



Le GPS

UN REPÈRE PERMANENT DANS L'ESPACE ET LE TEMPS



De tous temps, les hommes ont cherché à connaître avec précision leur position géographique. Cette volonté est à l'origine de nombreuses inventions : la cartographie, la boussole, la navigation astronomique... Pourtant, chacune de ces techniques est limitée par ses capacités d'information ou de précision ou par les conditions nécessaires à son utilisation (la nuit, les conditions météorologiques, le champ magnétique terrestre...). Le GPS (« Global Positioning System » ou « Système de Positionnement Global ») est un système de localisation par satellite mis en place par le Département américain de la Défense dans les années 1970. Il détermine les coordonnées géographiques d'un récepteur, ainsi que sa vitesse, son altitude et l'heure. Ces données sont fournies grâce à une constellation de satellites et sont reçues par l'utilisateur dans un boîtier électronique. Le GPS permet ainsi de s'affranchir de toutes contraintes puisqu'il offre la possibilité de déterminer sa position géographique de façon précise et en temps réel, en tout point de la Terre et à tout moment.

HISTOIRE DU GPS

Initialement, le GPS a été conçu pour répondre à un impératif militaire : localiser des troupes de manière précise et quasi-instantanée, n'importe quand et n'importe où à la surface du globe. C'est en 1968 que le Pentagone imagine un système de localisation géographique composé d'une constellation de satellites en orbite autour de la Terre. Le système NAVS.T.A.R.-G.P.S. (Navigation System Time and Ranging - Global Positioning System) a alors été conçu, financé et développé dès 1973 par le Département de la Défense des États-Unis pour un usage strictement militaire. Le premier satellite a été lancé en 1978 et complété par d'autres satellites de différentes générations pour aboutir à un système opérationnel en 1995. Ce système comporte 28 satellites en orbite et un segment de contrôle au sol qui suit les satellites et enregistre les signaux.

DE L'APPLICATION MILITAIRE AUX APPLICATIONS CIVILES

La localisation par satellite est un atout militaire primordial. Le fait de connaître en permanence la position et le déplacement des troupes offre en effet un avantage tactique et stratégique déterminant. Par ailleurs, très rapidement, ce système a représenté une technologie unique permettant l'amélioration ou le développement de nombreuses applications civiles. Pour des raisons de sécurité, il n'était pas imaginable de laisser ce service accessible à tous, les États-Unis ne souhaitant évidemment pas que d'éventuels pays agresseurs utilisent leur système. Un compromis a alors été trouvé : d'un côté un système de grande précision réservé aux militaires américains (le mode PPS ou « Precise Positioning System ») et de l'autre un système limité ou « dégradé » pour les applications civiles (le mode SPS ou « Standard Positioning System »). Le revers de la médaille est que toutes ces applications sont dépendantes d'un seul pays. C'est ainsi que d'autres systèmes ont vu le jour :

- le système GLONASS créé par l'Union soviétique mais qui n'est pas pleinement opérationnel suite aux bouleversements provoqués par l'éclatement du bloc de l'Est ;
- GALILÉO, le système européen actuellement en développement.

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU GPS

LE SYSTÈME

Le système GPS est composé de trois parties distinctes.

- Le segment spatial est constitué d'un ensemble de 24 satellites répartis sur 6 plans orbitaux. Ces satellites évoluent à une altitude d'environ 20 000 km et mettent environ 12 heures pour effectuer une révolution autour de la Terre. Chaque satellite possède un oscillateur qui fournit une fréquence de 10,23 MHz calibrée sur des horloges atomiques. L'émetteur génère deux ondes (L1 et L2) de fréquence respective 1575,42 MHz et 1227,60 MHz. Il transmet régulièrement des signaux horaires, la description de l'orbite suivie (éphémérides) et diverses autres informations.
- Le segment de contrôle qui permet



de piloter le système est composé de 5 stations américaines au sol (la station maîtresse est située à Colorado Springs). Elles enregistrent tous les signaux émis par les satellites, calculent leurs éphémérides et transmettent des données aux satellites.

- Le segment des utilisateurs civils et militaires regroupe l'ensemble des récepteurs qui interceptent les informations des satellites.

