

DU SEXTANT AU SATELLITE

LE SYSTEME GPS,
UN OUTIL
AU SERVICE DE
LA RECHERCHE

L'évolution des techniques de positionnement (longitude, latitude, altitude) par satellite durant la dernière décennie, explique le succès considérable de ces systèmes de mesures au sein de la communauté scientifique.

Au premier rang de ces systèmes de positionnement, le système GPS (Global Positioning System) s'est imposé pour sa grande précision et son utilisation possible en tout point du globe.

Depuis plusieurs années des géophysiciens et océanographes de l'Orstom utilisent le GPS lors de campagnes de mesures à terre et en mer. En fin 1991, le Département Terre, Océan, Atmosphère a acquis deux récepteurs de haute précision destinés dans un premier temps à des applications géodynamiques.

D'autres applications scientifiques sont envisageables.



*Le navire océanographique "Alis" de l'Orstom est équipé d'un système mixte de positionnement GPS/TRANSIT (MAGNAVOX MX1000-107)
Photo : Orstom*



Le système GPS encore appelé NAVSTAR/GPS (Navigation Systems by Timing and Ranging/Global Positioning System) est un système mondial de positionnement par satellite. Il a été conçu dans les années 70, par le Département de la Défense américain pour être utilisé en navigation aérienne, au sol et en mer, en tout point du globe et à tout instant. En utilisation courante, le système GPS permet de définir la latitude et la longitude d'un point par rapport à un ellipsoïde de référence, avec une précision de quelques dizaines de mètres, et, sous des conditions particulières, une précision de l'ordre du mètre en positionnement absolu ou de quelques millimètres en positionnement relatif peut être atteinte. Les performances sur la détermination de l'altitude, généralement inférieures à celles du positionnement horizontal, sont également très variables (de plusieurs dizaines de mètres, en positionnement isolé, au centimètre, en positionnement relatif).

A l'origine destiné à des applications militaires, le système est devenu partiellement accessible au public dans les an-

nées 80. Le système GPS est habituellement décrit en 3 dispositifs appelés "segments": un segment spatial, un segment de contrôle et un segment utilisateur.

LE SEGMENT SPATIAL

Le segment complet comprendra en fin 1992 une constellation de 21 satellites (18 opérationnels actuellement) et 3 de secours, placés en orbite autour de la terre à une altitude de 20 300 km, suivant 6 plans et avec une période de rotation d'environ 12 heures. Cette configuration permet déjà une réception virtuelle d'au moins 4 satellites à tout instant sur toute la surface du globe. Chaque satellite est équipé d'horloges atomiques très stables (Cesium ou Rubidium) capables d'émettre 2 fréquences appelées L1 (1575.42 MHz) et L2 (1227.6 MHz). Les signaux émis en continu par les satellites sont obtenus en modulant la porteuse L1 avec les codes pseudo-aléatoires P (Precision) et C/A (Coarse Acquisition) et la porteuse L2 avec le code P uniquement. Ces codes propres à chaque satellite, prennent pour valeur 0 ou 1 avec des cadences de 10.23 Mbits/s (code P) et 1.023 Mbits/s (code C/A); ils servent à

From sextant to satellite The global positioning system

Orstom has just acquired two new high-precision receivers to extend its linkup with the Global Positioning System, the world's foremost satellite-based positioning and navigation system. This system was designed in the 1970s for the US armed forces, but is now increasingly used for civilian scientific purposes all over the world. The system consists of three segments :

- The space segment is a system of 21 satellites, giving coverage of every part of the earth's surface by at least four satellites at any one time. Signals are emitted at frequencies timed with exceptional accuracy by atomic clocks.
- The control segment consists of ground stations scattered around the globe, continually calculating the satellites' orbit and clock data and retransmitting these to users by satellite.
- The user segment involves special receivers using synchronization with the satellites' signals to

determine the distance between satellite and receiver, and hence, once the satellite's position is accurately known, the position of the receiver.

