



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Eléments de Géomatique

Polycopié 7 : Localisation par satellites

Pierre-Yves Gilliéron
Audrey Ueberschlag
Geoffrey Vincent

Faculté de l'Environnement Naturel, Architectural et Construit
Institut d'Ingénierie de l'Environnement
Géomatique - Topométrie

Lausanne, édition Février 2014

SOMMAIRE

1. LOCALISATION PAR SATELLITES	3
1.1. INTRODUCTION	3
1.2. DESCRIPTION DU SYSTÈME GPS	4
1.2.1. LE SEGMENT ESPACE	5
1.2.2. LE SEGMENT DE CONTRÔLE	8
1.2.3. LE SEGMENT UTILISATEUR	9
1.3. LE SIGNAL GPS	10
1.3.1. LA STRUCTURE DU SIGNAL	10
1.3.2. ACCÈS AU SYSTÈME GPS	12
1.4. LES MÉTHODES DE LOCALISATION	13
1.4.1. LA MESURE DES PSEUDO-DISTANCES	13
1.4.2. LA LOCALISATION ABSOLUE	14
1.4.3. LA LOCALISATION RELATIVE	15
1.4.4. BILAN D'ERREUR ET PRÉCISION DU GPS	16
1.5. SYSTÈME D'AUGMENTATION : WAAS	17
1.6. SYSTÈME EUROPÉEN GALILEO	20
1.6.1. ARCHITECTURE	20
1.6.2. SERVICES	21
2. RÉFÉRENCES	23
3. TABLE DES FIGURES	24

Avertissement

La plupart des figures de ce polycopié ont été créées à l'EPFL. Toutefois, les auteurs ont utilisé un certain nombre de ressources dont les références sont citées. Si l'une ou l'autre de ces ressources ne sont pas référencées correctement ou font l'objet d'un droit d'usage particulier, nous vous prions de bien vouloir le signaler à l'auteur.

Toute utilisation de ce support de cours doit se faire avec le consentement de l'auteur.

1. Localisation par satellites

1.1. Introduction

La localisation par satellites occupe une place importante dans les techniques modernes de la géomatique et dans les systèmes de navigation. Le plus connu des systèmes est le NAVSTAR-GPS (NAVigation System with Time And Ranging - Global Positioning System), conçu et géré par le Département de la Défense des Etats-Unis (DoD).

Ce système était à l'origine voué à la navigation ainsi qu'à la détermination des paramètres de temps et de position qui s'y rattachent. Il devait permettre un positionnement tridimensionnel à ± 10 m, fonctionner en temps réel, 24h sur 24, indépendamment des conditions météorologiques et sur la totalité du globe. Son utilisation était prévue prioritairement pour des activités militaires, alors que les applications civiles pouvaient librement se développer en second plan. Depuis son avènement, le GPS a pris une place de premier ordre dans les applications civiles, en particulier dans les domaines des transports et des télécommunications. La localisation par satellites s'est imposée comme un instrument stratégique, ce qui a poussé les européens à développer leur propre programme de navigation avec d'une part EGNOS, en tant que système d'augmentation de GPS, et d'autre part avec Galileo comme nouveau système de navigation par satellites. D'autres pays développent ou modernisent leurs infrastructures spatiales de navigation : la Russie avec GLONASS, la Chine avec COMPASS, l'Inde et le Japon avec des systèmes d'augmentation.

Le GPS peut, en plus de son exploitation pour la navigation, répondre à des besoins pour la topographie et la géodésie. Il permet notamment de connaître les différences de coordonnées entre points terrestres avec une précision meilleure que le centimètre, sur des distances de plusieurs dizaines ou centaines de kilomètres.

Par rapport aux méthodes topométriques conventionnelles (mesures angulaires, mesures électroniques de distances), l'utilisation de GPS possède les avantages suivants :

- la visibilité entre les stations de mesures n'est plus nécessaire, d'où une diminution importante des opérations de reconnaissance.
- les mesures sont indépendantes des conditions météorologiques (brouillard par exemple).
- les mesures sont possibles 24 h sur 24h.

Actuellement, la méthode présente toutefois quelques inconvénients :

- la visibilité du ciel peut être limitée par des arbres, bâtiments ou autres éléments, empêchant la réception des signaux envoyés par les satellites et rendant le GPS inopérant,

- la précision nominale de la localisation varie en fonction du temps. Suivant la disposition des satellites dans le ciel, la précision des coordonnées ne sera pas toujours la même,
- pour les applications de haute précision, le prix d'un équipement complet reste relativement élevé.

1.2. Description du système GPS

Le système GPS peut être divisé en trois segments :

- le segment espace,
- le segment utilisateur,
- le segment de contrôle,

dont les fonctions et les interactions sont présentées dans la figure suivante :

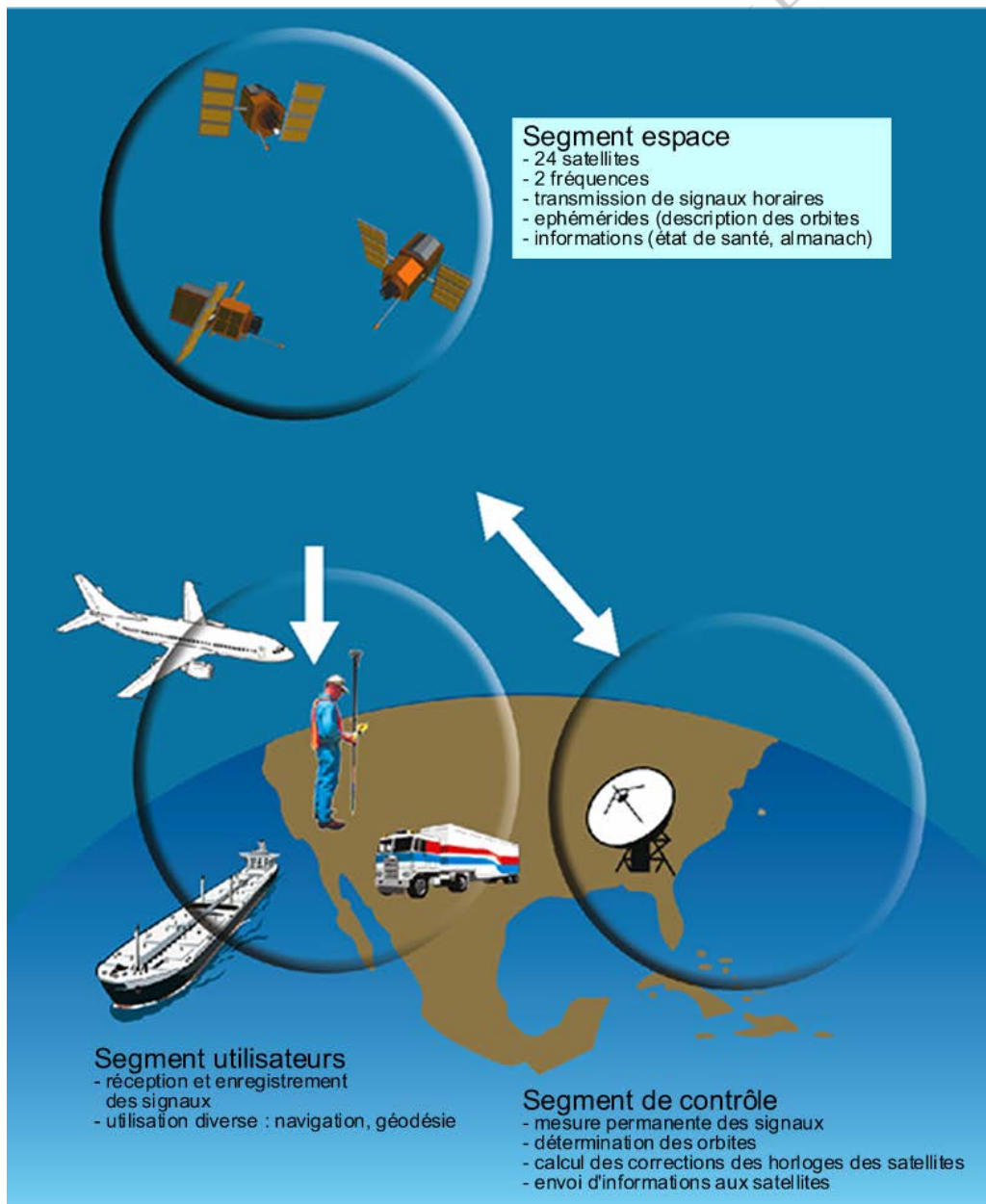


Figure 1-1 : Les 3 segments du système GPS

Comme on peut le constater, les utilisateurs (civils) n'ont aucun moyen de communication avec les autres segments de GPS. Ils ne font que recevoir les signaux provenant du segment spatial.