LE SIGNAL

Le fonctionnement du système est fondé sur l'émission et la réception d'un signal ou onde électromagnétique. Le signal émis par le satellite est la combinaison de différents éléments :

- Les ondes porteuses L1 et L2 : ce sont des signaux modulés par deux types de codes, respectivement CA et P.
- Les codes CA (Coarse Acquisition) sur l'onde L1 et P (Precise) sur les ondes L1 et L2 : ils autorisent des précisions différentes. Le code CA est disponible pour tous les utilisateurs et donne une précision de l'ordre de 100 mètres (c'est le service SPS). Le code P est crypté et accessible uniquement à l'armée américaine, avec une précision de l'ordre de 10 mètres (c'est le service PPS). Depuis 2000, le code P est accessible aux civils et un nouveau code (Y) a été introduit pour les militaires avec une précision encore affinée.
- Les informations sur la position du satellite (éphémérides).

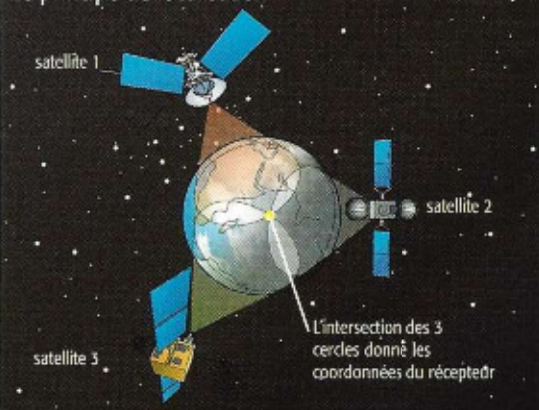
DÉGRADATION VOLONTAIRE DE LA PRÉCISION

Initialement, le Département de la Défense américain dégradait la précision du système pour les civils (environ 100 mètres d'incertitude). Depuis mai 2005, cette dégradation a été supprimée et offre donc aux utilisateurs une précision théorique de 25 mètres en tout point du globe.

LES MESURES

Le satellite envoie des ondes électromagnétiques qui se propagent à la vitesse de la lumière. Cette vitesse étant connue, la distance qui sépare le récepteur du satellite est calculée en mesurant le temps de parcours de l'onde. Ce temps calculé est d'une précision extrême (de l'ordre de 10^{-8} seconde) grâce à l'oscillateur du satellite. Pour obtenir les coordonnées d'un point dans l'espace, il est nécessaire de faire des mesures sur au moins trois satellites. Il suffit alors de tracer trois sphères dans l'espace ; le centre de chaque sphère est la position connue d'un satellite ; le rayon de chaque sphère est la

Le principe de localisation



distance calculée. L'intersection de ces trois sphères nous donne les coordonnées (latitude, longitude et altitude) d'un point, en l'occurrence le récepteur. Un quatrième satellite est en plus nécessaire pour assurer une précision optimale des coordonnées. En effet, les récepteurs ne peuvent pas disposer d'une horloge atomique comme les satellites. Il en résulte une désynchronisation des horloges. Ce quatrième satellite permet donc de compenser le décalage de l'horloge du récepteur avec l'heure GPS. Enfin, le système prend également en compte deux notions fondamentales : la relativité restreinte qui démontre que le temps ne s'écoule pas de la même façon dans le satellite qui possède une grande vitesse par rapport au récepteur et la relativité générale qui démontre que le temps s'écoule plus rapidement dans le satellite du fait de la plus faible gravité.

Il existe trois types d'observations GPS possibles : la mesure code, la mesure phase et la mesure de fréquence Doppler.

- La mesure code : les satellites génèrent un code modulé sur les ondes porteuses. Les récepteurs GPS génèrent également une réplique de ce code. Pour déterminer le temps de parcours de l'onde, le récepteur retarde l'émission jusqu'à ce que son signal soit aligné avec celui du satellite. Ce décalage multiplié par la vitesse de la lumière donne alors la distance séparant le récepteur du satellite.

- La mesure phase : elle est utilisée pour des applications nécessitant des mesures très précises. Au lieu d'utiliser le code, on exploite directement la phase sur les ondes porteuses en déterminant le déphasage entre le satellite et le récepteur. L'inconvénient majeur de cette mesure est que la position n'est pas obtenue en temps réel. Il est en effet nécessaire d'enregistrer

un grand nombre de mesures sur le terrain puis de traiter ces données avec des logiciels spécialisés. En contrepartie, les résultats ont une précision de l'ordre du centimètre.

