

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**Université SAAD DEHLEB BLIDA  
Faculté des Sciences de l'Ingénieur  
Département : Aéronautique**



**Mémoire de fin d'études  
En vue d'obtention  
Du diplôme d'ingénieur en Aéronautique  
Spécialité : Navigation Aérienne  
Option : installation**

---

**THEME**

**ANALYSE DES BROUILLAGES NON-INTENTIONNELS SUR LES  
RECEPTEURS GPS ET DES TECHNIQUES PERMETTANT D'EN  
REDUIRE LES EFFETS**

---

**Présenté par :**

**M<sup>r</sup>: BOUTI YUCEF  
M<sup>r</sup>: DJEMA NADJI**

**Encadré par :**

**M<sup>lle</sup>: DOUDOU FAIZA**

**ANNEE UNIVERSITAIRE 2009 /2010**

## RESUME

Ce projet analyse l'impact des brouillages non-intentionnels sur la réception des signaux GPS et les techniques de robustesses du récepteur GPS ce qui se caractérise par :

- Une analyse des normes et des spécifications actuelles.
- Une analyse qui nous permet de situer le problème, de déterminer les sources de brouillage potentielles et de décrire leurs impacts sur un récepteur GPS. Ainsi on analyse tout d'abord la vulnérabilité d'un récepteur civil au niveau de chacun des composants (RF, l'AGC et le CAN, les boucles et la démodulation des données) .
- Une étude bibliographique des diverses techniques de traitement de signal potentiellement utilisable pour l'élimination des brouilleurs dans un signal GPS : nous avons retenue filtrage à encoche.

Cette étude sera terminée par une partie stimulation sur Matlab où l'on essaiera d'analyser le signal GPS dans le récepteur.

## ABSTRACT

This project analyzes the impact of not-intentional jamming on the reception of GPS signals and the techniques of robustness of its receiver what is characterized by :

- An analysis of the standards and specifications current.
- An analysis which enables us to locate the problem, to determine the potential sources of jamming and to describe their impacts on a GPS receiver . Thus one first of all analyzes the vulnerability of a civil receiver on the level of each component (RF, L `AGC and the EDGE, loops and demodulation of the data).
- A bibliographical study of the various techniques of signal processing potentially usable for the elimination of the jamming in a GPS signal : we retained filtering with notch.

This study will be finished by a stimulation part on Matlab where one will try to analyze GPS signal in the receiver.

## ملخص

هذا المشروع يهدف إلى دراسة و تحليل تأثير التشويش غير المقصود على استقبال إشارات محدد المواقع العالمي GPS و

تقنيات تحسين مستقبلات هذه الأجهزة و هذه الدراسة تنقسم إلى :

- دراسة و تحليل القواعد و الخصائص الحالية لهذه المستقبلات
- دراسة تسمح لنا بتحديد المشكل و التعرف على مصادر التشويش المهمة و تحديد تأثيرها على مستقبلات GPS . و نقوم قبل هذا بدراسة حساسية جهاز استقبال GPS مدني على مستوى كل مركب من مركباته.
- دراسة عن مختلف التقنيات المستعملة لمعالجة الإشارات من أجل حذف التشويش: قمنا باختيار تقنية المصفاة ذات السن.

هذه الدراسة سوف نختتم بمحاكاة إشارات GPS داخل المستقبلات و ذلك باستخدام برنامج Matlab

## Introduction :

Le système de positionnement global (GPS) est un système de navigation par satellite destiné à fournir la position, la vitesse et l'heure n'importe où à la surface de la terre ou dans ses environs. La précision du positionnement par GPS va de 100 mètres à quelques mètres en temps réel elle peut atteindre quelques millimètres pour les applications de géodésie en temps diffère. Bien qu'il y ait des milliers d'utilisateurs civils du GPS à travers le monde, le GPS a été créé et est contrôlé par le département de la défense américain (departement of defense (DOD)).

Les satellites GPS envoient des signaux codés qui peuvent être déchiffrés par des récepteurs GPS. Le récepteur mesure la distance entre la station et plusieurs satellites à laide des codes C/A ou P. Les éphémérides des satellites sont transmises par le message de navigation permettant de calculer la position du satellite dans un repère terrestre. Chaque mesure de distance sur un satellite définit une sphère dont le centre est le satellite. Trois satellites sont donc nécessaires pour déterminer la position du récepteur en trois dimensions. Un quatrième satellite est nécessaire pour tenir compte du non synchronisation de l'horloge du récepteur et des horloges des satellites.



## 1-Différents types de système de navigation:

### 1-1-GLONASS:

Le GLONASS (**G**lobale **N**avigation **S**atellite **S**ystème) est un système d'origine russe concurrent au système GPS, certains récepteurs intègrent les systèmes Glonass et GPS de manière à présenter une meilleure précision par obtention d'une valeur moyenne entre les deux systèmes.

### 1-2-ENSS:

L'ENSS (**E**uropéen **N**avigation **S**atellite **S**ystème) est l'équivalent européen du système GPS, il a subi une très forte concurrence de la part du système américain GPS et s'avère peu ou pas utilisé.

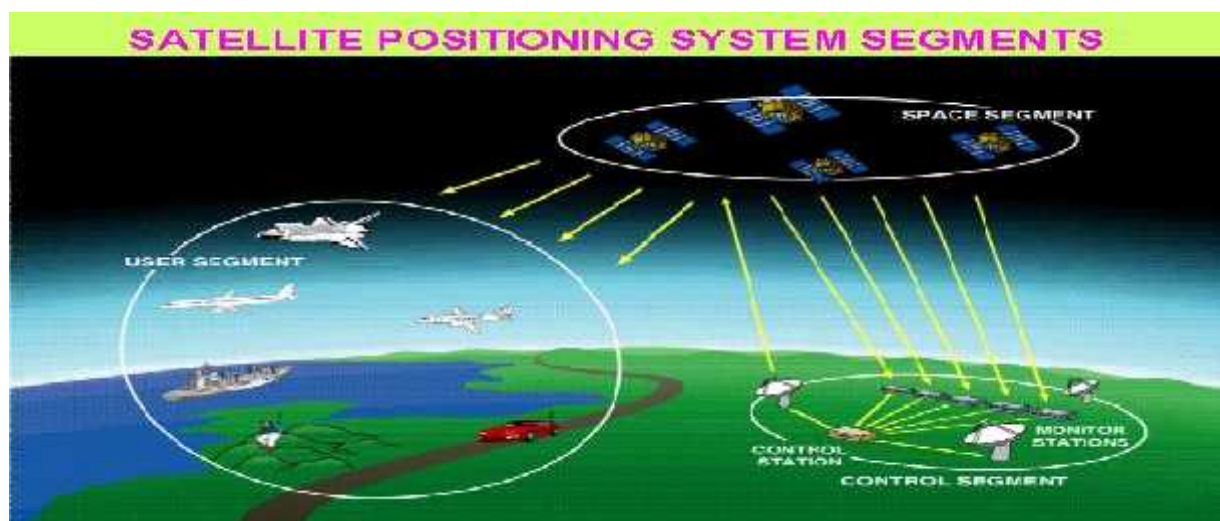
### 1-3-GALILEO:

Le système Galileo sera compatible avec GPS et il est attendu qu'il y ait de nombreux développements de récepteurs mixtes GPS - GLONASS - GALILEO. Néanmoins, il en sera indépendant, c'est-à-dire que si GPS est mis hors service GALILEO devrait continuer à fonctionner. Les premiers satellites étaient lancés en 2003 pour un ensemble pleinement opérationnel en 2008.

## 2-Description du système GPS:

**Le GPS est construit de 3 parties (3 segments) :**

- le segment Spatial (Space segment).
- le segment Utilisateur (User Segment).
- le segment de Contrôle (Control Segment).



**Figure 1.1 :** Les trois segments du GPS

## 2-1-Segment spatial:

Le segment spatial est composé d'un réseau de satellites (24+3 de réserve) en orbite quasi-circulaire autour de la terre, à une hauteur de +/- 20000 Km et dont la période de révolution est de 12 heures sidérales. Ces satellites sont répartis sur 6 plans orbitaux inclinés à 55° par rapport à l'équateur, sachant qu'elles sont espacées de 60° les une des autres.

La constellation GPS a été conçue de telle manière que partout sur terre et à tout moment, un minimum de 4 satellites soit visible au dessus de 15° d'élévation.

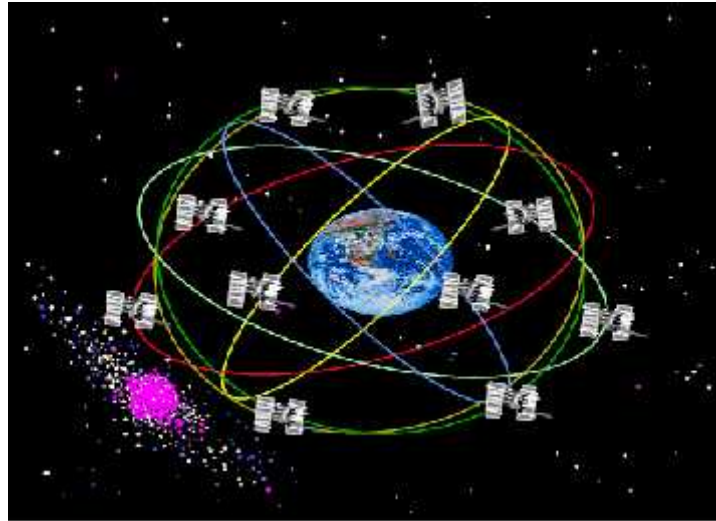
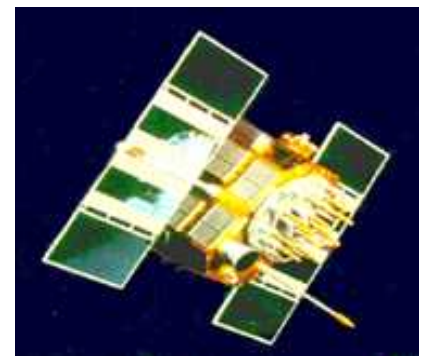


Figure 1.2 : Constellation des satellites

### 2-1-1-Caractéristique d'un satellite :

On peut dire qu'on générale un satellite est caractériser par :

- Largeur du Satellite 152 cm
- Hauteur du Satellite 191 cm
- Masse du Satellite 1066 kg
- L'air des panneaux solaires 7.2 m<sup>2</sup>
- Puissance embarquée 1136 W
- Hauteur de sa gravitation 20 180 km



Les satellites GPS sont caractérisés par une horloge ultra précise qui transmet des signaux horaires et des informations sur leurs positions.

Ils disposent de quatre horloges atomiques à leur bord, ce qui assure une grande stabilité des signaux générés. Les horloges sont quotidiennement remises à l'heure par les stations de contrôle de l'armée américaine. Les utilisateurs peuvent donc synchroniser l'horloge de leur récepteur avec cette heure précise (appelée « heure GPS »). La précision est de l'ordre de 10<sup>-12</sup> à 10<sup>-13</sup> sur un jour.

### **2-1-2-Les blocs des satellites :**

Il existe trois catégories des satellites GPS :

**Bloc I :** Satellites lancés entre 1978 et 1985 tous les satellites du bloc I sont maintenant hors service excepté un qui est activé de manière périodique, leur durée de vie est de 4.5 ans. La différence entre ces satellites et les générations suivantes est l'impossibilité de dégrader volontairement le signal transmis.

**Bloc II :** Seconde génération des satellites GPS mis sur orbite à partir de 1985. Ils ont la capacité de dégrader le signal émis. Leurs durée de vie est de 7.5 ans.

**Bloc III :** Ils ont été construits pour avoir une durée de vie de 10 ans, ils sont capables de communiquer entre eux et ont été mis sur orbite depuis 1996 afin de maintenir une constellation complète. Les satellites GPS transmettent leurs données sur deux fréquences (porteuses). Ceci afin que l'erreur introduite par la réfraction ionosphérique puisse alors être éliminée. Les signaux qui sont générés à partir de la fréquence standard 10.23 MHz sont L1 à 1575.42 MHz et L2 à 1227.6 MHz. Ces fréquences sont générées grâce à l'horloge atomique embarqué à bord de chaque satellite, les porteuses ne peuvent être utilisées directement pour le positionnement et c'est pourquoi deux codes binaires sont modulés sur les porteuses: le code C/A (Coarse Acquisition) et le code P (Precision). Il est également nécessaire de connaître les coordonnées du satellite, cette information est envoyée par le message de données qui est modulé sur les porteuses.

### **2-1-3-Couverture terrestre des satellites :**

L'arrangement des satellites permet d'avoir, dans 99 % des cas, un minimum de 4 satellites visibles à 5° au plus au dessus de l'horizon, quelque soit l'endroit où l'on se trouve sur la terre. Mais cela signifie également que pendant une minute et demie par jour le système GPS est peut ne pas indiquer une position suffisamment fiable. En outre, si le lieu n'est pas parfaitement dégagé, c'est –à-dire si le ciel n'est pas totalement visible au dessus de 5° de l'horizon, la couverture des satellites peut être totalement insuffisante. A quelques rares endroits du globe dans des zones dits de réception difficile, cette couverture n'est pas assurée dans plus de 3 % des cas.

Il arrive aussi régulièrement qu'un ou plusieurs satellites soient momentanément mis hors service. Généralement cela est dû à une maintenance périodique du satellite ou à un problème technique. Normalement un satellite n'est pas hors service plus de 24 heures, il n'y a pas plus

de 4 satellites mis hors service chaque mois et jamais plus de trois hors service en même temps. Le nombre de satellites visibles varie tout au long de la journée, et est en moyenne égale à huit.

