GPS: COMMENT ET POUR QUOI FAIRE ?

Qu'est-ce que le GPS ?

Dès la fin des années 70, l'un des principaux soucis du "Department of Defense" (DoD) américain est de concevoir un système permettant à tous les éléments de l'armée américaine (avions, navires, véhicules blindés, troupes) de se positionner de manière précise et quasi instantanée, n'importe quand et n'importe où à la surface de la Terre. Le "Global Positioning System" (GPS) a donc été conçu pour répondre à ces impératifs.

Applications grand public

Le système est composé d'une constellation de satellites suffisamment nombreux (24 satellites orbitant à 20000 km d'altitude, répartis sur 6 plans orbitaux) pour qu'à tout instant aux moins trois d'entre eux soient clairement "visibles" de n'importe quel point à la surface du globe. Chaque satellite émet un message codé contenant un certain nombre d'informations, dont sa propre position et l'instant exact de l'émission du signal. Un simple récepteur suffit alors pour mesurer le temps écoulé entre émission et réception, et par là en déduire la distance qui le sépare du satellite. Trois mesures sur trois satellites fournissent les trois distances nécessaires à la détermination des trois coordonnées du point : latitude, longitude et altitude. Ce type de mesures est connu sous la dénomination de "pseudo-distances" dans la terminologie GPS. Chaque satellite émet deux types de pseudo-distances : un code précis qui permet un positionnement à environ 10 mètres près et un code non-précis à seulement 100 mètres près environ. Le code précis est crypté pour empêcher son utilisation par tout autre que les militaires américains.

Applications scientifiques

Pour la majeure partie des applications du GPS en géophysique on ne saurait se satisfaire de la précision atteinte par les mesures de pseudo distances. En effet, pour la tectonique des plaques par exemple, il est nécessaire de mesurer des positions au centimètre près (voire au millimètre près) si l'on veut être à même de déceler des déplacements de quelques centimètres par an (voire moins) sans avoir à attendre des centaines d'années.

1-Les codes de pseudo-distance et la politique d'accès au système

Il y a donc deux types de pseudo-distance qui autorisent des précisions différentes.

- *le code C/A pour "Coarse Acquisition", rendu disponible à tout utilisateur, qui autorise une précision de l'ordre de la centaine de mètres. C'est le code utilisé dans les récepteurs disponibles dans le commerce et utilisés aussi bien pour la navigation des avions de ligne, des navires marchands et de plaisance, ou encore des taxis parisiens.*
- *le code P pour "Precise", crypté pour empêcher son utilisation par tout autre que l'armée américaine, qui autorise une précision de l'ordre de la dizaine de mètres. Destiné à être désactivé en temps de paix, ce dispositif connu sous le nom de "Anti Spoofing" est en fait opérationnel et activé en continu depuis début 1994.*

Toujours dans le but d'empêcher le positionnement trop précis d'éventuels "hostiles", le système est pourvu de capacité de diminution de la précision. Cet objectif est atteint en dégradant artificiellement la précision d'un certain nombre des informations émises par les satellites. Pour chaque chiffre que l'on souhaite dégrader, les derniers "bits" informatiques donnant les dernières décimales sont "aléatoirement" inversés deux par deux selon une clef secrète. Les quantités concernées sont d'une part les horloges des satellites qui donnent l'instant d'émission du signal, et d'autre part les orbites des satellites qui donnent la position du point d'émission du signal. Ce dispositif est connu sous le nom de "Selective Availability".En pratique, il est possible de contourner cette difficulté en ayant recours au GPS différentiel. Cette technique consiste à disposer d'une station fixe dont la position est connue à l'avance avec une grande précision. A chaque instant, la différence entre position mesurée et position vraie est alors réémise "en clair" par radio comme une correction valable dans toute la zone de la station fixe.

La technique consiste alors à effectuer les mesures de distances satellites-stations directement sur l'onde porteuse de chaque signal GPS (mesure de phase). Le principe est similaire à celui de la mesure à partir du code de pseudo distance. Néanmoins, la longueur d'onde, ou taille caractéristique, du signal est considérablement réduite, ce qui permêt d'atteindre une précision centimétrique.