- La mesure de fréquence Doppler : elle permet entre autre de mesurer la vitesse à laquelle se déplace l'utilisateur. Cette mesure est la différence entre la fréquence reçue par le récepteur et la fréquence générée par le satellite. Cette différence est causée par le mouvement relatif entre le satellite et le récepteur.

LES MODES DE POSITIONNEMENT

Le positionnement absolu consiste à déterminer les coordonnées d'un point quelconque en utilisant les codes générés par les satellites. Il ne nécessite qu'un seul récepteur et une durée de mesure très courte. L'intrêr de cette méthode est de fournir des informations en temps réel. Le positionnement relatif fait intervenir deux récepteurs. On s'intéresse alors au vecteur spatial reliant ces deux points. Cette méthode 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). La précision obtenue est de l'ordre du millimètre. Ce mode est notamment utilisé pour les applications de géodésie.

Enfin, le GPS différentiel (DGPS) permet un positionnement en temps réel tout en affinant la précision grâce à des corrections. Celles-ci sont calculées par une station de référence (dont les coordonnées exactes sont connues) et radiodiffusées vers les récepteurs des utilisateurs. Il existe aussi un mode pseudo-différentiel où ce n'est pas une valeur absolue qui sert de correction mais simplement le déplacement du récepteur par rapport à une station référence.

Évolution du GPS

1968
Invention du concept du GPS.

1973
Développement du projet de localisation par GPS.

1978
Lancement du premier satellite du système NAVSTAR.

1978-1994
Mise en place opérationnelle et lancement des différents satellites.

1983
Le président Reagan demande que la SPS soit accessible dans le monde entier et que sa précision soit de 100 mètres avec une probabilité de 95 %.

1984
Adoption du système géodésique WGS 84 pour tous les calculs de position avec le GPS.

1995
Le système est déclaré opérationnel.

2002
Accord des 15 ministres européens des transports pour Galiléo.



2005
Mise en orbite du premier satellite expérimental

LE SYSTÈME DE RÉFÉRENCE

Un système de localisation quel qu'il soit nécessite de définir des paramètres de référence. Pour le GPS, elle s'appelle WGS84 (« World Geodesic System 84 ») et est définie par un système géocentrique de coordonnées cartésiennes (X, Y et Z). L'origine est au centre de gravité de la Terre, l'axe des Z passe par l'axe de rotation de la terre et l'axe des X est l'intersection de l'équateur avec le méridien de Greenwich.

Lors de l'utilisation d'un récepteur GPS, il est nécessaire de vérifier la référence géodésique utilisée ainsi que le système de projection cartographique.

PHÉNOMÈNES AFFECTANT LA PRÉCISION

Hormis la dégradation volontaire du signal, il existe certains facteurs qui limitent la précision du GPS.

La réfraction dans l'ionosphère

L'ionosphère est une couche de l'atmosphère constituée de particules chargées qui affectent la propagation des ondes électromagnétiques. C'est pour cela que deux ondes (L1 et L2) sont utilisées : la comparaison des temps de propagation des deux ondes permet d'évaluer le délai ionosphérique et la correction appropriée.

Les multi-trajets

Ce sont des phénomènes de réflexions parasites provoqués par des objets dans le voisinage du récepteur GPS. Ceux-ci renvoient une partie du signal du satellite vers l'antenne du récepteur et altèrent donc la précision des informations. Il n'y a pas de solution réellement efficace pour s'en prémunir, si ce n'est d'éviter de placer le récepteur à proximité d'objets parasites.

La réfraction dans la troposphère

C'est cette fois la teneur en vapeur d'eau de la couche basse de l'atmosphère qui modifie le temps de propagation de l'onde. En pratique, il n'existe pas non plus de solution appropriée. Cependant, l'erreur provoquée intervient essentiellement sur la composante verticale (l'altitude) plutôt que sur la composante horizontale.