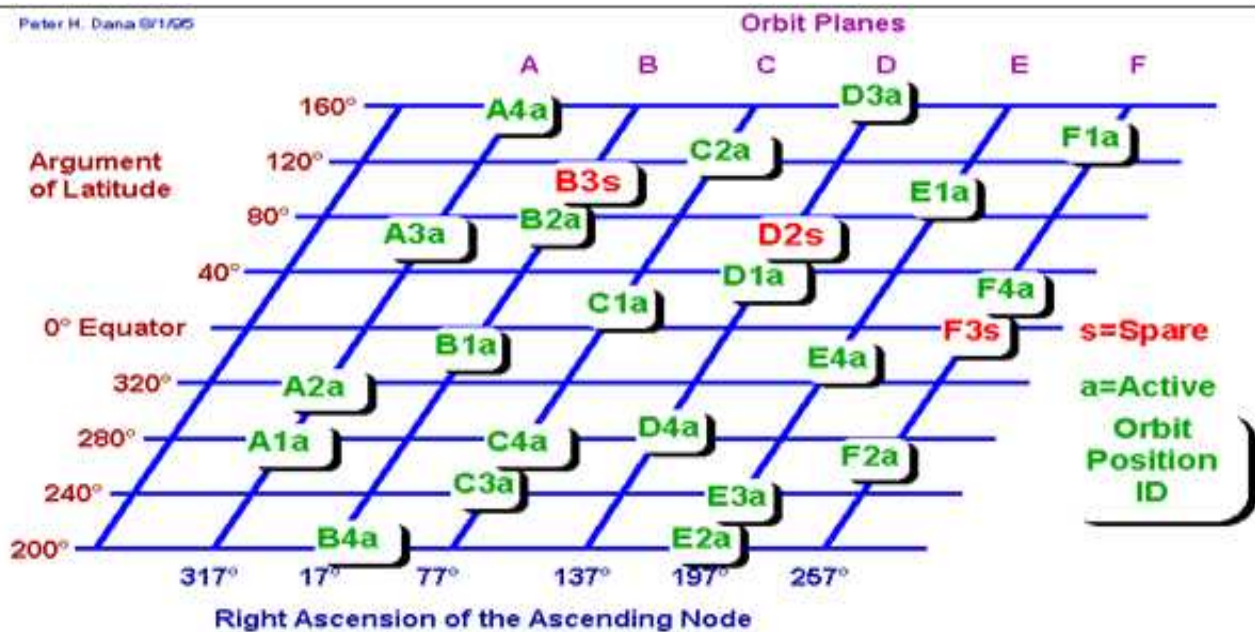


Figure 1.3 : Représentation simplifiée de constellation nominale de GPS

#### 2-1-4-L'identification des satellites :

Plusieurs systèmes de numérotation des satellites coexistent :

- La numérotation séquentielle dans l'ordre de lancement (SV).
- La numérotation PRN (pseudo random noise) donné pour les codes, qui est généralement utilisé, le numéro PRN est fournie aux utilisateurs dans le message de navigation.
- Numéro lié à l'orbite et à la position sur l'orbite.
- Numéro dans le catalogue de la NASA

#### 2-2-Segment de contrôle :

Le secteur de contrôle dépend de l'armée américaine et doit maintenir en permanence le système GPS opérationnel. Pour cela cinq stations de poursuite observent 24h/24 les satellites GPS, contrôlent et modifient leurs trajectoires et leurs transmettent des informations qui seront diffusées par le message de navigation. Les cinq stations sont Colorado spring (la station principale), Ascension Diegio, Garcia, Kwajalein et Hawaii. Le temps GPS est généré par la station principale de Colorado Spring.



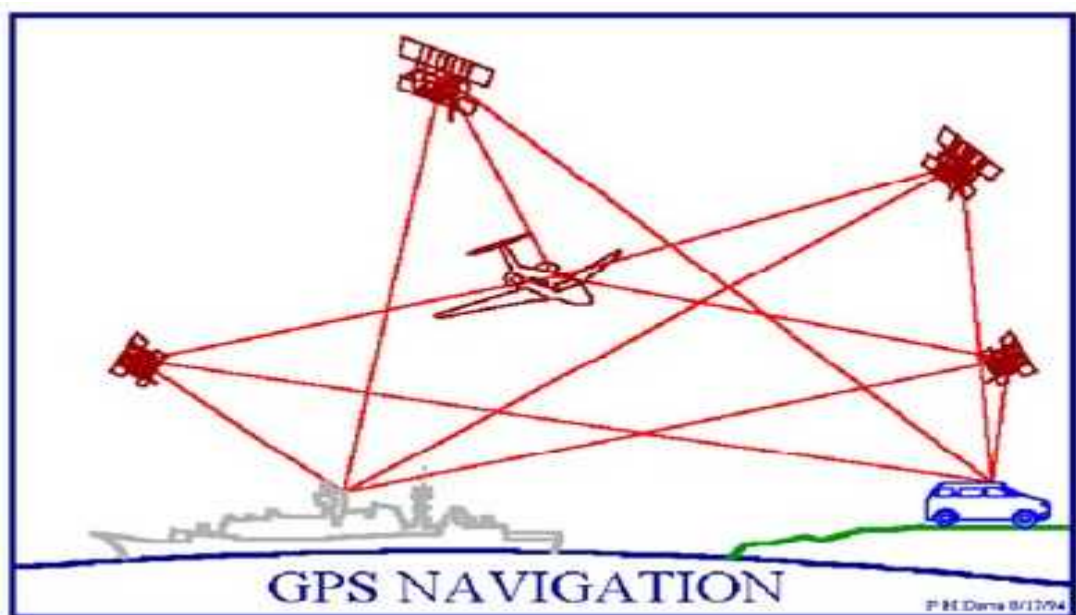


**Figure 1.4 :** Les stations de contrôles

### **2-3-Le segment utilisateur :**

Le segment utilisateur consiste en une variété GPS militaires ou civils. Un récepteur est conçu pour recevoir décoder et traiter les signaux émis par les satellites GPS. Les récepteurs intégrés (carte ou circuits spécifiques au GPS) dans d'autres systèmes sont également inclus dans le segment utilisateur.

Les utilisateurs disposent d'un moyen unique pour leurs applications de localisation, de navigation, de référence de temps, de géodésie voire de détermination d'attitude.



**Figure 1.5 :** Le segment utilisateur

### 3-Le Signal GPS :

Les satellites GPS transmettent deux codes : un code crypté pour la défense militaire américaine (signaux PPS) et un code civil (signaux SPS).

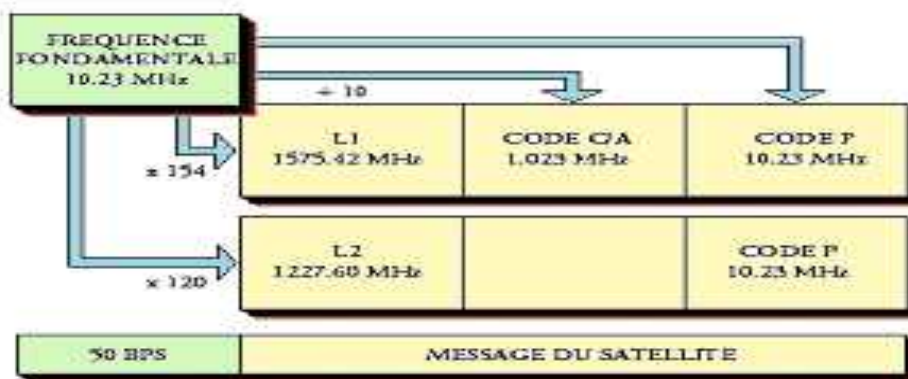
Pour l'ensemble des satellites, la fréquence fondamentale est  $f_0 = 10.23$  MHz.

A partir de la fréquence fondamentale, chaque satellite génère deux ondes porteuses :

$L_1 = 154 \cdot f_0 = 1575,42$  MHz (soit une longueur d'onde d'environ 19 cm).

$L_2 = 120 \cdot f_0 = 1227,60$  MHz (soit une longueur d'onde d'environ 24 cm).

Les signaux seront radiodiffusés sur ces deux fréquences.



**Figure 1.6 :** Dérivation des fréquences

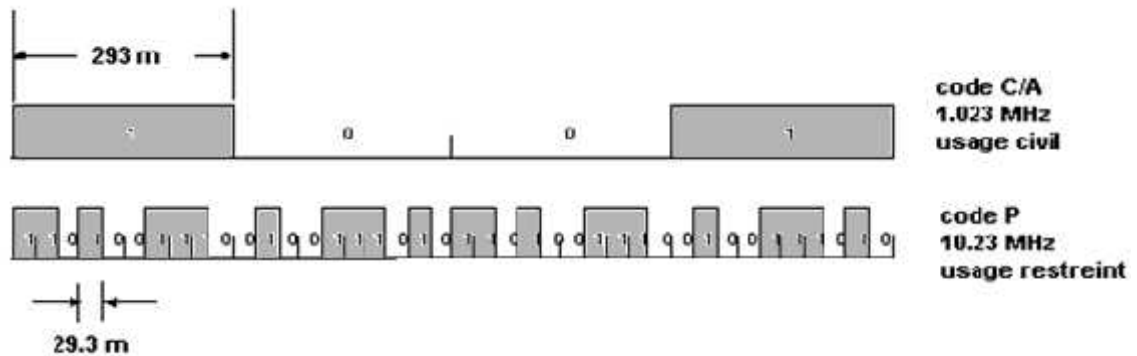
Pour des raisons techniques, ces deux ondes porteuses seront modulées par des codes pseudo aléatoires (**P**seudo **R**andom **N**oise) qui seront transmis en direction de la terre. Les informations véhiculées par ces ondes permettront de se positionner. Les codes pseudo aléatoires sont les suivants :

- Le **C/A-code** (**C**oarse/ **A**cquisition-code) disponible sur la porteuse **L1** pour les applications civiles (donc accessible à tous). C'est une série pseudo aléatoire de 0 ou 1 défini de façon déterministe par une fonction mathématique de période 1 ms à une fréquence de  $f_0/10 = 1,023$  MHz. Un code spécifique est attribué à chaque satellite afin que le récepteur puisse les identifier d'une façon univoque.  
La courte période de ce signal (1 ms), permet au récepteur une acquisition et donc une identification rapide des satellites.
- Le **P/Y-code** disponible sur les deux porteuses **L1** et **L2** pour les applications militaires. Le **P-Code** (**P**recision code) est une série pseudo aléatoire de fréquence

$f_0=10,23$  MHz. Le P-code est généralement rendu inaccessible aux civils par l'activation d'une fonction dite A.S (Anti-Spoofing) qui encode le P-code.

Ce code n'est accessible qu'aux utilisateurs possédant des clés de décryptage comme l'armée américaine et certains de ses alliés. Ses caractéristiques sont inconnues et il est donc impossible de le reproduire.

Les différents satellites émettent tous sur les mêmes fréquences (L1 et L2), mais un code individuel leur est assigné.



**Figure 1.7 : Code C/A et P**

### **3-1-Génération des signaux GPS:**

Les données de navigation sont transmises par un signal D prenant les valeurs 0 ou 1, dont la fréquence est de 50Hz (50 bits/s).

Le signal est tout d'abord additionné modulo 2 au code choisi (P ou C/A).

La porteuse L1 est modulée en phase par le signal  $P \oplus D$  et en quadrature par le signal  $C/A \oplus D$  (où  $\oplus$  représente l'opérateur XOR).

La porteuse L2 est simplement modulée en phase par le signal  $P \oplus D$  (voir figure 1.8).

Le signal  $S_{L1}$  est constitué de deux composantes en quadrature modulée respectivement par les codes C/A et P et le signal D, les codes C/A et P Coexistant sur la porteuse sans interférence, et l'on peut écrire :

$$\begin{aligned}
 S_{L1}(t) &= A_P.C_P(t).C_D(t).\cos(\check{S}_{L1}.t) + A_{C/A}.C_{C/A}(t).C_D(t).\sin(\check{S}_{L1}.t) \\
 S_{L2}(t) &= B_P.C_P(t).C_D(t).\cos(\check{S}_{L2}.t)
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

Avec :

$$C_P(t) = \pm 1 \text{ (code P).}$$

$$C_{C/A}(t) = \pm 1 \text{ (code C/A).}$$

$$C_D(t) = \pm 1 \text{ (message de navigation)}$$

$A_P$ ,  $A_{C/A}$  et  $B_P$  : Amplitudes des différentes composantes.

$\omega_{L1}$ ,  $\omega_{L2}$  : Pulsations respectives des signaux  $S_{L1}$  et  $S_{L2}$ .

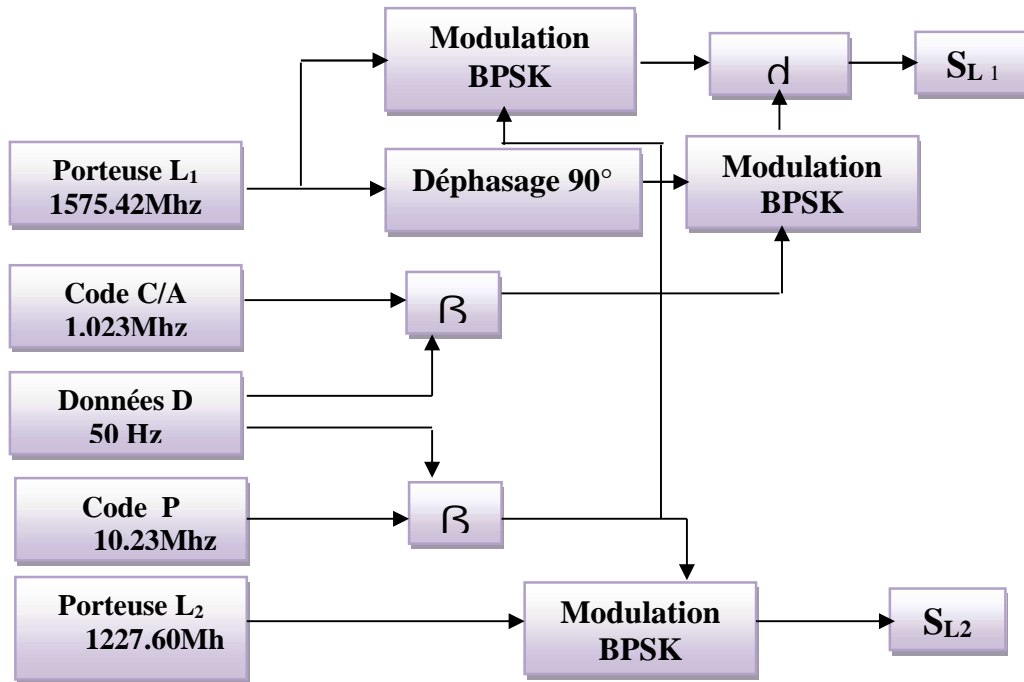


Figure 1.8 : Génération des signaux GPS

### 3-2-Les niveaux de puissance :

On obtient un spectre de raies dont l'enveloppe est montrée en Figure (1.9). Le code P génère une enveloppe en  $(\sin^2(x)/x^2)$  dont le lobe principal a une largeur de 20.46Mhz, le code C/A génère la même enveloppe avec une largeur du lobe principal de 2.046Mhz. Typiquement, la puissance associée à chaque raie est d'au moins 24 dB inférieur à la puissance totale du lobe principal, ce qui donne au lobe principal une puissance de plus de 95% de la puissance totale du signal GPS.