Phénomènes affectant la précision des mesures de phase

En dehors de la dégradation volontaire du signal par les militaires américains, il y a un certain nombre de facteurs "naturels" qui limitent la précision du GPS. On peut citer dans l'ordre de leur influence : la réfraction dans l'ionosphère, la réfraction dans la troposphère, la précision du positionnement des satellites GPS, les phénomènes de multitrajets, et la position du centre de phase des antennes GPS. Certains de ces phénomènes sont à peu près contrôlés, d'autres le sont moins, voire pas du tout.

la réfraction dans l'ionosphère

Comme son nom l'indique, l'ionosphère est une enveloppe constituée de particules chargées (ions) qui orbitent autour de la Terre au delà de 20 km d'altitude. L'onde porteuse du signal GPS doit donc traverser cette couche sur son trajet entre le satellite et la station. Le fait que cette couche ne soit pas neutre entraine une perturbation de la vitesse de toute onde électromagnétique qui se propage en son sein. L'amplitude de cette perturbation est liée à la longueur d'onde et à la densité de particules chargées dans le milieu traversé, laquelle densité est évidemment inconnue et variable dans le temps et dans l'espace. Le temps de propagation de l'onde GPS va donc être modifié d'une quantité inconnue, nommée délai ionosphérique, et pour finir l'évaluation de la distance entre le satellite et la station sera donc erronée.

La solution consiste à émettre deux ondes sur deux fréquences différentes. Chacune d'elle sera donc affectée d'une quantité différente, et la comparaison donnera une évaluation raisonnable du délai ionosphérique pour chaque longueur d'onde. C'est pour cette raison que le système GPS est "bicolore", c'est à dire qu'il émet sur deux fréquences légèrement différentes (1.575 GHz et 1.228 GHz). Il n'en reste pas moins que dans le cas d'une ionosphère très agitée, en cas de tempête solaire par exemple, l'évaluation du délai ionosphérique ne sera qu'approximative et la mesure moins précise.

2-Les mesures sur la phase de l'onde porteuse

la longueur d'onde, ou taille caractéristique du signal, passe de 30 m pour le code C/A et 3 m pour le code P, à 19 cm pour l'onde porteuse du premier et 24 cm pour l'onde porteuse de second. Comme il est possible de faire une mesure au niveau d'une fraction de la longueur d'onde, on conçoit aisément qu'il soit possible d'atteindre une précision centimétrique.
Toutefois, cette technique, présente un inconvénient majeur. En effet, contrairement à la mesure sur le signal codé, la mesure sur l'onde porteuse est dite fondamentalement ambigüe. Alors que des codes toujours différents, et donc identifiables, se succèdent en continu, rien ne permet de distinguer une oscillation de l'onde à un instant donné de l'oscillation immédiatement suivante ou précédente. En d'autres mots, on ne connaît pas le nombre d'oscillations qui séparent le satellite de la station, mais seulement le nombre d'oscillations qui séparent deux mesures effectuées sur le même satellite à deux instants différents. On n'a donc pas accès directement à la distance qui sépare le satellite de la station, et on ne peut donc connaître la position de la station en temps réel. Par contre, après avoir effectué des mesures en continu sur tous les satellites visibles pendant un certain laps de temps, on dispose d'un jeux de nombreuses équations (autant que de mesures), pour un nombre relativement petit d'inconnues (trois pour la position de la station, et une pour chaque distance satellite-station à la première mesure). La technique consiste donc à enregistrer un grand nombre de mesures sur le terrain, puis à résoudre les équations à l'aide d'un ordinateur une fois de retour au laboratoire.
D'autre part, pour éliminer les effets néfastes de la "selective availability" il est nécessaire de combiner les données provenant de différentes stations (c'est le principe du GPS différentiel). On parvient alors à éliminer les erreurs provenants des horloges des satellites, au prix de la perte de la notion de positionnement absolu. On ne connaît plus que les distances qui séparent les stations au lieu de leur position. En géodésie, ces distances sont nommées "lignes de base", et comportent trois composantes : une composante verticale qui correspond à la différence d'altitude entre les stations, et deux composantes horizontales que sont les distances selon les directions Nord-Sud et Est-Ouest dans le plan de la surface terrestre.