1.2.1. Le segment espace

• Le satellite

La pièce maîtresse du système de navigation est le satellite NAVSTAR.

Caractéristique d'un satellite GPS :

- Producteur : Rockwell International
- Poids : env. 850 kg
- Durée de vie planifiée : 7-8 ans
- Largeur : 5.20 m avec panneaux solaires
- Hauteur de vol : ~ 20'200 km
- Période de révolution : 11h 58 min

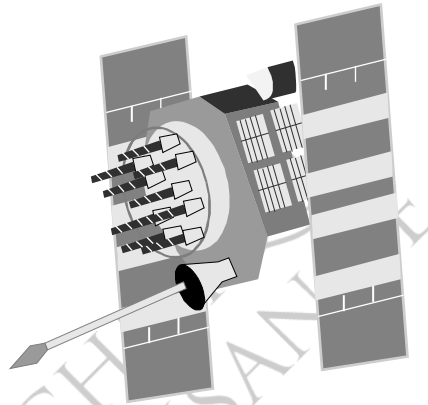


Figure 1-2 : Satellite NAVSTAR GPS

Les fonctions que doivent assurer ce satellite sont :

- maintenir une échelle de temps très précise. Dans ce but, deux horloges atomiques au césium et deux horloges au rubidium très stables dans le temps sont embarquées à bord du satellite.
- émettre des signaux ultra-stables en fréquence, modulés en phase par des codes pseudo-aléatoires sur les deux fréquences L1 et L2 spécifiques du système.
- recevoir et stocker l'information provenant du segment de contrôle.
- effectuer des manœuvres orbitales limitées, soit pour garder sa position définie dans la constellation, soit pour remplacer un satellite défaillant.
- effectuer à bord des calculs limités.
- retransmettre de l'information au sol (message).

• La constellation

La constellation GPS prévue par le DoD comprend nominalelement 24 satellites. Leur lancement a été planifié en trois blocs :

- **le bloc I** lancés entre 1978 et 1985 ;
- **le bloc II** lancés en 1989 et 1990 ;
- **le bloc IIA** lancés entre 1990 et 1997 ;
- **le bloc IIR** comprend une vingtaine de satellites afin de remplacer les premiers. Développés par Lockheed Martin, ils contiennent trois

horloges atomiques au Rubidium. Leur lancement a commencé en 1997 ;

- Les derniers satellites du bloc **IIR** comprendront un deuxième signal (C/A code sur L2) pour les civils ainsi qu'un nouveau signal militaire (M-code) ;
- **le bloc IIF** qui servira à la maintenance de la constellation comprendra une nouvelle fréquence L5 prévue dans la bande réservée à l'aéronautique ;
- **le bloc III** constituera le prochain bloc de satellites. Le **bloc IIIA** transmettra un nouveau signal pour les civils conçu pour être hautement interopérable avec les signaux du système de navigation par satellite européen.

La maintenance d'une constellation de 24 satellites est planifiée pour une trentaine d'années, alors que la mise à disposition d'un service de positionnement gratuit aux utilisateurs civils est garantie pour les années à venir.

Les satellites sont répartis sur 6 plans orbitaux séparés de 60° en longitude et de 55° d'inclinaison par rapport au plan équatorial. Sur chaque plan orbital, 4 satellites sont espacés régulièrement. Leur période de révolution est de 11h 58 (un demi-jour sidéral), leur altitude de 20 200 km. Ceci permet une visibilité permanente d'au moins 4 satellites 24 h sur 24 en tout point de la Terre.

Compte tenu du programme de remplacement des satellites, la constellation actuelle (2011) est de 32 satellites. On peut observer plus de 8 satellites à certaines périodes du jour.

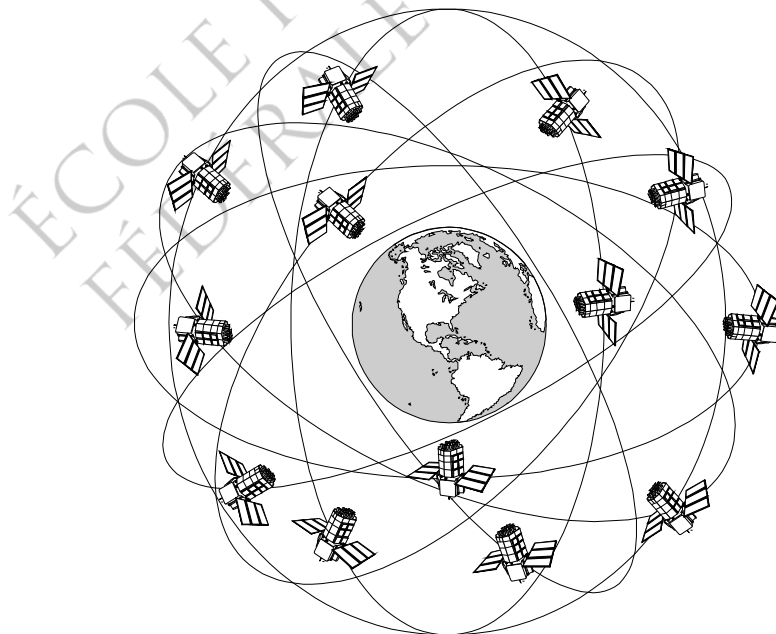


Figure 1-3 : Constellation des satellites GPS autour de la Terre

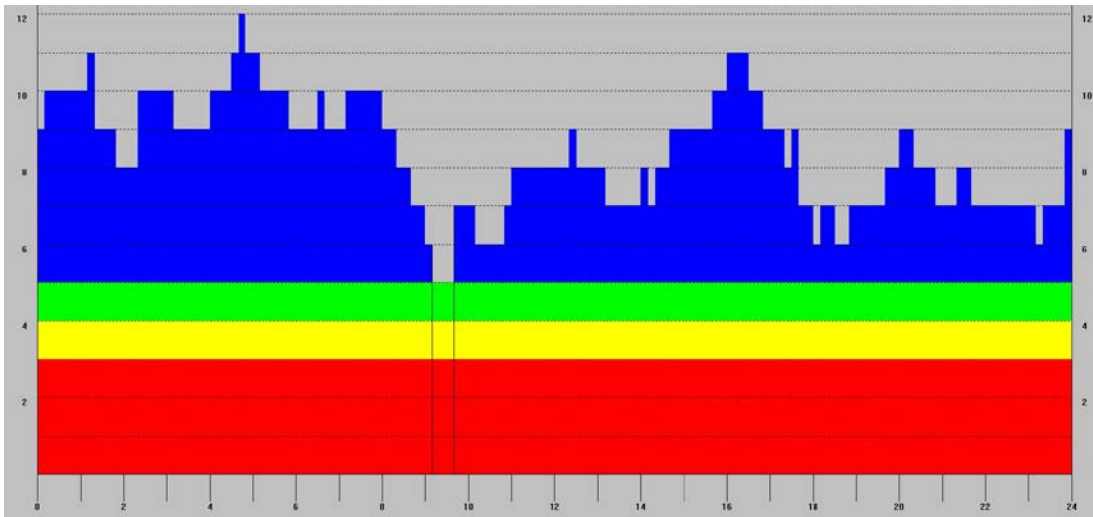


Figure 1-4 : Disponibilité des satellites GPS pour une période de 24 heures à l'EPFL

La Figure 9-4 montre le nombre de satellites disponibles 10° au dessus de l'horizon pour une période de 24 heures. On constate que le nombre de satellites observables peut passer du simple au double.