LES APPLICATIONS DU GPS

En dehors des **applications militaires**



qui sont à l'origine du GPS, nombreuses sont aujourd'hui les applications civiles de ce système, tout d'abord, parce que la localisation d'un lieu géographique reste une donnée essentielle pour la plupart des activités humaines. Malgré tout et bien que le système GPS ait été essentiellement conçu pour déterminer la position d'un porteur, les caractéristiques du système et la qualité des mesures font que nombre d'applications dépassant le strict domaine de la localisation ont pu être développées. On peut dissocier trois types d'applications selon le degré de précision, d'intégrité et de sécurité : les applications pour les particuliers et

les professionnels, les applications pour les services publics et les applications scientifiques.

LES APPLICATIONS POUR LES PARTICULIERS ET LES PROFESSIONNELS

La navigation (aéronautique, maritime ou terrestre) en temps réel est l'une des applications élémentaire et principale du GPS. Un usage en plein essor est



celui de la navigation routière avec un système GPS embarqué dans les **automobiles**. En agriculture, les mesures GPS permettent d'optimiser les rendements, de gérer au mieux les coûts de production et de limiter l'ampleur de certaines pollutions, par exemple en dosant précisément au sein d'une même parcelle les quantités d'engrais nécessaires. Même le système bancaire utilise ce système pour déterminer l'heure exacte des transactions financières. Les



professionnels du génie civil exploitent ce type d'informations pour l'implantation de constructions, le contrôle des ouvrages (les ponts par exemple).

En météorologie, le système GPS sert au positionnement des mesures en mer, au positionnement des sondes de radiosondage et au calcul du vent en altitude (ballons sondes). Une application en cours de développement utilise même les propres limites du système : la modification de la propagation de l'onde par la troposphère. Cela permet de mesurer le contenu de vapeur d'eau dans l'atmosphère, valeur utilisée en climatologie et en prévision météorologique.

LES APPLICATIONS POUR LES SERVICES PUBLICS

Pour ce type d'application, le signal doit être sûr et continu et les données sécurisées. Le système GPS est utilisé dans les domaines de la sécurité civile (le repérage des balises de détresse et les opérations de sauvetage), de la gestion de réseaux de transport routiers, ferroviaires, maritimes, aéronautiques (contrôle de vitesse, localisation des véhicules, système de guidage, surveillance, gestion du trafic au sol dans les aéroports...), des télécommunications, des services sociaux (assistance aux personnes handicapées ou aux personnes âgées), de la justice, la police et les douanes (contrôles frontaliers, repérage des véhicules), de la gestion des réseaux aériens et enterrés (eau, gaz, électricité)...

LES APPLICATIONS SCIENTIFIQUES

Généralement, le paramètre déterminant pour ce type d'application est la précision. Les modes de mesures

sont donc appropriés : mesure de phase, positionnement relatif avec deux récepteurs, mode différentiel. Ces techniques sont par exemple employées comme outil d'acquisition pour les systèmes d'information géographique (SIG) ou pour les mesures géodésiques. Dans le domaine de la géophysique, les mesures GPS permettent par exemple de suivre la vitesse de dérive des plaques continentales et leur déformation (tectonique des plaques). La précision de ce système autorise également l'analyse de zones plus restreintes telles que des failles actives, les volcans, les zones d'érosion... et d'anticiper ainsi les risques possibles encourus par les populations. Dans le domaine de l'écologie, des balises GPS installées sur des animaux donnent des informations sur les déplacements des espèces, leurs comportements migratoires ou journaliers...

L'UTILISATION DU GPS

L'utilisation d'un GPS passe par trois phases :

- le paramétrage initial ;
- l'affichage des fonctions disponibles ;
- la programmation d'outils de navigation.

Lorsqu'un récepteur GPS est employé pour la première fois, il est indispensable de spécifier les paramètres de bases, à savoir les unités de mesures, l'heure..., ainsi que le système de référence géodésique utilisée et le système de projection cartographique. Une fois cette opération effectuée, le récepteur donne accès à certaines fonctions (variables selon les modèles). Les principales sont les suivantes :

- la position géographique (en latitude et longitude) ;
- la vitesse ;
- la direction de navigation par rapport au nord géographique (ou cap) ;
- l'altitude.

