

DESCRIPTION DES DIFFERENTS SYSTEMES DE POSITIONNEMENTS

GPS NAVSTAR

Le système GPS (Global Positioning System) a été mis en œuvre par le ministère de la défense américaine. Il est de ce fait entièrement sous le contrôle américain et leur permet une disponibilité sélective du signal en cryptant certaines informations. Ce projet GPS a été lancé aux États-Unis en 1973 pour surmonter les limites des précédents systèmes de navigation. Ce système est composé de 31 satellites (mars 2017) sur 6 orbites quasi-circulaires de 20200 km d'altitude moyenne (26600 km environ du centre de la terre). Leur période de révolution est égale à 11 h 58 min 2 sec, ce qui correspond à deux révolutions complètes par jour à la vitesse de 14000 Km/h. L'inclinaison des plans orbitaux est de 55°. Le système GPS est actuellement le plus utilisé car il est gratuit, et permet une localisation avec une bonne précision. Il faut néanmoins rappeler que la qualité du signal peut volontairement être dégradée, voire coupée par les administrateurs du système.

GLONASS

Le système GLONASS (Global Navigation Satellite System) est l'équivalent russe du GPS. Ce système a été développé à partir de 1982 par les militaires Russes. Le 24 septembre 1995, les 24 satellites de la constellation sont placés en orbite et deviennent opérationnels à partir de janvier 1996. Mais après la chute de l'URSS, en octobre 2000, seuls six satellites sont en état de fonctionner. Il faudra attendre 2011 pour voir GLONASS assurer la couverture de toute la surface terrestre. Cette constellation de 24 satellites est répartie sur 3 orbites inclinée de 64°8 et situées à 19130 km. Cette répartition permet une réorganisation plus rapide des satellites en cas de panne. La particularité de ce système est que chaque satellite possède sa propre fréquence d'émission, ce qui augmente la résistance au brouillage. Leur période de révolution est égale à 11 h 15 min. À la différence du système GPS, les satellites de la constellation GLONASS vus du sol, se retrouvent à la même place dans le ciel après huit jours sidéraux. La partie au sol est composée de cinq stations de contrôle, la principale se trouve à Krasnoznamensk dans la région de Moscou.

GALILEO

GALILEO est le système de positionnement par satellites initié par l'Union Européenne et l'Agence Spatiale Européenne. La nécessité d'un système de positionnement européen répond au besoin d'indépendance face au système GPS américain. Ce système novateur et performant supprime les restrictions (précision et fiabilité) du GPS tout en restant entièrement sous contrôle civil. Il est donc à la fois concurrent et complémentaire du GPS. En phase d'exploitation commerciale le système GALILEO sera composé à terme de 30 satellites dont 6 de rechange. Cette constellation est placée sur trois plans orbitaux distincts inclinés de 56° et situés 23220 km d'altitude moyenne. Leur période de révolution est égale à 14 h 07 min. La composante terrestre comprend 2 centres de contrôles coordonnant un minimum de 20 autres stations au sol. De plus, GALILEO diffusera 10 signaux sur 3 bandes de fréquences : 6 signaux dédiés aux services gratuits, 2 signaux pour les services commerciaux et 2 pour le service public réglementé. GALILEO étant compatible avec le GPS, l'utilisateur pourra accéder aux deux systèmes simultanément et améliorer la qualité et la fiabilité de sa position. Le service européen se veut plus performant avec notamment un positionnement d'une précision, de l'ordre du mètre, supérieure à celle de ses concurrents.

Beidou

Dans le domaine civil, il est utilisé notamment dans des domaines comme la navigation, les transports et les prévisions météorologiques. Il a également des applications dans le domaine militaire.

Comparaison des caractéristiques des différents systèmes

Tableau réalisé le 21/10/2019

Caractéristiques	GPS.....	.GLONASS.	.GALILEO.	.BEIDOU.
Altitude	20 200Km	19 100Km	23 220km	21 528km
Inclinaison	55°	64°8	56°	55°
Période orbitale	11h 58	11h 15	14h 07	12h 53
Nombre de plan orbitaux	6	3	3	3
Nombre de satellites opérationnels (en cible)	31 (31)	24 (24)	22 (26)	39 (39)

Le GPS (Global Positioning System) aussi connu sous le nom de Navstar servira de base pour l'explication d'un positionnement par satellite.