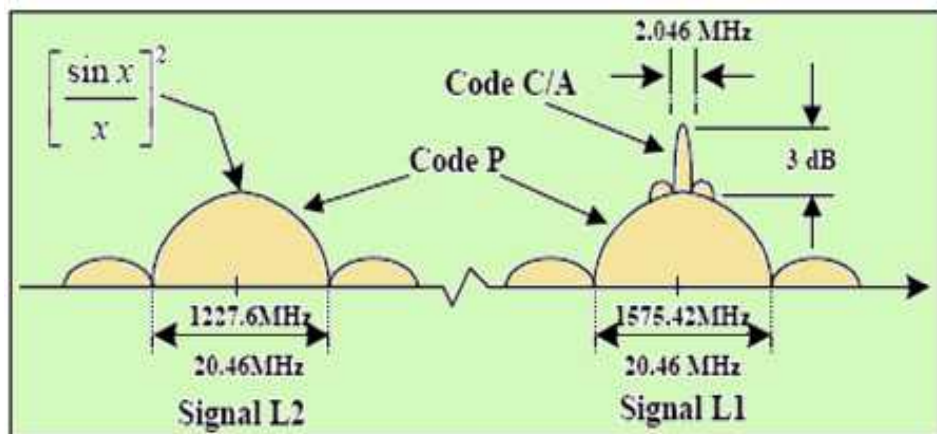


Figure 1.9 : Niveaux de puissance

### 3-3-Génération du code C/A :

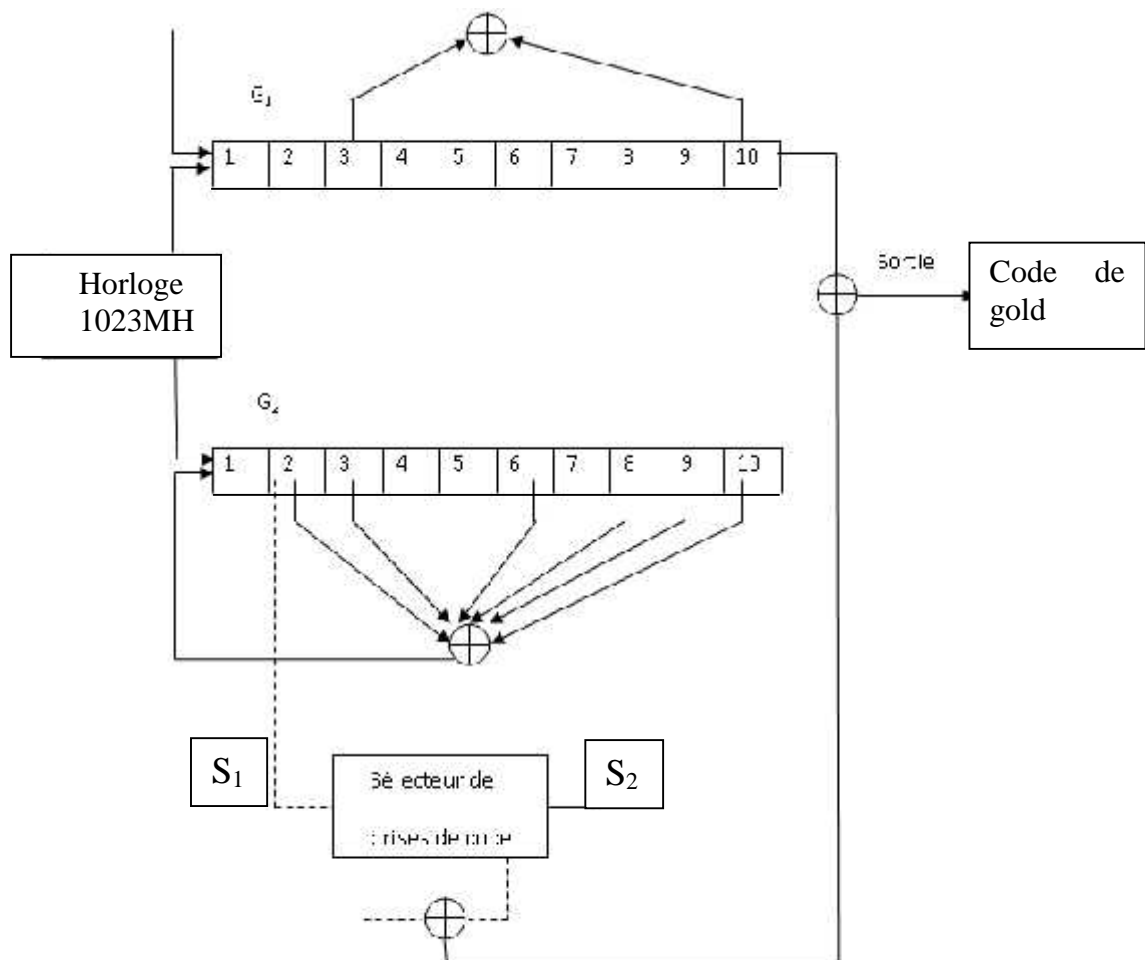
Le code C/A (Coarse/Acquisition) est un code relativement court de 1023 chips et de 1 ms de période, il est généré sous une cadence de 1.023 MHz, on note que c'est un code de Gold qui est retenu grâce à ces propriétés de corrélation. Le code est généré à partir de deux configurations linéaires de dix étages comme présente dans la figure (1.10). Ces deux registres produisent deux polynômes générateurs :

$$G_1=1+x^3+x^{10}$$

$$G_2=1+x^2+x^3+x^6+x^8+x^9+x^{10}$$

La valeur de initialisation des registres  $G_1$  et  $G_2$  est : 1111111111

Les deux registres à décalage de 10 étages sont cadencés à 1.023 MHz, pratiquement le décalage est réalisé par deux multiplexeurs sélectionnant deux sorties du registre  $G_2$ . Ces deux sorties sont additionnées modulo 2 avant d'être à leur tour additionnées à la sortie du registre  $G_1$ . Ces opérations sont réalisées par le synoptique suivant :



**Figure 1.10 :** La génération du code C/A

### **3-4-Le message de navigation :**

Nous allons à présent décrire brièvement les données de navigation contenues dans le signal GPS et la façon dont elles sont ordonnées.

#### **3-4-1-Format du message :**

Le signal émis par un satellite est composé de trames de 1500 bits. Chaque trame est divisée en sous trames contenant chacune 10 mots de 30 bits. Comme le débit du message est de 50 bits/sec, une trame est donc émise en 30 secondes.

Les sous trames 1, 2,3 contiennent un message qui en général ne change pas d'une trame à l'autre, ce sont des informations indispensables à la navigation, qui sont répétées toutes les 30 secondes, les sous trames 4 et 5, quant à elle, sont réservées à des message plus longs mais moins importants, en conséquence, il y a 25 messages différents pour les sous trames 4 et 5. On appelle alors trame principale l'ensemble des 25 trames différents, elle dure 12.5 minute.

Les mots de 30 bits se décomposent en 24 bits d'information et 6 bits de parité : les mots sont donc codés, à l'aide d'un code de hamming étendu. On rappelle qu'un code de hamming permet de corriger une erreur de transmission.

Longueur de message 1500bits (30s)	
Correction d'horloge+ les éphémérides 900bits (18s)	Des informations générales 600bits (12s)

**Tableau 1.1 : Message de navigation**

#### **3-4-2- Contenu du message :**

Pour qu'un utilisateur puisse déterminer sa position à l'aide du signal satellite, il faut qu'il connaisse la position des satellites et la distance qui le sépare de ceux-ci.

Les satellites GPS doivent donc émettre des éléments permettant de calculer leur position, ainsi que l'âge de ces informations, afin de déterminer les satellites à utiliser en priorité pour obtenir une meilleure précision. Tous ces éléments se retrouvent dans les sous trames 1, 2,3, répartis comme suit :

Sous trames	1	2	3
Contenu	L'âge des données la santé du satellite les coefficients de correction d'horloge	Les paramètres d'orbite (éphémérides)	

**Tableau 1.2 : Contenu des sous trames 1, 2 et 3**

Les éphémérides contiennent les paramètres orbitaux du satellite ainsi que leurs coefficients de correction.

Les sous trames 4 et 5 décrivent, quant à elles, les almanachs de tous les satellites en orbite et leur état de santé. L'almanach permet de calculer approximativement la position d'un satellite, et de déterminer s'il est visible ou pas.

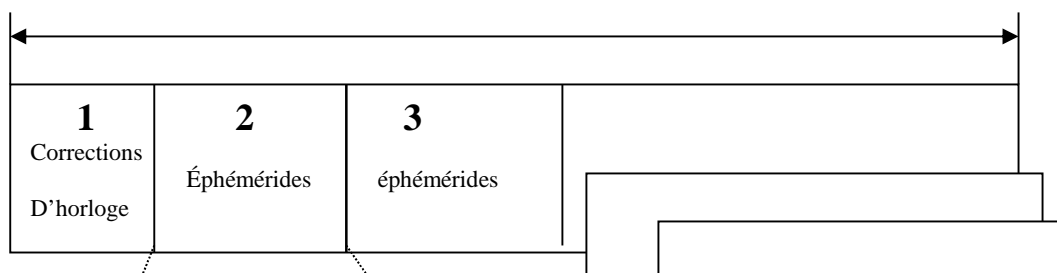
De plus, il donne une idée grossière de la vitesse relative du satellite et ainsi de l'effet doppler à prendre en compte pendant l'acquisition. La sous trame 4 contient également

Les coefficients du modèle ionosphérique, qui permet d'affiner le calcul de la distance satellite récepteur, notons pour conclure que le segment de contrôle du système GPS (les stations fixes au sol qui supervisent les satellites) calcule et rafraîchit les éphémérides régulièrement (une fois par jour), et transmet les nouvelles informations aux satellites.

Comme ces corrections ne sont pas rafraîchies simultanément, l'utilisateur a intérêt à utiliser les plus récentes (l'âge des données étant donné dans la sous trame 1).

Les informations spécifiques à chaque satellite, comme les corrections d'horloge et les éphémérides des satellites sont répétées en totalité dans toutes les "phrases" (les 900 premiers bits), soit toutes les 30 secondes pendant 18 secondes.

Les informations générales dont le contenu change à chaque phrase est transmis en totalité en 12.5 minutes (durée nécessaire pour 25 phrases).





10 mots de 0.6 secondes = 6 secondes

**Sous trame**

25 pages contenant :

- paramètre ionosphérique
- UTC temps universel coordonné
- santé de satellite

30 bits de 0.02 secondes = 0.6 secondes

**Mot**

**Figure 1.11:** Format du message de navigation

**3-4-Acquisition du signal :**

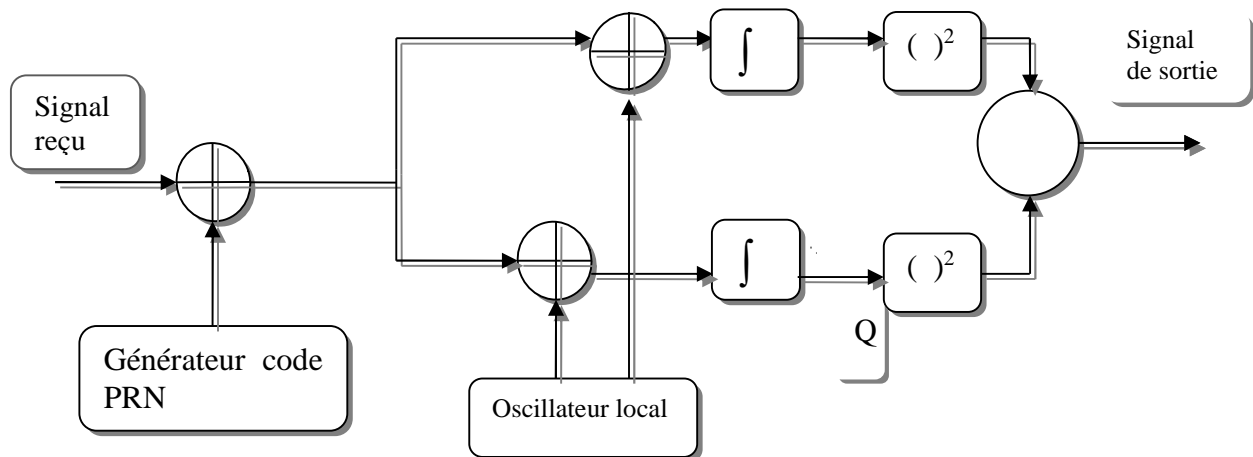
L'acquisition est une recherche tridimensionnelle dans le temps, la fréquence et le code d'accès du satellite dans le but de déterminer les satellites visibles ainsi que le code phase et la fréquence du signal reçu correspondant à un canal donné. Le code phase est nécessaire afin de générer un code PRN local qui est parfaitement aligné avec le code reçu tandis que la fréquence à son tour, affectée par un doppler variant entre  $\pm 5\text{KHz}$ , permet de générer une réplique locale utilisée afin d'enlever la porteuse du signal reçu.

Il existe trois méthode d'acquisition du signal (série, parallèle sur la fréquence, parallèle sue le code). Dans les trois méthodes, il s'agit d'une exploration des domaines temporel et fréquentiel discrétiser avec des pas prédéfinis, Pour chaque méthode le récepteur calcule la corrélation du signal reçu et avec une réplique retardée et modulée du code C/A.

Dans notre travail on s'intéresse à l'acquisition en série dont le synoptique correspondant est représenté par le schéma de la figure (1.12):







**Figure 1.12 :** Schéma de l'acquisition série

D'après cette figure, on constate que l'algorithme est basé sur la multiplication du signal reçu par un code PRN et une porteuse générée localement. Le générateur PRN génère une séquence correspondante à un satellite donné, cette séquence possède un code phase entre 1 et 1023 chips. Le signal reçu est multiplié par le code PRN puis multiplié par une porteuse générée localement. Cette dernière constitue le signal 'I' tandis que la multiplication avec la porteuse déphasée de 90° génère le signal 'Q'. I et Q sont intégrés sur un temps donné, qui est la longueur d'un code C/A donc 1ms, finalement ces deux voix sont mises au carré puis additionnées.

La sortie est la valeur de la corrélation entre le signal reçu et le signal généré localement. Si cette sortie dépasse un certain seuil prédéterminé on le localise puis on récupère la fréquence et le code phase correspondant.

En acquisition série, on a deux paramètres à balayer selon plusieurs valeurs :

- La fréquence qui doit balayer les valeurs possibles entre  $F_i - 5\text{KHz}$  et  $F_i + 5\text{KHz}$  avec un pas de 500Hz.
- Un code qui glisse sur les 1023 code phases différentes.

