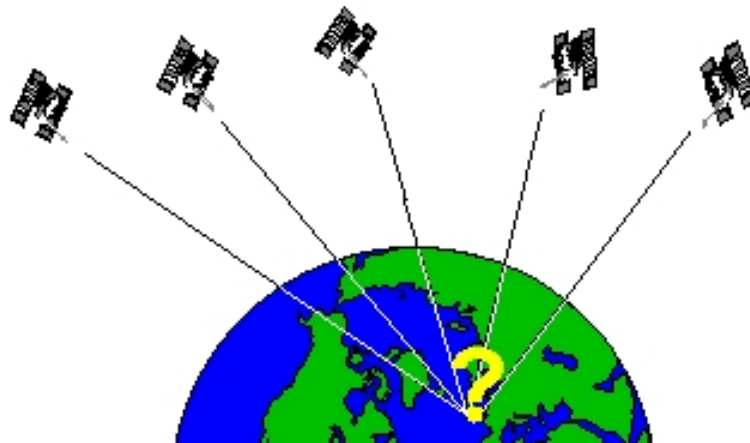


GLOBAL POSITIONING SYSTEM

*Principes généraux de la
localisation par satellites*



Jean-Luc Cosandier
Avril 2003

Index

Index	2
Introduction	3
<i>Segment de contrôle</i>	4
<i>Segment spatial</i>	5
<i>Segment utilisateur</i>	6
<i>Référentiel de position</i>	8
<i>Temps GPS et UTC</i>	9
Signaux GPS	10
<i>Propriétés générales du signal GPS</i>	11
<i>Code C/A</i>	12
<i>Code P et code Y(P)</i>	12
<i>Message de navigation</i>	12
Récepteur GPS	14
<i>Antenne</i>	14
<i>Conversion du bruit en signal</i>	14
<i>Récupération des données GPS</i>	15
<i>Types de récepteur GPS</i>	18
Calcul du point	19
<i>Principe de base</i>	19
<i>Positionnement par GPS</i>	19
<i>Mesure des pseudo-distances</i>	20
<i>Fonctionnement avec une ou plusieurs grandeurs fixes</i>	21
<i>Mesure par la phase de la porteuse</i>	22
Sources d'erreurs	23
<i>Selective Availability</i>	23
<i>Anti-Spoofing</i>	24
<i>Erreurs du segment spatial</i>	24
<i>Erreurs atmosphériques</i>	25
<i>Multi-trajets</i>	25
<i>Bruit du récepteur</i>	25
<i>Lois de Kepler</i>	26
<i>Effets relativistes</i>	27
GPS différentiel	28
Utilisation du GPS avec d'autres senseurs	29
Système Galileo	30
Annexes	31

Introduction



Le GPS est un système de navigation à base de satellites conçu pour fournir instantanément des informations de position, de vitesse et de temps pratiquement à n'importe quel endroit sur terre, n'importe quelle heure et par n'importe quelles conditions météorologiques.

La désignation NAVSTAR GPS signifie :

«NAVigation Satellite Timing And Ranging Global Positioning System»

Le GPS permet un positionnement instantané avec une précision qui va d'une centaine de mètres à quelques mètres (95% des cas). Certains équipements permettent, après corrections différées des mesures, d'atteindre des précisions de l'ordre du centimètre. Il est bien clair que les meilleures performances nécessitent une infrastructure conséquente et engendre des coûts plus importants.

Les principales étapes dans le développement du système GPS ont été :

- 1973, début du programme sous l'égide du *Department of Defense* des USA (DoD).
- 1974-85, essais des premiers récepteurs, lancements des premiers satellites du "block I".
- 1983, "accident" avec le Boeing-747 de Korean Airlines (KAL 007) abattu par un Mig soviétique. Le système de navigation s'ouvre aux applications civiles.
- 1986, poursuite de l'évolution du système avec les lancements des satellites du "block II".
- 1990 (25 mars), mise en fonction de la SA.
- 1991, la SA est momentanément désactivée durant la première Guerre du Golfe ce qui entraîne une fantastique promotion du GPS.
- 1995 (17 juillet), les USA annoncent que le système GPS est pleinement opérationnel.
- 1997, lancements des satellites du "block IIR"
- 2000 (1er mai), la SA est désactivée.

... A suivre...

Bien que développé dans un but essentiellement militaire, les applications civiles du GPS ont connu depuis quelques années un essor considérable. Le système reste néanmoins sous contrôle de l'*US Air Force* et du *Dod*. Il est cependant à noter que depuis 1995, le *Department of Transport* (DoT) qui représente les "voix" civiles a également un pouvoir de décision.

Parmi les utilisations civiles actuelles du GPS, on peut citer :

- La navigation en générale (course pédestre, marine, aviation, automobile...).
- La surveillance d'ouvrages de génie civil.
- Les relevés géométriques et topographiques.
- Le transfert de temps.

... Cette liste n'est de loin pas exhaustive !

Du point de vue fonctionnel, le système GPS est composé de trois segments principaux : le **segment de contrôle** (control segment), le **segment spatial** (space segment) et le **segment utilisateur** (user segment).

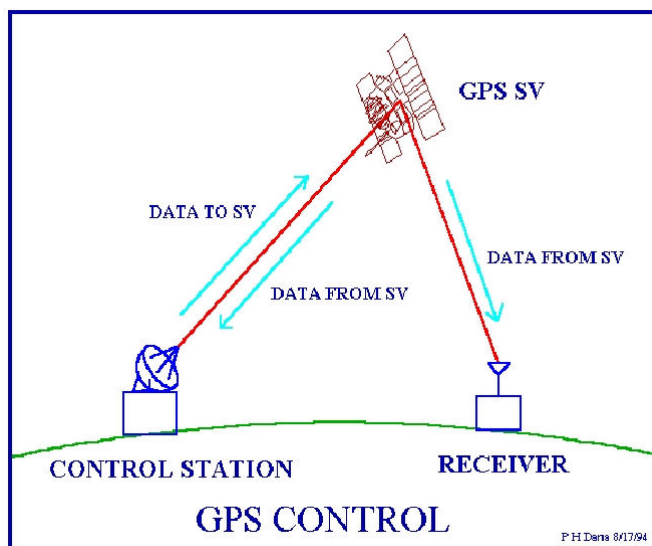
Segment de contrôle

Constitué de cinq stations terrestres.



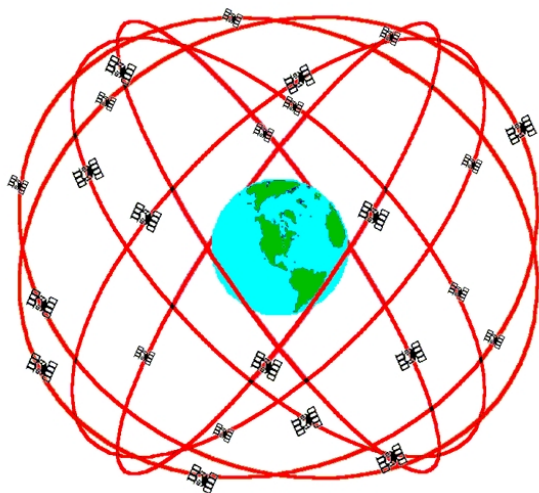
Global Positioning System (GPS) Master Control and Monitor Station Network

Localisation du segment terrestre



Ces stations sont en quelque sorte les "yeux" et les "oreilles" du GPS; elles reçoivent des informations fournies par les satellites. On assure ainsi le contrôle et la mise à jour des paramètres du système (données orbitales, performances des horloges embarquées...) par un suivi permanent du segment spatial. La disposition des stations tout autour de la Terre permet de suivre chaque satellite pendant 92% du temps. Les informations sont centralisées au "Master Control" de Colorado Springs. Des données de corrections peuvent être émises en direction des satellites par les stations des Iles Ascension, Diego Garcia et Kwajalein.

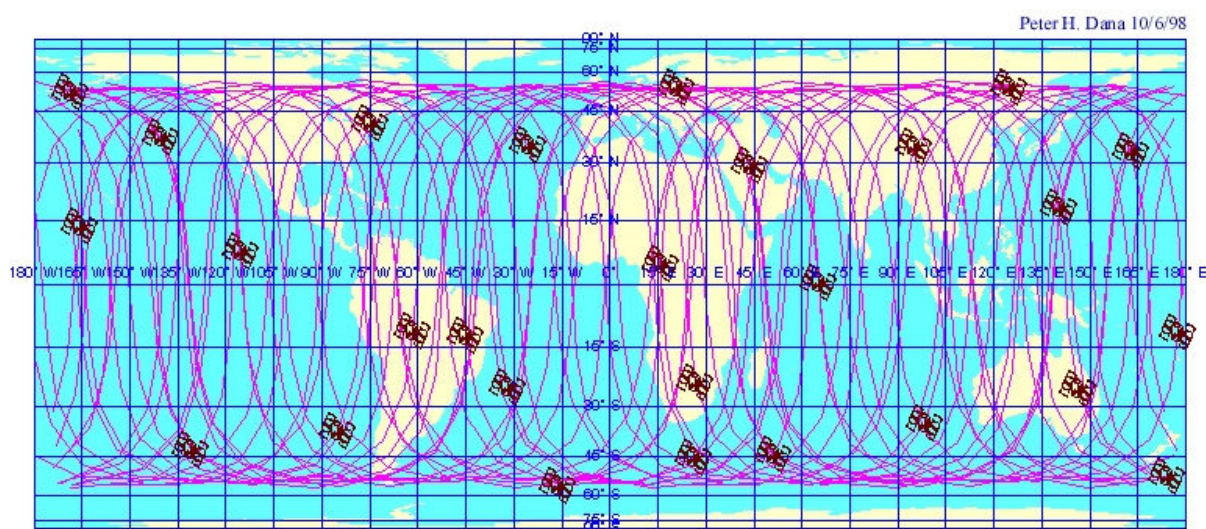
Segment spatial



Constitué d'une constellation de satellites placés en orbites quasiment circulaires (ellipses à faible excentricité, voir le paragraphe *Lois de Kepler*).