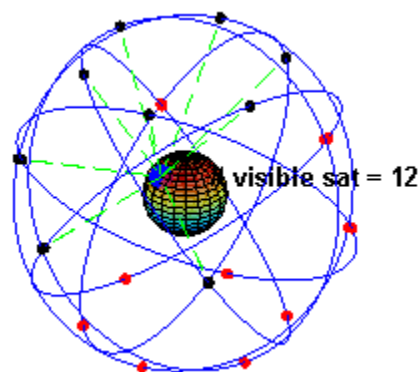
GPS - Global Positioning System

Le système GPS s'articule autour de trois segments :

- le segment spatial
- le segment de contrôle
- le segment utilisateur

Le segment spatial

Comme nous l'avons vu ci-dessus, la constellation GPS est constituée de 31 satellites (mars 2017) mais le nombre de satellites en service à une date précise peut varier. La constellation est organisée autour de 24 satellites principaux qui assurent la disponibilité mondiale du GPS, ce qui permet d'avoir au moins quatre satellites visibles du sol partout dans le monde. Depuis 2011, la configuration de la constellation principale est augmentée à 27 emplacements afin de fournir une meilleure couverture mondiale. Leur période de révolution est égale à 11 h 58 min 2 sec, soit un demi-jour sidéral, chaque satellite reprend la même position tous les 2 tours, vu du sol terrestre. Il y a six plans orbitaux pratiquement circulaires à une altitude moyenne de 20 200 km, à une vitesse de 14 000 km/h (3,88 km/s). Chaque orbite inclinée à environ 55 degrés par rapport au plan équatorial comporte 5 ou 6 satellites. Cette constellation fournit à l'utilisateur entre cinq et huit satellites visibles de n'importe quel point sur la terre.



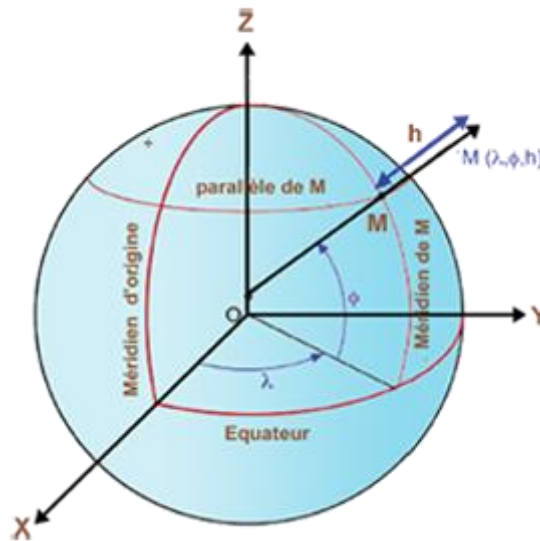
Système géodésique de référence

Le système référentiel utilisé par le GPS est le WGS-84 (World Geodetic System version 1984) qui est un modèle de représentation globale de la Terre. En effet il faut tenir compte que la terre n'est pas une sphère parfaite, mais compressée aux pôles ce qui donne dans le système choisi WGS-84 un rayon terrestre de 6378,137 km à l'équateur et 6356,7523142 km aux pôles.

Les paramètres qui définissent la géodésie en un point M de la surface topographique sont ses coordonnées cartésiennes X, Y et Z ou ses coordonnées géographiques longitude et latitude. La longitude λ : angle formé en un point de la surface terrestre, par le méridien du lieu avec le méridien Greenwich.

Le méridien d'origine 0° est celui de Greenwich.

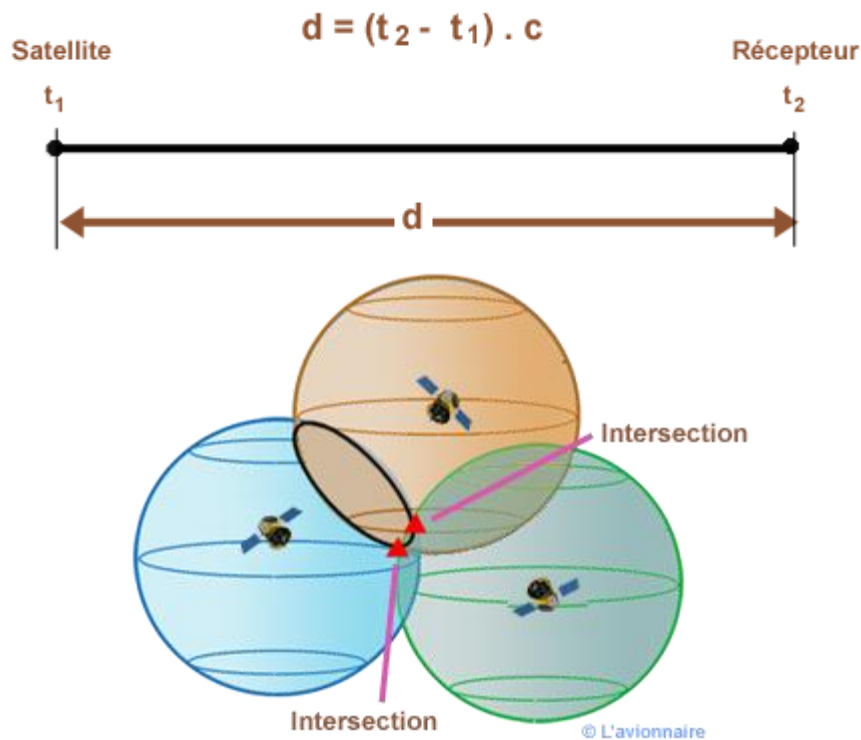
La latitude ϕ : angle formé en un point de la surface terrestre par la verticale du lieu avec le plan de l'équateur.