#### **4-Les services fournis dans le GPS:**

Le GPS fournit deux types de positionnements, le positionnement précis (**pps**) et le positionnement standard (**sps**). Seul le positionnement standard est librement disponible, le

**pps** est réservé à l'armée américaine.

#### ➤ **LE PPS**

Le PPS (précise positioning service) est un système de positionnement précis. L'erreur de positionnement maximale dans 95 % des cas est inférieure à 21 mètres en horizontale et à 27.7 mètre en vertical. L'heure peut être obtenue avec une précision de 100 nanosecondes.

Les signaux du **pps** sont transmis sur deux fréquences différentes, appelées L1, L2 et qui contiennent le code de précision ou p-code. Le p-code est généralement crypté, le mode A-S (anti-spoofing) est activé. Le signal L2 est également utilisé pour déterminer le retard introduit par les couches de l'ionosphère. Le PPS n'étant normalement pas accessible aux civils, nous ne décrivons pas ce système.

#### ➤ **LE SPS**

LE SPS (standard positioning service) est la version civile du GPS communiqué sur une seule fréquence L1, et qui contient le code d'acquisition dit "grossier"(C/A, coarse acquisition code), ainsi que les différents messages de navigation.

En cas de conflit, l'armée américaine peut supprimer totalement toute utilisation du GPS dans la zone de conflit, son fonctionnement restant inchangé en dehors de la zone de conflit.

## **Introduction :**

Connaitre la position était un besoin qui s'est de plus en plus exprimé depuis l'antiquité, notamment pour les navires, les voyageurs etc. A ces époques, seule la nature

offrait un moyen de positionnement par le biais du soleil ou des étoiles, on permettant ainsi de connaître le nord géographique. Ces moyens primaires de localisation donnée un positionnement de très faible précision. Au XX<sup>ème</sup> siècle, avec l'avènement des radiocommunications, la navigation astronomique utilisant la boussole et navigation naturelle utilisant les astres ont été abandonnés pour ouvrir les portes aux systèmes de radionavigation. Ces derniers ont exploité le progrès technologique qu'ont connu les radiocommunications, en particulier les communications par satellites. C'est dans ce cadre que le système américain NAVSTAR GPS était le premier système de navigation par satellite.

## **1-Principe:**

Le principe du positionnement GPS est très proche du principe de triangulation. On mesure la distance entre l'utilisateur et un certain nombre de satellites de positions connues.

Pour cela, le récepteur mesure la différence de temps entre l'émission et la réception du signal. Le signal voyageant pratiquement à la vitesse de la lumière, on peut appliquer la relation :

$$D=c.t$$

Avec

- **D** : distance entre le récepteur et le satellite (c'est en fait le rayon d'un cercle où le satellite serait le centre).
- **c** : vitesse de propagation des signaux radios (la vitesse retenue par convention pour le système GPS est  $c = 299\,792\,458 \text{ m.s}^{-1}$ ),
- **t** : durée de signal entre l'émission et la réception.

On obtient donc des "pseudo-distances" qu'il faudra corriger des perturbations naturelles.

Comme la longueur d'onde du signal codé est de 10 à 100 m selon le code utilisé, la distance absolue que l'on obtient n'est estimée qu'à quelques mètres près.

Connaissant la position des satellites ainsi que les pseudo-distances, on définit ainsi des sphères centrées sur les satellites et dont l'intersection donne deux positions : l'une sur le globe terrestre et l'autre dans l'espace (cette dernière sera éliminée).

Les données (code et phase) enregistrées par le récepteur GPS sur le terrain sont ensuite traitées par des logiciels qui prennent en compte les différentes sources d'erreurs dues aux perturbations naturelles.

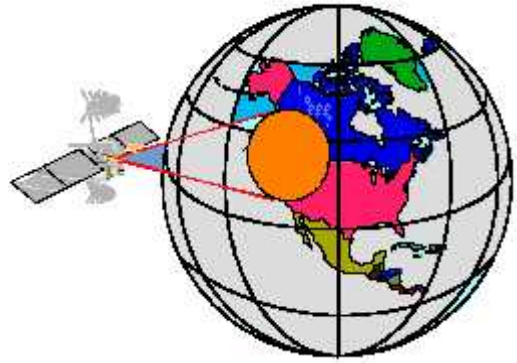
## **2-Fonctionnement de GPS:**

Les récepteurs GPS fonctionnent sur le principe de la « TÉLÉMÉTRIE ». Le récepteur calcule la distance entre un point sur terre et plusieurs satellites afin d'établir la latitude et la longitude de ce point.

## 2-1-Positionnement à partir du GPS:

### Un Seul Satellite Visible:

Supposons que vous allumez votre récepteur GPS et qu'il capte le signal d'un satellite. Il vous donne sa position et sa distance de votre poste. Une seule distance ne vous aide pas beaucoup car tout ce que vous savez, c'est que vous vous trouvez quelque part dans un cercle dont la circonférence détermine votre distance du satellite. Vous êtes toujours perdu.



---

### Deux Satellites Visibles:

Si le récepteur capte un signal provenant d'un deuxième satellite, vous pouvez cerner un peu mieux votre position. Vous savez maintenant que vous êtes quelque part dans l'intersection de ces deux cercles. Vous ne savez toujours pas où vous vous trouvez exactement, mais votre situation s'améliore.



---

### Trois Satellites Visibles :

Maintenant, si votre récepteur capte Les signaux

D'un troisième satellite vous vous trouvez dans l'intersection des trois cercles Vous savez où vous vous trouvez, mais cela manque de précision!



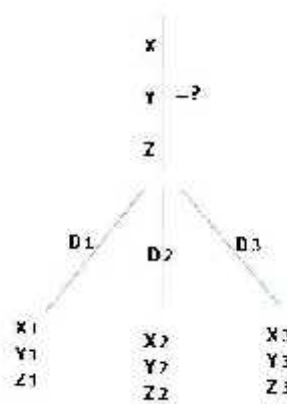
### Quatre Satellites Visibles :



Avec quatre satellites, vous obtenez votre Positionnement par point unique (absolu) et l'élévation du point. Voilà, vous savez où vous vous trouvez, à quelques mètres près!

## 2-2-Triangulation classique :

Toute position dans l'espace tridimensionnel est repérée par 3 points. Le centre du repère étant choisit arbitrairement.



$$D_i = \sqrt{(X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2 + (Z - Z_i)^2} \quad ; i = 1, 2, 3 \quad (2.1)$$

C'est le principe utilisé d'ordinaire par les instituts géographiques, en temps normal ce système s'appuie sur un réseau de balise terrestre fixe.

Ce type de positionnement est appelé positionnement en 2D, car il donne seulement une information concernant la latitude et la longitude. Il est donc nécessaire de faire intervenir un quatrième satellite dans le positionnement afin de déterminer l'altitude du récepteur GPS, on obtient alors un positionnement 3D.

Connaissant la distance qui sépare le récepteur du satellite et la position du satellite, il est possible de dessiner une sphère imaginaire autour de chaque satellite, sur laquelle se situe obligatoirement le récepteur.

L'intersection de ces deux sphères donne un cercle de position sur lequel se situe le récepteur. En continuant ainsi, on trouve que l'intersection de trois de ces sphères donne deux points, où est susceptible de se trouver le récepteur. L'utilité d'un quatrième satellite s'avère

alors de nouveau utile afin d'éliminer un de ces deux points. La position 3D est ainsi définie par quatre satellites, donc quatre sphères de positionnement.

Certains récepteurs sont capables d'affiner leurs calculs en utilisant plus de quatre satellites (ce qui rend les mesures plus faciles) tout en ôtant les sources qui semblent peu fiables. Avec une horloge assez stable, un récepteur peut calculer la position de satellite en 3D grâce à trois satellites seulement (cela reste encore un cas extrêmement rare). L'imprécision sera alors due au décalage de l'horloge.

### **3-Les différents types de mesure:**

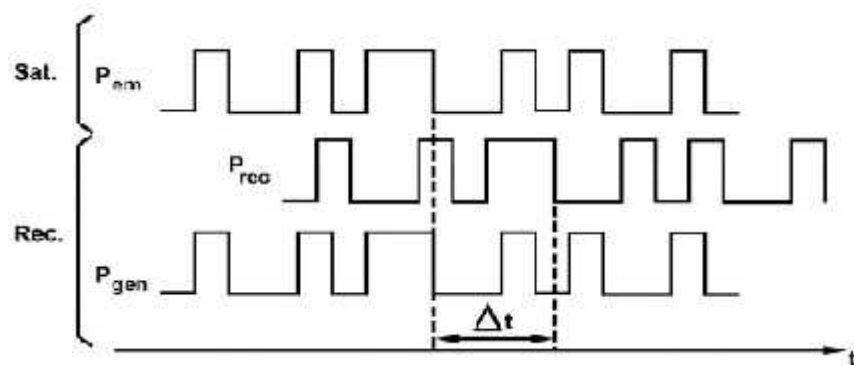
#### **3-1-La mesure de distance:**

Toute la présentation précédente reposait sur l'hypothèse que l'on connaissait exactement la distance séparant le satellite du récepteur, étudions comment calculer cette distance.

Le principe est simple : le satellite envoie un signal vers le récepteur, celui-ci détermine le temps de transmission de ce signal et ainsi peut déduire la distance le séparant du satellite grâce à l'équation: **Distance = vitesse x temps**

La célérité des ondes transmises est proche de celle de la lumière : 300 000 km/s.

Il reste donc à déterminer le temps de transmission du signal. Pour cela, le récepteur et le satellite émettent au même moment une trame pseudo aléatoire identique appelée ainsi car elle est générée par des équations très complexe, la rendant ainsi unique. Une fois que cette trame sera reçue par le récepteur, celui-ci pourra la décaler dans le temps de façon à la faire coïncider avec celle qu'il a générée. La mesure du temps de transmission est déduite de ce procédé, et ainsi on peut connaître la distance séparant le récepteur du satellite.



**Figure 2.1 : Mesure de pseudo**

Pour valider tout le raisonnement qui précède, il faut que la mesure du temps soit extrêmement précise. En effet, si une erreur d'un millième de seconde est faite, cela produit une erreur de Position de 300km. A la vitesse de la lumière, une très grande précision est de rigueur. Les horloges internes des satellites sont très précises car il s'agit d'horloges atomiques au Césium, cependant celles des récepteurs sont beaucoup moins. La solution est d'utiliser un 4<sup>ème</sup> satellite.

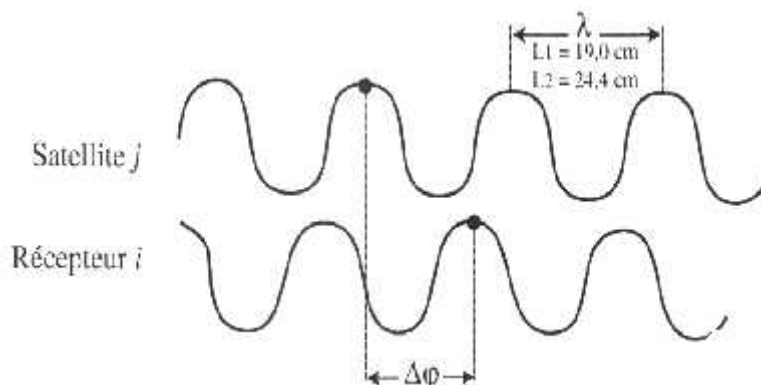
### **3-2-La mesure de phase:**

La donnée que l'on récupère à la sortie d'un récepteur GPS est la différence entre la phase de l'onde émise par un satellite et la phase d'un oscillateur interne au récepteur. La phase de l'onde reçue est affectée par l'effet Doppler (la variation de la fréquence du « son » perçu en fonction de la distance sa source et observateur) du au déplacement du satellite, la réfraction atmosphérique, et le bruit de mesure du récepteur.

On peut écrire la différence de phase  $\Phi_{ij}(t_j)$  au temps  $t$ , à la station  $j$ , et pour les satellites  $i$ , comme suit :

$$(2.2) \quad \Phi_{ij}(t_j) = \Phi_{ij}^r - \Phi_j^1 + n_{ij} + \Phi_b$$

- $t_j$  : Temps de la réception du signal à la station  $j$ .
- $\Phi_{ij}^r$  : Phase reçue à la station  $j$  en provenance du satellite  $i$ .
- $\Phi_j^1$  : Phase de l'oscillateur du récepteur  $j$ .
- $\Phi_{bruit}$  : Bruit aléatoire sur la mesure de phase.
- $n_{ij}$  : Un entier ( $n$  cycles) représentant l'ambiguïté de phase.



**Figure 2.2 : Mesure de phase**

Par ailleurs, le signal reçu au temps  $t_j$  est lié au signal émis au temps  $t_i$  par le  $i^{ème}$  satellite par relation suivante:

$$(2.3) \quad t_j = t_i + \tau_{ii}(t_j)$$

Dans laquelle  $\tau_{ij}$  est le temps de propagation qui dépend de la géométrie satellite station et des perturbations ionosphériques et troposphériques.

On en déduit que la phase de signal reçu au sol est liée à la phase transmise par le satellite par:

$$(2.4) \quad \Phi_{ii}^r(t_j) = \Phi_i^t(t_j - \tau_{ii})$$

Cependant, si l'on compare les équations (2.2) et (2.4), on se rend immédiatement compte de la difficulté qu'il y a à employer les observations de phase plutôt que les pseudo-distances. Avec ces dernières, on mesure directement la distance satellite récepteur. Avec les observations de phase, le terme d'ambiguïté (nombre de cycles entiers) doit être estimé avant que l'on puisse tirer avantage de la précision de cette observation. L'estimation de l'ambiguïté mène à des complexités dans l'utilisation des observations de phase, inexistantes avec les pseudo-distances. Le tableau qui suit, résume les avantages et les inconvénients des deux types d'observations :

	<b>Pseudo distances</b>	<b>Observations de phase</b>
<b>Avantages</b>	Non ambiguës Simples	Possibilité d'une grande exactitude de positionnement
<b>Inconvénients</b>	Faible exactitude de positionnement	Complexité plus grande

**Tableau 2.1 : Comparaison entre les deux types de mesures**

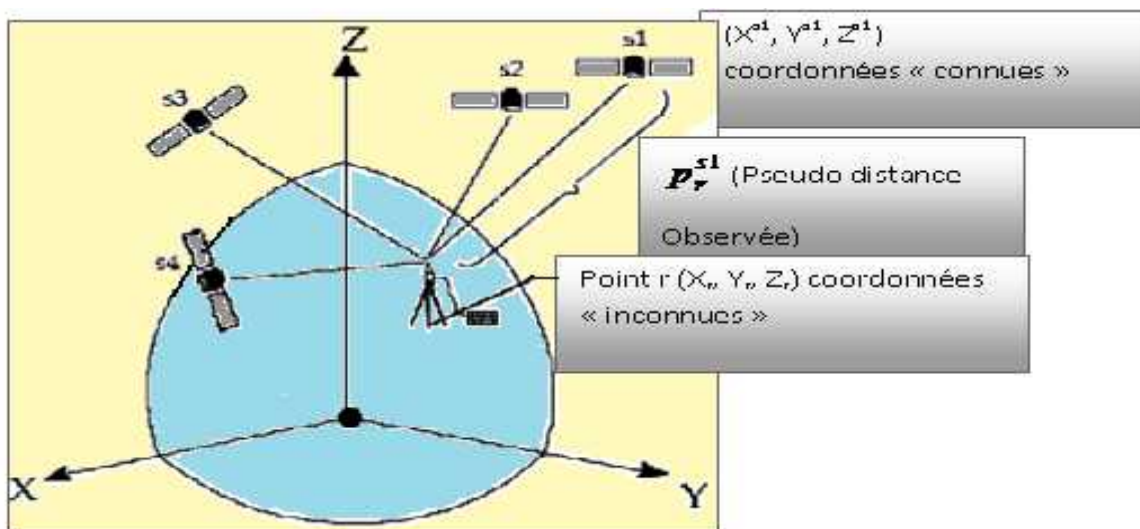
#### **4-Types de positionnement GPS :**



Jusqu'à présent, nous avons décrit les trois segments du GPS et les composantes des signaux diffusés par les satellites. Les principales méthodes de positionnement sont : Positionnement absolu et positionnement relatif.