Precision is the key, and errors can stem from several sources. As the receivers' quartz clocks are far less accurate than the satellites' atomic clocks, synchronization is crucial and data from at least three satellites are needed to correct the "clock error". With four satellites, one can also determine the altitude of the receiver. Other sources of error that require correction are disturbance of satellite signals as they pass through ionosphere and atmosphere, and errors in orbit data. Orstom uses the GPS for navigation on its oceanographic vessels; for geodynamic, gravimetric and seismological measurements (eg. precise measurements of the rate of movement of a geological rift); for groundwater studies and topographic surveys.



Station GPS (ASHTech M XII) installée dans la région de Djibouti lors d'une campagne de géodésie spatiale.
Campagne IPG "Djibouti-Afar", novembre 1991 - Photo : J.C. Ruegg/IPG-CNRS

identifier le satellite émetteur et à mesurer sa distance au récepteur. Le code P, plus précis et longtemps réservé aux organismes militaires américains, peut être désormais partiellement exploité. Les signaux comportent en plus un message de navigation donnant des informations sur les paramètres orbitaux et l'état d'émission des satellites et sur la propagation des ondes dans l'atmosphère.

LE SEGMENT DE CONTROLE

Il est composé de stations fixes, dites "stations fiduciales", réparties à la surface du globe, qui suivent en permanence les satellites pour calculer les données d'orbitographie et les corrections d'horloge des satellites. Ces informations, continuellement réactualisées, sont transmises à l'utilisateur par l'intermédiaire des satellites.

LE SEGMENT UTILISATEUR

Ce segment inclut l'acquisition à l'aide d'un récepteur spécialisé (ou balise) et l'exploitation des signaux émis par les satellites pour déterminer avec précision la position du récepteur. Ce dernier, muni d'une horloge à quartz, émet au même instant que les satellites, le même code pseudo-aléatoire et dispose d'un calculateur incorporé qui lui permet d'estimer sa distance, par mesure des temps de trajet, à un ou plusieurs satellites. Connaissant à tout instant la position d'un nombre minimum de satellites, il est donc possible de calculer celle du récepteur. Cependant, l'imprécision de l'horloge du récepteur par rapport à celle du satellite entraîne une erreur sur la mesure de la distance satellite-récepteur. Cette erreur ou "biais d'horloge" est traitée comme une inconnue supplémentaire; les données

d'au moins trois satellites reçus simultanément sont donc nécessaires pour définir la position du récepteur en longitude et en latitude. Avec quatre satellites on détermine également l'altitude du point de mesure.

LES MESURES GPS ET LEUR PRÉCISION

La précision d'un positionnement GPS dépend de l'erreur commise sur l'estimation de la distance satellite-récepteur. La distance mesurée, appelée pseudo-distance et déterminée par calcul des temps de trajet d'un ou des deux signaux émis par le satellite, comporte outre le biais d'horloge une erreur relative à plusieurs facteurs indépendants (irrégularités de propagation des ondes dans l'atmosphère et l'ionosphère, incertitude sur l'orbitographie des satellites...). En fonction du type du récep-

Les récepteurs

Il en existe trois types principaux :

1) Les récepteurs monofréquence mesurant le temps du trajet (donc les pseudo-distances) sur la fréquence L1. Ces instruments sont utilisés pour la navigation ou le positionnement instantané expédié (précision 30 m environ).

2) Les récepteurs monofréquence mesurant pseudo-distance et phase sur la fréquence L1, utilisés en navigation et positionnement différentiel de moyenne précision.

3) Les récepteurs bifréquence pouvant recevoir les fréquences L1 et L2. Ces récepteurs sont utilisés pour le positionnement différentiel de qualité géodésique, car ils permettent d'estimer les retards de propagation liés à l'ionosphère. Une version recevant le code P permet en outre un positionnement absolu plus précis (quelques mètres) et d'utiliser les données recueillies pour le recalcul d'orbites précises. Ces instruments sont utilisés en géodésie à l'échelle globale ou régionale et permettent une précision subcentimétrique sur des lignes de base longues (100-1000 km).