• Les orbites

Les orbites des satellites GPS sont des ellipses presque circulaires dont la Terre occupe l'un des foyers. Les trois lois de Kepler fournissent les formules de base pour leur description. Elles ne sont qu'une première approche, parce qu'elles ne tiennent pas compte des forces perturbatrices agissant sur le satellite. La description de l'orbite doit en fait évoluer dans le temps selon l'intensité des perturbations existantes, par exemple :

- le renflement équatorial ;
- l'attraction de la Lune et du Soleil ;
- l'inhomogénéité du champ de pesanteur terrestre ;
- la pression de la radiation solaire ;
- le freinage par les résidus atmosphériques.

L'orbite de chaque satellite est décrite dans le temps par 16 paramètres appelés éphémérides. A chaque heure, de nouvelles valeurs sont déterminées pour ces orbites, sous la forme de prédiction et de résultat de calcul par les moindres carrés. Ces valeurs sont émises par le segment contrôle et diffusées à l'ensemble des satellites.

M_0	Anomalie moyenne
Δn	Correction du mouvement moyen
e	Excentricité
\sqrt{a}	Racine carrée du demi grand-axe
Ω_0	Ascension droite
i_0	Inclinaison
ω	Argument du périée
$\dot{\Omega}$	Vitesse de l'ascension droite
\dot{i}	Vitesse de l'inclinaison
C_{uc}, C_{us}	Corrections des termes de l'argument de la latitude
C_{rc}, C_{rs}	Corrections des termes du rayon orbital
C_{ic}, C_{is}	Corrections des termes de l'inclinaison
t_0	Heure de référence de l'éphéméride

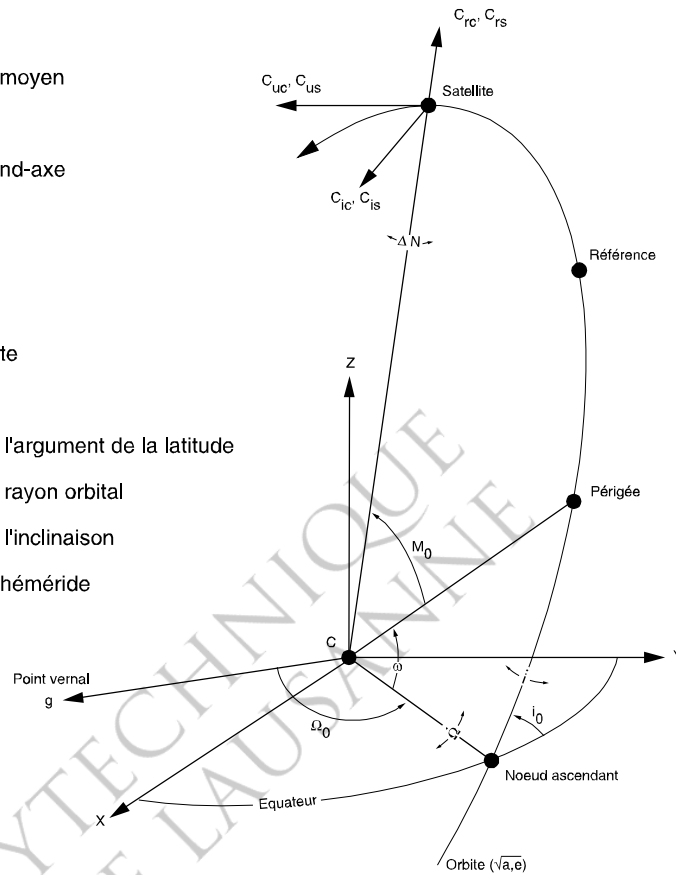


Figure 1-5 : Description de l'orbite d'un satellite

1.2.2. Le segment de contrôle

Le segment de contrôle est l'ensemble des six stations américaines (Air force monitor stations) au sol (Hawaï, Cape Canaveral, Ascension, Colorado Springs, Diego Garcia et Kwajalein), dont la position est connue avec grande précision. Elles enregistrent toutes les signaux émis par les satellites GPS, effectuent des mesures météorologiques et envoient les données à la station principale de Colorado Springs.

A Colorado Springs, les éphémérides des satellites ainsi que les coefficients des paramètres du polynôme d'horloge sont calculés, prédits et envoyés aux stations de transmission. Celles-ci (Ascension, Diego Garcia et Kwajalein) sont chargées de transmettre ces données aux satellites, avec d'autres informations telles que l'état de santé des satellites et des antennes de transmission au sol.

Depuis 2005, ces stations de contrôle sont complétées par le réseau de stations de l'agence américaine NGA (National Geospatial Intelligence Agency).

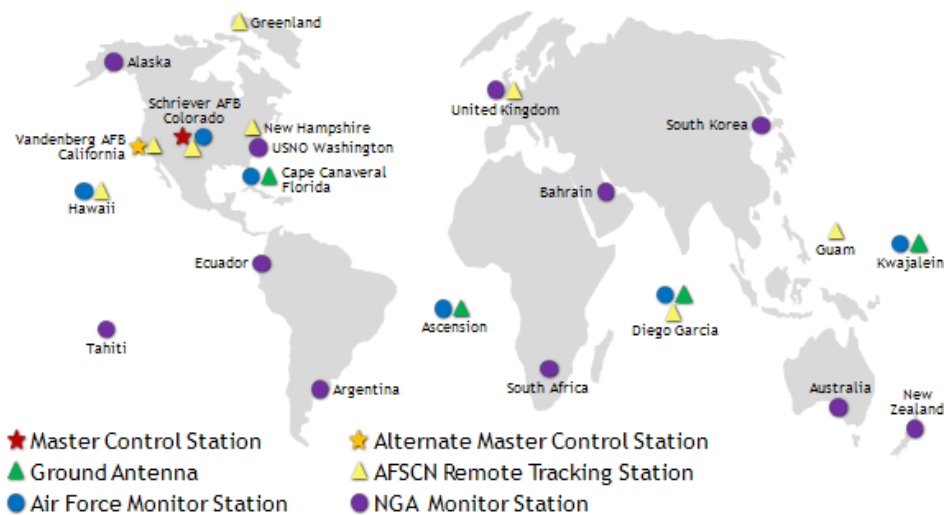


Figure 1-6 : Situation des stations américaines de contrôle de GPS
(source : <http://www.gps.gov/systems/gps/control>)

1.2.3. Le segment utilisateur

Le segment utilisateur représente - comme son nom l'indique - l'ensemble des récepteurs militaires et civils capables de mesurer les signaux émis par les satellites, dans un but géodésique ou de navigation. Pour soutenir les utilisateurs, il existe des services d'information internationaux et nationaux divulguant des informations plus détaillées et précises que celles dérivant des mesures elles-mêmes. Au niveau suisse par exemple, l'Office Fédéral de Topographie (swisstopo) gère un tel service, dont la base se situe à Zimmerwald (BE). Ce service gère notamment un réseau permanent, appelé AGNES (Automatisches GPS Netz Schweiz) de stations de référence GNSS qui couvre l'ensemble du territoire suisse.

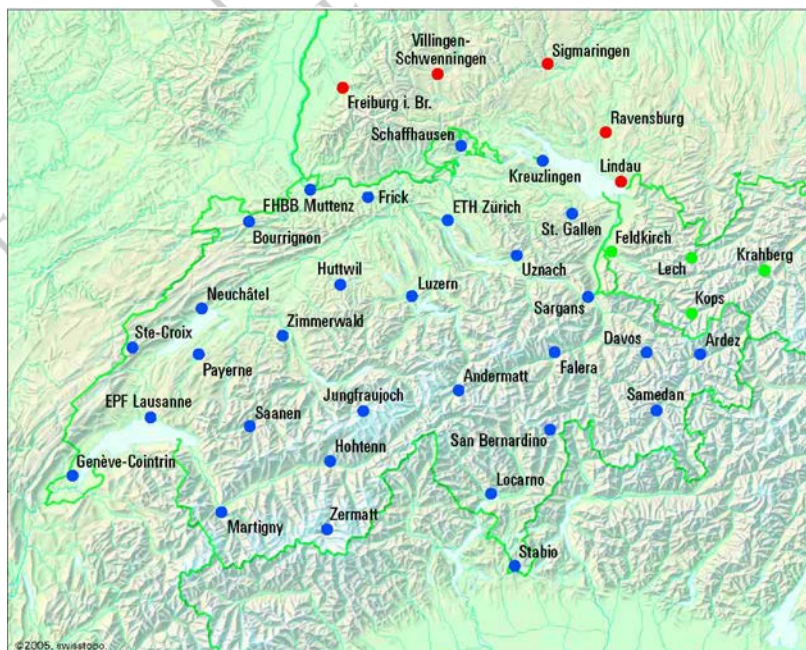


Figure 1-7 : Positions des stations du réseau AGNES (source swisstopo, 2010)

1.3. Le signal GPS

1.3.1. La structure du signal

Le GPS utilise une technique de mesure de distance unidirectionnelle où le satellite NAVSTAR est actif et envoie continuellement un signal. Le paramètre fondamental de la mesure de distance est le temps, qui doit être fourni avec une très grande précision. Les oscillateurs des satellites assurent une stabilité de l'ordre de 10^{-14} (définie comme un rapport de fréquence, $\Delta f/f$). Ils sont réglés sur une fréquence fondamentale de 10.23 MHz, de laquelle dérivent les fréquences L1, L2 et la nouvelle L5, ainsi que les différents codes (Figure 9-8).