#### **4-1-positionnement absolu :**

Le positionnement au moyen du GPS peut s'effectuer de façon absolue ou de façon relative. En positionnement absolu, les coordonnées d'un récepteur en un point (inconnu) sont établies relativement au cadre de référence des satellites d'après les positions (connues) des satellites GPS suivis. Le positionnement absolu est également dit positionnement autonome ou simplement positionnement par point unique (point positioning). Dans le positionnement relatif, les coordonnées d'un récepteur en un point inconnu sont établies relativement à celles d'un récepteur en un point connu.



**Figure 2.3 :** Positionnement autonome

La figure (2.3) illustre la notion de positionnement autonome. Grâce aux éphémérides, la position de n'importe quel satellite à n'importe quel moment dans le temps peut être calculée.

Sur la figure, s1, s2, s3 et s4 représentent quatre satellites différents qui sont suivis.

La position de ceux-ci est donnée par rapport au centre de la terre dans le système de coordonnées x, y et z, les coordonnées de s1 sont notées  $(X_{s1}, Y_{s1}, Z_{s1})$ , les coordonnées de r le point inconnu relativement au centre de la Terre sont  $(X_r, Y_r, Z_r)$ . La pseudo distance observée  $p_r^{s1}$ , permet d'établir la relation entre les coordonnées connues du satellite 1 et les

coordonnées inconnues du récepteur au moyen de l'équation d'un vecteur dans l'espace tridimensionnel :

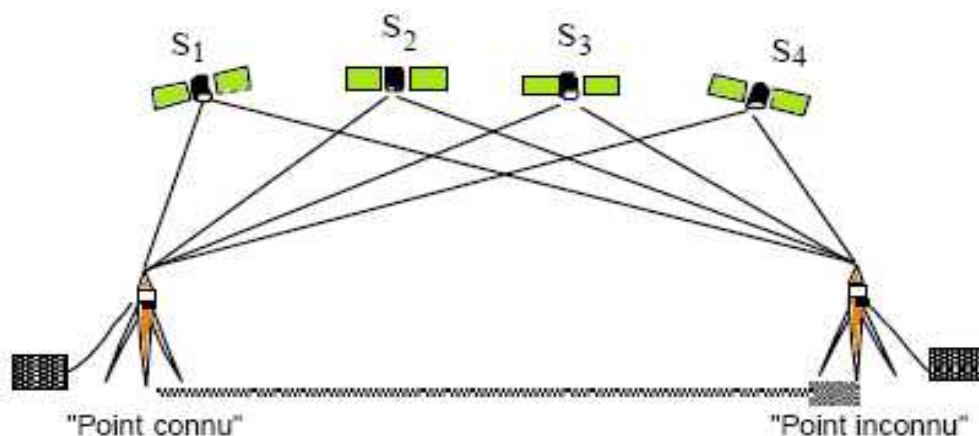
$$P_r^{s1} = \sqrt{(X^{s1} - X_r)^2 + (Y^{s1} - Y_r)^2 + (Z^{s1} - Z_r)^2} + \text{erreurs}$$

(2.5)

Une équation similaire à (2.5) décrivant la relation entre le satellite 1 et le récepteur, peut être formulée pour les différents satellites suivis. Grâce à un minimum de quatre satellites, toutes les inconnues ( $X_r$ ,  $Y_r$ ,  $Z_r$ ) et un terme relié à la synchronisation des horloges (qui fait partie des erreurs) peuvent être calculées.

#### **4-2-Positionnement relatif :**

La notion de positionnement relatif est illustrée à la figure (2.4). Plutôt que d'établir la position d'un point sur la Terre par rapport aux satellites (comme c'est le cas en positionnement autonome), la position d'un point sur la Terre est établie par rapport à celle d'un autre point connu. L'avantage du positionnement relatif sur le positionnement autonome réside dans l'exactitude beaucoup plus grande qu'il permet, puisque la plupart des erreurs dans les observations GPS sont communes aux points (connu) et (inconnu) et peuvent être annulées durant le traitement des données.



**Figure 2.4 : Positionnement relatif**

Les expressions positionnement différentiel et positionnement relatif sont parfois employés indifféremment l'une pour l'autre. Toutefois, étant donné que le positionnement différentiel désigne plus souvent un type particulier de positionnement relatif, appliquant des corrections mesurées à un point de position (connue) aux observations effectuées en un autre, de position (inconnue),

## **5-Les sources d'erreurs :**

### **5-1-Les orbites :**

L'erreur d'orbite est la différence entre la position d'un satellite calculée au moyen des éphémérides diffusées et la position réelle du satellite dans l'espace. L'influence des orbites sur la détermination dépend du mode de positionnement, pour un positionnement absolu, l'erreur sur la position du satellite affecte directement la position de la station lorsqu'on utilise en temps réel les éphémérides radiodiffusées, on obtient un positionnement à 10m près. Lors d'un positionnement relatif, l'erreur introduite par les orbites sur la ligne de base est proportionnelle à la longueur de la ligne, les orbites radiodiffusées utilisées pour le positionnement en temps réel ont généralement une précision de quelques mètres, ce qui implique une erreur de plusieurs centimètres sur une ligne de base de 100 km.

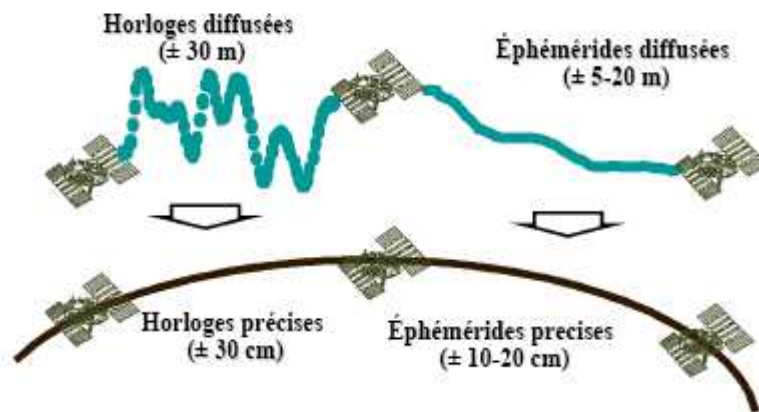


Figure 2.5: Erreurs d'éphéméride et d'horloge

### **5-2-Les dégradations volontaires du système :**

Les signaux émis par les satellites sont soumis à des dégradations volontaires visant d'une part à limiter l'utilisation civile du système GPS et d'autre part à en protéger l'utilisation militaire: l'accès sélectif (SA : *Selective Availability*) et l'anti-brouillage (AS : *Anti-Spoofing*)

#### **5-2-1-L'accès sélectif :**

L'accès sélectif (SA) consiste en au moins deux types de dégradation :

- Dégradation par déphasage de la fréquence d'horloge des satellites.
- Dégradation des données du message de navigation (éphémérides et paramètres d'horloge).

### **5-2-2-L'antibrouillage :**

L'antibrouillage (AS) consiste à ajouter au code P, sur  $L_1$  et  $L_2$ , le code W, classifié militairement et ainsi former le code Y. Une telle mesure permet d'éviter le brouillage volontaire du système par un utilisateur qui diffuserait un signal proche de celui du GPS et créant ainsi des erreurs de positionnement pour les autres utilisateurs. L'accès au code P et aux clefs de protection SA et AS correspond au service PPS de positionnement précis.

### **5-3-Les horloges :**

L'instabilité des horloges est la source d'erreur la plus importante dans les mesures GPS. Les horloges des satellites sont les plus stables et leurs dérives impliquent seulement des variations de 10 à 30 m sur la mesure de la distance satellite-station. Par contre la grande instabilité des horloges des récepteurs induit un décalage de 10 à 100m, la correction d'horloge satellite est modélisée à partir des données du message de navigation par contre la correction d'horloge récepteur est estimée lors du calcul.

### **5-4-L'ionosphère :**

Les effets induits varient entre moins d'un mètre et une cinquantaine de mètres. En positionnement relatif, lorsque les stations sont proches (quelques kilomètres) les variations ionosphériques observées sont corrélées et le calcul de la ligne de base n'est pas affecté. Pour des lignes de base plus importantes, les effets ionosphériques ne sont plus les mêmes sur les différents trajets satellite-station, une correction est alors nécessaire. Ces effets sont dépendants de plusieurs paramètres : la latitude (plus agité aux pôles et à l'équateur), l'activité solaire, le champ magnétique terrestre, la période de l'année, le jour et la nuit. L'ionosphère étant un milieu dispersif, la réfraction induite sur les signaux dépend de leurs fréquences. Cette propriété est utilisée pour la correction de ces effets sur les signaux GPS. En combinant linéairement les observations sur les deux fréquences ( $L_1$  et  $L_2$ ), on supprime au premier ordre le retard ionosphérique.

### **5-5-La troposphère :**

La troposphère est la couche basse de l'atmosphère, elle s'étend du sol jusqu'aux environs de 80 km d'altitude. C'est un milieu non dispersif pour les ondes de fréquence inférieure à 20 GHz, les combinaisons entre les deux fréquences  $L_1$  et  $L_2$  ne permettent donc pas de s'affranchir des hétérogénéités de propagation. La troposphère engendre un retard sur le signal correspondant à un allongement moyen de la distance satellite-station supérieur à 2 mètres. Cet allongement dépend de la température et de la pression le long du trajet du signal ainsi que de l'altitude de la station.

### **5-6-Les multi trajets :**

Sont introduites lorsque des signaux reçus directement se combinent à d'autres, réfléchis par des objets voisins, de telle manière que le vrai signal subit une interférence attribuable au signal réfléchi, ils ne sont pas modélisables, car ils dépendent de l'environnement de l'antenne.

Ils peuvent engendrer des interférences destructrices ou, fausser les calculs si le signal réfléchi est retenu par le récepteur, de plus, selon la direction de l'antenne et le coefficient de réflexion, le signal réfléchi peut être plus fort que le signal original.

Les mesures sur les codes sont plus sensibles et on peut avoir de 10 à 20m de différence en comparant des pseudo-distances à deux époques consécutives.

Pour les mesures de phases, en relatif, avec des distances courtes et une durée d'observation assez longue, l'erreur de trajet multiple est d'ordre du centimètre, l'effet augmente si l'on diminue le temps d'observation.

### **5-7-Les erreurs de précision :**

La position de l'observateur, ainsi qu'elle est calculée par le récepteur GPS, est fournie avec une précision de l'ordre de quelques mètres. Cette précision dépend d'un certain nombre de facteurs, l'un des plus significatifs étant le nombre de satellites (visibles). En outre, la configuration des satellites visibles c'est-à-dire les positions respectives des uns par rapport aux autres à une influence considérable sur la précision des résultats. En effet, plusieurs satellites groupés dans une même région du ciel conduisent à une précision plus faible que le même nombre de satellites judicieusement répartis sur la demi-sphère céleste au-dessus de l'observateur.

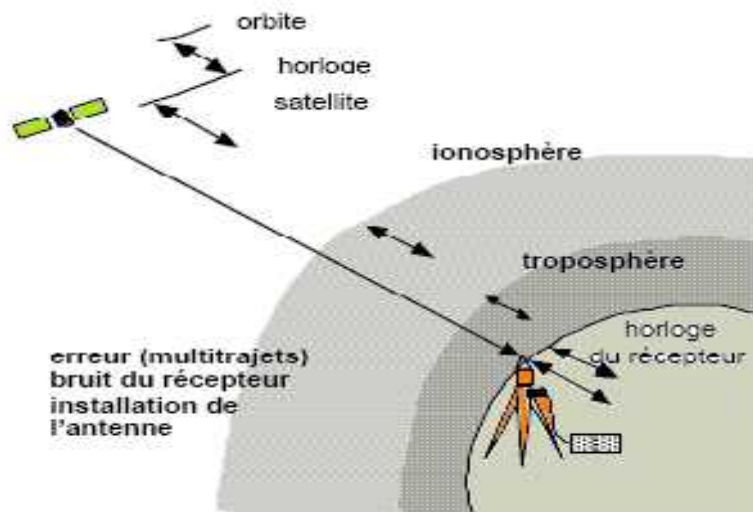


Figure 2.6 : Erreurs courantes

### **6-Les récepteurs GPS :**

Les récepteurs GPS peuvent être sous-divisés en trois catégories :

- Les récepteurs multicanaux

- Les récepteurs séquentiels
- Les récepteurs multiplex

**Les récepteurs multicanaux :** constituent le top-niveau des récepteurs GPS. Ils sont généralement utilisés pour des applications ultra précises ou dans des applications de positionnement dynamique.

**Les récepteurs séquentiels :** existent en version un ou deux canaux. Le deuxième canal est généralement utilisé pour l'acquisition d'un satellite initial et pour recevoir le message de navigation.

**Les récepteurs multiplex :** forment un compromis entre les récepteurs multicanaux et séquentiels. Ils peuvent malgré un principe de fonctionnement analogue à un récepteur séquentiel et grâce à une conception améliorée, faire un enchaînement entre les différents satellites en moins de 20 millisecondes.

La majorité des récepteur traite uniquement le code C/A (coarse acquisition) tandis que d'autres ont la capacité d'acquérir le code P (precision), un récepteur P acquiert une première fois le code C/A pour obtenir le temps GPS puis il accroche le code P.