la réfraction dans la troposphère

De la même façon, le temps de propagation de l'onde GPS est affecté par la teneur en vapeur d'eau de la couche basse de l'athmosphère (de 0 à 10 km d'altitude) : la troposphère. Il serait donc nécessaire de connaitre cette quantité avec précision tout le long du trajet suivi par l'onde. En pratique cela se révèle très difficile, sinon impossible, même avec l'aide des deux fréquences. En effet, le retard introduit est plus compliqué qu'un simple rapport de proportionnalité avec le pourcentage de vapeur d'eau. La différentiation entre les deux fréquences n'apporte donc pas l'information souhaitée : le délai troposphérique. Il existe plusieurs techniques pour contourner cette difficulté, aucune n'apportant de solution vraiment satisfaisante. La plus simple consiste tout simplement à introduire une nouvelle inconnue dans les calculs : le délai troposphérique de chaque station. Toutefois, comme ce paramètre évolue en fonction de la météorologie locale, il est nécessaire de modifier ce paramètre au cours du temps (toutes les deux heures par exemple). Cela finit par introduire beaucoup d'inconnues, ce qui rend les calculs instables et les solutions moins fiables.

En pratique, ce problème prend d'autant plus d'importance que les conditions météorologiques et les épaisseurs troposphériques sont différentes entre deux stations. La ligne de base entre une station située en bord de mer (à altitude zéro) avec un degré d'hygrométrie important et une station située en haute montagne avec un air très sec, sera particulièrement affectée. Enfin, cette erreur se retrouvera plus particulièrement sur la composante verticale de la ligne de base, les erreurs horizontales se compensant plus ou moins du fait que les satellites couvrent à peu près toutes les directions l'horizon. Du point de vue théorique, des instruments permettant de mesurer directement la teneur en vapeur d'eau le long du trajet suivi par l'onde GPS sont en phase expérimentale. Il est encore trop tôt pour savoir si la précision de ces mesures, basées sur la température de brillance du ciel, sera suffisante.

la précision des orbites des satellites GPS

Il est évident que si l'on se trompe d'une certaine quantité sur la position du satellite émetteur, cette erreur va se répercuter directement sur la position de la station receptrice. La distance entre deux stations (ligne de base) sera moins affectée, la plus grosse partie de l'erreur étant éliminée par différentiation. Néanmoins, l'arithmétique veut que l'erreur proportionnelle sur l'orbite est égale à l'erreur proportionnelle sur la ligne de base. L'orbite des satellites GPS peut être calculée très précisemment, mais elle est rendue publique par les militaires américains avec une précison de l'ordre de 200 m. Sur 20000 km cela donne une erreur proportionnelle de 10-5 (10 ppm), soit une erreur de 10 cm sur une ligne de base de 10 km ! Cette erreur est totalement inacceptable pour le positionnement précis. Il est donc nécessaire de recalculer les orbites des satellites GPS à l'aide de programmes informatiques d'orbitographie. Ce faisant, on arrive à contraindre l'erreur d'orbite à environ 20 cm, soit 10-9 (1 ppM), ce qui ne donne plus qu'une erreur de 1 mm pour une ligne de base de 1000 km de long.

les multitrajets

Ces phénomènes sont parmi les plus difficiles à appréhender. Il est clair que tout objet réflecteur placé dans le voisinage de l'antenne de la station GPS, peut renvoyer une partie du signal provenant du satellite sur cette antenne. Tout comme un miroir crée une image de soi même lorsque l'on se regarde dedans, le réflecteur crée une image de l'antenne GPS. C'est la position de cette antenne virtuelle que l'on risque alors de mesurer en lieu et place de la véritable antenne. Qui plus est, au fur et à mesure que le satellite se déplace sur son orbite, l'angle d'incidence sur le réflecteur change, et l'image se déplace d'autant. C'est donc finalement la position d'une antenne virtuelle mobile que l'on mesure ! Compte tenu de la complexité des calculs correctifs qu'il faudrait effectuer, il n'y a pas vraiment de remèdes aux problèmes des multitrajets. Un "blindage" des antennes contre les réflections parasites est toujours possible, mais celui-ci ne peut être que partiel puisqu'il faut bien que le vrai signal parvienne à l'antenne. La seule solution consiste donc à essayer d'éviter les multitrajets (c'est à dire les objets parasites) autant que faire ce peut, ce qui n'est pas si facile quand on considère que le sol lui même est un réflecteur potentiel !