Compte-tenu de la fréquence élevée des signaux, la propagation est interrompue par tout obstacle situé entre le satellite et le récepteur ; ce dernier doit alors être placé dans un endroit dégagé, suffisamment éloigné de masques naturels ou artificiels pouvant gêner la réception (montagnes, forêts, constructions...). Les récepteurs sont donc munis d'une antenne externe omnidirectionnelle qui peut être mise en station sur un trépied de théodolite ou à l'extrémité d'un mât. Pour un positionnement de haute précision, des règles graduées permettent de mesurer au millimètre près la position de l'antenne par rapport au repère fixe à positionner.

Certains petits récepteurs monofréquence possèdent également une antenne interne pour un positionnement rapide de moyenne précision. L'acquisition des données provenant de plusieurs satellites se fait de façon simultanée (récepteurs multicanaux) ou séquentielle (récepteur monocanal multiplexé).

Les prix

L'accès au système de positionnement est libre à tout possesseur d'un récepteur GPS et il n'existe actuellement aucun droit payant d'utilisation. Plusieurs constructeurs proposent aujourd'hui une grande variété de récepteurs (ASHTECH, MAGELLAN, MAGNAVOX, SERCEL, SONY, TRIMBLE, WILD-LEICA...) qui, dans une gamme de précision donnée, présentent diverses options (nombre de canaux d'acquisition, capacité de stockage des données, liaison série avec ordinateur compatible...). Les prix, programmes de traitement inclus, varient d'environ 15 KF pour un récepteur monofréquence (type MAGELLAN Nav 1000) à 400 KF pour un récepteur bifréquence de haute précision (type ASHTECH MD-XII). Notons toutefois que dans la gamme des récepteurs monofréquence, les prix baissent rapidement et qu'à la suite du constructeur SONY, d'autres constructeurs devraient commercialiser des récepteurs à moins de 10 KF en 1992.

La précision des mesures

La précision d'une mesure GPS est qualifiée par un coefficient appelé GDOP (Geometric Dilution of Precision) qui exprime l'erreur dérivant de la position relative des satellites entre eux (la meilleure géométrie correspond au plus grand volume du polyèdre formé par les satellites et le récepteur). Ce coefficient devant être le plus faible possible, des mesures ayant pour GDOP des valeurs inférieures à 4 sont considérées comme bonnes et celles ayant des valeurs supérieures à 10 doivent être rejetées. Pour minimiser le GDOP, il est possible de sélectionner sur tout récepteur les satellites qui conduisent à une géométrie de constellation optimale. L'utilisateur dispose en effet d'éphémérides transmis par le segment de contrôle via les satellites, qui lui donnent en un lieu et à un instant donnés une information sur chaque satellite du système (fenêtre de passage, azimuth, élévation, état d'émission...). Le choix du matériel et le mode de mesure dépendront ensuite de la précision recherchée. Les précisions citées ici sont données par les constructeurs dans les

conditions actuelles d'utilisation du système GPS et sous réserve de non dégradation par la Défense américaine (dégradation qui réduirait environ d'un facteur 3 à 10 la précision actuelle). On peut néanmoins espérer que le nombre toujours croissant des applications scientifiques et commerciales dont certaines de grand public (navigation de plaisance en voile, U.L.M...) constituent un poids suffisant, vis à vis des autorités militaires américaines, pour maintenir le système accessible, au moins dans son état actuel, pour plusieurs années.

Les mesures de moyenne précision.

Les mesures de pseudo-distances avec un récepteur monofréquence fournissent en temps réel une précision sur les coordonnées horizontales d'environ 30 mètres en 3D et 25 mètres en 2D (altitude fixée). Pour un temps d'observation plus long (dizaine de minutes), la précision peut être améliorée de 5 à 10 mètres, par moyenne des données reçues. En mode différentiel, deux récepteurs peuvent être positionnés jusqu'à 1 ou 2 mètres près.