Les récepteurs bi-fréquences estiment le retard ionosphérique améliorant de ce fait la précision des mesures. Un récepteur mono-fréquence (exploitant uniquement L1) utilise le modèle GPS de l'ionosphère pour élaborer ces corrections.

Il existe des utilisations spécifiques, pour les différents récepteurs GPS tels qu'en aéronautique ou en marine. Si le traitement des signaux GPS est identique pour un appareil d'une gamme donnée, les interfaces utilisateurs sont adaptées a l'application, un récepteur GPS dédiée à la navigation visualisera le cap ou la distance parcourue, en plus de la position, tandis qu'un récepteur de géodésie affichera les retards ionosphériques ou le biais d'horloge.

### **6-1-Structure générale d'un récepteur :**

Un récepteur GPS est constitué de sous-ensembles parfaitement délimités. On distingue :

- Une antenne.
- Un préamplificateur à faible bruit (LNA).
- Un module radiofréquence (RF).
- Un module numérique.
- Une interface utilisateur (clavier et afficheur).
- Une alimentation.

#### **6-1-1-L'antenne :**

L'antenne convertit l'énergie des ondes électromagnétiques en provenance des satellites en un courant électrique capable d'être traité par les circuits électroniques du récepteur. La taille et la forme de l'antenne sont critiques et doivent être adaptées aux signaux reçus. L'antenne peut capter uniquement L1 ou, L1 et L2.

### **6-1-2- Le préamplificateur à faible bruit :**

Le rôle du préamplificateur à faible bruit est d'amplifier le signal utile tout en minimisant le niveau du bruit thermique. Le niveau des signaux captés est très faible.

Le préamplificateur doit donc amplifier ces signaux sans dégrader de façon notable leur qualité. Ce sous-ensemble doit se situer à proximité de l'antenne pour limiter la dégradation du rapport signal à bruit. Un câble coaxial permet d'une part, de transmettre le signal au récepteur lui-même et d'autre part d'alimenter le préamplificateur.

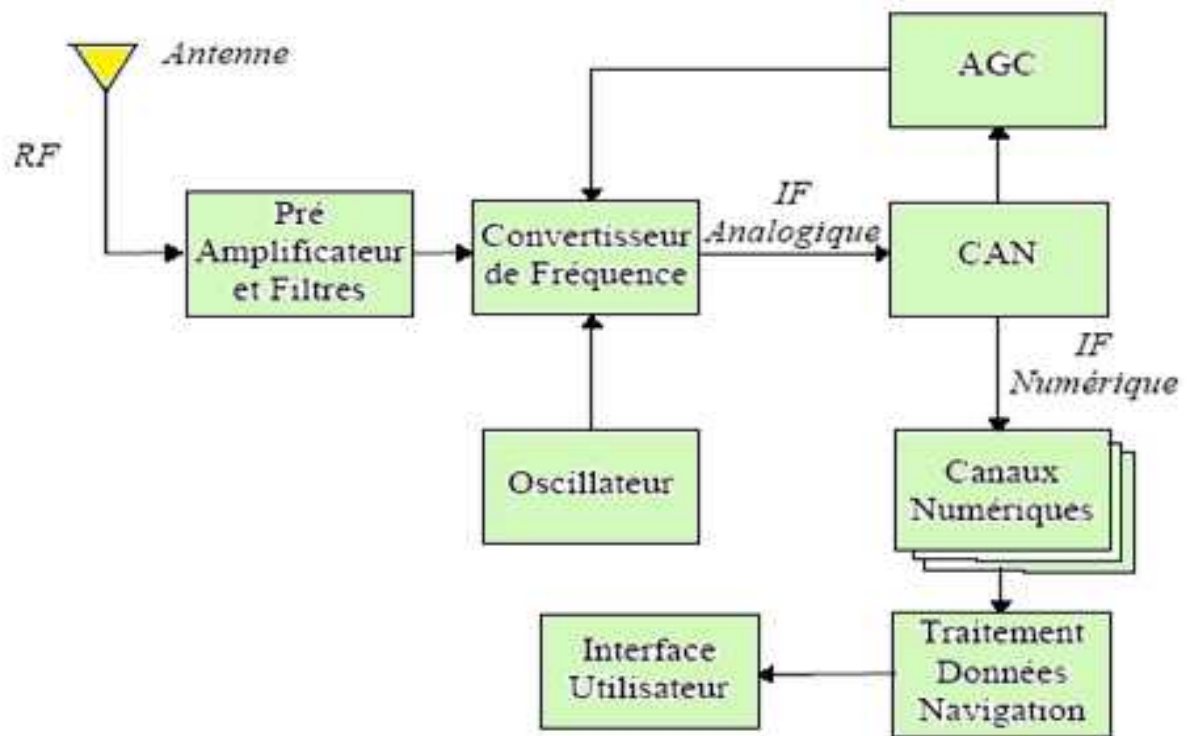
Un filtre en tête atténue les fréquences hors bande. Celui-ci peut être à large bande recouvrant les fréquences de L2 à L1 ou sélectif à double bande. Le choix du filtre dépend de l'application. Au minimum, un filtre non sélectif est nécessaire pour supprimer les fréquences images du signal avant la transposition des fréquences.

### **6-1-3-Le module RF :**

Le module RF assure la transposition des signaux L1 et L2 (le cas échéant) vers des fréquences plus faibles, appelées fréquences intermédiaires (IF). Ces IF permettent de traiter plus aisément le signal. La transposition est effectuée grâce au battement, ou produit du signal d'entrée avec une sinusoïde pure ; appelée oscillateur local (LO), générée par un synthétiseur de fréquence. Ce dernier est piloté par l'horloge à quartz du récepteur. Le signal IF contient la modulation du signal. Seule la fréquence porteuse a été décalée en préservant la dérive due à l'effet doppler. Les filtres IF offrent des bandes étroites adaptées au signal. Un dispositif de contrôle automatique de gain (GAC) régule le niveau du bruit (le signal est largement sous le bruit thermique avant sa compression par l'opération de corrélation). Le signal est numérisé après un échantillonnage, la conversion A/N a lieu directement en fréquence intermédiaires IF à quelques mégahertz pour les récepteurs C/A. ceci autorise une plus grande souplesse dans le traitement numérique pour pouvoir, par exemple prendre en compte d'autres satellites (Glonass...).

### **6-1-4-le module numérique :**

Les premières architectures des récepteurs GPS ont été analogiques. Les récepteurs d'aujourd'hui traitent numériquement le signal au plus tôt dans la chaîne. Les circuits numériques remplacent les circuits analogiques en fonction de leurs performances et de leur coût. Dans le module numérique, on distingue principalement un ou deux circuits ASIC (Application Specific Integrated Circuit) dédiés au traitement GPS et un processeur de signal. On trouve également les circuits traditionnels d'une structure programmée (mémoires, ports d'interface,...)



**Figure 2.7 :** Structure d'un récepteur GPS

### **Conclusion :**

Dans cette approche non exhaustive du GPS, nous pouvons retenir l'immense champ d'action de ce système et ses multiples applications. Cependant son utilisation courante avec un matériel classique ne permet pas d'obtenir des précisions supérieures à 50m suffisantes dans certains cas, mais pas dans tous.

### **Introduction :**



Le Système GPS a été déclaré opérationnel le 8 décembre 1993. Il présente un grand intérêt pour plusieurs communautés scientifiques et pour différentes raisons. L'utilisation du système de navigation par satellite GPS pose à l'heure actuelle au moins 4 problèmes (La disponibilité, La continuité de service, l'intégrité et la vulnérabilité aux brouillages).

Le système GPS n'est pas nécessairement plus vulnérable aux brouilleurs que les autres systèmes de radionavigation, mais la localisation de sa bande de fréquence d'opération et son principe de fonctionnement le rendent sensible à plusieurs types de brouilleurs et de perturbations.

Pour l'aviation Civile pose des problèmes liés à l'intégrité du système et à sa vulnérabilité au brouillage. L'intégrité peut être garantie, au moins partiellement, par des stations de contrôle terrestres additionnelles, par l'augmentation du nombre de satellites ou par un traitement au niveau du récepteur, tel qu'un couplage avec d'autres moyens de détection ou de navigation secondaire.

L'objet de ce chapitre est de recenser les sources potentielles de brouillage sur les signaux de GPS. Il est question alors du brouillage non Intentionnel et celui volontaire (Intentionnel) qui pourrait également être présent à cause des limitations imposées par les règles de cohabitation des systèmes dans les bandes considérées. Il faut savoir que la puissance nominale de réception des porteuses à l'entrée du récepteur est de l'ordre de

-160 dBW pour un angle d'élévation de  $5^\circ$  et en supposant un gain d'antenne du récepteur de '0' dB. Le faible niveau de ce signal fait qu'un nombre de signaux extérieurs d'origines diverses peuvent se retrouver à l'entrée du récepteur avec des niveaux comparables, voire largement supérieurs. Heureusement le gain de traitement apporté par la procédure de désétalement de spectre permet de réduire l'influence de ces brouilleurs.

## **1-Classification des brouilleurs :**

Il s'agit des brouilleurs retrouvés dans le domaine civil et des autres types de brouilleurs, on peut les classer selon leur largeur de bande:

- Brouilleurs à bande étroite: les raies parasites.
- Brouilleurs à bande semi étroite: 10 KHz à 100 KHz.
- Brouilleurs à bande large: plus de 100 KHz.

On peut faire, pour les brouilleurs GPS, une première distinction entre les brouilleurs intentionnels et les brouilleurs non intentionnels. Les premiers doivent être pris en compte pour les applications militaires, ce type de brouilleur ne sera pas considéré. On se limite ici aux problèmes concernant les récepteurs d'usage civil.

Les effets du brouillage sur un récepteur GPS est caractérisé par des puissances pour un signal brouillé en termes de :

- rapport signal à bruit (S/N)
- rapport brouilleur à signal (J/S).

On verra que les sources potentielles des brouilleurs pour une application normale sont nombreuses et qu'il est nécessaire de connaître les relations entre la puissance des signaux mise en jeu, les isolations entre émetteurs, les distances de brouillage.

## **2-Vulnérabilités d'un récepteur GPS :**

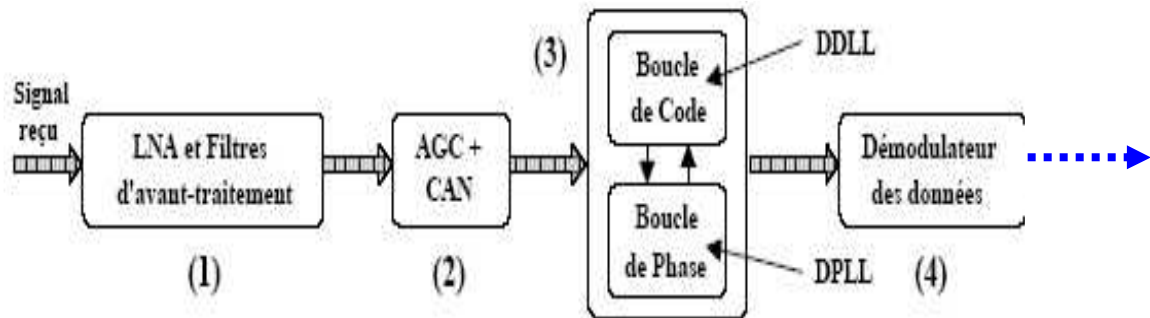
Cette section introduit l'architecture interne générique d'un récepteur GPS par l'identification de ses modules qui sont les plus vulnérables aux brouilleurs radiofréquences. La résistance aux brouillages dépendra de la structure du signal GPS, du design du récepteur ainsi que de l'architecture du système global.

Il existe plusieurs types de design de récepteurs GPS disponibles sur le marché qui utilisent différentes techniques de conversion en fréquence, d'acquisition de code, de maintien des boucles accrochées et de traitement du signal.

L'analyse qui suit est basée sur le schéma bloc de la figure (3.1) représentant l'ensemble des parties d'un récepteur GPS générique. Il existe quatre régions où le récepteur numérique est vulnérable.

1. L'étage (1) de réception RF comprenant un module d'amplification et de filtrage.
2. L'étage (2) un contrôle automatique du gain (AGC) et un convertisseur analogique numérique (CAN).
3. L'étage (3) la boucle de code (DDLL) qui isole un code particulier en provenance d'un satellite GPS.

4. L'étage (4) la boucle de phase (DPLL) qui maintient la phase de la porteuse placée en fréquence intermédiaire.
5. L'étage (5) de démodulation des données qui extrait le message de navigation.



**Figure 3.1 :** Ensemble des parties d'un récepteur GPS générique

### 2-1-Etage de réception RF :

Les brouilleurs captés par l'antenne rencontreront typiquement un amplificateur à faible bruit (LNA : low noise ampli) utilisé pour amplifier le signal GPS noyé dans le bruit.

Il y a deux types de brouillage peuvent être identifiées :

1. Des brouilleurs dans la bande GPS.
2. Des brouilleurs proches de la bande GPS.

➤ **Les brouilleurs dans la bande GPS :** contribuent à augmenter le niveau de bruit dans la bande passante du récepteur et à dégrader ainsi ses performances. Principalement les signaux tels que les harmoniques, les produits d'intermodulations ou simplement les bruits hautes fréquences contribuent aux brouillages des signaux GPS.

➤ **Les brouilleurs proches de la bande GPS :** peuvent perturber le récepteur en désensibilisant la chaîne RF (c'est-à-dire que les niveaux élevés de puissances reçues conduisent à une possibilité de désajustement du contrôle automatique de gain et à une perte de fidélité des mesures du signal GPS) ou en pénétrant l'étage de traitement du signal.

Le niveau de puissance des brouilleurs juste au dessus du niveau de puissance du signal GPS traversera facilement cet étage d'amplification, les brouilleurs de puissance moyenne peuvent amener l'amplificateur à travailler en région non linéaire. La sortie devient rapidement instable et l'amplificateur sature. A cause des signaux de brouillage, le signal GPS de faible intensité est soumis à un système non-linéaire et le fonctionnement dans ce régime,

même pour une courte période, entraîne des perturbations pouvant aller jusqu'au décrochage des boucles de maintien.

Du fait que l'amplificateur à faible bruit sature à un certain niveau, il peut être envisagé à cette étape, une technique de robustesse envers les signaux de puissances élevées.

Cette sensibilité de l'amplificateur à faible bruit due aux brouilleurs externes est une première précaution à considérer lors de la conception d'un récepteur GPS. Evidemment, cette puissance nécessaire pour causer une saturation de l'amplificateur varie selon la conception.