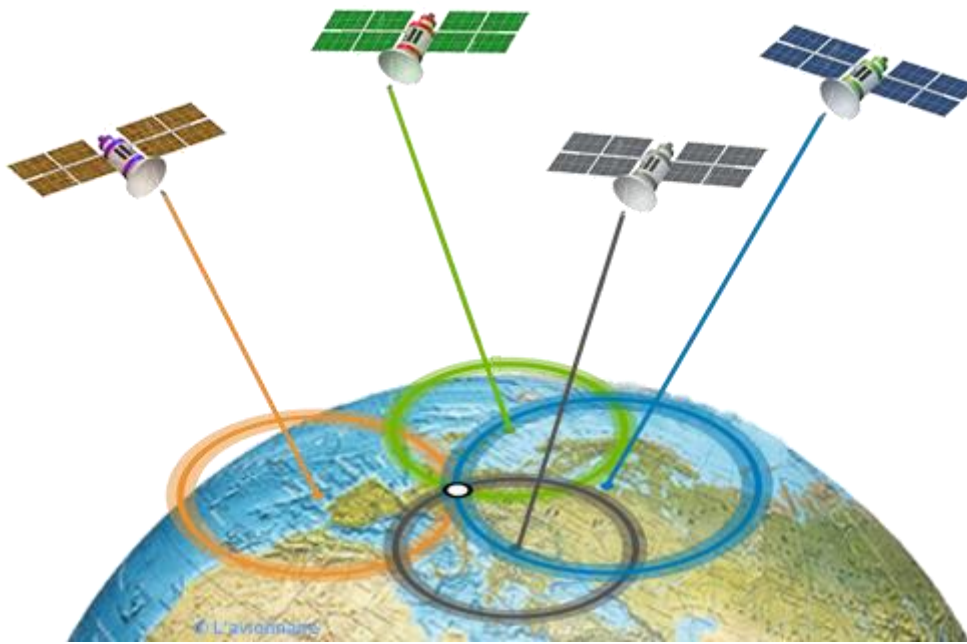
Principe de base

La détermination d'un lieu géométrique est basée sur l'intersection de trois sphères dans l'espace. Chaque sphère est définie par son centre correspondant à la position d'un satellite, et par son rayon qui est la distance entre le centre et le récepteur GPS de l'utilisateur. Ainsi la mesure correspond à une distance entre un satellite et un récepteur. Le GPS fonctionne grâce à la méthode mathématique trilatération. On mesure la distance qui sépare un récepteur GPS de plusieurs satellites. Les informations nécessaires au calcul de la position des satellites étant transmises régulièrement au récepteur, celui-ci peut, grâce à la connaissance de la distance qui le sépare des satellites, connaître ses coordonnées. Chaque satellite émet des signaux pseudo aléatoire (code qui revient périodiquement à la même structure de bits un et zéro) dans tout l'espace et qui contiennent des informations (orbite - heure - position - etc). Pour mesurer la distance qui sépare le satellite au récepteur GPS, on mesure le temps que l'onde électromagnétique a mis pour parcourir le trajet satellite / récepteur. Le signal voyageant à la vitesse de la lumière 300 000 Km/sec (la valeur exacte est

de 299 792 458 m/s). En supposant que la propagation est rectiligne (figure ci-dessous), la distance recherchée est donnée par :



Si trois satellites sont suffisants pour un positionnement en deux dimensions, il est nécessaire d'utiliser un quatrième satellite afin de positionner un récepteur en trois dimensions : longitude, latitude, altitude. Le GPS fournit donc non seulement la position géographique, mais aussi l'heure exacte en utilisant la précision des horloges atomiques des satellites. Les horloges atomiques reposent sur la résonance naturelle des atomes (césium ou rubidium) qui fournissent un «tick» stable. Chaque élément chimique absorbe et émet de l'énergie électromagnétique à sa propre résonance, ou fréquence, et les scientifiques ont constaté que ces résonances sont stables dans le temps.