Du point de vue de sa structure, le signal émis peut être séparé en trois parties :

- les ondes porteuses L1, L2 et L5 ;
- les codes ou signaux ;
- le message.

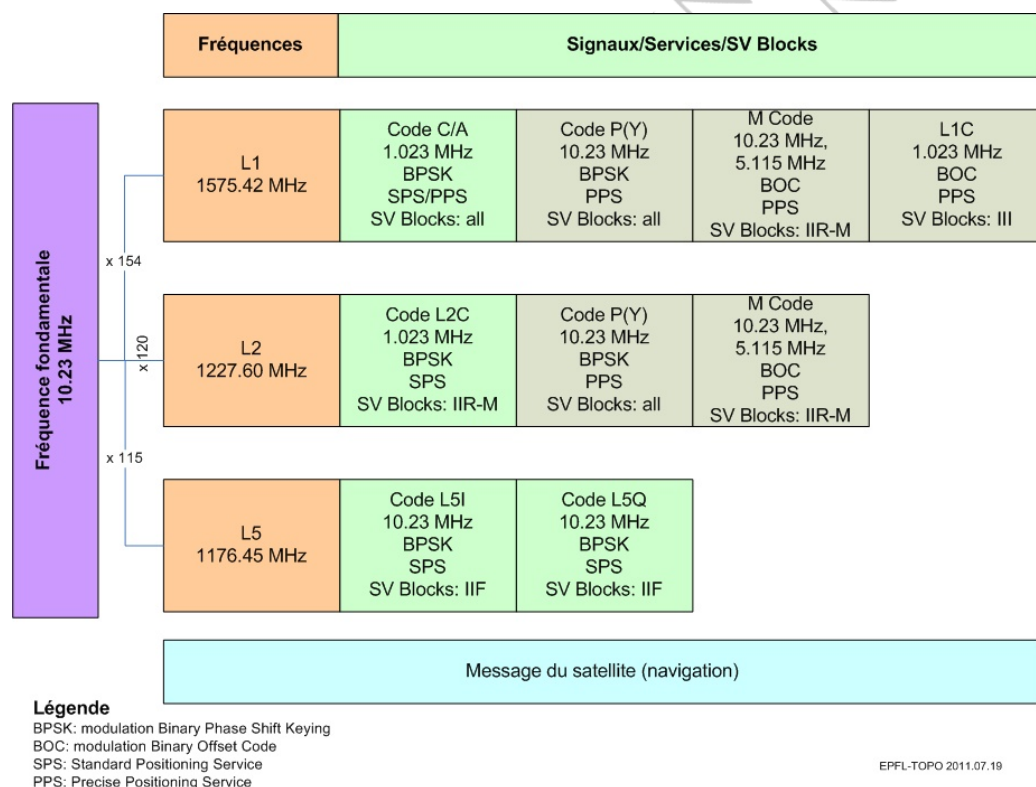


Figure 1-8 : Les fréquences et signaux GPS

• Les ondes porteuses L1, L2 et L5

A l'origine, les satellites GPS (blocs I, IIA et IIR) transmettent deux ondes porteuses L1 et L2, obtenues en multipliant la fréquence fondamentale par 154 et par 120, ce qui donne les fréquences respectives de 1575.42 MHz et de 1227.60 MHz et les longueurs d'onde de 19,1 et 24,5 cm. Avec le nouveau bloc IIF, le GPS bénéficie d'une troisième fréquence L5 qui est un multiple de 115 de la fréquence fondamentale.

En admettant une résolution de 1% de la longueur d'onde, on voit immédiatement que la précision dépend de celle-ci (Figure 9-9).

MESURE DE LA PHASE ($f_1 = 1.575 \text{ GHz}$, $f_2 = 1.228 \text{ GHz}$)

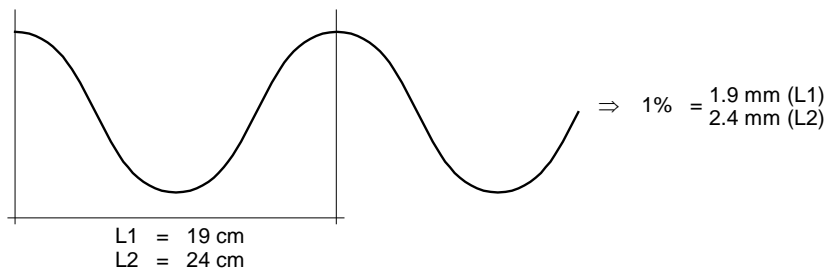


Figure 1-9 : Précision interne des mesures de phase de l'onde porteuse

• Les codes

Pour permettre la mesure du temps de propagation d'une marque horaire, un code pseudo-aléatoire (PRN, Pseudo-Random Noise) est modulé sur les porteuses selon une séquence binaire, c'est à dire une suite de "1" et de "0". Bien que ce signal paraisse similaire à du "bruit" pour un récepteur radio standard, il est reconstituable par un récepteur disposant de l'algorithme générant ce code.

Parmi les codes pseudo-aléatoires générés par chaque satellite, on peut décrire :

- le code C/A (Coarse Acquisition), de fréquence 10 fois inférieure à la fréquence fondamentale, est un code grossier transmis uniquement par la porteuse L1 ;
- le code P (Precise), de fréquence identique à la fréquence fondamentale, est transmis sur L1 et L2.

En admettant comme pour les porteuses une résolution de 1% de la durée du code, l'ordre de précision est le suivant pour les codes P et C/A :

MESURE DU CODE P (10.23 Mégabits/seconde) $1 \text{ bit} \approx \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{10.23 \cdot 10^6 \text{ m/s}} \approx 30 \text{ m}$



MESURE DU CODE C/A (1.023 Mégabits/seconde) $1 \text{ bit} \approx 300 \text{ m}$

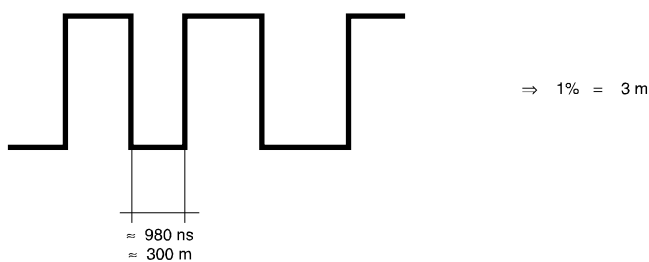


Figure 1-10 : Précision interne des mesures de code P et C/A

- **Le message**

En plus du code, les satellites transmettent un **“message”** à raison de 50 bits/seconde, contenant tous les renseignements nécessaires pour calculer la position du satellite. Il se présente comme un bloc de 1500 bits correspondant à une durée de trente secondes et comprend 5 sous-blocs contenant 10 mots chacun.

Sous-bloc 1 : Il contient les paramètres de **correction de l’horloge** du satellite afin d’informer l’utilisateur du décalage entre l’heure de référence du système GPS et l’heure du satellite. On y trouve aussi les coefficients modélisant la propagation des ondes dans l’ionosphère (couche de l’atmosphère perturbant la vitesse de propagation des signaux).

Sous-blocs 2 et 3 : Ils contiennent les **éphémérides** calculées et envoyées aux satellites par les stations de contrôle. A partir de ces éphémérides, la position du satellite peut être calculée de manière précise dans un système géocentrique de coordonnées cartésiennes.