## **2-2-Vulnérabilité de la boucle de code :**

Le signal en provenance de l'étage de récepteur RF (antenne, LNA, filtre) entrera dans la section d'acquisition du code et de maintien de la synchronisation après que le signal ait traversé un AGC.

Encore une fois, selon les concepteurs des récepteurs GPS, les boucles de code et de phase peuvent être séparées ou imbriquées.

Dans notre modèle, le signal GPS en fréquence intermédiaire (FI) qui est échantillonné par le CAN rencontrera la boucle de code qui poursuit la phase de l'un des codes provenant des satellites GPS. La plupart des récepteurs actuels utilisent une boucle à verrouillage avance et retard (early-late DLL pour Delay Lock Loop).

La boucle de maintien du code réalise une poursuite par asservissement sur le maximum de corrélation. La corrélation du signal local de désétalement s'effectue sur la voie en retard. Les résultats de la corrélation sont comparés pour connaître le sens du biais.

La boucle de maintien du code a une bande passante faible (moins de 1 Hz) et c'est pourquoi elle peut fonctionner à des niveaux élevés de rapport brouilleur à signal (J/S). Elle constitue la section la plus résistante du récepteur, le bruit étant atténué dans un rapport égal au gain d'étalement suite à la corrélation.

Un brouilleur à spectre étroit sera en effet étalé par le code pseudo- aléatoire local multiplié par  $\sin(\tau/2)$  où

$\tau$ : Correspond à la différence de phase entre l'avance et retard.

Un corrélateur standard avec un délai entre la voie avance et retard d'une bribe

( $T_{bribe} = 2\tau = 1 \sim \text{sec}$  (microsecondes)) étale un brouilleur à spectre étroit en un spectre de raies d'enveloppe  $\sin(x)^2/x^2$  dont la largeur de bande du lobe principal est  $(1/\tau)$  (=2MHz).

Par contre, pour un corrélateur dont les voies avance et retard seraient espacées de 0.2 bride seulement, le même brouilleur serait étalé pareillement avec une largeur du lobe principal de 10MHz environ ; sont 5 fois plus efficace.

On note que le choix d'espacement entre les deux répliques 'Early' et 'Late' possède une influence sur les brouilleurs à spectre étroit.

D'où le bénéfice du contrôle de la précision du délai des codes de la boucle de désétalement mais en contre partie, le désavantage de fonctionner sur une largeur de bande plus large.

L'atténuation de la puissance du brouilleur causée par ce processus d'étalement est de l'ordre de :

- 24 dB pour un brouilleur à bande étroite.
- 60 dB pour un brouilleur large bande.

Mais dans le cas du brouilleur à bande étroite, ce gain d'étalement dépend aussi de la position fréquentielle et de la largeur de bande du brouilleur.

Pour un brouilleur large bande, l'utilisation d'un corrélateur étroit n'apporte pas de gain significatif, au contraire, du fait de l'élargissement de la bande passant.

Une boucle de code ne peut pas maintenir sa synchronisation lorsque la puissance de bruit est supérieure à la puissance du signal (après étalement). On définit typiquement le point de décrochage de la boucle de code par un seuil du rapport (J/S) de 0dB.

De cette façon, la puissance minimale du brouilleur nécessaire pour désynchroniser une boucle de code doit être à un minimum de 24dB supérieure à la puissance du signal utile (-160dBw) soit supérieure à (-136dBw) (avant étalement).

La limite du rapport (C/N) entre les phases d'acquisition et de maintien est de 6dB.

En d'autres termes, le signal utile doit être de 6dB supérieur pour l'acquisition, par rapport aux (-136dBw) nécessaires pour le maintien (ce qui implique un J/S limite de 6dB dans le cas de la boucle de phase).

### **2-3-Vulnérabilité de la boucle de phase :**

Il existe également différents types de configuration de boucle à verrouillage de phase, à chaque type est associée une largeur de bande d'opération. A l'intérieur de la boucle, le signal incluant le brouilleur est d'abord filtré avant d'être appliqué au VCO (voltage controlled oscillator) qui estime la phase de la porteuse du signal d'entrée. La bande passante

du filtre passe bas de la boucle de phase est très faible en comparaison de la largeur de bande des données (100Hz).

Ceci permet de minimiser les effets du spectre de données sur l'acquisition de la porteuse. La bande passante typique de la boucle de phase d'un récepteur GPS est de l'ordre de (1 à 10Hz).

En effet, la boucle d'acquisition du code GPS étale le brouilleur avant que le signal atteigne la boucle de phase. Ceci réduit de façon considérable la puissance d'un brouilleur dans la bande passante de la boucle de phase.

L'effet du bruit provenant du brouilleur étalé qui entre dans la boucle de phase dépend de la conception de la boucle et varie selon les concepteurs.

#### **2-4-Détection du message de navigation :**

L'étage final du processus d'acquisition d'un signal GPS mène à la démodulation des données de navigation. Le signal brouilleur à ce point été étalé par le code d'étalement local apportant un gain de 24dB. Sous des conditions normales d'opération, le rapport signal à bruit (S/N) à l'entrée du démodulateur est approximativement de 18dB.

Une analyse conservatrice permet de limiter le niveau des brouilleurs à 18dB au-dessous de la puissance du signal utile (désétalé), ce qui causera une augmentation maximum de 3dB sur le plancher de bruit et une augmentation sensible du TEB (taux d'erreur binaire).

Le démodulateur de données est caractérisé vis-à-vis du brouilleur en termes de TEB, il est évident que l'on aura une dégradation du TEB au fur et à mesure que l'on diminue le SNR (rapport signal sur bruit). On prend en générale comme référence pour établir un niveau minimum de performances, un TEB de ( $10^{-5}$ ). Une augmentation du TEB ne provient pas systématiquement de la perte du signal mais elle indique simplement une diminution de la qualité de la liaison BPSK (Binary Phase Shift Keying) modulation en phase.

Le cas extrême pour le démodulateur de données correspond à une puissance effective de brouillage (en sortie des boucles) égale à la puissance du signal utile, soit un signal à brouillage de 0dB (après étalement). La performance se dégradera graduellement entre ces deux limites (18dB et 0dB) ainsi, il est utile de définir le seuil du taux d'erreur binaire maximum en présence du brouilleur. De façon à réduire l'impact d'une seule erreur sur la démodulation des données de navigation, nous adoptons :

Une limite de TEB à ( $10^{-5}$ ). Le rapport signal sur brouilleur (S/J) est approximativement de 13.9dB après désétalement.

## **2-5-Résumé d'un récepteur GPS générique :**

Le comportement des différents composants d'un récepteur GPS face aux brouilleurs a été examiné (résistance et faiblesses).

Les performances sur la précision de localisation se dégraderont graduellement en fonction de l'augmentation de la puissance du brouilleur étalé allant de 18dB sous la puissance du signal utile (à priori n'affectant aucun des performances) à une puissance égale au signal utile (échec du démodulateur et perte de synchronisation de la boucle de phase).

- Le gain d'étalement minimum a été fixe à 24dB pour les brouilleurs à bande étroite et les signaux à porteuse pure tandis que l'on peut s'attendre en pratique à un gain d'étalement de 60dB pour les brouilleurs large bande. Le rapport (S/J) équivalent minimum après désétalement a été spécifié à 13.9dB correspondant à un TEB de ( $10^5$ ). En deçà de ce seuil, les boucles de code et de phase se désynchronisent.
- Une autre grandeur à prendre en compte pour la caractérisation du signal brouillé est le rapport (J/S) entre la puissance du brouilleur et celle du signal GPS. En effet, le bruit thermique peut être considéré comme constant, pour évaluer les signaux brouilleurs, il est donc plus pratique de les comparer directement avec le niveau de puissance du signal GPS.
- La structure logique d'un récepteur GPS dont nous avons schématisé encore plus ces principales fonctions à la figure (3.1). il y a dans cette structure différents éléments qui sont sensibles au brouillage du signal, et qui présentent une robustesse différente. Il s'agit des éléments suivants, classé en ordre de sensibilité décroissante :
  1. le démodulateur de données.
  2. la boucle de porteuse (DPLL).
  3. la boucle de code (DDLL).
- Les boucle de code et de porteuse sont caractérisées en termes de seuil de maintien, c'est -à- dire le niveau de C/N minimum pour assurer l'accrochage de la boucle. On ne veut pas ici rentrer dans les détails du fonctionnement des boucles du récepteur; on se limite à remarquer que le fonctionnement du récepteur est limité par le FLL

(fréquence Lock Loop) de la boucle de porteuse. En effet, le décrochage de la boucle de porteuse implique immédiatement la perte du signal et donc le décrochage de la boucle de code. C'est pourquoi on retrouve souvent dans la littérature des spécifications sur le seuil de fonctionnement de la boucle DPLL qui déterminent le seuil de maintien du signal.

- A l'entrée du récepteur, la saturation du préamplificateur peut être la cause de la génération de produits d'intermodulation ou d'harmoniques des étages de conversion en fréquence. Un composant très important du récepteur, l'AGC peut dégrader considérablement le processus de normalisation du signal et sa quantification par le CAN sera moins efficace.

Plusieurs autres perturbations peuvent survenir à l'intérieur d'un récepteur. Malheureusement, ces perturbations ne sont pas toujours visibles et elles se répercutent principalement sur les points que nous venons de mentionner.

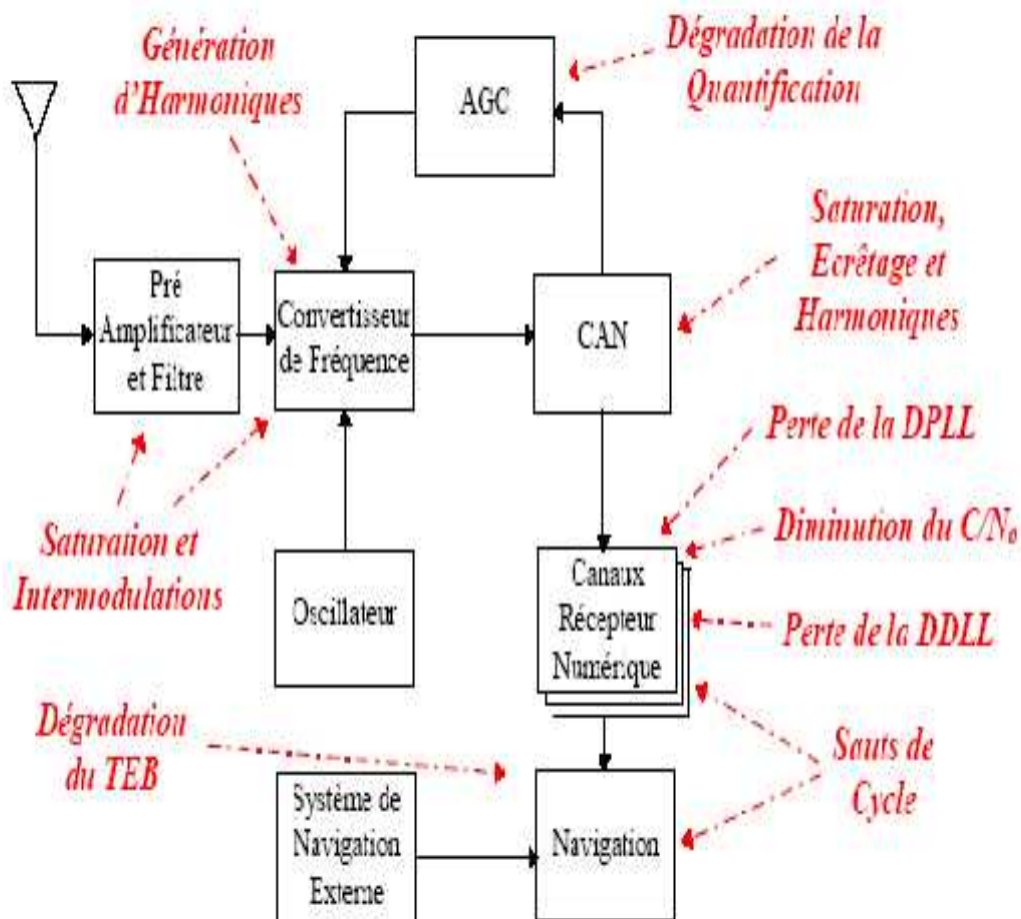


Figure 3.2 : résumé de l'ensemble des perturbations potentielles

### 3- Caractérisation Des Problèmes de brouillage :



### 3-1-Equations fondamentales du brouillage :

On s'intéresse dans notre étude au signal GPS modulé en code C/A L'équation qui détermine rapport  $(C/N_0)$  non brouillé en bande de base après les boucle est la suivante :

$$\frac{C}{N_0} = S_r + G_a - 10 \log (K \cdot T_0) - N_f - P_i \quad [\text{dB} - \text{Hz}]$$

(3.1)

$C/N_0$  : Rapport de puissance entre le signal utile et la densité spectrale du bruit thermique (dB-Hz).

$S_r$  : Puissance du signal GPS reçu (dBw).

$G_a$  : Gain de l'antenne de réception (dB).

$T_0$  : Température de référence du bruit thermique = 290(°K).

$K$  : La constante de Boltzmann =  $38 \cdot 10^{-23}$  (w-sec/k).

$10 \log (kT)$  : la densité de puissance du bruit thermique = -204(dBw-Hz).

$N_f$  : Le facteur de bruit de l'antenne + les pertes des câbles (dB).

$P_i$  : Les pertes d'implémentation + perte de conversion A/D (dB).

On peut considérer un récepteur muni d'une antenne de gain unitaire (0dB) et chiffrer pour un récepteur typique le facteur de bruit à 4dB et les pertes d'implémentation à 2dB. Avec ces hypothèses, on obtient en bande de base un rapport en dB du  $\left[ \frac{C}{N_0} \right]_{NB}$  non brouillé

$$\left[ \frac{C}{N_0} \right]_{NB}^d = -159.6 + 0 - (-204) - 4 - 2 = 38.4 \quad [\text{dB-Hz}] \quad (3.2)$$

Les mêmes conditions conduisent à une valeur du rapport  $\left[ \frac{C}{N_0} \right]_{NB}$  non brouillé

➤ de 35.4dB-Hz pour le code L1 P(Y)

➤ et 32.8 dB-Hz pour le code L2 P(Y)

En présence d'un brouilleur, on définit le rapport  $C/N_0$  équivalent par :

$$\left[ \frac{C}{N_0} \right]_e^d = -10 \log \left[ 10^{-\frac{\left[ \frac{C}{N_0} \right]_{NB}^d}{1}} + \frac{1}{Q \cdot R_c} \right] \quad [\text{dB} - \text{Hz}] \quad (3.3)$$

C'est la puissance du signal ramené à la puissance du bruit thermique augmentée de celle du brouilleur étalé (que l'on associe donc au bruit). Il s'agit du  $C/N_0$  vu par le récepteur après les boucles. A l'équation (3.3), on a indiqué :

$[C/N_0]_{NB}^{dB}$  : Le rapport de la puissance du signal utile dans 1Hz de bande Passante sur la densité de puissance du bruit thermique en absence de brouilleur (dB-Hz).