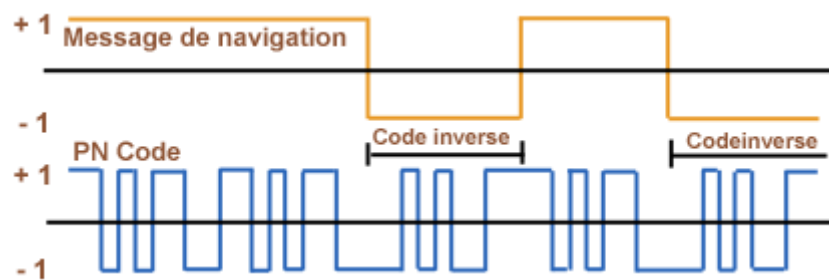


Pour utiliser correctement le GPS, il faut donc un minimum de quatre satellites : trois pour la position, et un supplémentaire pour la synchronisation de l'horloge interne du récepteur. À noter que les espacements des satellites sont disposés de façon à ce qu'un minimum de cinq satellites soient en vue à partir de chaque point du globe.

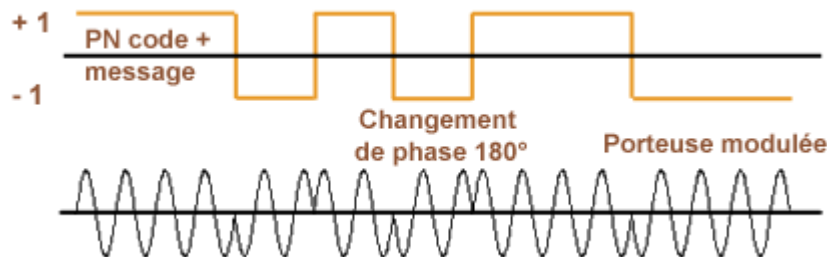
Signaux émis par les satellites

Une onde électromagnétique est caractérisée par sa fréquence f . Chaque satellite émet simultanément sur deux fréquences porteuses différentes, l'une à 1575.42 Mhz nommée L 1, longueur d'onde 19.05 cm, et l'autre à 1227.60 Mhz nommée L 2 longueur d'onde 24.45 cm. Ces porteuses sinusoïdales sont modulées par deux séquences binaires différentes. Ce code est une suite de nombres binaires, dont la fréquence s'exprime en « bits par seconde ». Contrairement à un signal parfaitement sinusoïdal, un code binaire permet de véhiculer de l'information. Code C/A (acronyme de « Coarse Acquisition », en français : « acquisition brute ») est un code binaire pseudo- aléatoire (code qui revient périodiquement à la même structure de bits un et zéro) ou PRN (en anglais Pseudo Random Noise) de débit 1,023 Mbit/s et de période 1 ms. Le code C/A n'est transmis que sur la fréquence L 1 et n'est pas crypté. La transmission des données se fait selon le principe CDMA (Code Division Multiple Access), c'est-à-dire que chaque satellite de la constellation dispose d'une clé (mot d'un code) à l'aide de laquelle il code l'information à transmettre. Connaissant la clé d'un satellite donné, le récepteur est capable d'extraire le message de ce satellite du signal composite reçu.

Les deux codes C/A et P sont eux même modulés par le message de navigation (Broadcast Message). Le message transmis résulte de l'addition modulo-2 (message de navigation et des codes)



Avec le code modulé ci-dessus la porteuse subit une modulation de type BPSK (Binary Phase Shift keying). Ainsi la porteuse fait un saut de phase de 180° à chaque changement d'état de code.



Code P (pour « précis ») de débit 10,23 Mbit/s dont la séquence binaire est non répétitive et sa période est d'une semaine. Ce code est modulé sur les deux fréquences L1 et L2.

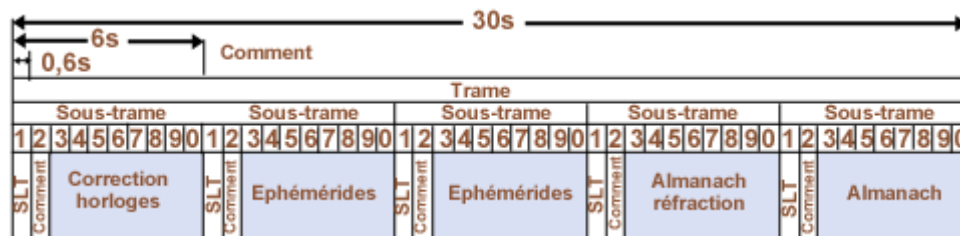
Le premier est librement accessible, le second est réservé aux utilisateurs autorisés car il est le plus souvent chiffré : on parle alors de code Y.

