spatiale européenne pour les satellites *Metop*. Le récepteur Gras fonctionnera à la fois avec le système GPS et le système russe Glonass. D'autres projets sont en cours d'étude pour déployer un grand nombre de microsatellites de ce type en vue d'obtenir une vision à trois dimensions de la température et de l'humidité atmosphériques.

Précision et résolution

Les précisions attendues de cette nouvelle technique sont de 0,5 à 1 °C pour la température et de 0,1 à 0,2 g/kg pour l'humidité spécifique, avec des résolutions verticales de 0,2 à 1 km et des résolutions horizontales de 100 à 300 km, le tout pour des altitudes de mesure comprises entre 5 et 45 km (Yuan et al., 1993 ; Ware et al., 1996 ; Anthes et al., 1998). Le lecteur intéressé pourra aussi consulter le site Internet du projet GPS-MET (voir encadré ci-dessus).

Le réseau pilote GPS-météorologie pour la mesure du contenu intégré en vapeur d'eau

Début 1998, une étude sur l'estimation du contenu intégré en vapeur d'eau par GPS a été engagée par Météo-France, le Laboratoire de géophysique, tectonique et sédimentologie (LGTS) de Montpellier et l'IGN. Les objectifs sont de tester l'efficacité des réseaux GPS géodésiques pour mesurer la vapeur d'eau atmosphérique, de montrer la faisabilité opérationnelle de cette nouvelle technique et d'étudier l'apport de ces mesures à la prévision numérique du temps et à la climatologie.



Un miniréseau pilote GPS-Météo constitué des sites GPS permanents de Brest et de Saint-Jean-des-Vignes (Lyon) a été équipé de stations météo Vaisala spécifiquement conçues pour les applications GPS. Ces deux sites ont été choisis pour leur proximité de stations de radiosondage, afin de pouvoir valider par comparaison les contenus intégrés en vapeur d'eau. Les comparaisons aux radiosondages sur cinq mois de mesures (de juin à octobre 1999) ont montré une très bonne concordance des deux techniques (biais de 1 mm et écart type de 3 mm pour les deux sites, voir figure 14). Cette étude a été étendue à six stations et la période de mesure allongée à un an.

Figure 14 - Quantités d'eau précipitable (mm) déterminées à partir des radiosondages de Brest-Guipavas et de la station GPS permanente de Brest pour le mois de juillet 1999.

Figure 16 - Principe de la mesure par radio-occultation GPS.

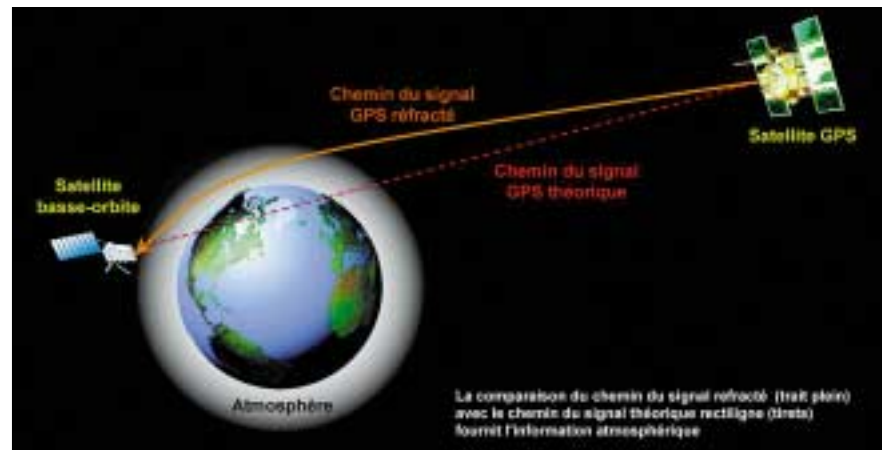


Figure 15 - Zone de déploiement du réseau tomographique GPS de 17 récepteurs dans la région de Marseille. Localisation de la station GPS permanente de Marseille (MARS) et des autres instruments de mesure de la vapeur d'eau atmosphérique.

Tomographie atmosphérique de la vapeur d'eau par GPS durant la campagne Escompte 2001

Le programme Escompte a pour objectif la modélisation tridimensionnelle des émissions et du transport des polluants atmosphériques sur la région de Berre-Marseille (voir le site Internet à l'adresse medias.obsmp.fr:8000/escompte/maquette/pagef.php3).

Dans le cadre de la campagne de mesure de juin-juillet 2001, une étude tridimensionnelle de la vapeur d'eau atmosphérique par GPS est menée par des organismes de géodésie et de météorologie français (IGN, CNRS et Météo-France) et suisse (ETHZ). Cette étude consiste à déployer (voir figure 15) un réseau dense à petite maille (3-5 km) de 17 récepteurs GPS et différents instruments de sondage de la vapeur d'eau : lidar Raman (IGN et Service d'aéronomie du CNRS), radiomètres micro-ondes et spectromètre solaire (ETHZ), photomètre solaire (Service d'aéronomie du CNRS et Cimel) et radars profilers de vent UHF et VHF (Météo-France).