Données de la constellation GPS

- 24 satellites en orbite assurant une certaine redondance afin de garantir un nombre minimum de 21 unités opérationnelles dans 98% du temps. *En réalité, il y a aujourd'hui (mars 2003) 29 satellites opérationnels. Ceci s'explique par le fait que certain des plus anciens modèles fonctionnent toujours parfaitement, bien qu'ayant dépassé leur durée de vie prévue.*
- 6 plans orbitaux décalés de 60° entre eux.
- Inclinaison des orbites de 55° par rapport au plan de l'équateur.
- Altitude nominale des orbites : $\sim 20\,200\text{ km}$ au-dessus de la surface de la Terre.
- Période orbitale de 11h 58min.



Global Positioning System Satellites and Orbits
for 27 Operational Satellites on September 29, 1998
Satellite Positions at 00:00:00 9/29/98 with 24 hours (2 orbits) of Ground Tracks to 00:00:00 9/30/98

Segment utilisateur

Constitué par l'ensemble des récepteurs susceptibles de décoder les signaux de navigation transmis par les satellites et d'en déduire par calcul les solutions de position, de vitesse et/ou de temps. Un récepteur doit être capable de :

- Sélectionner plusieurs satellites parmi ceux qui sont visibles et acquérir les signaux GPS correspondants.
- Poursuivre les satellites sélectionnés (tracking).
- Extraire le message de navigation et calculer les solutions de position/temps.

Il y a actuellement deux types de service à disposition des utilisateurs :

SPS – Standard Positioning Service. C'est le service accessible par chacun basé sur l'exploitation du code C/A (Coarse Acquisition) transmis par la porteuse L1.

Performances dynamiques (à 95%)

- ***avec SA***
 - 174m en 3D, 100m en horizontal, 363ns
- ***sans SA (condition de fonctionnement depuis le 01.01.2000)***
 - 51m en 3D, 29m en horizontal, 0.2m/s par axe, 208ns

PPS – Precise Positioning Service. Présente le meilleur degré de précision dynamique et d'intégrité des données. Accessible uniquement par les personnes autorisées (armée US...). Basé sur l'exploitation des deux bandes de fréquence L1 et L2 ainsi que des code P (Precise et/ou Protected) et Y(P).

Performances dynamiques (à 95%)

- ***mono fréquence (L1)***
 - 51m en 3D, 29m en horizontal, 208ns
- ***bi fréquence (L1 + L2)***
 - 37m en 3D, 21m en horizontal, 0.2m/s par axe, 198ns

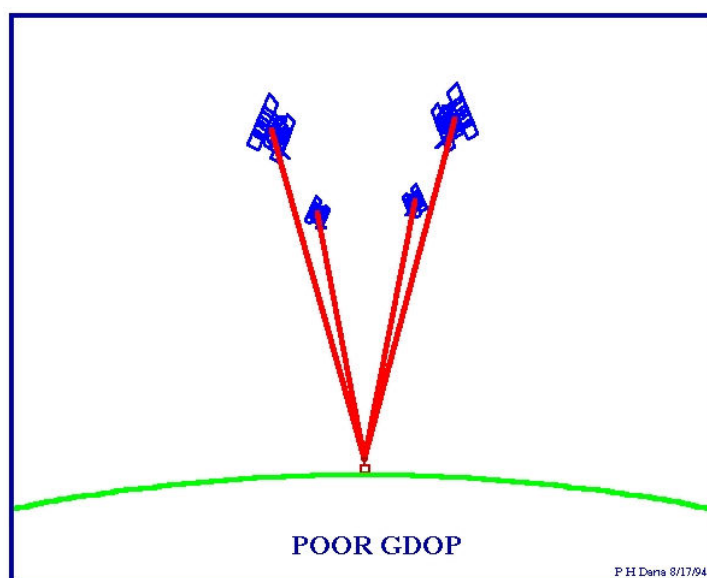
Remarque : Chiffres actuels (2003) sujets à modifications (améliorations...) futures.

Il est à noter que la précision de l'altitude est environ 1,5 fois moins bonne que celle de la position en 2D. Ceci est lié à la géométrie du système; il faudrait en effet être capable de suivre un satellite qui se trouve de l'autre côté de la planète pour avoir la même précision, ce qui est bien sûr impossible.

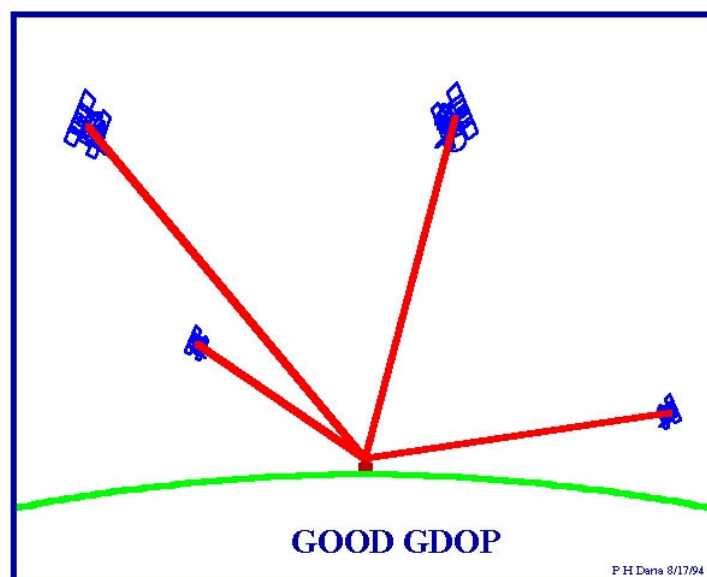
Les performances instantanées vont en fait dépendre d'un certain nombre de facteurs :

- La géométrie de la constellation; des satellites "bien répartis" diminuent l'incertitude de position (voir croquis ci-après).
- L'efficacité des algorithmes de correction des erreurs (voir chapitre *Sources d'erreurs*).

- Le nombre de satellites suivis. Bien qu'il faille 4 satellites pour assurer le positionnement, une certaine redondance permet de mieux affiner le calcul.
- Le rejet éventuel des satellites trop bas sur l'horizon. Sauf exception, il convient de ne pas tenir compte des satellites dont l'élévation est inférieure à 10 ou 15° car les signaux émis par ceux-ci sont sujets à diverses perturbations (couche d'atmosphère plus épaisse à traverser, multi-trajets...).



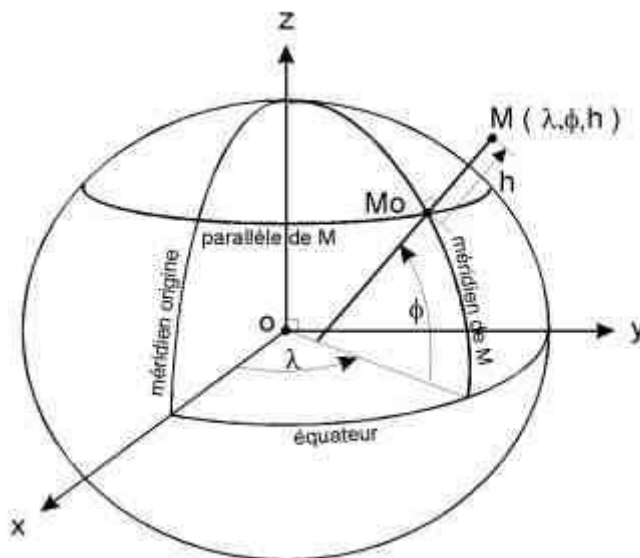
"Mauvaise" géométrie; incertitude plus grande.



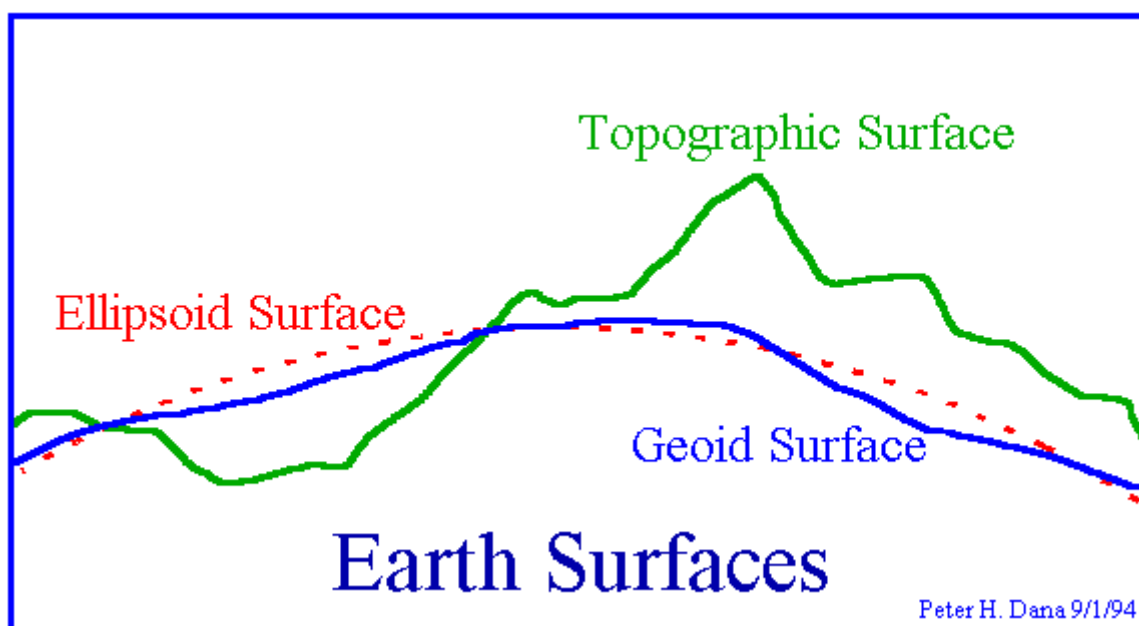
"Bonne" géométrie; incertitude réduite.