Les éphémérides des satellites sont mises à jour chaque heure mais sont valables pour au moins 1h 30.

Sous-bloc 4 : Il est réservé pour des applications futures.

Sous-bloc 5 : Il contient l’**almanach** pour un satellite. Pour obtenir un almanach complet de tous les satellites, il faut enregistrer une suite de 25 messages, dont chacun contient l’almanach relatif à un seul satellite. Cette opération dure 12 minutes et 30 secondes, à partir du moment où le signal d’un satellite a été reconnu. L’almanach contient des paramètres d’orbites approchées permettant de calculer les trajectoires des satellites plusieurs jours, voire plusieurs semaines à l’avance. Grâce à lui, l’utilisateur peut rapidement calculer la position et par conséquent la «visibilité» de tous les satellites, pour un lieu et un instant futur. C’est l’outil indispensable à la préparation et la planification d’une campagne de mesures. Dans la pratique, l’utilisateur reprend toujours un nouvel almanach avant une campagne de mesures si celui dont il dispose date de plus d’un mois.

1.3.2. Accès au système GPS

Le système GPS offre deux services qui se différencient par la précision atteignable dans les résultats :

- le service **SPS** (Standard Positioning Service)
- le service **PPS** (Precise Positioning Service)

Dès décembre 1993, Le service **SPS** a officiellement été mis à la disposition des utilisateurs civils par l’intermédiaire du code C/A modulé sur la porteuse L1. Il n’occasionnera aucun coût d’utilisation dans les années à venir, mais son contrôle reste une exclusivité des militaires américains qui se réservent le droit de brouiller les signaux en cas de conflit.

La disponibilité sélective **SA** (Selective Availability) était une dégradation volontaire de la qualité en vigueur jusqu'en mai 2000 (Figure 9-11). La fréquence de base de 10.23 MHz des oscillateurs ainsi que les paramètres orbitaux radio-diffusés étaient alors entachés d'erreurs. Ce dispositif a permis de limiter pour des raisons militaires la précision à environ 100 m.

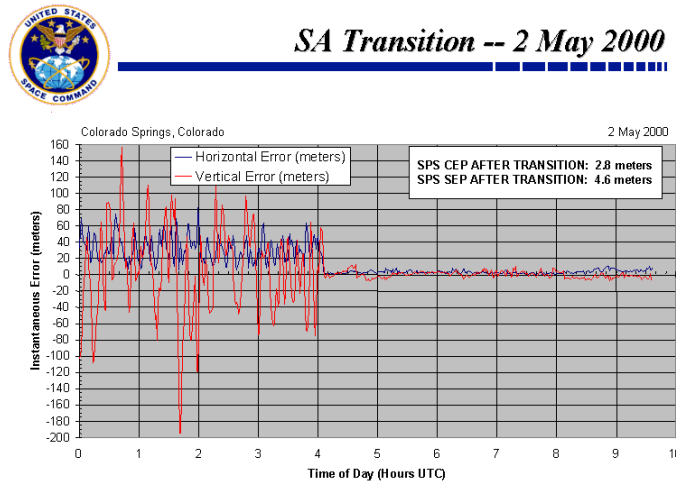


Figure 1-11 : Effet de la suppression de la SA sur les mesures de code (C/A)

L'anti-leurrage **A-S** (Anti-Spoofing) doit permettre une contre-mesure électronique à une tentative délibérée de brouillage par l'ennemi. Le code P est alors remplacé par un code secret Y. L'anti-leurrage a été mis en activité continue depuis la fin janvier 1994, si bien que la mesure du code P est dès lors impossible pour les utilisateurs civils.

Le service **PPS** est réservé aux militaires américains et à certains utilisateurs autorisés par le DoD. Les récepteurs sont alors équipés d'algorithmes de décryptage permettant de reconstituer les brouillements et encodages dus à la disponibilité sélective et à l'anti-leurrage.

1.4. Les méthodes de localisation

1.4.1. La mesure des pseudo-distances

La pseudo-distance élémentaire observable dérive de la différence Δt entre l'heure d'émission et l'heure d'arrivée d'un signal particulier transmis par un satellite.

Ce signal est dans la pratique le code qu'émet le satellite par l'intermédiaire d'ondes porteuses. Sur terre, le récepteur émet simultanément une réplique synchrone de ce code. Le récepteur est ainsi en mesure de reconnaître le code satellite à son arrivée et de le comparer à son propre code au moyen d'un procédé corrélatif.

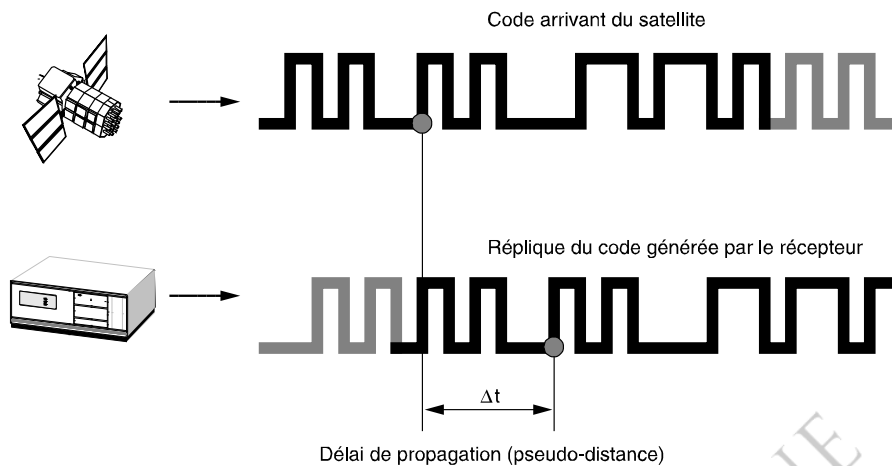


Figure 1-12 : Principe de mesure de la pseudo-distance

Selon le résultat de la comparaison, le code récepteur sera retardé jusqu'à ce qu'il coïncide avec le code satellite ; le décalage correspond à la durée de propagation Δt entre satellite et récepteur, pour autant que les horloges respectives soient parfaitement synchronisées. Cependant, les échelles de temps du récepteur et du satellite sont généralement décalées, ce qui produit une erreur systématique lors de chaque observation.

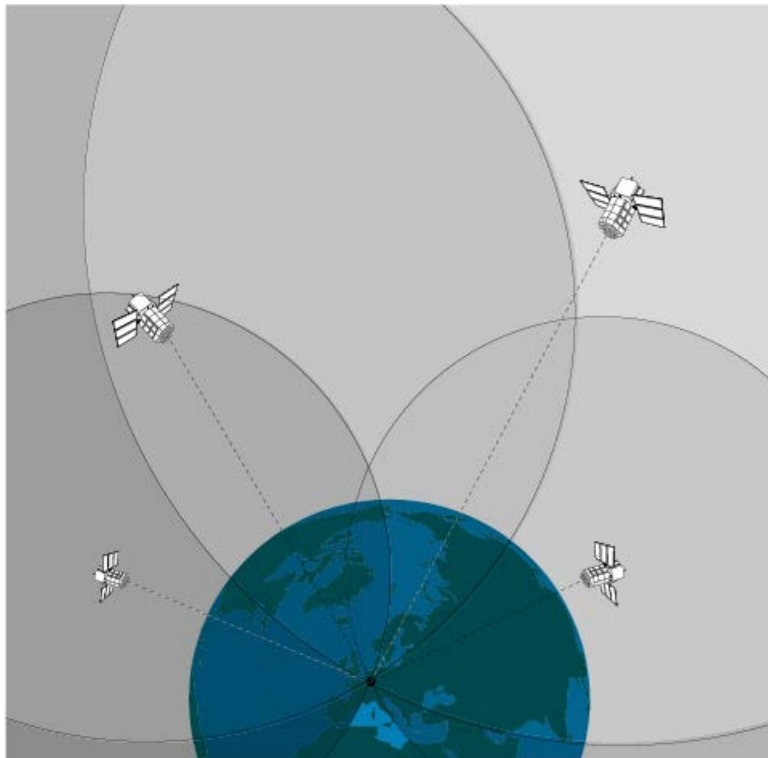
A ce défaut d'horloge, s'ajoutent encore les influences non négligeables de l'atmosphère sur la vitesse de propagation des ondes porteuses. Le délai de propagation mesuré étant donc systématiquement faussé, on ne peut en déduire des distances réelles entre satellite et récepteur, c'est pourquoi on utilise le terme de **pseudo-distance**.