Les mesures de haute précision.

Elles sont effectuées à l'aide de plusieurs récepteurs (de préférence bifréquence) placés en observation simultanée pendant plusieurs jours, pour affranchir autant que possible les mesures de l'influence des variations de propagation des signaux (mesures de pseudo-distances et phases en mode différentiel). Des récepteurs monofréquence équipés d'horloges très précises peuvent être utilisés sur des bases horizontales courtes (inférieures à 10 km) pour lesquelles les corrections ionosphériques et atmosphériques sont négligeables. Les données sont alors transférées sur ordinateur pour être traitées ultérieurement. Pour augmenter la précision, on peut introduire des contraintes supplémentaires en installant par exemple un ou plusieurs récepteurs sur des points de coordonnées connues ou en prenant en compte des données météorologiques et ionosphériques pour affiner les modèles de propagation.

Il est alors possible d'atteindre des précisions relatives de 10^{-6} à 10^{-7} , soit de l'ordre de 1 cm sur des bases horizontales de 10 km à plus de 100 km.

teur et du mode d'observation, il est possible de minimiser cette erreur et donc d'améliorer la qualité du positionnement. Pour les applications de haute précision, il est nécessaire de mesurer également la phase des signaux, à l'aide de plusieurs récepteurs placés en observation simultanée (mesures en mode différentiel).

LES PRINCIPAUX FACTEURS D'ERREUR

Plusieurs facteurs indépendants peuvent influencer sur la qualité d'une mesure à un moment et en un lieu donnés :

Les irrégularités de propagation des ondes - La propagation des signaux entre le satellite et le récepteur est perturbée par la présence d'une ionosphère fortement dispersive (de 50 à 500 km d'altitude) et d'une troposphère neutre (de 0 à 10 km d'altitude). Cette perturbation dépend de la fréquence et de l'angle d'incidence des signaux émis. Les signaux provenant de satellites dont l'élévation est faible (inférieure à 10° - 20° au-dessus de l'horizon) sont par conséquent fortement perturbés et ne peuvent pas être pris en compte. Cette principale source d'erreur peut engendrer des erreurs de plusieurs mètres dans le positionnement absolu et plusieurs ppm en relatif (1 ppm = 1 partie par million). Elle peut être minimisée en estimant le retard ionosphérique entre les signaux synchronisés sur des fréquences différentes (L1 et L2) au moyen de récepteurs bifréquences. Sur des récepteurs monofréquence, une correction moins précise est calculée à l'aide de modèles prévisionnels (par exemple, ceux transmis dans le message de navigation).

La mauvaise synchronisation des horloges - Il existe des biais d'horloge à la fois entre les satellites et les récepteurs et entre les satellites eux-mêmes. Les premiers, les plus importants, sont éliminés comme nous l'avons décrit précédemment en utilisant un nombre minimum de satellites supérieur de 1 au nombre de coordonnées à déterminer; les seconds sont convenablement estimés par les informations fournies dans le message de navigation.

La réception de signaux multiples L'onde émise par le satellite peut subir, en se propageant, des réflexions et emprunter ainsi des trajets multiples. Les signaux multiples qui atteignent l'antenne d'un récepteur avec un temps de propagation plus long que l'onde non



Antenne du récepteur GPS bifréquence (ASHTECH MD-X11), montée sur trépied sur le toit du centre Orstom de Bondy et utilisée pendant le mois de novembre 1991 comme station fiduciale pour une campagne de géodésie spatiale dans la région de Djibouti - Photo : S. Bonvalot

réfléchi, vont perturber les mesures de pseudo-distance et de phase. Ces arrivées secondaires sont en partie éliminées, soit directement sur l'antenne, soit par le calcul. Les données provenant de satellites de faible élévation, fortement affectées par ce phénomène, doivent aussi être rejetées.