Référentiel de position

La constellation de satellite étant dynamiquement liée au centre des masse de la Terre, c'est en toute logique que le référentiel choisi pour le GPS s'y rapporte.



Le référentiel utilisé est le **WGS-84** (World Geodetic System version 1984) qui est un modèle de représentation "globale" de la Terre établi à partir de données géométriques et gravitationnelles. L'origine des axes correspond au centre massique de la planète. Les coordonnées sont issues de la combinaison de *l'ellipsoïde de référence* et du *géοïde* (surface d'équigravité). Le méridien d'origine est celui de Greenwich.



"Surfaces" terrestres.

Temps GPS et UTC

Le temps est une donnée fondamentale de la navigation. Il existe plusieurs échelles de temps brièvement décrites ci-dessous.

Temps Universel (UT)

C'est un temps astronomique où la seconde est définie par $1/86'400$ du jour solaire moyen.

Temps Atomique International (TAI)

Ce temps est établi par le Bureau International des Poids et Mesures de Paris grâce à environ 250 étalons (horloges césium et maser à hydrogène) répartis dans le monde. La seconde *atomique* est définie comme étant la durée de $9'192'631'770$ périodes de la radiation correspondante à la transition entre les deux niveaux hyper fins de l'état fondamental du césium 133...

C'est un temps "papier" car calculé à posteriori de manière statistique selon les données reçues de chaque étalon.

Temps Universel Coordonné (UTC)

C'est le *Temps Atomique* (TAI) auquel on ajoute ou on enlève un nombre entier de secondes afin de rester dans la même seconde que le *Temps Universel* (UT).

Temps GPS

Le temps GPS est un temps "composite" calculé à partir des éléments suivants :

- UTC(USNO), fourni par le *US Naval Observatory*,
- UTC(AMC), Alternate Master Clock au centre principal de contrôle du GPS. Ce temps est lui-même asservi par UTC(USNO).
- Horloges embarquées dans les satellites.

Le temps GPS est donc lié au temps UTC (en pratique, il est maintenu à moins de 10ns de UTC). L'écart entre le temps GPS et le temps UTC est connu à chaque instant.

Signaux GPS

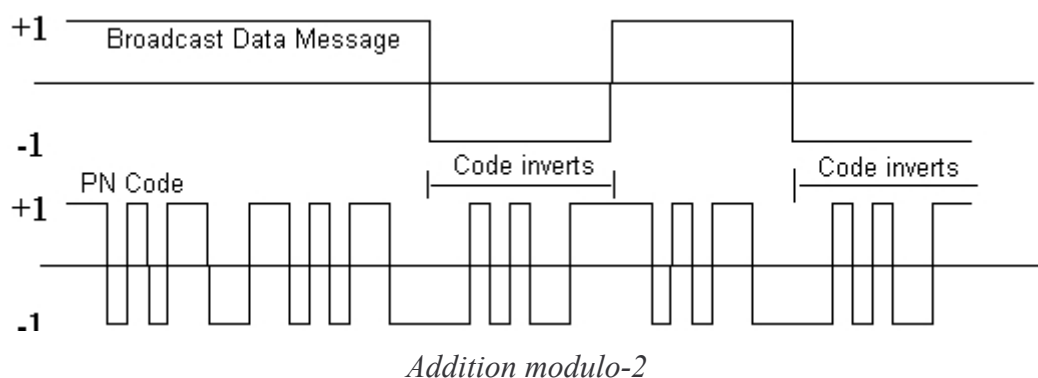
L'émission des signaux par les satellites se fait sur deux fréquences porteuses différentes nommées **L1** et **L2**. Les erreurs produites par la réfraction ionosphérique dépendent de la longueur d'onde et peuvent être fortement compensées en cas d'utilisation simultanée des deux fréquences.

Les porteuses des signaux GPS sont générées à partir de la fréquence d'horloge fondamentale des satellites, $f_0 = 10.23\text{MHz}$.

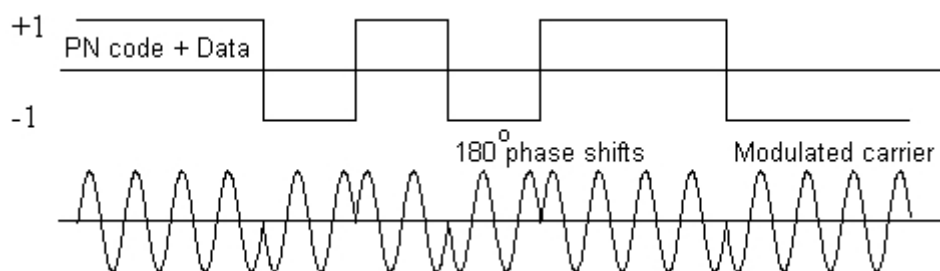
Bande	f [MHz]	λ [cm]
L1	$154 f_0 = 1575.42$	~ 19
L2	$120 f_0 = 1227.60$	~ 24

Note : les récepteurs civils n'utilisent en général que la bande L1, à l'exception notamment de certains équipements de géodésie !

Les porteuses sinusoïdales sont modulées par deux séquences binaires différentes, les codes **C/A** et **P** (codes pseudo-aléatoires ou PRN), eux même modulés par le **message de navigation** (Broadcast Message) qui contient les informations nécessaires au calcul de la solution de position. Le signal transmis résulte de l'addition modulo-2 du message de navigation et des codes.



Une modulation de type BPSK (Binary Phase Shift Keying) est utilisée pour moduler la porteuse avec le code obtenu précédemment.

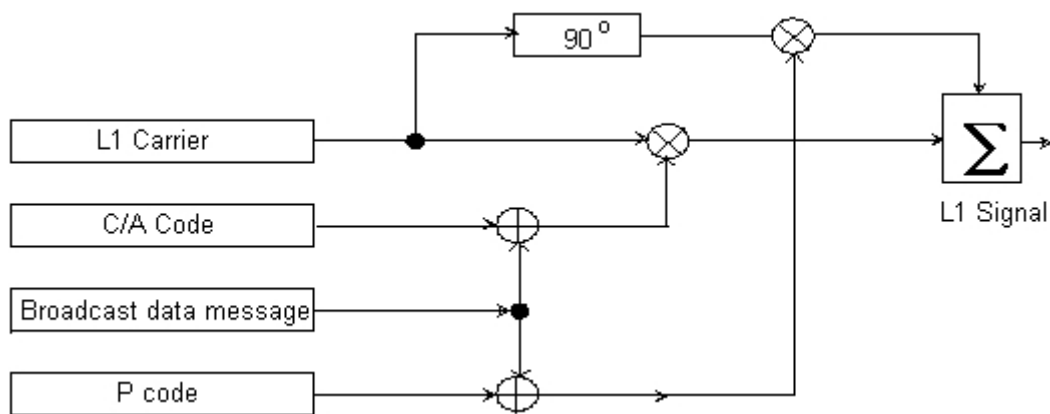


Modulation BPSK de la porteuse (L1) par le code C/A et le message de navigation

Le code est ainsi directement "multiplié" avec la fréquence, il en résulte un saut de phase de 180° de la porteuse à chaque changement d'état du code.

Cette technique de modulation à étalement de spectre (spread spectrum modulation) permet d'augmenter fortement l'intégrité des données transmises.

La porteuse L1 étant modulée par deux codes distincts (C/A et P), il est préférable que ceux-ci n'interfèrent pas entre eux. Pour cela le code P module la porteuse en quadrature de phase (90°). De plus, la partie correspondante au code C/A est amplifiée afin d'obtenir une amplitude plus élevée de 3 à 6dB.



Structure du signal sur L1

La porteuse L2 est modulée de la même façon.

Propriétés générales du signal GPS

- Fréquence fondamentale interne de l'horloge satellite : $f_0 = 10.23\text{MHz}$.
- Message de navigation : 50 bits/s sur L1 et L2.

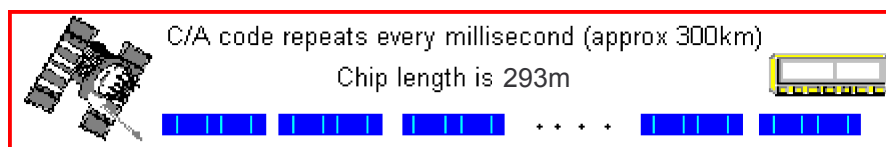
Bande GPS	L1		L2
Fréquence de la porteuse	1575.42 MHz (= $154 \cdot 10.23\text{MHz}$)		1575.42 MHz (= $120 \cdot 10.23\text{MHz}$)
Code	C/A	P	P
Puissance	-160 dBW	-163 dBW	-166 dBW
Débit	1.023 Mchips/s	10.23 Mchips/s	10.23 Mchips/s
Modulation	BPSK	BPSK	BPSK

Note : selon que le satellite s'approche ou s'éloigne du récepteur ou encore que celui-ci est en mouvement (véhicule), il faut mesurer et tenir compte du décalage des fréquences causé par l'effet Doppler.

Code C/A

Le code C/A (Coarse Acquisition) est un code binaire pseudo-aléatoire (PRN code) constitué de 1'023 éléments (chips) qui se répète avec une période de 1ms. Le terme «pseudo-aléatoire» est utilisé car le code en a l'apparence bien que périodique et généré par un algorithme parfaitement connu.

Du fait de la périodicité du code C/A, il en résulte une ambiguïté au niveau du récepteur. En effet la durée du code (1ms) se propageant à la vitesse de la lumière (env. $3 \cdot 10^8$ m/s) correspond à une distance d'environ 300km. Le code se répète lui-même tout les 300km.



Représentation du code C/A

Le code C/A est une séquence de type *codes de Gold*. Ces codes présentent la particularité d'avoir de très bonnes propriétés d'auto-corrélation et une faible inter-corrélation, ce qui facilite le travail du récepteur.