Ces deux codes sont datés grâce aux horloges atomiques à bord de chaque satellite et par le message de navigation. La précision d'une horloge atomique est de l'ordre de $1 \text{ ns} = 10^{-9}$

Structure du message de navigation

Les informations contenues dans le message de navigation ont la structure de trame de base représentée ci-dessous. Un message complet se compose de 25 trames, chacune contenant 1500 bits à 50 Hz (ce qui signifie que l'on transmet 50 bits par secondes). Chaque trame est subdivisée en cinq sous-trames de 300 bits : 6 sec et chaque sous-trame se compose de 10 mots de 30 bits : 0,6 sec. Le premier mot de chaque sous-trame est SLT (mot de télémétrie), il contient des informations sur l'actualité des éphémérides. La transmission du message

complet de navigation de 25 trames nécessite 750 s ou 12,5 min. Les données restantes de la première sous-trame contiennent des données sur l'état et la précision du satellite ainsi que les valeurs de correction d'horloge. La deuxième et troisième sous-trame contiennent des paramètres de l'éphéméride, et les sous-trames 4 et 5 comprennent enfin les almanachs.



Données "almanach"

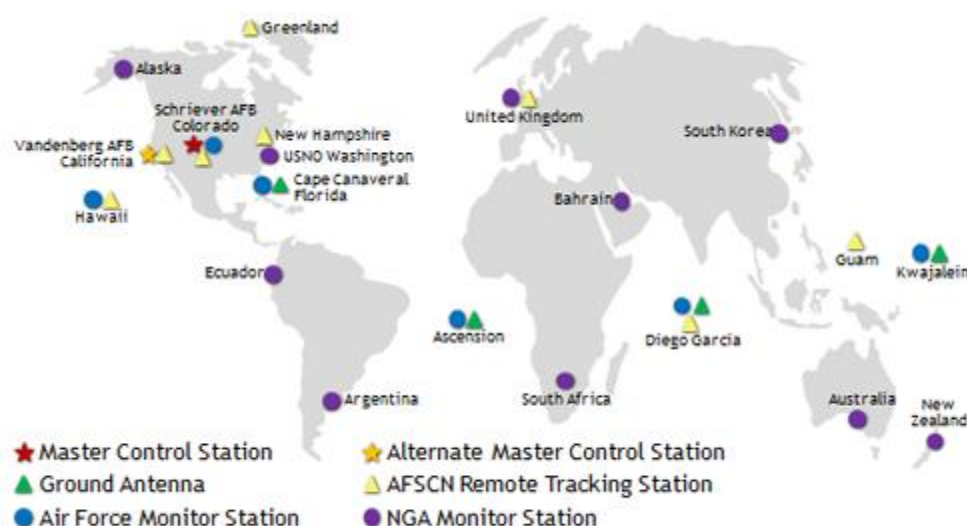
Les données "almanach" fournissent toutes les informations nécessaires pour permettre à l'utilisateur de calculer l'emplacement approximatif de chaque satellite dans la constellation GPS à un moment donné. Les données d'almanach ne sont pas suffisamment précises pour déterminer la position mais peuvent être stockées dans un récepteur où elles restent valables pendant plusieurs mois. Elles sont principalement utilisées pour déterminer quels satellites sont visibles à un endroit donné afin que le récepteur puisse rechercher ces satellites lorsqu'il est activé.

Données "éphémérides"

Les données éphémérides sont semblables aux données d'almanach mais permettent une détermination beaucoup plus précise de la position du satellite nécessaire pour convertir le retard de propagation du signal en une estimation de position de l'utilisateur. Contrairement aux données d'almanach, les données éphémérides d'un satellite ne sont diffusées que par ce satellite et sont actualisées périodiquement (toutes les 4 à 6 heures pour le système GPS) afin de tenir compte des plus petits changements affectant l'orbite du satellite. Ce sont ces données qui sont utilisées pour le calcul de la position. Chaque satellite transporte plusieurs horloges atomiques pour obtenir un temps très précis. Mais les horloges atomiques de chaque satellite ne correspondent pas au temps de référence GPS, mais courent librement. C'est pour cette raison, que les paramètres de correction des horloges de chaque satellite sont nécessaires. Le temps de référence GPS diffère également de l'heure UTC (temps universel), qui est adaptée à la rotation de la Terre sur une base régulière.