L'erreur sur la position des satellites - Le principe de la mesure GPS suppose une bonne connaissance de la position des satellites à tout instant. Cette position est déterminée à partir des distances mesurées à des points connus (stations fixes du segment de contrôle) et transmise, avec d'autres données d'orbite également réactualisées, à tout récepteur GPS. Pour obtenir une précision de 1 ppm, on peut en général se contenter des orbites radio-diffusées.

LES APPLICATIONS DU GPS À L'ORSTOM

Le positionnement de stations de mesures géophysiques

Depuis 1986, des géophysiciens de l'UR "Lithosphère continentale" utilisent le système GPS (récepteurs monofréquence) pour positionner avec une précision de quelques dizaines de mètres, des stations de mesures gravimétriques ou sismologiques dans des régions où les méthodes classiques de la topométrie ne peuvent être utilisées : par exemple en Afrique de l'Ouest lors du complément de la couverture gravimétrique réalisée avec l'IGN ou plus récemment sur des volcans d'Indonésie (Krakatau) et d'Amérique centrale (Masaya). Pour la détermination des altitudes de station, la résolution des récepteurs utilisés est insuffisante pour les corrections gravimétriques qui exigent une précision du mètre en gravimétrie de reconnaissance et du centimètre en microgravimétrie; des méthodes complémentaires de nivellement doivent donc être utilisées.

Les bateaux de l'Orstom

Le GPS est aussi utilisé, depuis plusieurs années, comme système de navigation sur les navires océanographiques de l'Orstom (Nizery et Alis). Les possibilités de positionnement qu'offrent ce système, hors de tout repère côtier distinct au radar ou à la gonio, ont contribué à améliorer la sûreté des travaux menés en mer. En effet, outre l'aide à la navigation, le GPS permet aux navires de localiser précisément des lignes de mouillage de subsurface et donc de retrouver des instruments précédemment immergés (bouées OBS). Enfin en donnant la possibilité de revenir sur des zones de chalutage prospectées lors de campagnes antérieures, il facilite les recherches en halieutique. Plus précis et

plus pratique que son ancêtre le sextant, le GPS semble devoir lui succéder sur les passerelles des navires et notamment sur celles des navires de l'Orstom.

Les applications géodynamiques

Le département "Terre, Océan, Atmosphère" de l'Orstom vient d'acquiescer deux récepteurs bifréquences de haute précision (ASHTECH MD-XII) pour la réalisation de ses programmes scienti-

ifiques. Ces récepteurs devraient rejoindre le parc de récepteurs constitué depuis quelques années par l'INSU pour être mis, en plus grand nombre, à la disposition d'équipes scientifiques (cf. programme TECTOSCOPE-POSITIONNEMENT). D'autres organismes (IGN, IPG Paris, CEA, laboratoires universitaires...), dont certains pourraient être associés au parc INSU, possèdent des appareils équivalents qui ont déjà été utilisés pour des applications géodésiques et géodynamiques.

Durant le mois de novembre 1991 a eu lieu une importante expérience regroupant 14 récepteurs GPS placés en une quarantaine de stations, dans la région de Djibouti. L'objectif était de mesurer avec une précision de 10^{-7} , le taux d'expansion de part et d'autre d'un rift où des vitesses de 60 mm/an et des mouvements verticaux de plusieurs centimètres ont été mis en évidence par d'autres mesures géodésiques de 1978 à 1987. Le premier récepteur livré à l'Orstom a donc été mis en station sur le toit du centre de Bondy, à l'aplomb du laboratoire de géophysique, dans le but de constituer une station fiduciale supplémentaire utilisée pour les corrections d'orbite lors de cette opération. Il s'agissait en outre de tester l'appareil lui-même, d'entraîner les opérateurs et donc pour les géophysiciens d'acquiescer un savoir-faire dans le traitement.

Les prochaines applications prévues à l'Orstom concernent les programmes

*Sextant (circa 1795).
fabriqué par l'atelier Jecker à Paris.
Photo : Musée de la Marine*



Pour en savoir plus

Boucher C. et Willis P., 1986 - Le GPS et son impact en géodésie, topométrie et cartographie. Rencontres A.F.T.86 Cachan, Revue "XYZ", n°29. Le système NAVSTAR-GPS. Revue "Toute l'Electronique", n° 511 et 512, Fév.- Mars 1986.