1.4.2. La localisation absolue

La localisation absolue consiste en la détermination des coordonnées d'un point quelconque de la Terre. Les messages codés envoyés par les satellites sont captés et traités dans un récepteur stationné sur le point inconnu.

La localisation par GPS se caractérise par la mesure de la distance entre l'antenne du récepteur et les différents satellites. La durée du trajet du signal GPS permet de calculer en théorie la distance entre le satellite et le récepteur. Trois distances de ce type suffisent à donner une solution géométrique, la position de l'antenne correspondant à l'intersection de 3 sphères, centrées à l'emplacement des trois satellites, leurs rayons étant égaux aux distances mesurées.

En réalité une inconnue s'ajoute au problème, l'erreur de l'horloge du récepteur par rapport au temps GPS, et nécessite l'utilisation d'un quatrième satellite.



(Le 4^e satellite est nécessaire pour déterminer l'inconnue d'horloge du récepteur)

Figure 1-13 : Localisation absolue à partir de trois satellites

On a vu précédemment qu'il existe 2 principaux types de mesures GPS, pour la localisation :

- les mesures effectuées avec les codes appelées pseudo-distances ;
- les mesures de phase réalisées sur L1, L2 et L5.

Les mesures de code sont exploitées dans les techniques de localisation absolue et relative, alors que les mesures de phase ne sont exploitées qu'en localisation relative (Figure 9-14).

1.4.3. La localisation relative

La localisation relative fait intervenir deux récepteurs qui enregistrent et exploitent simultanément les signaux GPS sur deux points différents.

L'éloignement entre deux points, constituant une base, va jusqu'à 10 km dans le cas de mesures topographiques et peut atteindre plusieurs centaines de kilomètres pour les mesures géodésiques de grands réseaux, tel que le réseau européen EUREF¹.

La précision relative de la base est excellente, c'est-à-dire inférieure au cm pour les mesures topographiques. La position absolue de la base dans un système de référence peut être de l'ordre de quelques mètres (Figure 9-14). Mais la connaissance de la position d'un point fixe dans le système de coordonnées de référence, ainsi que la mesure de deux bases au moins

¹ <http://www.epncb.oma.be/>

depuis ce point, appelé point de référence, règle le problème de la précision absolue du GPS différentiel.

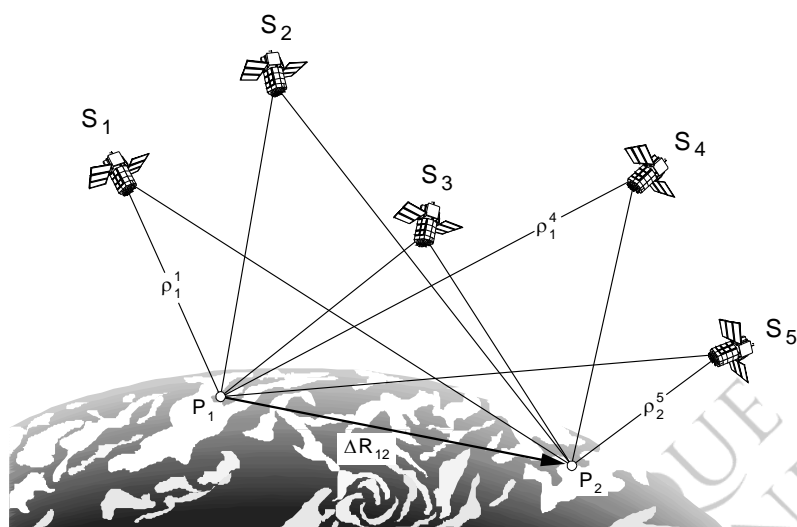


Figure 1-14 : Principe de la localisation relative (ligne de base $P_1 - P_2$)

1.4.4. Bilan d'erreur et précision du GPS

Depuis la suppression de la disponibilité sélective (SA), le gain en précision est important, mais il subsiste des sources d'erreurs dont il faut connaître l'origine. Les mesures GPS de code sont entachées des erreurs systématiques et aléatoires suivantes :

- la synchronisation des horloges ;
- les erreurs dues aux orbites ;
- les erreurs dues à la troposphère ;
- les erreurs dues à l'ionosphère ;
- le trajet multiple.

On peut estimer l'effet de ces erreurs sur la mesure de pseudo-distances. On exprime chacune des erreurs comme l'erreur moyenne (1σ) en unité de distance.

Source d'erreur	Ecart-type (1σ) en m
Retard ionosphérique	2.0
Retard troposphérique	0.25
Ephémérides	1.0
Horloge satellite	0.5
Trajet multiple	0.2
Récepteur	0.5
Bilan d'erreur global (1σ)	2.4 (*)

Tableau 1 : bilan des erreurs GPS (* somme quadratique des différentes erreurs moyennes)

Afin d'illustrer la qualité de la localisation de GPS, l'exemple suivant (Figure 9-15) présente le résultat de l'enregistrement d'une trajectoire à l'aide d'un récepteur GPS code. On constate deux cas de figure avec une trajectoire

optimale (à gauche) et une trajectoire défavorable (à droite). Sur cet exemple, réalisé lors de travaux pratiques GPS à l'EPFL, on distingue clairement l'effet de l'environnement sur la qualité de la position horizontale (point 3). Le fait de disposer de moins de satellites pendant une période de mesures s'avère particulièrement critique dans des zones où le masquage des signaux est effectif (présence de bâtiments, végétation,...).