L'objectif est de valider cette nouvelle méthodologie d'utilisation du GPS en réseau dense, afin d'améliorer la précision des mesures altimétriques GPS et d'obtenir l'évolution à haute résolution et à trois dimensions du champ de vapeur d'eau atmosphérique.

Conclusion

Aujourd'hui, le système GPS est couramment utilisé en météorologie pour le positionnement et la synchronisation des mesures. On le retrouve en particulier sur les radiosondages pour la mesure du vent et lors de campagnes de mesure fixes ou mobiles (à terre, en mer et dans les airs). Les précisions sur le positionnement sont d'une dizaine de mètres en mode absolu et vont jusqu'au centimètre en mode relatif. Les précisions pour la mesure du temps sont de quelques nanosecondes à 100 nanosecondes selon le mode de mesure.

Depuis quelques années, de nombreuses études ont été conduites pour mesurer le contenu intégré en vapeur d'eau dans l'atmosphère à partir de réseaux de récepteurs GPS. Cette technique repose sur l'estimation des perturbations affectant le signal GPS lors de son passage dans l'atmosphère. La composante humide de cette perturbation (ou délai) peut être modélisée avec une précision millimétrique à partir des données GPS et des mesures de pression et de température en surface. Le délai humide peut être converti simplement en contenu intégré en vapeur d'eau le long du trajet du signal.

Les réseaux GPS denses devraient permettre d'obtenir la distribution spatiale à haute résolution de la vapeur d'eau de la basse atmosphère, mais ce type de réseau n'est envisageable que pour des études ponctuelles et limitées dans l'espace (quelques dizaines de kilomètres).

La technique de radio-occultation utilisant des récepteurs GPS embarqués sur des satellites permettra d'obtenir des profils de température et d'humidité dans l'atmosphère. Cette technique est pour l'instant limitée par le coût du nombre important de



satellites à mettre en œuvre pour la rendre pleinement opérationnelle en météorologie. D'un autre côté, l'embarquement de récepteurs GPS sur des satellites lancés pour d'autres missions rend la technique très bon marché par rapport au coût global moyen des missions spatiales.

Le calcul en temps réel du contenu intégré en vapeur d'eau, au-dessus des stations d'un réseau géodésique GPS existant, est aujourd'hui possible à un coût relativement faible. Les premières études effectuées (Benjamin et al., 1998) ont montré que ces données ont un impact non négligeable sur la qualité des prévisions numériques en météorologie. On peut donc envisager, dans un proche avenir, l'assimilation opérationnelle des quantités de vapeur d'eau déduites du GPS pour la prévision numérique du temps, mais aussi leur emploi en climatologie.