La transmission des données GPS se fait selon le principe CDMA (Code Division Multiple Access), c'est à dire que chaque satellite de la constellation émet sur une seule et même porteuse un code C/A qui lui est propre. Les codes C/A de chaque satellite étant parfaitement connus, le récepteur peut ainsi identifier les unités qu'il capte.

Code P et code Y(P)

Le code P est une longue séquence binaire non répétitive dont la durée vaut une semaine. Son exploitation nécessite l'accès à des informations particulières et du matériel (hardware) adapté. Elle est de ce fait limitée à une certaine catégorie d'utilisateur (armée US...). Le code Y(P) est une version cryptée du code P.

Message de navigation

Il constitue la base du fonctionnement pour le récepteur car il contient toutes les informations nécessaires pour :

- Synchroniser l'horloge interne du récepteur.
- Calculer le point (position),
 - corrections de temps
 - éphémérides des satellites (position, données orbitales...)
 - modèle de correction ionosphérique
- Accrocher les autres satellites
 - almanachs, états de "santé"

Chaque satellite émet – entre autre – une complète description de ses propres données d'orbite et de temps, c'est l'**éphémérides**.

Les **almanachs** quant à eux constituent les données orbitales et temporelles approximatives des autres satellites de la constellation. Le récepteur est ainsi en mesure de prédire les signaux qu'il va capter (accrochage plus rapide des satellites).

Un paramètre important concerne l'état de "santé" des satellites. En effet, un satellite en panne et déclaré comme tel sera rejeté par le récepteur. On se prémunit de cette façon contre certaines erreurs de calcul de position.

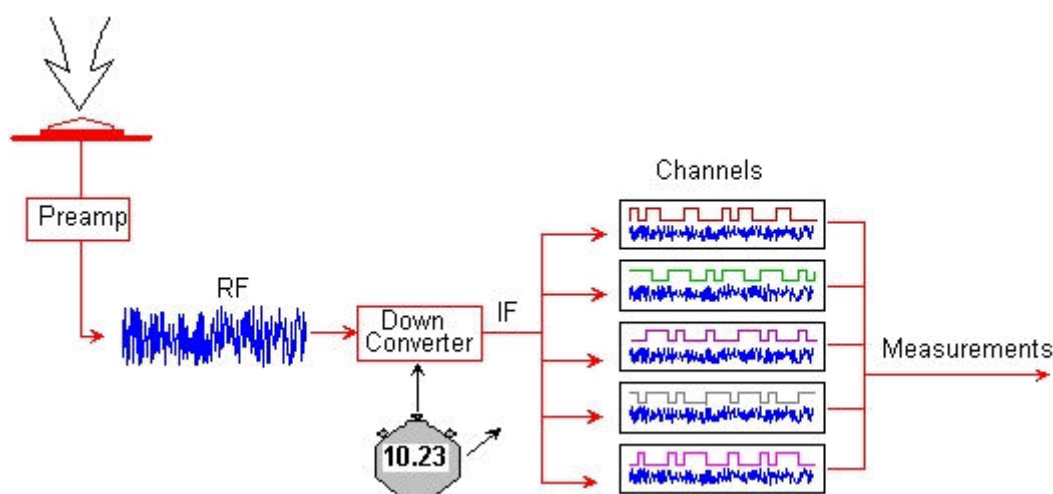
Vu la taille conséquente du message de navigation – due à la quantité importante de données ainsi qu'à sa structure censée garantir l'intégrité de son contenu (répétition de trames particulières...) et à la relative lenteur du débit (50 bits/s) – il faut 12.5 min pour une transmission complète de toutes les données.

Afin de réduire le temps nécessaire pour obtenir une position initiale, les éphémérides et données d'horloge sont répétées toutes les 30s.

Récepteur GPS

Le rôle du récepteur GPS est en premier lieu de détecter les signaux transmis par les satellites et de les convertir en données utilisables. Au cours du voyage des signaux à travers l'atmosphère, il y a une atténuation sensible de leurs amplitudes sans compter les perturbations diverses qui apparaissent inévitablement. D'où la nécessité d'avoir un code à étalement de spectre et présentant de bonnes propriétés d'auto-corrélation, comme décrit précédemment.

Le procédé permettant de retrouver un signal noyé dans du bruit est décrit de manière très succincte ci-dessous.



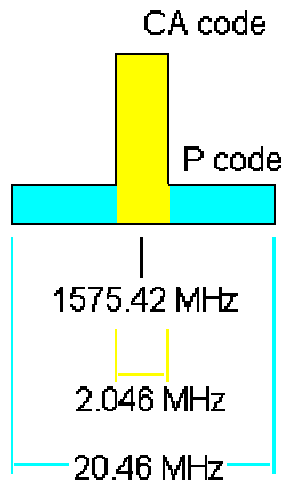
Antenne

L'antenne GPS est généralement active (gain : 3...35dB) et conçue de façon à être omnidirectionnelle. Elle est connectée au récepteur par un câble coaxial qui, outre la conduction du signal GPS lui-même, permet d'alimenter le préamplificateur d'antenne (alimentation "fantôme" fournie par le récepteur).

Le préamplificateur d'antenne augmentant l'amplitude du signal reçu, il est possible d'utiliser des câbles coaxiaux d'une certaine longueur (compensation de l'atténuation du câble). Certains récepteurs ont une fonction permettant la compensation du temps de propagation dans le câble d'antenne (applications de transfert de temps...).

Conversion du bruit en signal

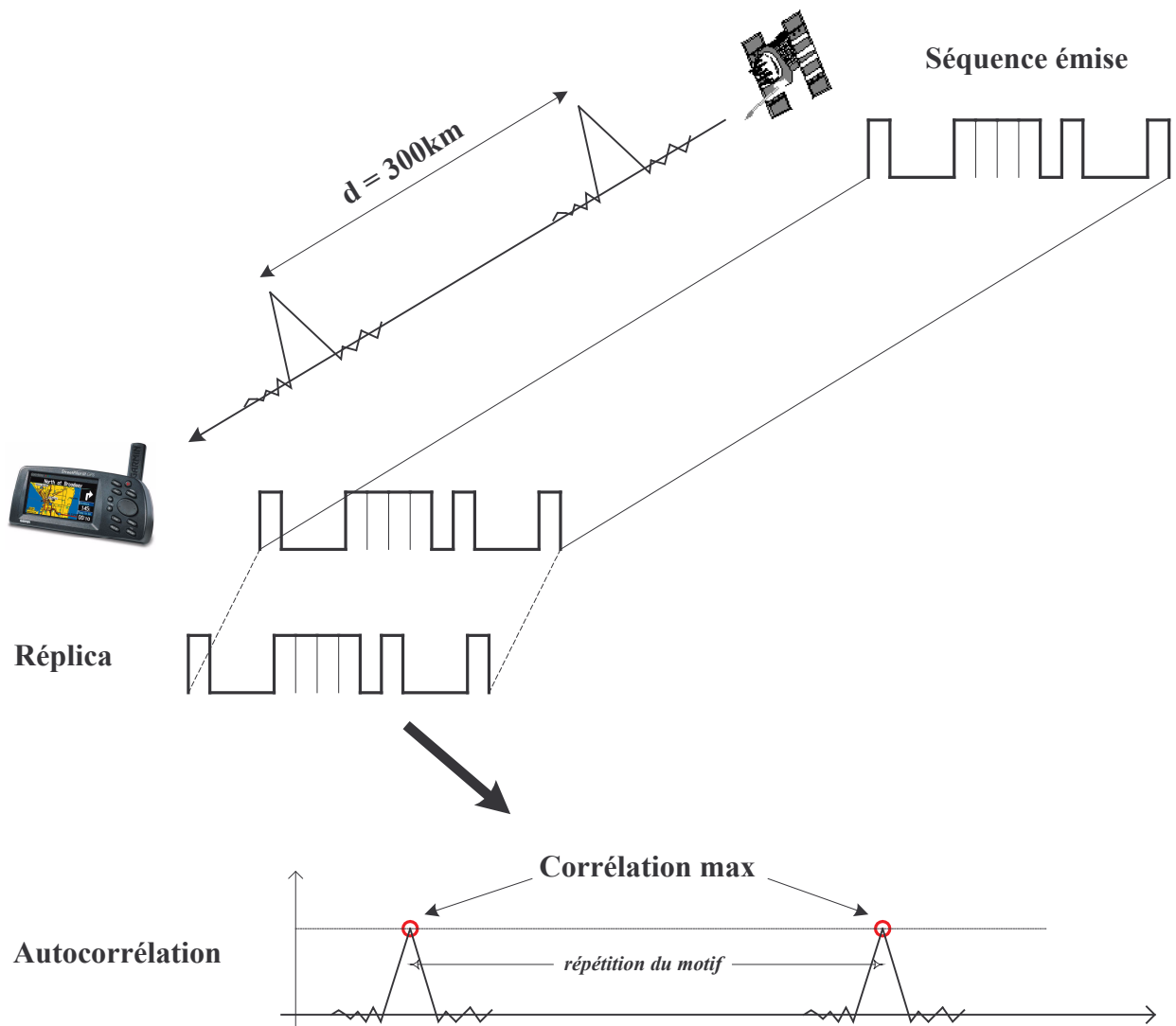
Le signal passe en premier lieu à travers un filtre de type passe-bande qui rejette les fréquences indésirables de part et d'autre de la porteuse L1. En général, le filtre présente une fréquence centrale de 1575.42MHz avec une largeur de bande de 20MHz. Il en résulte une *radio fréquence* (RF).



On effectue alors une démodulation (Down Converter) de telle façon à obtenir un signal de basse fréquence qui est ensuite débarrassé d'une part du bruit résiduel à l'aide de filtres passe-bas dont les largeurs de bande typiques sont 2MHz pour le code C/A et 20MHz pour le code P. Le signal obtenu est appelé *fréquence intermédiaire* (IF).

On peut alors procéder à la numérisation du signal. Deux signaux numériques, l'un en phase (I) et l'autre en quadrature (Q) sont créés.