La programmation du récepteur se fait ensuite par l'intermédiaire de points remarquables (*waypoint*) ou de routes. Il est possible de nommer les *waypoints* et parfois de leur attribuer une icône. Lorsque l'utilisateur désire se rendre sur un point fixe, il sélectionne la

fonction (généralement appelée « *GO TO* ») lui permettant d'activer le point choisi. Le système calcule alors différentes données reliant sa position actuelle et le point de destination : la distance à parcourir, le cap actuel, le cap à suivre (azimut), le temps de parcours estimé, l'heure d'arrivée estimée, l'erreur de cap (différence entre cap suivi et azimut), la correction de cap, la distance parcourue. Lorsque l'utilisateur choisit une route, le récepteur sélectionne les points dans l'ordre donné et passe au point suivant dès qu'un point intermédiaire est atteint. Certains récepteurs GPS proposent l'affichage du tracé du parcours effectué. Celui-ci est constitué de points enregistrés automatiquement par le récepteur (ce paramètre peut être personnalisé pour que les enregistrements soient effectués selon un certain laps de temps ou selon des valeurs de distance). Les récepteurs de dernière génération permettent d'afficher une carte en fond d'écran et d'y superposer le tracé de son parcours.

GALILÉO

Galiléo est le nom du futur système européen de positionnement par satellite. Il est destiné à donner à l'Europe son indépendance vis-à-vis du système GPS américain. L'originalité de Galiléo est qu'il sera strictement sous contrôle civil. L'Union Européenne et l'Agence Spatiale Européenne sont responsables du projet.

Le système Galiléo reposera sur le déploiement de 30 satellites (27 opérationnels et 3 en réserve), postés sur trois orbites terrestres moyennes de 23 616 km d'altitude, circulaires et inclinées à 56° par rapport à l'équateur. Deux centres de contrôle Galiléo seront installés en Europe pour suivre le fonctionnement des satellites et gérer le système de navigation.

Le programme a débuté en 2002. Le premier satellite expérimental GIOVE-A a été placé sur orbite le 28 décembre 2005. Le lancement du second satellite expérimental est prévu pour septembre 2006. En 2008, quatre satellites devraient être à poste. Le système sera pleinement opérationnel en 2010.

Galiléo diffusera 10 signaux : 6 pour les services gratuits, 2 pour le service commercial et 2 pour le service public réglementé.

LES SERVICES PROPOSÉS PAR GALILÉO

- Le service ouvert (ou OS pour *Open Service*) : ce service sera principalement utilisé par les particuliers. Il offrira la même prestation que le GPS mais avec une plus grande précision (de l'ordre de 1 mètre).
- Le service commercial (ou CS pour *Commercial Service*) : en échange d'une redevance, plusieurs garanties seront proposées, notamment pour l'intégrité et la continuité du signal, une meilleure précision ou des possibilités de cryptage des informations. C'est ce service qui doit assurer le financement de Galiléo.
- Le service de sûreté de la vie (ou SOL pour *Safety Of Life Service*) : il assurera des données sécurisées, intégrées et certifiables pour des applications dans le domaine de la sécurité (par exemple, dans le transport aérien, maritime ou terrestre).
- Le service public réglementé (ou PRS pour *Public Regulated Service*) : il est destiné aux utilisateurs remplissant une mission de service public (services d'urgence, transport de matières dangereuses, etc.). Ce service nécessite une disponibilité permanente d'où l'utilisation de deux signaux distincts et de systèmes anti-brouillage.
- Le service de recherche et secours (ou SAR pour *Search And Rescue service*) : il permettra de localiser l'ensemble du parc des balises Cospas-Sarsat 406 MHz et de renvoyer un message d'acquiescement vers les balises en détresse.

LES AVANTAGES DE GALILÉO PAR RAPPORT AU GPS

- Il offre des garanties aux applications civiles et pas seulement militaires.
- Il offre une meilleure précision.
- Il est plus fiable car il inclut un message d'intégrité qui informe l'utilisateur d'éventuelles erreurs.
- Le système Galiléo est exploitable dans les régions situées à des latitudes extrêmes.
- L'horloge atomique est la plus précise jamais placée en orbite (stabilité supérieure à 1 nanoseconde par jour).

LE SYSTÈME GALILÉO



Chaque satellite embarque une horloge atomique très précise et émet un signal radio. Un récepteur capte les signaux provenant de 6 à 10 satellites.

Le récepteur calcule la distance au satellite compte tenu de la durée mise par le signal pour l'atteindre : chaque satellite permet d'obtenir une sphère de positions possibles.