la position du centre de phase des antennes GPS

Lorsque l'on mesure la position d'une antenne GPS, que mesure-t-on vraiment ? En fait, le coeur d'une antenne GPS est constitué d'une spire de fils conducteurs (un solénoïde) qui à pour mission de convertir l'onde électromagnétique en signal électrique. C'est la position du point même où la conversion ce fait, que l'on nomme centre de phase de l'antenne, qui est donc mesurée. Malheureusement, ce point n'est pas matériellement définit, c'est un point "virtuel" dont la position dépend de l'incidence de l'onde par raport au solénoïde, c'est à dire par raport à l'antenne elle même. Le centre de phase, et donc la position mesurée de l'antenne, peut ainsi ce déplacer de plusieurs centimètres, en fonction de l'élevation et de l'azimuth des satellites que l'on reçoit.

Là encore, l'erreur de positionnement sera d'autant plus faible que les décalages introduits se compenseront en moyenne grace à la bonne répartition spatiale des satellites. Néanmoins, les satellites ne couvrant que la demi-sphère supérieure, un décalage systématique de l'altitude de la station est inévitable. En pratique, on résoud la difficulté en utilisant toujours des antennes identiques, orientées dans la même direction, ce qui annule le décalage sur la différence entre les altitudes de deux stations. Là encore, on est ammené à faire du positionnement différentiel.

Il n'est pas impossible de connaitre à l'avance la "carte" des déplacements du centre de phase d'une antenne donnée en effectuant des mesures en laboratoire. Néanmoins, de telles mesures sont très délicates, et cette possibilité est encore en phase d'étude à l'heure actuelle.

La tectonique des plaques mesurée par GPS

L'hypothèse de Wegener de la dérive des continents a été confirmée depuis une vingtaine d'années par un nombre d'observations géophysique. Parmi celles ci, la plus flagrante est sans nul doute la découverte de l'existence de bandes dans les planchers océaniques, "marquées" par un champ magnétique dirigé alternativement vers le Nord et vers le Sud. Ces bandes, parallèles à la dorsale, proviennent de l'aimantation rémanente du champ magnétique terrestre, piégé dans les roches magnétiques au moment de leur refroidissement, c'est à dire peu après leur sortie de la dorsale. La polarité du champ terrestre s'inversant plus ou moins régulièrement au cours du temps, on obtient cette "peau de zèbre",preuve de l'expansion des fonds océaniques et donc de la tectonique des plaques.

Des estimations de la vitesse de cette dérive des continents ont pu être produites à partir de la datation de ces bandes et de leur largeur. De manière similaire, il est possible d'estimer le décalage des deux moitiés d'une structure coupée par une faille (typiquement un ancien volcan, ou le lit d'une ancienne rivière). Là encore, la datation de l'évènement fournira une estimation de la vitesse le long de la faille en question.

L'inconvénient majeur de toutes ces méthodes réside dans le fait qu'elles fournissent une estimation moyennée sur les temps géologiques. Les vitesses des déplacements présents pouvant être sensiblement différentes, il était indispensable de pouvoir mesurer la vitesse instantanée des déformations actuelles. Parmi tous les outils géodésiques terrestres et spatiaux dédiés à cette tâche (théodolithes et distancemètres "classiques",VLBI, SLR, LLR, DORIS, ...), le GPS est particulièrement bien adapté à la mesure de la déformation dans une zone donnée. Grâce à sa grande précision, à son relativement faible coût, à sa facilité de mise en oeuvre, à la possibilité qu'il offre de mesurer des points sans visibilité, il est possible de faire rapidement et à moindre coût un grand nombre de mesures sur une zone donnée.