Le segment de contrôle

Le segment de contrôle dépend de l'armée américaine, il était composé de 5 stations terrestres. Le centre de calcul est à Colorado Springs sur la base de Cheyenne Mountain. Les quatre autres stations situées à Hawaii dans le Pacifique nord, Diego Garcia dans l'océan Indien, Kwajalein dans le Pacifique sud et à Ascension dans l'Atlantique sud, assuraient le contrôle du système et la mise à jour des informations à bord des satellites. En août et septembre 2005 six stations de surveillance de la NGA (Agence nationale de Geospatial-Intelligence) ont été ajoutées au réseau. Puis par la suite quatre autres stations NGA ont été de nouveau rajoutées, ceci permet à chaque satellite d'être contrôlé en permanence par au moins trois stations. Pour l'utilisateur final ceci se traduit par une précision de position légèrement améliorée. Le segment de contrôle surveille et corrige les satellites en particulier lors du passage au-dessus des stations. Il calcule en permanence les temps de propagation ionosphérique, les effets mécaniques relativistes, la dérive des horloges atomiques de bord qui compte tenu de certaines instabilités dans les satellites en orbite doivent être fréquemment ajustées aux horloges des stations de contrôle au sol. Il doit également permettre aux satellites de connaître très précisément leurs éphémérides : d'abord, le satellite envoie sa position théorique à la station de contrôle, qui calcule alors la véritable position et renvoie finalement au satellite la valeur de l'erreur commise. Ainsi, le satellite est à même d'inclure dans ses signaux la différence entre sa position théorique et sa position réelle afin que les récepteurs la prennent en compte dans leurs calculs.



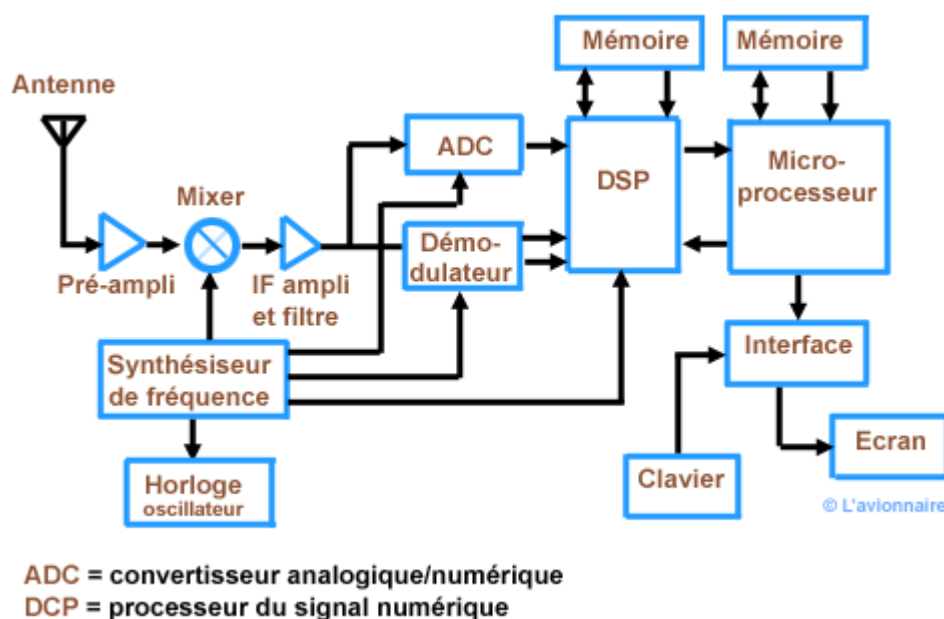
Source : World Map NASA

Le segment utilisateur

Le segment utilisateur est constitué par l'ensemble des récepteurs militaires et civils susceptibles de décoder les signaux transmis par les satellites pour calculer des données de position, de vitesse ou de temps. La plupart des GPS modernes sont équipés de récepteurs à canaux parallèles et sont capables de suivre 5,6,7 satellites voire plus et de choisir ceux donnant le meilleur signal (rejet éventuel des satellites trop bas sur l'horizon) et de les combiner pour améliorer la précision de la mesure. Comme les utilisateurs ne font que recevoir (ils n'émettent pas vers les satellites), le système ne peut être saturé et le nombre maximum d'utilisateurs GPS est illimité. Les récepteurs commercialisés dans le domaine civil utilisent le code C/A. Quelques récepteurs pour des applications de haute précision, comme la géodésie, mettent en œuvre des techniques permettant d'utiliser le code P malgré son chiffrement en code Y.

Schéma de principe d'un récepteur GPS

La conception d'un récepteur varie selon le constructeur, mais chaque récepteur ont en commun un certain nombre éléments.