Récupération des données GPS



Processus de corrélation

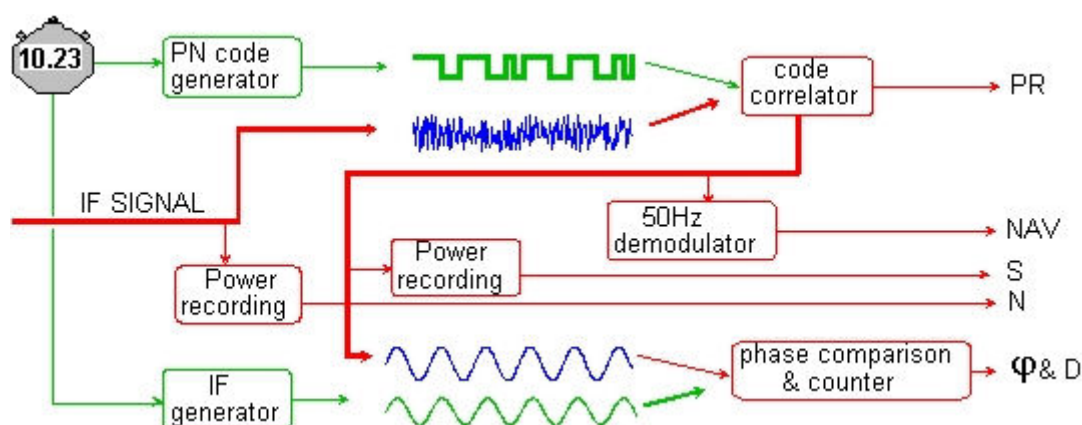
Des copies du signal IF numérique sont envoyées en parallèle dans des canaux séparés. Le nombre de satellites pouvant être suivis simultanément dépend du nombre de canaux de traitement à disposition (le récepteurs actuels comportent couramment 8 à 12 canaux).

Chaque canal a pour tâche d'extraire le code C/A (ou P), le message de navigation et éventuellement la phase de la porteuse d'un satellite en particulier. Pour cela, une réplique du code est générée par un NCO (Numerically Controlled Oscillator) et est corrélée avec le signal IF.

Lorsque la réplique du signal se superpose avec les données noyées dans le bruit, il y a corrélation et on observe un pic d'énergie. Cette technique suppose d'être en mesure de prédire quels signaux on doit recevoir à une date et un endroit donnés. Ces informations sont fournies par les almanachs; le récepteur est informé de l'état de la constellation et connaissant approximativement sa position et l'heure, il peut de ce fait générer la bonne réplique.

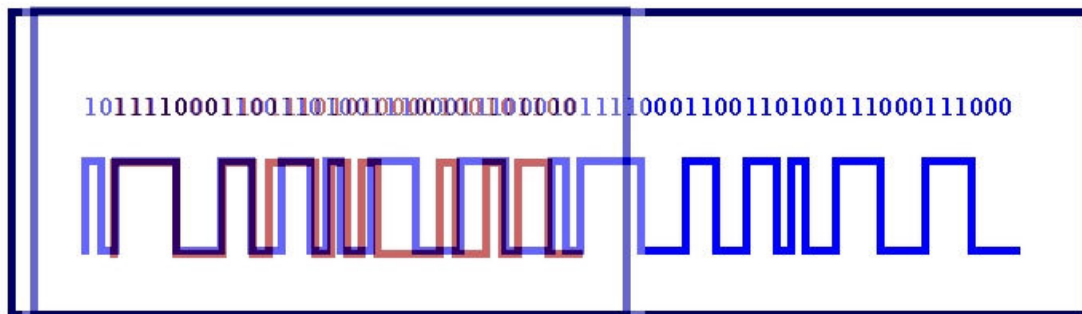
Une question se pose immédiatement. A l'enclenchement, le récepteur ne connaît pas obligatoirement toutes les données – bien que beaucoup de modèles actuels soient munis d'une pile au lithium ou d'un accumulateur leur permettant de conserver en mémoire les derniers almanachs reçus, la dernière position calculée et de mettre l'heure à jour, ceci autorisant une capture plus ou moins rapide des satellites lors d'un redémarrage. Il est également généralement possible d'introduire manuellement les données initiales dans le récepteur.

Dans le cas contraire, il existe aujourd'hui des algorithmes permettant de retrouver tout d'abord un premier satellite par itérations successives, puis ensuite de reconstituer toutes les données au fur et à mesure que les informations parviennent de la constellation. Généralement, l'opération peut prendre 5 à 15 minutes selon les conditions.



Quelques données extraites

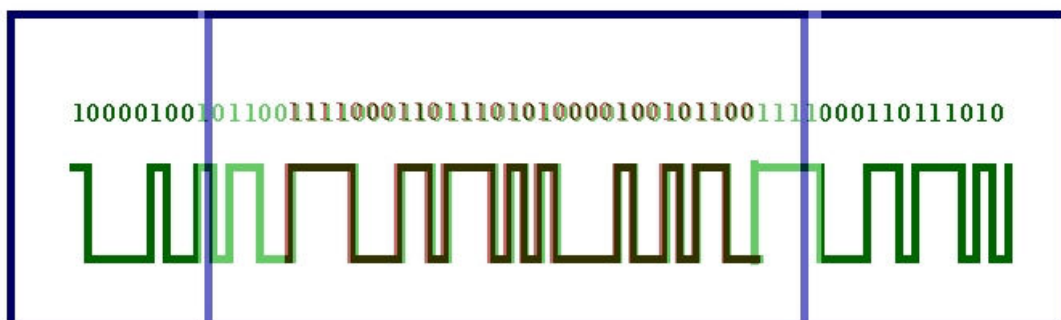
- **PR** (pseudo-range) : mesure de la pseudo-distance entre le satellite et le récepteur (voir le chapitre *Calcul du point*).
- **NAV** : message de navigation (éphémérides, almanachs, corrections d'horloge...)
- **S** et **N** : niveau du signal (S) et du bruit (N), permet de chiffrer la qualité de réception avec le rapport S/N (valeur typique : 35..45 dB-Hz)
- **ϕ** : phase de la porteuse. Cette mesure combinée avec celle de pseudo-distance améliore la précision (utilisée notamment dans les récepteurs géodésiques)



No Correlation with a Different PRN Code



Partial Correlation of Identical Receiver and Satellite PRN Codes



Full Correlation (Code-Phase Lock) of Receiver and Satellite PRN Codes

Types de récepteur GPS

On peut classer les récepteurs civils en deux types.

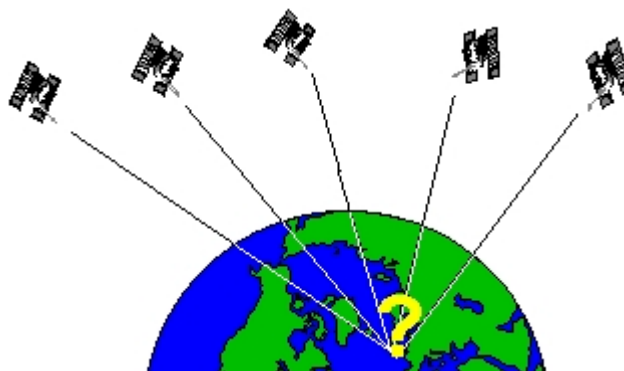
Récepteurs séquentiels – munis d'un seul canal pour l'extraction du code C/A, ils utilisent une technique de multiplexage pour passer d'un satellite au suivant. Ils sont en général conçus avec peu de composants, donc bon marchés et consommant une faible puissance. Leurs performances sont cependant limitées par le principe même du multiplexage (perte d'information, coupure du signal...).

Récepteurs parallèles – aussi connus sous le nom de *Récepteurs Continus*, munis de plusieurs canaux de traitement permettant l'analyse de plusieurs satellites simultanément et de manière continue. Leurs performances sont meilleures que dans le cas des récepteurs séquentiels. Les techniques de traitement du signal actuelles (DSP, FPGA...) en facilitent de plus en plus et à moindre coût la conception.

Calcul du point

Principe de base

La position est déterminée par l'intersection des "droites" reliant le récepteur aux satellites. Cette technique est appelée traditionnellement trilatération.



Les distances ne sont pas mesurées directement. Connaissant la vitesse de propagation ($\sim$ vitesse de la lumière) et la position des satellites (éphémérides), on peut calculer la distance entre le récepteur et le satellite capté en mesurant le temps mis par le signal pour effectuer le trajet. C'est la technique dite du TOA (Time Of Arrival). Il y a bien entendu tout une série de paramètres dont il faut tenir compte pour obtenir un résultat avec une précision suffisante (perturbations atmosphériques, incertitudes sur la position réelle des satellites, géométrie de la constellation, effet doppler...).

Positionnement par GPS

Il y a essentiellement deux grandes catégories de positionnement par GPS qui peuvent se résumer par les termes *navigation en temps réel* et *positionnement précis par phase de la porteuse*.

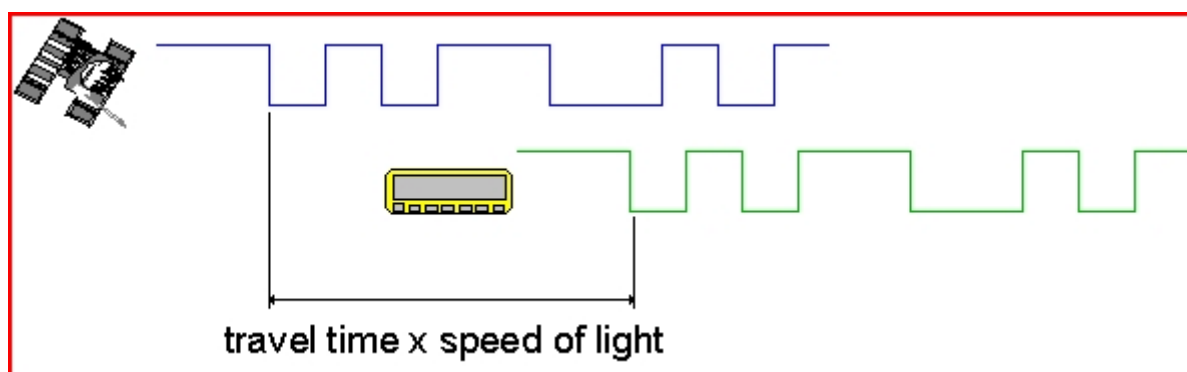
La navigation utilise un minimum de quatre mesures de pseudo-distance issues de quatre satellites différents pour résoudre le système de quatre inconnues – les coordonnées en 3D et l'offset entre l'horloge interne du récepteur et le système de temps GPS. La précision est de l'ordre de quelques dizaines de mètres. Une extension à cette technique est le GPS différentiel (DGPS) qui permet d'incorporer "en temps réel" des corrections d'erreurs fournies par une station fixe proche; on peut atteindre ainsi une précision de l'ordre du mètre.