Le principe est simple. Un point est matérialisé par un repère géodésique, en général une broche métallique enfoncée dans un affleurement rocheux solidement lié au substratum. A l'aide d'un trépied associé à un viseur optique, il est possible de placer l'antenne GPS exactement à la vertical du centre du repère, à une hauteur déterminée. La mesure GPS de la position de l'antenne fournit alors la position du repère. Il suffit de mesurer à nouveau la position de ce repère quelques temps après pour detecter un déplacement et en déduire une vitesse. La déformation dans une zone considérée est donnée par la mesure des déplacements d'un certain nombre de points répartis sur la zone considérée. Cet ensemble de points constitue un réseau géodésique. En pratique, compte tenu de l'obligation de faire des mesures différentielles et de l'obligation de faire des mesures suffisemment nombreuses et durant assez longtemps, il est nécessaire de mesurer les points du réseau simultanément pendant plusieurs heures, voire plusieurs jours. Typiquement on effectuera une mesure toutes les 30 secondes, pendant 3 jours, sur tous les satellites visibles à chaque instant. Cela représente une moyenne de 30000 à 40000 mesures par point. Evidemment, le temps de mesure est conditionné par la précision requise. Pour une précision de quelques centimètres, il sera suffisant de mesurer pendant une durée de l'ordre de l'heure.

Autres applications

Le GPS est un formidable outil de positionnement, et le simple fait de pouvoirmesurer la position d'un point à la surface de la Terre avec une très grande précision ouvre la voie à grand nombre d'applications.

la surveillance d'une faille active

Tout naturellement, les américains furent les premiers à envisager l'application du système GPS à la géophysique. D'autre part, l'une des préocupations majeure des pouvoirs publics en la matière est l'étude du risque sismique en Californie. Dans cette région du monde, le coulissement de deux plaques tectoniques le long de la faille de "San Andreas" provoque régulièrement des séismes dévastateurs, comme ceux de San Francisco et Los Angeles dernièrement. En mesurant la positions de points répartis de part et d'autre de la faille, et les mouvements de ces points au cours du temps, il est possible de cartographier celle ci précisemment. L'analise de la déformation de la surface du sol dans la région de la faille donne des informations sur la profondeur de la fracture, la longueur des segments actifs, les zones où le risque de séisme est le plus important, etc.
D'autre part, après un séisme, la mesure GPS donne accès au déplacement total du sol occasioné par celui ci. Cette information est particulièrement utile pour la compréhension des mécanisme fondamentaux de la rupture sismique. Enfin, il est meme possible de mesurer la position de points GPS pendant un séisme. En calculant la position du point à chaque mesure, on peut litéralement voire le point se déplacer pendant les quelques dizaines de secondes que dure le tremblement de Terre. Si ces points sont bien répartis, on peut également voire la rupture se propager le long de la faille. Là encore, toutes ces informations permettent d'analiser la propagation des ondes sismiques, et les mouvements de la surface qui en résultent. Ce type de réseau est maintenant mis en place autour d'un grand nombre de failles actives de part le monde : au Japon, en Indonésie, ou encore en Turquie.

la déformation des volcans

De la meme façon, il est possible de surveiller la déformation du cône d'un volcan en activité. avec quelques points GPS judicieusement placés et mesurés en continu, on peut suivre jour après jour les déformations dues à la monté de lave. Ces mesures sont utiles aux volcanologues pour quantifier les phénomènes associés à une éruption. On peut également imaginer acquérir un pouvoir de prédiction, une fois ces phénomènes bien connus. Actuellement, de telles mesures sont en cours sur différents volcans tels que le Piton de la fournaise en Martinique, la Soufrière en Guadeloupe, ou le Merapi en Indonesie.

le rebond "post glaciaire" et ses implications sur le changement global

Depuis un certain nombre d'années on soupçonne que le niveau des mers est en constante, bien que très faible, augmentation (quelques millimètres par an au plus). Comme elle se conjugue avec des mouvements verticaux des continents du même ordre de grandeur (voire plus impportant), cette éventuelle montée des mers est très difficilement mesurable. Par contre, l'hypothèse a été émise que la source de cette monté provienne de la "fonte" de la calotte glaciaire antarctique, liée au réchauffement global de la planète. Ors, les conséquences d'une telleperte d'eau sont mesurables. En effet, si la masse de la calotte polaire diminue, le continent qui la soutient monte au fur et à mesure que sa charge diminue. C'est le phénomène du rebond post-glaciaire bien connu en Europe du Nord ou au Canada. Il est parfaitement possible de mesurer par GPS une surection du continent antarctique. De telles mesures, bien que très difficiles ont déjà commencé, et des résultats sont attendus pour dans quelques années.