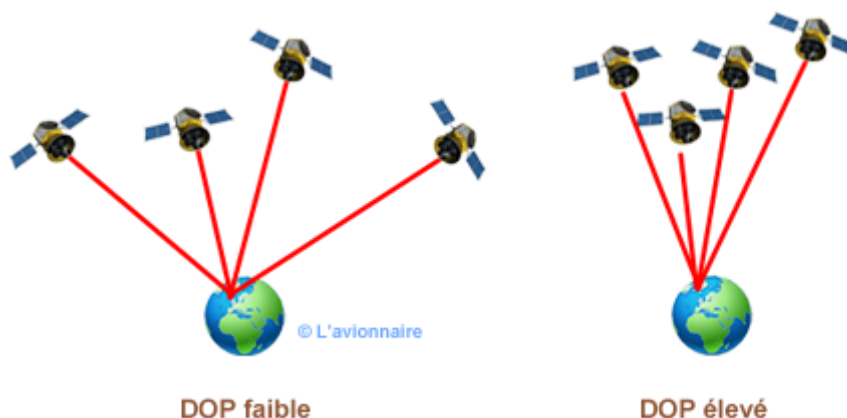
Les horloges

L'estimation de la distance étant fondée sur la mesure du temps de transit réel d'un signal d'un satellite vers un récepteur, il est essentiel que les horloges du satellite et du récepteur soient synchronisées. Seules les horloges atomiques permettent d'atteindre la précision nécessaire à

un bon positionnement. Mais vu leur poids, leur coût, cette solution était incompatible avec les objectifs d'un système de navigation léger et bon marché. La base de temps des récepteurs GPS provient d'oscillateur à quartz, qui peuvent aller d'un simple composant électronique fournissant du 10 MHz pour un appareil de type GPS. Mais, dans tous les cas, ces oscillateurs ne sont pas assez précis pour être utilisables pour le positionnement. Les ingénieurs du système GPS ont résolu le problème en utilisant un quatrième satellite pour synchroniser l'horloge du récepteur GPS. Dès que le récepteur reçoit les signaux d'un satellite, il cale son horloge avec un certain retard sur celle donnée par le satellite et cherche à acquérir les signaux des autres satellites visibles. Lorsqu'il reçoit trois satellites, il peut (leur position est connue) déterminer les cercles d'interception entre la sphère correspondant à un signal émis par les satellites et la sphère terrestre. Dans la plupart des situations, le récepteur reçoit les signaux issus de plus de quatre satellites, ce qui permet d'améliorer la qualité de la synchronisation et du positionnement, d'éliminer les données les moins fiables et d'accéder à l'information sur l'altitude.

Géométrie des satellites

Le récepteur utilise la trilatération des signaux GPS pour déterminer sa position sur la terre, plus la géométrie des satellites est bonne (satellites bien répartis dans le ciel), plus la trilatération qui en résulte est précise. L'effet de la géométrie des satellites sur les erreurs de positionnement est appelé DOP (Dilution of Precision ou affaiblissement de la précision). Le DOP dépend seulement de la position des satellites : combien de satellites sont visibles, quels sont leurs altitudes dans le ciel, l'angle de vision. Le récepteur GPS calcule constamment la valeur DOP en fonction des satellites utilisés pour d'établir sa position.



Ci-dessus à gauche les satellites sont bien répartis dans le ciel, ils sont éloignés entre eux. Le facteur DOP sera donc bon, à savoir proche de 1.

À droite les satellites sont très proches, mal répartis. La mesure est donc peu fiable, on obtiendra un DOP élevé, supérieur à 7. Dans le cas où un nombre suffisant de satellites sont visibles, le récepteur peut donc choisir de rajouter ou d'enlever des satellites pour la mesure, en prenant la configuration où le facteur DOP est le meilleur.

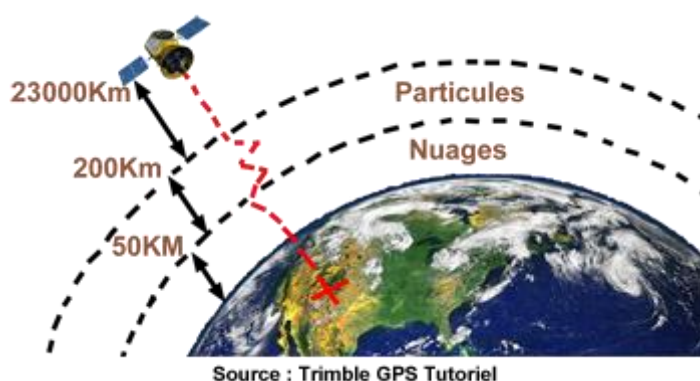
Sources d'erreurs

Dégradations volontaires

Une erreur aléatoire intentionnelle peut être appliquée aux signaux GPS par le Département américain de la Défense afin de réduire la précision des applications civiles. Cette "disponibilité sélective" connue sous le nom Selective Availability a été mise en fonction en 1990 pour empêcher des ennemis de localiser avec précision des objectifs civils ou militaires. Le 1er mai 2000, le président Bill Clinton mettait fin à cette dégradation volontaire du service. Elle pourrait être théoriquement réactivée mais cette option est peu possible aujourd'hui.