La seconde catégorie donne de meilleurs résultats en terme de précision (il est possible d'atteindre des résolutions plus petites que 1cm). Elle associe à la mesure des pseudo-distances l'observation de la phase de la/des porteuse(s) L1 ou L1+L2. Elle nécessite deux stations de réceptions, le traitement des données pouvant se faire en temps réel ou de manière différée. Cette technique requiert un équipement relativement lourd et coûteux. Elle est notamment employée en géodésie.

Mesure des pseudo-distances

La mesure des pseudo-distances constitue le principe de base du système GPS (et de tout autre système de navigation par satellites).

Le processus de mesure détermine le temps mis par le signal (code) pour parcourir la distance séparant le satellite du récepteur. Ce temps multiplié par la vitesse de la lumière est ainsi converti en une distance.



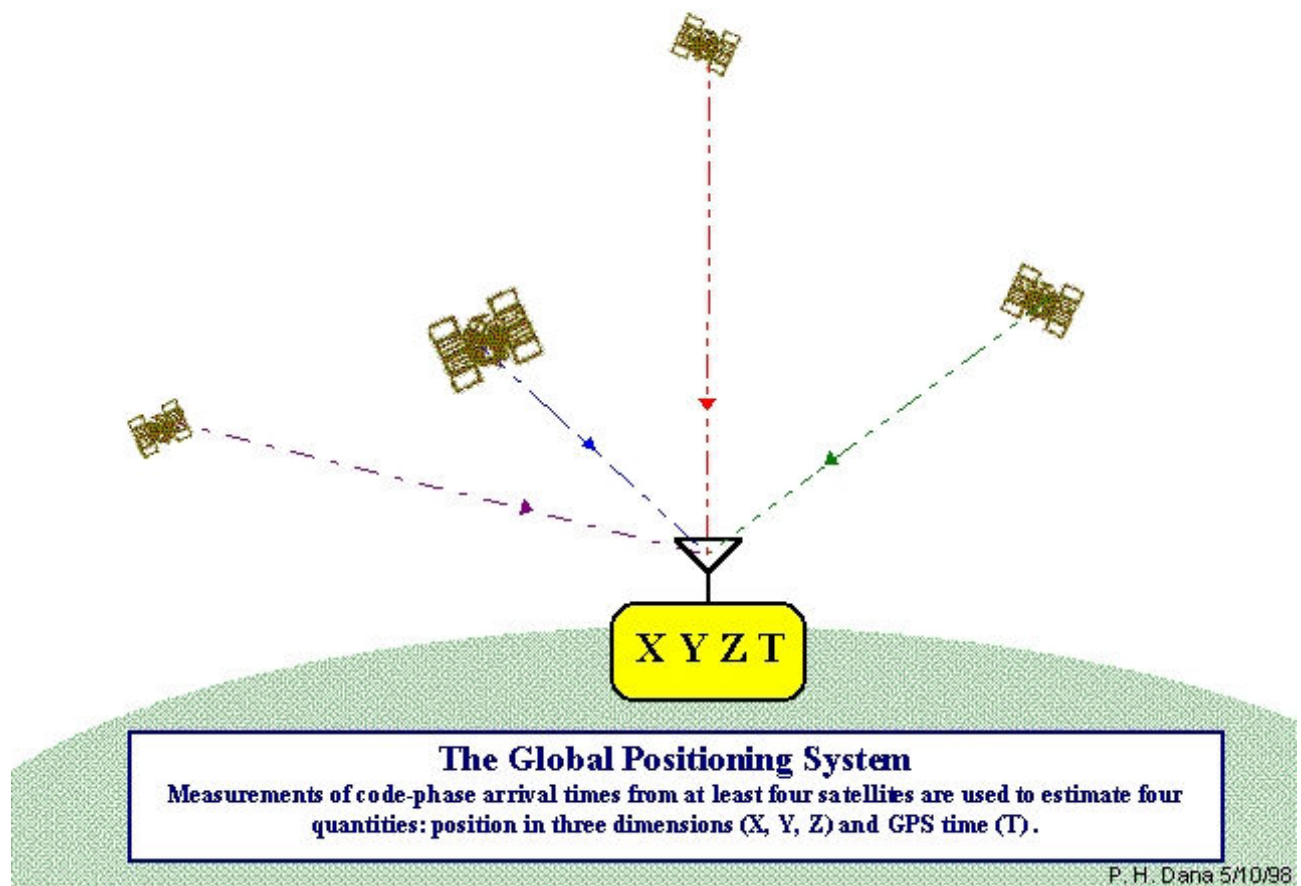
D'une manière très simplifiée, cela fonctionne à peu près comme ceci... A un certain moment, le code (C/A ou P) est généré puis transmis par le satellite pour être reçu par le récepteur quelques instants plus tard. Le récepteur compare l'état du code reçu avec celui de sa propre réplique – la différence est le temps de parcours. Le satellite transmettant sa position et l'heure d'envoi du message, le récepteur est à même de calculer sa propre position relative.

Deux problèmes apparaissent alors !

Les satellites "fabriquent" leur base de temps grâce à des horloges atomiques (césium) embarquées et dont les dérives sont surveillées et corrigées si nécessaire par le segment terrestre, tandis que les récepteur doivent se contenter d'un simple oscillateur (un récepteur équipé d'une horloge atomique serait passablement encombrant et surtout hors de prix !). L'horloge du récepteur n'est donc a priori pas synchronisée avec le temps GPS. Il y a de ce fait un offset de temps qui conduit à une erreur dans la mesure d'où le terme de **pseudo**-distance. Cependant, cette erreur peut facilement être calculée et compensée car toutes les pseudo-distances aux différents satellites ont le même offset au même moment.

On est en présence d'une système à quatre inconnues (latitude, longitude, altitude et temps) et il faut quatre équations pour pouvoir le résoudre. C'est pourquoi au moins quatre satellites sont nécessaires pour déterminer une position.

Le deuxième problème est lié à l'ambiguïté amenée par la longueur du code C/A (env. 300km). Au vu de cette particularité, on peut penser que la mesure n'est correcte que dans une plage de 0 à 300km. Or, la distance moyenne jusqu'aux satellites tourne autour de 20'200km ! Il existe cependant des algorithmes permettant de lever facilement et rapidement l'ambiguïté. La pseudo-distance réelle correspond alors à la mesure additionnée d'un nombre entier de fois 300km. Il est à noter que le code P ne présente pas ce genre d'ambiguïté, sa durée d'une semaine lui assurant en effet une longueur approximative de 181'440'000'000km !



Fonctionnement avec une ou plusieurs grandeurs fixes

Certaines applications ne nécessitent pas le calcul des quatre grandeurs. Une ou plusieurs de ces valeurs sont admises comme étant fixes et la solution peut être calculée avec moins de satellites.

En cas de redondance du nombre de satellites – ce qui est généralement le cas – il y a amélioration de la précision car le nombre d'équations reste le même mais avec moins d'inconnue.

Exemples

Transfert de temps. L'antenne est en position fixe et la position en 3D est préalablement déterminée par un moyennage des 10'000 premières mesures puis admise comme étant fixe. Il ne reste alors qu'une inconnue, le temps.

Navigation maritime. L'altitude est fixée, il reste alors la position en 2D et le temps comme inconnues.

Mesure par la phase de la porteuse

La détermination de la distance entre le satellite et le récepteur par la phase de la porteuse (L1 ou L1+L2) obéit au même principe que la mesure de la pseudo-distance, soit déterminer la durée de propagation du signal.

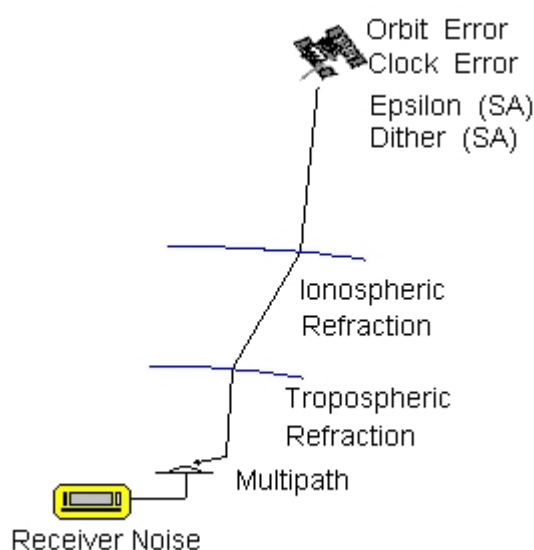
Les longueurs d'onde des porteuses L1 et L2 étant respectivement de 19 et 24 cm, on perçoit immédiatement l'ambiguïté dont est affectée la mesure !

Comme décrit plus haut, cette technique nécessite une infrastructure conséquente et coûteuse. Elle se justifie lorsque les précisions recherchées descendent en dessous du mètre.