la mesure du géoïde

A cause des anomalies de densité et de forme de la planète, le champ de gravité de la terre n'est pas celui d'une sphère homogène applatie aux poles. Au contraire il présente des maxima et des minima suivant que les roches en surface et en profondeur sont plus ou moins denses, et le relief plus ou moins accentué. Là où la surface terrestre est couverte par les océans, l'eau qui est liquide s'amasse librement là où la gravité est la plus forte, pour s'équilibrer à un niveau où la gravité est constante. La surface ondulée ainsi crée s'appelle le géoïde. Bien entendu, le géoïde existe également à la surface des continents, bien qu'il ne soit pas matérialisé par la présence de l'eau.

La connaissance du géoïde est de première importance en géophysique. En effet, le champ de gravité est affecté entre autres par les masses profondément enfouies dans le manteau terrestre. L'étude des anomalies du géoïde fournit donc une indication sur la composition de l'intérieur de la Terre, alors que les foragesles plus profonds ne dépassent guère les 10 km.

Au dessus des océans, le géoïde est connu grace aux satellites altimétriques qui mesurent tout simplement les variations dans l'espace de la hauteur de la surface moyenne de l'eau (abstraction faite des vagues et des marées). Toutefois, et justement parcequ'il n'est pas matérialisé au dessus des surfaces solides, le géoïde continental reste difficile à mesurer. Ors le GPS, parcequ'il a comme référence des satellites qui orbitent par rapport au centre de masse de la Terre, donne la position d'un point dans ce référentiel. C'est à dire que l'on connait la distance entre un point GPS et le centre de la Terre. Il suffit alors de connaitre l'altitude de ce point (c'est à dire la hauteur par rapport au niveau des mers), et la différence entre les deux est tout simplement le géoïde.

la mesure de l'érosion

Enfin, on peut envisager d'utiliser le GPS d'une manière légerement différente. Il s'agit là d'une application qui se rapproche de la navigation, tout en conservant le principe de la mesure de phase, qui seul autorise une assez grande précision. En effet, à condition d'effectuer des mesures suffisemment raprochées, il est possible de suivre la trajectoire d'un récepteur mobile. Chaque mesure donne alors la position (latitude, longitude, altitude) en fonction du temps. Comme on ne dispose que d'une seule mesure (sur plusieurs satellites) à chaque instant, la position du récepteur n'est connu qu'avec une précision dégradée. Néanmoins, la position du récepteur à un instant donné est liée à sa position à l'instant précédent et à l'instant suivant par l'intermédiaire de sa vitesse. Il est donc finalement possible de reconstituer la trajectoire du récepteur avec une précision inférieure à la dizaine de centimètres. Dans ces conditions, il est possible d'établir rapidement une carte topographique (altitude en fonction de latitude et longitude) précise d'une zone balayée par un récepteur GPS se déplaçant sur une voiture ou à dos d'homme par exemple. Ceci est particulièrement facile à réaliser sur le littoral, où l'on peut cartographier ainsi la topographie du cordon dunaire et celle de l'espace intertidal découvert entre les marées (ou estran). Il est même possible de mesurer la topographie des bancs sableux sous marins en véhiculant le récepteur GPS sur un bateau d'où l'on mesure la profondeur avec un sonar. Il suffit de mesurer ces topographies à intervalles réguliers, ou après une tempête, pour litéralement voire les effets de l'érosion lente ou catastrophique, ainsi que les échanges entre les différents réservoirs et les chemins parcourus par la matière.

3-Le coût des récepteurs GPS

Un récepteur grand public servant à la navigation sera doté uniquement de la capacité de mesure de la pseudo distance non précise sur une seule longueur d'onde. On trouve de tels récepteurs à partir de 1500 FF ou 300 USD. A l'opposé, les récepteurs bi-fréquence, dotés des capacités de mesures sur les deux pseudo-distances et sur les deux ondes porteuses, coûtent jusqu'à 150000 FF ou 30000 USD. Il existe une catégorie intermédiaire de récepteurs, qui permettent un positionnement relativement précis sans être trop onéreux. Ce sont les récepteurs mono-fréquence, qui ne mesurent que la pseudo distance et la phase d'une seule des deux ondes GPS.

Christophe Vigny
chargé de recherches au CNRS