Guide to GPS positioning, 1986 - Well et al, Ed. Canadian GPS Associate, Fredericton, New Brunswick.

Dixon T.H., 1991 - An introduction to the Global Positioning System and some geological applications. Review of Geophysics, 29, 2, pp. 249-276.

Davis J.L., Prescott W.H., Svarc J.L., Wendt K.J., 1989 - Assessment of GPS Measurements For Studies of Crustal Deformation. Journal of Geophys. Res., vol. 94, n°B10, pp. 13635-13650.

Ruegg J.C., Briole P., Feigl K.L., Tapponnier P., Jault D. 1991. GPS Measurements of spreading rate across an onshore rift segment in the Republic of Djibouti. A.G.U. 1991 Fall meeting, E.O.S. abstracts.



Station GPS (ASHTech M XII) installée dans la région de Djibouti lors d'une campagne de géodésie spatiale. Campagne IPG "Djibouti-Afar", novembre 1991 - Photo : J.C. Ruegg/IPG-CNRS

de géodynamique des U.R. "Lithosphère océanique" et "Lithosphère continentale". Il s'agit de mesurer à intervalles de quelques mois ou de quelques années les mouvements relatifs de certaines plaques tectoniques. Les cibles choisies sont le Sud-Ouest Pacifique où ces mouvements sont supposés être parmi les plus rapides du monde, soit environ 18 cm par an et le Nord Chili où sont étudiées les déformations dans une zone de lacune sismique qui pourrait être le lieu d'un séisme majeur dans les années ou les décennies prochaines.

Les applications en hydrologie

Des récepteurs monofréquences de haute qualité (TRIMBLE 4000 ST) seront utilisés prochainement en collaboration avec le Service Topographique du Niger pour mesurer avec une précision centimétrique les niveaux de nappes phréatiques sur des réseaux de piézomètres (programme HAPEX, UR "Continent, atmosphère, séries climatiques" et "Etude

et gestion des ressources en eau").

Le temps GPS

Les satellites du système GPS étant équipés d'horloges d'une grande stabilité (environ 1sec/300.000 ans), il est possible de synchroniser à distance, en quelques minutes, avec une précision de 10 à 100 nsec des récepteurs GPS. Cette application intéresse la sismologie d'observatoire et de terrain pour le remplacement des horloges synchronisées actuellement sur des émetteurs radios du type OMEGA, dont les signaux sont trop souvent mal reçus. En effet, compte-tenu du prix en baisse des récepteurs monofréquence, on peut déjà envisager d'équiper chaque station d'un même réseau d'un récepteur GPS.

L'AVENIR DU GPS À L'ORSTOM

Les récepteurs GPS ont subi depuis ces dernières années, des améliorations qui les rendent plus précis, plus facilement

transportables (quelques centaines de grammes pour certains modèles monofréquence) et plus simples à mettre en oeuvre. Si le positionnement GPS de haute précision, utilise des récepteurs bifréquence encore coûteux, les performances et le prix en baisse des récepteurs monofréquence rendent le système GPS à la portée de tous dans les domaines du positionnement de moyenne précision et de la mesure du temps. Le GPS a déjà séduit d'autres disciplines de l'Orstom (hydrologie, pédologie, écologie, géographie...) et pourrait, dans son évolution actuelle, devenir un instrument de base sur le terrain, à côté des cartes et des boussoles. On peut parier que, dans un avenir proche, les véhicules tout-terrain de l'Orstom seront équipés de tels récepteurs ■

Sylvain Bonvalot et Yves Albouy
Département Terre, Océan, Atmosphère
UR "Lithosphère continentale"

Bonvalot Sylvain, Albouy Yves

Du sextant au satellite

ORSTOM Actualités, 1992, (36), p. 2-8. ISSN 0758-833X