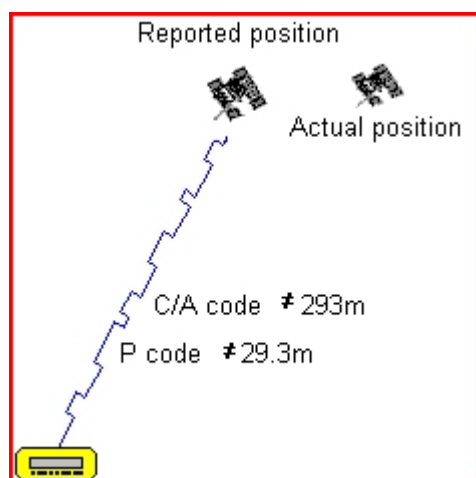
Sources d'erreurs

La précision de positionnement théorique à l'aide d'un récepteur GPS seul est de 20m (ou mieux) dans 95% du temps. En réalité, différentes perturbations diminuent cette performance. Ce sont les sources d'erreurs hardware, environnementales et atmosphériques.

De plus, des dégradations volontaires peuvent être ajoutées aux signaux afin de réduire la précision des applications civiles, qui passe de 20 à environ 100m. Deux aspects de ces "perturbations" sont connues sous les noms de **Selective Availability (SA)** et **Anti-Spoofing (AS)**.



Selective Availability



la SA est constituée essentiellement de deux composantes nommées *Dither* et *Epsilon*.

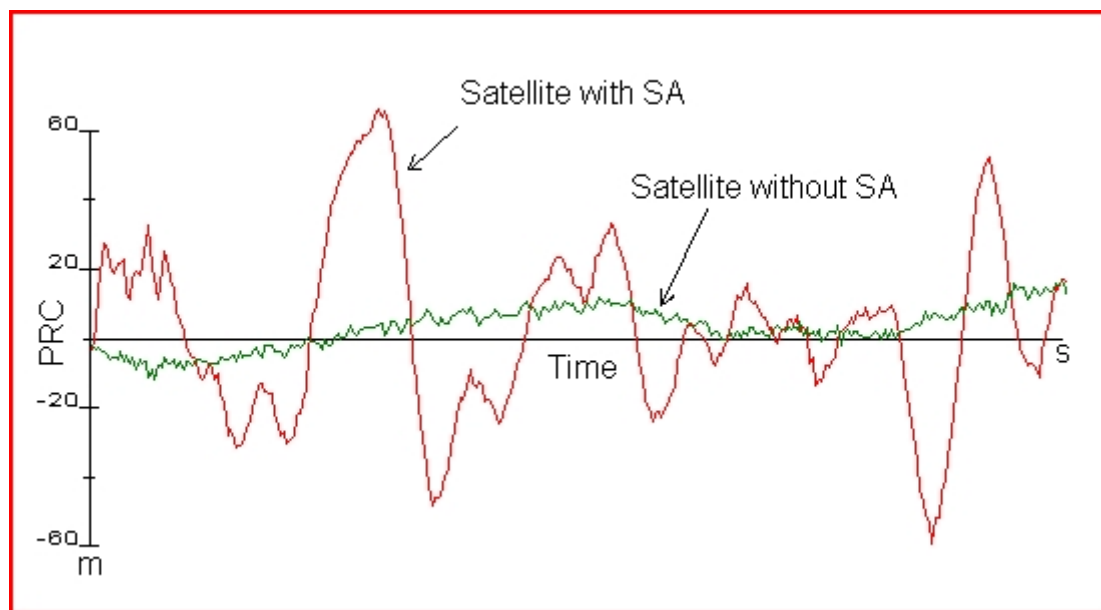
La composante *Dither* ($\approx$ hésiter) est une manipulation intentionnelle des fréquences d'horloge des satellites d'où une génération de signaux avec des longueurs d'ondes qui varient. En d'autres termes, la distance entre chaque chip de code C/A est variable autour de la valeur de 293m.

La composante *Epsilon* introduit des erreurs dans le message de navigation (modifications de éphémérides).

Il en résulte une erreur dans la mesure des pseudo-distances ce qui induit une certaine incertitude sur la position.

Les effets de la **SA** peuvent être compensés par qui dispose d'un matériel approprié et a accès aux clés de codage (armée US...).

La **SA** a été mise en fonction en 1990. Elle a subi une brève coupure en 1991 durant la 1^{ère} Guerre du Golf. Depuis le 1^{er} mai 2000, elle est désactivée sur décision de la Présidence des USA. Elle pourrait être théoriquement réenclenchée mais cette option est peu vraisemblable, les militaires américains ayant développés d'autres moyens pour s'assurer de leur avantage. La **SA** devrait être définitivement mise hors service d'ici 2006...



Exemple d'erreur : pseudo-distances en fonction du temps avec et sans SA

Anti-Spoofing

L'**AS** altère le code P en mixant celui-ci avec une séquence nommée code W. Il en résulte un code Y(P). L'**AS** a deux buts, le premier étant de restreindre l'accès au code P, le second étant de se prémunir contre un hypothétique leurrage des données. L'accès aux composants de décryptage du code Y(P) est soumis à autorisation.

Erreurs du segment spatial

Les erreurs non intentionnelles introduites par les satellites résultent principalement des incertitudes relatives aux offsets d'horloge et aux trajectoires orbitales. La cause de ces erreurs réside notamment dans la manière dont ces paramètres sont contrôlés par le segment terrestre. Les données de chaque satellite observable sont collectées par les stations de contrôle autour de la Terre puis acheminées à la station principale de Colorado Springs qui en déduit les paramètres futurs. Ces prévisions sont ensuite retournées aux différentes stations pour être transmises aux satellites. Les délais nécessaires à l'opération et les modèles mathématiques imparfaits conduisent à des erreurs similaires à celles causées par la **SA**, mais d'amplitudes nettement plus faibles.

Erreurs atmosphériques

Les signaux envoyés par les satellites traversent les différentes couches de l'atmosphère terrestre ce qui n'est pas sans conséquence. Deux couches sont généralement considérées quant à l'analyse des perturbations; la *ionosphère* (altitude 70..1'000km) et la *troposphère* (altitude 0..16km).

La ionosphère retarde la propagation du signal (la vitesse de la lumière est légèrement diminuée) et introduit une erreur dans la mesure de la pseudo-distance. La valeur du retard dépend de la latitude géomagnétique du récepteur, de l'heure du jour et de l'élévation du satellite. Des délais significativement plus long sont observés lorsque le satellite présente une faible élévation (plus grande largeur d'atmosphère à traverser pour parvenir au récepteur), durant la journée (radiation solaire), ou encore dans des régions proches de l'équateur géomagnétique ou des pôles.

Le retard ionosphérique dépend de la longueur d'onde du signal, aussi est-il possible d'en atténuer efficacement l'erreur par l'utilisation de récepteurs bi fréquences (L1+L2). Les récepteurs en bande L1 seule (en fait, la majorité des récepteurs civiles) "compense" en partie les erreurs ionosphériques à l'aide de modèles mathématiques.

Pour ce qui est de la troposphère, le retard ne dépend pas de la longueur d'onde et sa compensation se fait obligatoirement par des modèles mathématiques difficiles à élaborer. Dans le cas d'applications nécessitant une grande précision, il convient de prendre en compte la température, le degré d'humidité et la pression atmosphérique à l'endroit de la mesure.

Multi-trajets

Les multi-trajets (multipath) sont le résultat des réflexions multiples que peut subir le signal GPS avant de parvenir au récepteur, notamment sur les surfaces d'objets divers entourant l'antenne (sol, bâtiments, automobiles...). La surface la plus propice aux multi-trajets est le plan d'eau tandis que la moins propice est le terrain sablonneux.

Les multi-trajets conduisent à une erreur dans le calcul des pseudo-distances, le signal GPS ne parvenant pas au récepteur en ligne droite (allongement du trajet).

Les antennes sont généralement conçues pour limiter l'influence de ce phénomène. De plus, un positionnement judicieux de l'antenne et la réjection des satellites dont l'élévation est plus petite que 10 ou 15° contribuent à améliorer les performances à cet égard.

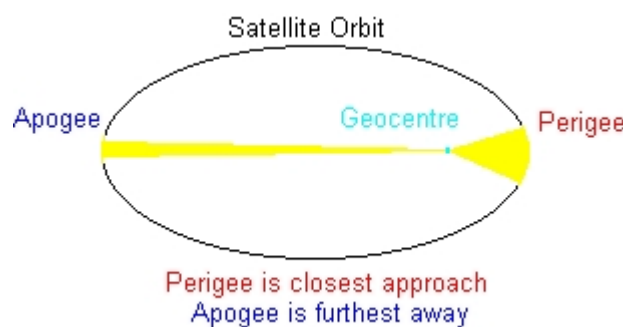
Bruit du récepteur

Les erreurs causées par le processus de mesure utilisé dans le récepteur sont communément groupées sous la désignation de *bruit du récepteur*. Ce dernier dépend de la conception de l'antenne (bruit du préamplificateur...), de la méthode de conversion analogique-numérique, du procédé de corrélation, des boucles de poursuite des satellites et des bande passantes.

Lois de Kepler

Les lois de Kepler, au nombre de trois, décrivent les mouvements des orbites planétaires. On peut les appliquer à un satellite en orbite autour de la Terre en faisant l'hypothèse que la seule masse exerçant une attraction est la Terre.

1. L'orbite est une ellipse dont un des foyers est occupé par le centre de la masse d'attraction (Terre). Cela implique qu'un satellite ne se trouve pas en permanence à la même distance de la Terre. Le point le plus proche se nomme *périgée*, le point le plus éloigné étant l'*apogée*.
2. La surface "parcourue" par un satellite pendant un temps donné est la même. Cela signifie que la vitesse orbitale n'est pas constante; elle est plus élevée au périgée qu'à l'apogée.



3. Le rapport entre le carré de la période orbitale T est le cube du demi grand axe de l'ellipse est constant; cela signifie que deux satellites placés sur des orbites elliptiques ayant le même demi grand axe mais des excentricités différentes auront la même période orbitale.