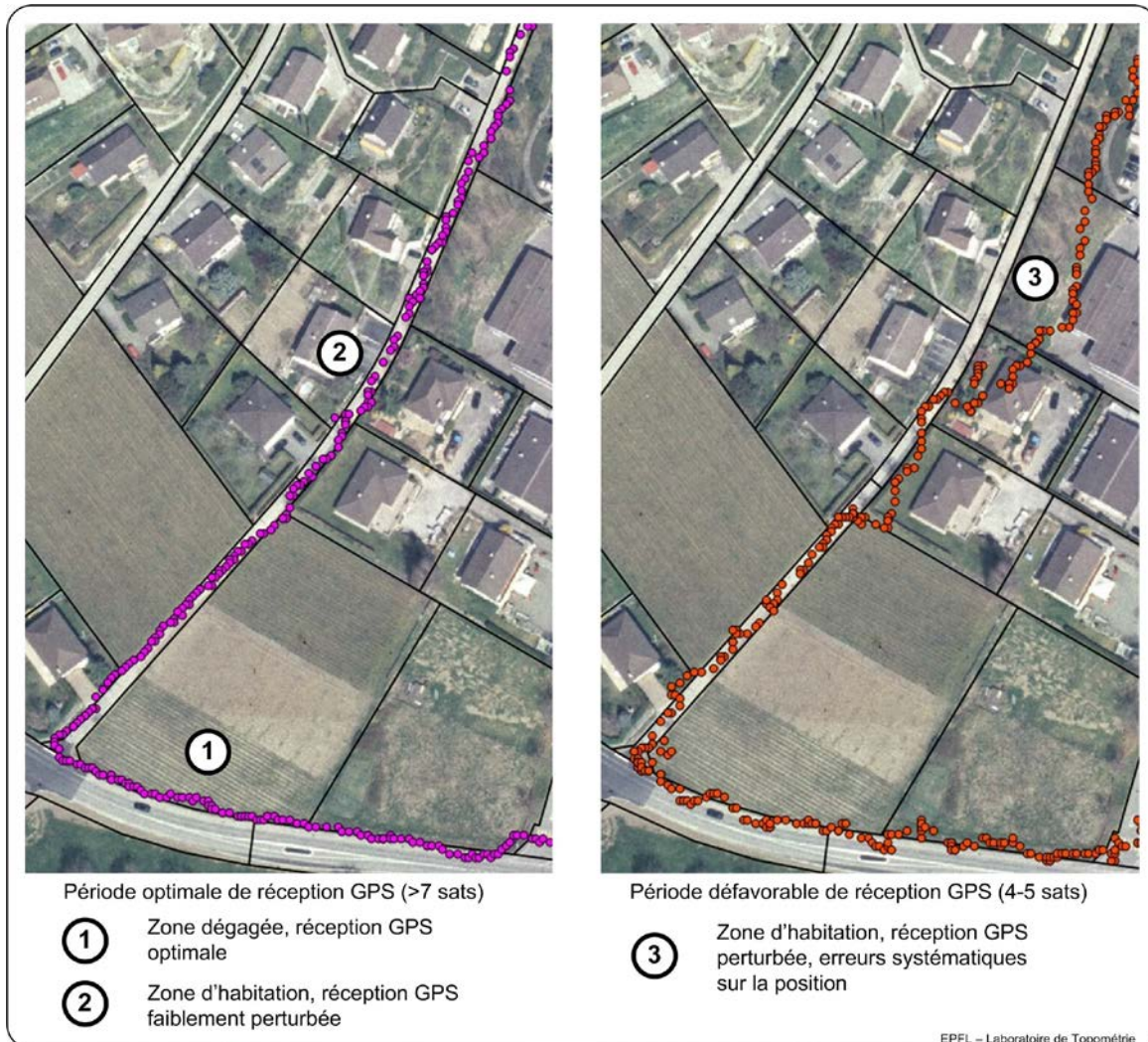


Figure 1-15 : Précision horizontale d'une trajectoire mesurée par GPS code

1.5. Système d'Augmentation : WAAS

D'autres domaines, comme le transport aérien, doivent en plus de l'amélioration de la localisation, assurer la qualité spatio-temporelle de l'information de positionnement. C'est pourquoi, la communauté de l'aviation civile a mis en œuvre un système dit d'augmentation spatial du GPS qui fournit à l'utilisateur des informations sur l'état du système de localisation grâce à un message d'intégrité. Ce sont les systèmes WAAS pour « Wide Area Augmentation Systems ».

La communauté internationale dans le domaine de la navigation a défini des standards pour la mise en œuvre de tels systèmes d'augmentation spatiaux. Actuellement, trois projets sont réalisés et utilisés par l'aviation civile :

- le WAAS (Wide Area Augmentation System) qui est le système d'augmentation américain ;
- le MSAS (Multi-transport Satellite Based Augmentation System) pour le Japon ;
- et EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) qui est le système d'augmentation de la communauté européenne.

Dans ce chapitre c'est le système EGNOS qui sert de référence pour décrire le principe de fonctionnement d'un système d'augmentation spatial.

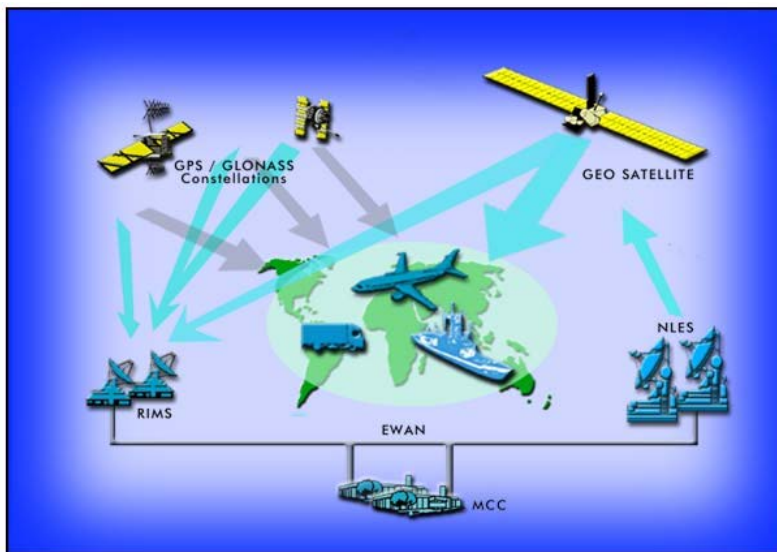


Figure 1-16 : Architecture EGNOS (source ESA)

EGNOS est implémenté par un groupe tripartite composé de l'Agence Spatiale Européenne ESA, de la Commission de l'Union Européenne et d'Eurocontrol². L'ESA est responsable du design, du développement et de la validation du système, tandis qu'Eurocontrol est responsable de la validation opérationnelle pour l'aviation civile. Le système a été approuvé officiellement en octobre 2009 et c'est le fournisseur de service ESSP³ (European Satellite Services Provider) qui a été certifié en 2010.

EGNOS est structuré en trois segments (Figure 9-16) :

- Le **segment de contrôle** est composé des stations RIMS (Ranging and Integrity Monitoring Stations), des stations MCC (Mission Control Centres) et des stations NLES (Navigation Land Earth Stations) :
 - Les 34 RIMS sont distribuées géographiquement et enregistrent des données GPS et GLONASS.
 - Trois stations de référence fournissent une information précise sur la position des satellites géostationnaires.

² Organisation européenne pour la sécurité de la navigation aérienne

³ <http://www.essp-sas.eu/>

- Les 4 MCC rassemblent toutes les informations. Ils calculent les corrections différentielles ainsi que la précision de tous les satellites visibles.
 - Ensuite, les stations NLES envoient ces messages aux satellites géostationnaires.
 - Les utilisateurs reçoivent les messages d'un satellite géostationnaire par l'intermédiaire de la fréquence L1 avec une modulation et un codage similaire à GPS (C/A code). Il n'est donc pas nécessaire d'acquérir un récepteur supplémentaire, car les nouveaux récepteurs GPS sont compatibles WAAS.
- Le **segment spatial** est composé de 3 satellites géostationnaires (INMARSAT-3 AOR-E (15,5°W), INMARSAT-3 IOR-W (25°E) ET ESA ARTEMIS (21,5°E)).
 - Le **segment utilisateur** est composé de récepteurs EGNOS standards et d'un équipement spécifique pour les applications aériennes, maritimes ou terrestres.

Services EGNOS

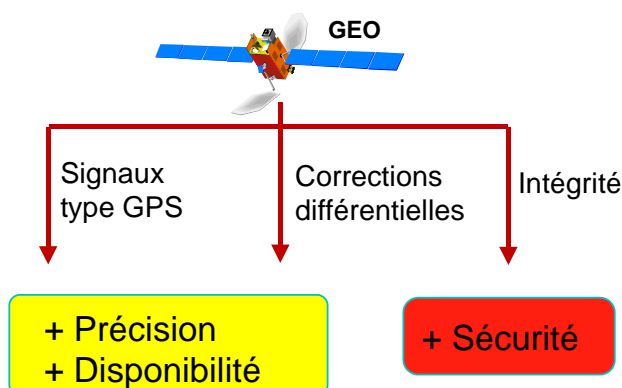


Figure 1-17 : Services EGNOS

EGNOS améliore la performance des systèmes satellitaires GPS et GLONASS par l'intermédiaire des trois services suivants :

- "GEO Ranging" : la transmission de signaux L1 (code et phase) de 3 satellites géostationnaires augmente le nombre de satellites disponibles pour le positionnement, ce qui améliore la géométrie de la constellation de satellites.
- "Wide Area Differential" : la précision du positionnement augmente grâce à la transmission de corrections différentielles par les satellites géostationnaires.
- "GNSS Integrity Channel" : l'information d'intégrité transmise par les satellites géostationnaires fournit le niveau de sécurité exigé pour des approches en aviation civile avec assistance verticale, pour la navigation en route et au terminal.

Type d'erreur	GPS	EGNOS
Orbite et synchronisation d'horloge	1 m	0,5 m
Erreur troposphérique	0,25 m	0,25 m
Erreur ionosphérique	2 m	0,3 m
Bruit du récepteur	0,5 m	0,5 m
Multitrajet	0,2 m	0,2 m
UERE (Somme quadratique des erreurs - 1 σ)	2,31 m	0,83 m
HDOP fonction de la géométrie des satellites visibles	1,1 m	1,1 m
Erreur de précision de positionnement horizontal (1 σ) = UERE x HDOP	2,54 m	0,92 m
Erreur de précision de positionnement horizontal (2 σ , 95 %)	5,08 m	1,84 m

Source : Guide EGNOS, ESA, CNES, CE, 2009

Figure 1-18 : Bilan d'erreurs GPS - EGNOS

Le tableau ci-dessus présente le bilan des erreurs typiques des systèmes GPS et EGNOS dans des conditions idéales de réception. Cela permet d'illustrer l'apport d'EGNOS par rapport au GPS seul.