Erreurs dues aux particules

Nous avons vu que la distance entre satellite et récepteur était basée sur la vitesse de la lumière. Mais celle-ci n'est constante que dans le vide. Le signal GPS passant à travers les particules chargées de l'ionosphère, puis à travers de la vapeur d'eau dans la troposphère, ralentit un peu le signal et cela crée la même erreur qu'une mauvaise horloge.



Erreurs dues à l'ionosphère

L'ionosphère est la couche de l'atmosphère s'étendant en altitude de 50 à 500 km. Elle se compose en grande partie de particules ionisées qui peuvent exercer un effet perturbateur sur

les signaux GPS. L'ionisation est surtout causée par les courtes longueurs d'ondes du rayonnement solaire (rayons X et ultraviolets) au cours de la journée. Bien qu'une grande partie de l'erreur induite par l'ionosphère puisse être éliminée par la modélisation mathématique, elle reste l'une des sources d'erreur les plus significatives.

Erreurs dues à la troposphère

La troposphère est la partie inférieure de l'atmosphère terrestre. Elle est remplie de vapeur d'eau et sa température et sa pression varient d'un endroit à un autre. Il existe plusieurs façons de minimiser ce type d'erreur notamment par modélisation. C'est-à-dire prédire ce qu'est un retard spécifique pourrait être sur une journée spécifique.

Erreurs dues aux horloges

Même si les satellites sont très sophistiqués, il y a quelques erreurs minuscules dans le système. Les horloges atomiques qu'ils utilisent sont très, très précises, mais elles ne sont pas parfaites et l'horloge d'un satellite n'est qu'imparfaitement accordée sur le temps GPS. Il peut donc y avoir des divergences qui se traduisent par des erreurs de mesure du temps, et la position calculée sera quelque peu inexacte.

Erreurs orbitales

Ce sont des inexactitudes de positionnement du satellite obtenues dans l'information du signal diffusé. En effet la prévision de l'emplacement qu'occupera un satellite à un moment donné peut différer de sa position réelle. Bien que des mesures faites par le segment de contrôle GPS qui surveille l'emplacement des satellites à tout moment, soient adoptées pour prévoir au mieux les positions des satellites (ou les orbites), elles ne peuvent être prévues chaque fois à la perfection.

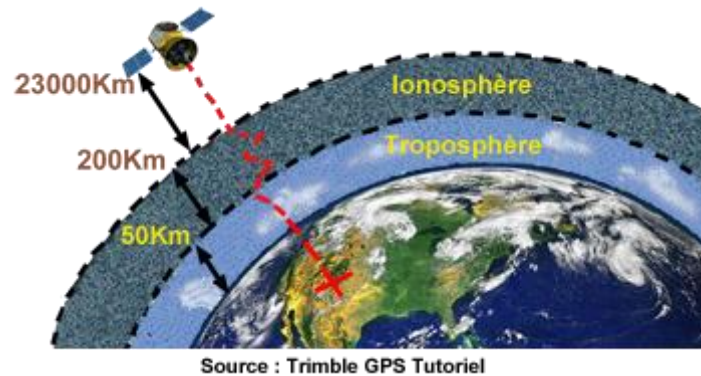
Erreurs bruit du récepteur

Ce sont les erreurs causées par le processus de mesure utilisé par le récepteur.

Erreurs dues au multi-trajets

Tout le concept de GPS repose sur l'idée qu'un signal GPS va directement du satellite au récepteur. Malheureusement les signaux peuvent être réfléchis ou diffractés (sol, bâtiments

...), et prendre plus de temps à arriver que prévu, et donc de parcourir un chemin plus long que la normale depuis le satellite au récepteur GPS. C'est ce qu'on appelle l'erreur multipath. Les récepteurs sophistiqués utilisent un système de traitement du signal pour s'assurer que le signal arrive directement.



Récapitulatif des erreurs

Types et grandeurs des erreurs pour chaque satellite en mètres:

Erreurs dues à ionosphère	5
Erreurs dues à la troposphère	0,5
Horloges des satellites	1,5
Erreurs orbitales	2,5
Erreurs de bruit du récepteur	0,3
Erreurs dues aux multitrajets	0,6