Les lois de Kepler telles qu'énoncées ci-dessus ne sont rigoureusement valables que dans un système où l'unique force d'attraction est un champs de gravité sphérique. C'est n'est bien entendu pas le cas en réalité, ce qui implique que les position "keplériennes" des satellites GPS sont affectées par diverses perturbations. On peut citer notamment :

- La Terre n'est pas une sphère parfaite est présente un champs de gravité non uniforme. Ce "défaut" est toutefois bien connu et les modèles mathématiques actuels permettent une très bonne correction de l'erreur.
- Les autres corps du système solaire, et en particulier le Soleil et la Lune, ont leur propres champs gravitationnels qui exercent une influence sur les satellites. Ici également, le phénomènes peut être corrigé de manière relativement facile.
- Les satellites ne voyagent pas dans un vide parfait et peuvent être exposés à des frottement contre les couches supérieures de l'atmosphère. Cependant, cet effet là est négligeable dans le cadre du système GPS (altitude des orbites env. 20'200km).
- Les satellites sont soumis aux impacts des photons de lumière émis par le Soleil. Ce phénomène de "pression des radiations solaires" est pratiquement pas modélisable et représente la plus grande source inconnue d'erreur.

Un certains nombres de paramètres sont transmis avec le message de navigation afin de permettre au récepteur de calculer une compensation des différentes sources d'erreurs décrites ci-dessus.

Effets relativistes

Nous n'allons pas terminer cette partie consacrée aux sources d'erreurs sans une petite parenthèse à propos de la Relativité.

Le système GPS est une preuve palpable des principes de *Relativité Générale* et de *Relativité Restreinte* établis par Albert Einstein au début du XX^{ème} siècle et **qui trouvent là une de leur première application.**

De manière très succincte et sans entrer dans des considérations physiques et mathématiques, la *Théorie de la Relativité* stipule notamment que :

- 1) La vitesse de la lumière est finie et immuable; elle ne dépend pas de l'endroit où l'on se trouve dans l'espace.
- 2) La mesure de la vitesse de la lumière, donc du temps puisque $v = d / t$, dépend de la situation de l'observateur.
- 3) Il découle du point 2) que le temps n'est pas immuable mais varie pour chaque observateur.
- 4) L'espace-temps a quatre dimensions et est courbé par la force de gravité exercée par les astres.

De part leur situation, les satellites GPS sont soumis à divers effets relativistes.

En premier lieu, la gravité à laquelle sont soumises les horloges atomiques embarquées est moindre qu'à la surface de la Terre. Les horloges avancent légèrement (le temps s'écoule "plus vite" en altitude...).

Ensuite, les satellites tournent en orbite autour de la Terre avec une vitesse qui n'est pas négligeable. Selon la mécanique relativiste, le temps ralentit pour des objets en mouvement par rapport à des objets fixes (le temps passe d'autant "plus lentement" que l'on se déplace rapidement dans l'espace...). De plus la vitesse orbitale n'est pas constante du fait de la trajectoire des satellites (ellipse) ou encore des fluctuations de la gravité terrestre.

Aux considérations ci-dessus, il convient d'ajouter que tout objet en orbite autour de la Terre voit son temps varier selon son sens de déplacement (le temps passe "plus lentement" si l'orbite a le même sens de rotation que celui de la Terre...).

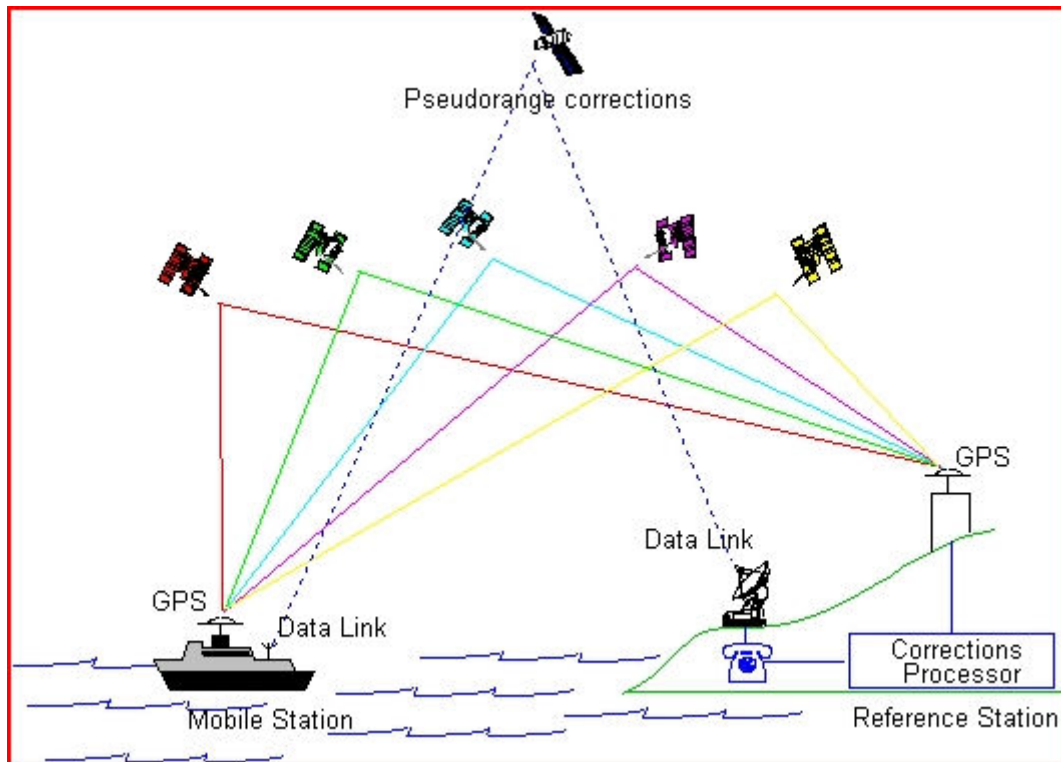
Chaque satellite possède donc un système de correction d'horloge afin de compenser les effets relativistes (on augmente ou on diminue très légèrement la fréquence). Sans quoi, les erreurs de positionnement pourraient atteindre plusieurs dizaines de km par jour !

GPS différentiel

Le GPS différentiel (DGPS) part du principe que l'erreur de positionnement instantanée dans une zone délimitée est identique pour chaque point de la zone. En mesurant la position fournie par le GPS à un endroit fixe (station de référence) dont les coordonnées sont parfaitement connues, on peut calculer l'erreur et transmettre par ondes hertziennes les paramètres de correction à d'autres stations situées dans la même zone.

Cette technique permet un gain dans la précision instantanée du positionnement d'un facteur environ 20.

Le DGPS nécessite une infrastructure adéquate composée de la **station de référence**, d'un "**data link**" (satellite géostationnaire, émetteur terrestre...) et de la/des **station(s) mobile(s)** adaptée(s) au fonctionnement en DGSP.



Utilisation du GPS avec d'autres senseurs

Le couplage du système GPS avec d'autres senseurs a pour but d'aider le récepteur à améliorer ses performances. Ceci est surtout nécessaire lorsque l'environnement est défavorable (brouillage, pertes de signal, fortes dynamiques...).

Le GPS peut être aidé de différentes façons :

- En temps grâce à une horloge précise.
- En altitude grâce à un baro-altimètre.
- en position et vitesse grâce à un odomètre, une centrale à inertie, un accéléromètre...
- ...

L'information fournie au récepteur apporte une ou plusieurs équations supplémentaires pour le calcul du point.

Un exemple d'application civile de plus en plus répandu est donné par les systèmes de navigation qui équipent les véhicules automobiles. Certains systèmes utilisent en effet – outre le GPS lui-même – différents capteurs de mouvement qui permettent d'extrapoler dans une certaine mesure la position dynamique, notamment en zone urbaine où la navigation trouve tout son intérêt mais où la réception GPS est fortement perturbée (masquage de la visibilité, tunnel...).

Système Galileo

Le système Galileo est en quelque sorte le "GPS européen". Les principes techniques de base sont identiques, à savoir l'émission de signaux par une constellation de satellites et la mesure des délais de propagation jusqu'aux récepteurs.

Les travaux préliminaires ont été véritablement lancés en 1998. Bien que depuis fin 2000 la plupart des concepts techniques soient largement définis, que la faisabilité du système ne fasse aucun doute et que des sommes importantes aient déjà été investies, la décision définitive de mener le projet à terme a été plusieurs fois repoussée pour des raisons politiques. Elle a enfin été prise en mars 2002.

Dans les très grandes lignes, les "propriétés" de Galileo sont/seront les suivantes :

- Système **civil, ouvert et global, indépendant du GPS** mais totalement compatible avec celui-ci.
- Développé sur la base d'un partenariat "public-privé" au niveau européen.
- Deux services principaux offerts : *grand public* (gratuit) et *sécurisé* (à accès contrôlé).
- Performances globalement meilleures que le GPS actuel (on bénéficie de toute l'expérience acquise par le GPS).
- ...

Selon le planning du projet, les premiers satellites doivent être lancés vers fin 2003. Il s'ensuivra un déploiement progressif du système global avec tous les essais de validations nécessaires. Galileo devrait être pleinement opérationnel d'ici 2008, 2009...

Pour plus d'information, voir le site web :

<http://www.galileo-pgm.org>

Annexes

Références de quelques ouvrages

«Guide pratique du GPS»

P. Correia

éd. Eyrolles / isbn : 2-212-11167-3

«Introduction to GPS»

A. El-Rabbany

éd. Artech House / isbn : 1-58053-183-0

«Understanding GPS, principles and applications»

E. Kaplan

éd. Artech House / isbn : 0-89006-793-7

Quelques sites web

<http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps.html>

<http://www.gpsworld.com>

<http://tycho.usno.navy.mil/systime.html>

<http://www.leapsecond.com/java/gpsclock.htm>

<http://www.trimble.com/>

<http://www.navcen.uscg.gov/>

<http://www.usno.navy.mil/>

<http://www.garmin.com/>

<http://www.gpstrack.com/>

<http://www.magellangps.com/fr/>