1.6. Système européen Galileo

Galileo est la contribution européenne à la deuxième génération de systèmes de navigation satellitaires. Financé par la Commission Européenne et l'Agence Spatiale Européenne (ESA), le système est maintenant dans sa phase de développement et de validation et sera en principe mis en service à l'horizon 2015.

1.6.1. Architecture

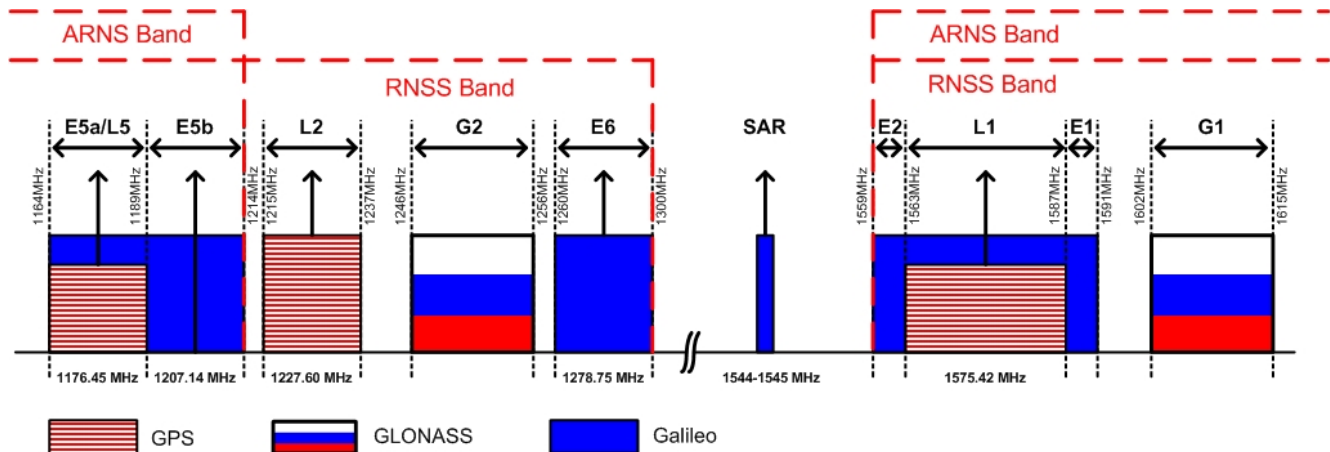
L'ensemble des satellites Galileo formera une constellation de 27 satellites opérationnels. Ils se trouveront sur trois orbites quasi circulaires inclinées de 56 degrés sur le plan de l'équateur et angulairement équidistantes les uns des autres autour de l'axe de la Terre. Chaque orbite sera parcourue par 9 satellites opérationnels et par un dixième de secours. L'altitude des satellites sera de 23'616 km correspondant à une période de révolution de 14h 22 min, soit à un cycle de dix jours pour repasser sur les mêmes trajectoires au sol.



Figure 1-19 : Vue d'artiste du satellite test GIOVE de Galileo (source ESA)

Chaque satellite émettra ses propres signaux lesquels seront modulés sur trois bandes de fréquence :

- E5A/E5B : 1164 – 1215 MHz, 4 signaux, 4 porteuses
- messages de navigation, intégrité, Search & Rescue
- E6 : 1260 – 1300 Mhz, 3 signaux, 2 porteuses
- signaux cryptés du service public réglementé (PRS), signaux commerciaux
- L1 : 1559 – 1591 Mhz, : 3 signaux, deux porteuses
- message de navigation, intégrité



1.6.2. Services

Galileo offrira 5 services : Un service « grand public » similaire à celui offert par GPS et GLONASS aujourd'hui. Ce service ouvert, « Open Service », sera gratuit et accessible à tout le monde avec trois signaux, dont la fréquence L1 qui est déjà utilisée par GPS. En plus, Galileo offrira quatre services novateurs :

- Le service commercial (CS- Commercial Service) : ce service nécessitera la signature d'un contrat (proposé par des tiers) avec des frais d'utilisation et accessible aux utilisateurs autorisés.
- Le service de sauvegarde de la vie (SoL - Safety of Life Service) : un service pour des applications de sécurité critique (p.ex. l'aviation civile, transport de matières dangereuses) qui transmet de données d'intégrité. Il sera garanti par un contrat.
- Le service public réglementé (PRS - Public Regulated Service) : différents services réservés aux autorités gouvernementales de sûreté (police, douane,...). Les signaux sont codés et résistants au brouillage.
- Les services de recherche et de sauvetage (SAR - Search and Rescue Service) : service de secours qui améliore le système existant COSPAS/SARSAT.

	Open Service (OS)	Commercial Service (CS)		Public Regulated Service (PRS)		Safety of Life Service (SoL)
Couverture	Global	Global	Local	Global	Local	Global
Utilisateur	Utilisateurs privés (Trafic routier ...), applications géodésiques	Services commerciaux (trafic routier, piétons, location based services LBS)		Applications militaires		Aviation civile, applications maritimes utilisateurs terrestres
Précision	15-35 m (1f), 4-8 m (2f)	5-10 m (2f)	< 10 cm - 1 m	4-6 m (2f)	1 m	4-6 m (2f)
Disponibilité	99% - 99.9%					
Intégrité	-	Service à valeur ajoutée		Oui		Oui
Accès	Gratuit	Données à valeur ajoutée	Corrections différentielles locales	Code de navigation et/ou données à valeur ajoutée	Corrections différentielles locales	Données à valeur ajoutée
Certification et garantie de service	Non	Garantie de service possible		Certification, garantie de service possible		Oui
Fréquences	E5a + E5b + L1	E5a + E5b + L1 + E6		L1 + E6		E5a + E5b + L1

Tableau 2 : Services du système européen de navigation par satellites - Galileo

2. Références

On donne ici quelques références bibliographiques utiles et complémentaires au contenu de ce polycopié. Cette liste n'est de loin pas exhaustive.

Duquenne F. et al., (2005), GPS, localisation et navigation par satellite, 2^{ème} édition, Ed. Hermès Science Publication

Gilliéron P.-Y., (2013), Localisation par satellites, Polycopiés de l'EPFL, EPFL, Lausanne

ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

3. Table des figures

Avertissement

La plupart des figures de ce polycopié ont été créées à l'EPFL. Toutefois, les auteurs ont utilisé un certain nombre de ressources dont les références sont citées. Si l'une ou l'autre de ces ressources ne sont pas référencées correctement ou font l'objet d'un droit d'usage particulier, nous vous prions de bien vouloir le signaler à l'auteur.

Figure 1-1 : Les 3 segments du système GPS	4
Figure 1-2 : Satellite NAVSTAR GPS.....	5
Figure 1-3 : Constellation des satellites GPS autour de la Terre	6
Figure 1-4 : Disponibilité des satellites GPS pour une période de 24 heures à l'EPFL.....	7
Figure 1-5 : Description de l'orbite d'un satellite	8
Figure 1-6 : Situation des stations américaines de contrôle de GPS.....	9
Figure 1-7 : Positions des stations du réseau AGNES (source swisstopo, 2010)	9
Figure 1-8 : Les fréquences et signaux GPS.....	10
Figure 1-9 : Précision interne des mesures de phase de l'onde porteuse.....	11
Figure 1-10 : Précision interne des mesures de code P et C/A.....	11
Figure 1-11 : Effet de la suppression de la SA sur les mesures de code (C/A)	13
Figure 1-12 : Principe de mesure de la pseudo-distance.....	14
Figure 1-13 : Localisation absolue à partir de trois satellites.....	15
Figure 1-14 : Principe de la localisation relative (ligne de base $P_1 -$ P_2).....	16
Figure 1-15 : Précision horizontale d'une trajectoire mesurée par GPS code.....	17
Figure 1-16 : Architecture EGNOS (source ESA).....	18
Figure 1-17 : Services EGNOS	19
Figure 1-18 : Bilan d'erreurs GPS - EGNOS.....	20
Figure 1-19 : Vue d'artiste du satellite test GIOVE de Galileo (source ESA)	20
Figure 1-20 : Bandes de fréquence de la navigation par satellites	21