Bibliographie

- **Akyüz F. A., H. Liu et T. Horst**, 1991 : Wind tunnel evaluation of PAM II pressure ports. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 8, 323-330.
- **Anthes R. et C. Rocken**, 1998 : GPS sounding of the atmosphere - Results and implications for the future. Presented at 78th American Meteorological Society Annual Meeting, Phoenix, Arizona, USA, January 1998.
- **Barat J. P. et J. Villaeys**, 1998 : How to take advantage of the GPS resolution with meteorological balloons. 10th Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation, Phoenix, Arizona, USA, 11-16 January 1998.
- **Bar-Sever Y. E., P. M. Kroger et J. A. Borjesson**, 1998 : Estimating horizontal gradients of tropospheric path delay with a single GPS receiver. *J. Geophys. Res.*, 103, 5019-5035.
- **Benjamin S. G., T. L. Smith, B. E. Schwartz, S. I. Gutman et D. Kim**, 1998 : Precipitable forecast sensitivity to GPS precipitable water observations combined with Goes using RUC-2. Presented at 78th American Meteorological Society Annual Meeting, 12th Conference on Numerical Weather Prediction, Phoenix, Arizona, USA, January 1998.
- **Bevis M., S. Businger, T. A. Herring, C. Roken, R. A. Anthes et R. H. Ware**, 1992 : GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System. *J. Geophys. Res.*, 97, 15787-15801.
- **Bock O. et E. Doerflinger**, 2001 : Atmospheric processing methods for high accuracy positioning with the Global Positioning System. Submitted to *Physics and Chemistry of the Earth*.
- **Botton S., F. Duquenne, Y. Egels, M. Even et P. Willis**, 1997 : *GPS localisation et navigation*. Hermes, Paris.
- **Bürki B., M. Cocard, A. Geiger, R. Gyger et H. G. Kahle**, 1992 : Development of a portable dual frequency Microwave Water Vapor Radiometer for geodetic applications. Proc. of the Refraction of transatmospheric signals in geodesy Symposium, Netherlands geodetic commission, N° 36.
- **Businger S., S. R. Chiswell, M. Bevis, J. Duan, R. A. Anthes, C. Rocken, R. H. Ware, M. Exner, T. VanHove et F. Solheim**, 1996 : The promise of GPS in atmospheric monitoring. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 5-18.
- **Cayla F.-R.**, 2001 : L'interféromètre IASI. Un nouveau sondeur satellitaire à haute résolution. *La Météorologie* 8^e série, 32, 23-39.
- **Davis J. L., T. A. Herring, I. I. Shapiro, A. E. Rogers et G. Elgered**, 1985 : Geodesy by radio interferometry: Effect of the atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. *Radio Sci.*, 20, 1593-1607.
- **Doerflinger E., R. Bayer B., J. Chery et B. Bürki**, 1998 : The Global Positioning System in mountainous areas: Effect of the troposphere on the vertical accuracy. *Comptes rendus de l'Académie des sciences, Série II a*, 326, 319-325.
- **Elgered G.**, 1993 : Tropospheric radio-path delay from ground-based microwave radiometry. Reprint from *Atmospheric remote sensing by microwave radiometry*, chapter N° 5, John Wiley & Sons INC.
- **Elosegui P., J. L. Davis, L. P. Gradinarsky, G. Elgered, J. M. Johansson, D. A. Talhmouth et A. Rius**, 1999 : Sensing atmospheric structure using small-scale space geodetic networks. *J. Geophys. Res.*, 26, 2445-2448.
- **Hauser J. P.**, 1989 : Effects of deviations from hydrostatic equilibrium on atmospheric corrections to satellite and lunar laser range measurements. *J. Geophys. Res.*, 94, 10182-10186.
- **Herring T. A.**, 1986 : Precision of vertical position estimates from very long baseline interferometry. *J. Geophys. Res.*, 91, 9177-9182.
- **Holton J. R.**, 1972 : *An introduction to Dynamic Meteorology*. Academic Press, New York.
- **Nash J., J. B. Elms, J. Stancombe, R. Smout et D. Lyth**, 1998 : Operational implementation of GPS windfinding – Test results from the UK and the South Atlantic. 10th Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation, Phoenix, Arizona, USA, 11-16 January 1998.
- **Rocken C., J. Johnson, R. Neilan, M. Cerezo, J. Jordan, M. Falls, L. Nelson, R. Ware et M. Hayes**, 1991 : The measurement of atmospheric water vapor: Radiometer comparison and spatial variation. *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens.*, 29, 3-8.
- **Rocken C., R. Ware, T. V. Hove, F. Solheim, C. Alber, J. Johnson, M. Bevis et S. Businger**, 1993 : Sensing atmospheric water vapor with the Global Positioning System. *Geophys. Res. Lett.*, 20, 2631-2634.
- **Rocken C., F. Solheim, T. VanHove et R. H. Ware**, 1995 : Determination of total integrated water vapor from GPS. AGU Fall Meeting, 76, 46, F146.
- **Saastamoinen J.**, 1972 : Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites. In: *Use of Satellites for Geodesy* (S. W. Henksen et al., eds.) Geophysics Monograph Series, 15. American Geophysical Union, Washington, D.C.
- **Santerre R.**, 1991 : Impact of GPS satellite sky distribution. *Manuscripta Geodaetica*, 16, 28-53.
- **Scheve T. M. et T. Swift**, 1999 : Profiling atmospheric water vapor with a K-band spectral radiometer. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 37, 1719-1729.
- **Seeber G.**, 1993 : *Satellite Geodesy*. Walter de Gruyter Ed., Berlin - New York.
- **Sierk B., B. Bürki, H. Becker-Ross, S. Florek, R. Neubert et H. G. Kahle**, 1997 : Tropospheric Water Vapor derived from Radiometer, Solar Spectrometer and GPS measurements. *J. Geophys. Res.*, 102, 22411-22424.
- **Smith E. K. et S. Weintraub**, 1953 : The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies. *Proc. IEEE*, 41, 1035-1037.
- **Solheim F., J. R. Godwin, E. R. Westwater, Y. Han, S. J. Kheim, K. Marsh et R. Ware**, 1953 : Radiometric profiling of temperature, water vapor and cloud liquid water using various inversion methods. *Radio Sci.*, 33, 393-404.
- **Ware R., M. Exner, D. Feng, M. Gorbunov, K. Hardy, B. Herman, Y. Kuo, T. Meehan, W. Melbourne, C. Rocken, W. Schreiner, S. Sokolovskiy, F. Solheim, X. Zou, R. Anthes, S. Businger et K. Trenberth**, 1996 : GPS sounding of the atmosphere from low earth orbit: Preliminary results. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 19-40.
- **Willis P., Y. Bar-Sever, E. Doerflinger et J. Zumberge**, 1998 : Using DORIS data for determining the tropospheric delay: Implication on climatology and meteorology. Proceeding of the DORIS Days, Toulouse, France, April 27-29.
- **Yuan L. L., R. A. Anthes, R. H. Ware, C. Rocken, W. D. Bonner, M. G. Bevis et S. Businger**, 1993 : Sensing climate change using the global positioning system. *J. Geophys. Res.*, 98, 14925-14937.