$[J/S]_{dB}$  : Le rapport de la puissance du brouilleur sur le signal utile (dB).

$R_C$  : Le rythme de brique du code PRN utilisé.

- Pour le code C/A 1.023 MHz.
- Pour le code P 10.23 MHz.

Q : un facteur d'ajustement du signal d'étalement.

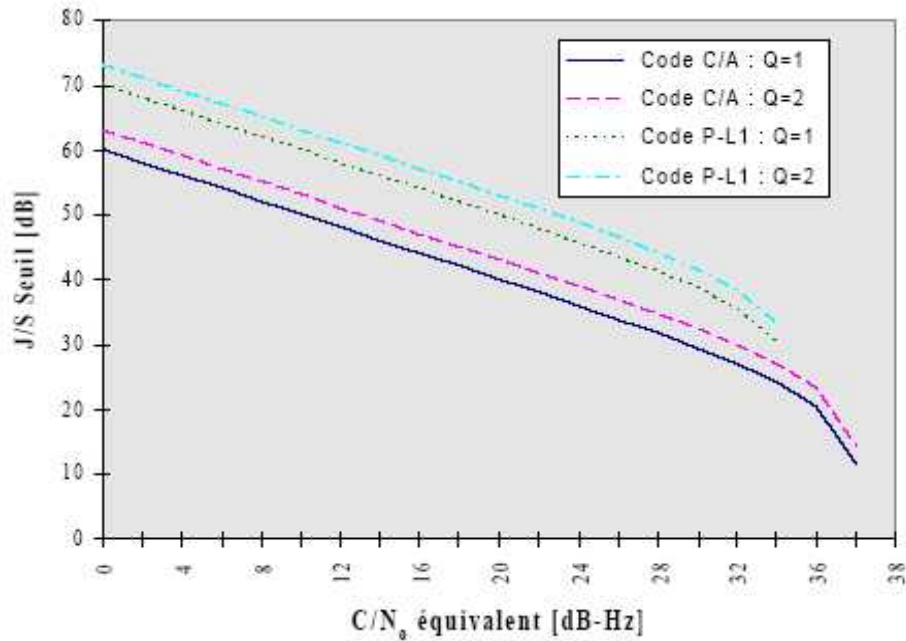
Le facteur Q tient compte de la largeur de bande des brouilleurs. Il vaut respectivement :

- Q = 1 : pour les brouilleurs bande étroite.
- Q = 1.5 : pour les brouilleurs à bande semi étroite.
- Q = 2 : pour les brouilleurs à large bande.

A l'aide de ces équations, on peut déterminer l'équivalent de la dégradation sur le rapport signal à bruit introduit par un brouilleur. Si on fixe un seuil de  $[C/N_0]_{\text{équivalent}}$  minimum pour le fonctionnement de notre récepteur, on peut déterminer le niveau de brouillage correspondant à partir de l'équation (3.3). En réorganisant l'équation, on obtient :

$$[\frac{J}{S}]_s = 10 \log \left[ Q \cdot R_C \left[ \frac{1}{\frac{[C/N_0]_d^d}{1}} - \frac{1}{\frac{[C/N_0]_N^d}{1}} \right] \right] \text{ [dB]} \quad (3.4)$$

On rappelle que le rapport  $[C/N_0]_{\text{équivalent}}$  est toujours supposé connu puisqu'il s'agit de celui qui est mesuré par le récepteur. Les courbes correspondantes à l'équation (3.4) sont montrées à la figure (3.3).



**Figure 3.3 :** correspondance entre  $[C/N_0]_{\text{équivalent}}$  et  $[J/S]_{\text{SEUIL}}$

Pour évaluer l'influence des sources potentielles de brouillage, on peut donc se servir de l'équation (3.4). Si on établit un seuil pour le  $C/N_0$  équivalent, on peut à partir de celui-ci établir un seuil pour le rapport  $J/S$  au delà du quel le signal brouilleur devient nuisible.

La puissance du signal GPS étant connue, on peut évaluer le niveau de puissance absolu des brouilleurs potentiellement (dangereux). En effet, on a pour un seuil  $J/S$  fixé :

$$\left[\frac{J}{S}\right]_S = J_r - S_r \text{ [dB]} \quad (3.5)$$

Où on a noté avec  $j_r$  et  $S_r$ , les puissances reçues à l'antenne pour le brouilleur et le signal GPS. On obtient pour la puissance du brouilleur en dBw :

$$J_r^S = \left[\frac{J}{S}\right]_S + S_r \text{ [dBW]} \quad (3.6)$$

Le niveau de puissance absolue du brouilleur vaut donc :

$$J_r^S = 10^{\frac{[J_r^S]_{\text{dB}}}{10}} \text{ [W]} \quad (3.7)$$

Pour illustrer l'impact de cette petite analyse de puissance, on peut prendre l'exemple de la règle simple qui définit le seuil de maintien de la boucle de code avec un rapport :

$$\left[\frac{C}{N_0}\right]_e^d = 28.0 \text{ [dB - Hz]} \quad (3.8)$$

C'est-à-dire une perte de 10dB-Hz (par rapport au cas non- brouillé) (équation (3.2)).

En substituant cette valeur de  $\left[C/N_0\right]_{\text{équivalent}}$  on obtient les rapports de J/S suivants :

Brouilleur à Bande Etroite Q = 1	$\left[\frac{J}{S}\right]_{dB} = 31.7 \text{ dB}$
Brouilleur à Bande Large Q = 2	$\left[\frac{J}{S}\right]_{dB} = 34.7 \text{ dB}$

**Tableau 3.1 : Limite du  $\left[J/S\right]_{dB}$  pour un  $\left[C/N_0\right] = 28\text{dB-Hz}$**

Dans le cas d'une situation plus optimale où le récepteur serait construit de sorte qu'il puisse tenir un rapport  $C/N_0$  équivalent d'environ 18dB-Hz (perte de 20dB-Hz par rapport au cas non brouillé), soit pour un brouilleur à bande large un  $\left[J/S\right]_{SEUIL}$  d'environ 45dB, on obtient une puissance du brouilleur de :

$$J_r^S = 10^{\frac{[45 \pm 1]_{dB}}{1}} = 3.467 \cdot 10^{-1} \text{ W} \quad (3.9)$$

Ceci démontre bien que seulement 3pw d'un brouilleur large bande reçu à l'antenne d'un récepteur GPS et bien positionné en fréquence peut rendre ce récepteur inutilisable. Le tableau (3.2) suivant résume l'analyse qui précède pour différentes valeurs du seuil de maintien des boucles et pour les trois types de brouilleur mentionné.

Seuil de maintien des (dB)	types de brouilleur	code C/A L1 J/S
$C/N_0 = 28 \text{ dB}$	Q=1 : bande étroit	31.7
	Q=1.5 : semi - étroit	33.7
	Q=2 : bande large	34.7
$C/N_0 = 18.5$	Q=1 : bande étroit	41.6
	Q=1.5 : semi - étroit	43.3

**Tableau 3.2 : Limite de  $\left[J/S\right]_{dB}$  pour les trois types de brouilleur**

On rappelle qu'il y a une différence entre le seuil de maintien en présence d'un brouilleur et le seuil d'accrochage du récepteur.

La détermination de ces deux seuils n'est pas facile, car à proximité des limites de fonctionnement le comportement du récepteur n'est pas linéaire, et de plus les seuils varient selon le type de récepteur. On peut définir que le seuil d'accrochage se trouve 6dB en dessus du seuil de maintien.

$$\left[\frac{J}{S}\right]_{a_i}^s \cong \left[\frac{J}{S}\right]_m^s + 6 \text{ [dB]} \quad (3.10)$$

Si un récepteur décroche, il se trouve de ce fait même dans l'impossibilité de raccrocher immédiatement dans les mêmes conditions de  $C/N_0$ , il va falloir s'éloigner du brouilleur pour récupérer une valeur de  $C/N_0$  suffisante pour la récupération du signal.

Cela peut introduire un retard assez important, allant de 10 secondes à quelques minutes selon la configuration de la plate-forme. Ceci est un aspect particulièrement critique pour les applications où l'on demande une grande fiabilité.

### **3-2-Influence de la largeur de bande :**

Il est important de mentionner quelques considérations de plus pour le code C/A qui ne s'applique pas au code P concernant la bande des brouilleurs.

On a vu à l'équation (3.3) que l'on introduit un facteur Q pour prendre en compte l'influence de bande du brouilleur sur le gain d'étalement. En effet, en bande de base le signal GPS se présente comme une sinusoïde modulée par les données transmises (avec modulation de type BPSK).

Si on considère un brouilleur de bande large  $B \gg 100 \text{ KHz}$ , l'étalement produit sur celui-ci un phénomène de recouvrement et de ce fait le brouilleur étalé se rapproche d'autant plus d'un bruit blanc que sa bande est large.

Dans ce cas le seuil de décrochage dépend non seulement de la puissance de la raie mais de sa position par rapport aux raies du spectre GPS. Si une CWI tombe entre deux raies du signal GPS elle ne posera pratiquement aucun problème à moins qu'elle entre dans la bande passante des filtres de boucle (code, phase et démodulation). Si elle se retrouve dans la bande passante du démodulateur qui est la plus large donc la plus vulnérable (50 Hz autour de la porteuse), on trouve alors pour le brouillage par CWI un seuil nettement inférieur au J/S tolérable que pour un brouilleur à bande large.

Ce phénomène est assez probable si on considère pour la fréquence de la CWI une distribution de probabilité uniforme, on obtient une probabilité de  $50/1000 = 1/20$  qu'elle

tombe dans la bande de modulation des données, et c'est souvent ce que l'on peut observer sur un récepteur GPS en laboratoire.

Le gain d'étalement par rapport à une CWI peut donc être réduit, selon le satellite et la fréquence, à une valeur comprise entre 21.3 et 24.1 dB.

Pour une CWI avec un J/S faible de 23dB la puissance du brouilleur après étalement peut donc être de l'ordre de celle du bruit thermique, correspond à un début de dégradation de la réception.

Un récepteur conventionnel pourra donc tolérer un rapport J/S de 23dB en présence d'un brouilleur large bande mais il sera perturbé s'il s'agit d'une CWI.

CODE C/A	FREQUENCE DE LA RAIE (KHz)	AMPLITUDE DE LA RAIE (dB)	CODE C/A	FREQUENCE DE LA RAIE (KHz)	AMPLITUDE DE LA RAIE (dB)
1	42	-22.71	20	30	-22.78
2	263	-23.12	21	55	-23.51
3	108	-22.04	22	12	-22.12
4	122	-22.98	23	127	-23.08
5	23	-21.53	24	123	-21.26
6	227	-21.29	25	151	-23.78
7	78	-23.27	26	102	-23.06
8	66	-21.5	27	132	-21.68
9	173	-22.09	28	203	-21.73
10	16	-22.45	29	176	-22.22
11	123	-22.64	30	63	-22.14
12	199	-22.08	31	72	-23.13
13	214	-23.53	32	74	-23.58
14	120	-22.01	33	82	-21.82
15	69	-21.9	34	55	-24.13
16	154	-22.58	35	43	-21.71
17	138	-22.5	36	23	-22.23
18	183	-21.4	37	55	-24.13
19	211	-21.77			

**Tableau 3.3 : Les cas de l'étalement de spectre pour les 37 codes C/A**

### **3-3-Critères de robustesse retenus :**

Dans les systèmes de communication conventionnelle (FDMA et TDMA) où la qualité des données (TEB) et le débit de transmission sont les critères essentiels, les effets des brouilleurs sont souvent limités par :

- Des contraintes d'énergie par bit.
- Une l'utilisation stratégie de modulation robuste.
- Et ou par la spécification des niveaux de brouillage acceptables.

Pour les applications de navigation par GPS pour le civil, il n'est pas suffisant de se limiter à l'étude seule de la perturbation des brouilleurs sur le processus de démodulation des données.

Des considérations plus poussées sur les phénomènes survenant au tout début de perturbation d'un brouilleur doivent être pris en considération, début de dégradation (sensibilité) jusqu'à la mise hors d'usage de la boucle de fréquence et de code.

La limitation de puissance des brouilleurs de type impulsionnel est assurée par le CAN et par d'autres dispositifs. Le brouilleur impulsionnel n'est pas nuisible exclusivement par sa puissance mais aussi par la durée totale de ses impulsions par la durée d'observation.

Pour notre analyse, on définit l'influence des perturbations sur un récepteur GPS selon les critères suivant :

- Début de dégradation du récepteur ( $S/N = -3\text{dB}$ ).
- Fonctionnement limite du récepteur pour la résolution de vitesse.
- Fonctionnement limite du récepteur pour la résolution de position
- Désensibilisation du récepteur (saturation).

A partir de ces états de perturbation, les spécifications en termes d'isolation des antennes entre la source du brouilleur et le récepteur GPS et les spécifications sur la réjection nécessaire par les filtres seront spécifiées.

- Pour un brouilleur large bande (BLB) défini comme un signal dont la largeur de bande est supérieure à 100KHz ( $G_{\text{étalement}} = 60\text{dB}$ ), le seuil du rapport de puissance entre le brouilleur et le signal ( $J/S$ ) avant étalement du spectre est résumé au tableau suivant :

PERTURBATIONS:	AVANT ÉTALEMENT
Début de Dégradation $\Delta S/N = -3\text{dB}$	$J/S = 25\text{ dB}$
Démodulation des Données ( $\text{TEB} \leq 10^3$ )	$J/S = 30\text{ dB}$
Seuil de la DPLL	$J/S = 37\text{ dB}$
Seuil de la DDLL (Précision Doppler de 1m/s)	$J/S = 44\text{ dB}$

**Tableau 3.4 : Seuil de  $[J/S]_{\text{dB}}$  pour (BLB)**

- Pour ce qui concerne les brouilleurs à bande étroite incluant les CWI (continuous wave interference), on utilise un gain d'étalement de 24dB (du au spectre de raies discret du code C/A au lieu d'un spectre continu).

Perturbation	après desetatement	avant
desetatement		
Démodulation des Données	J/S = 14dB	J/S = 10dB
Seuil de la DPLL	J/S = 6dB	J/S = 18dB
Seuil de la DDLI	I/S = 0dB	I/S = 24dB

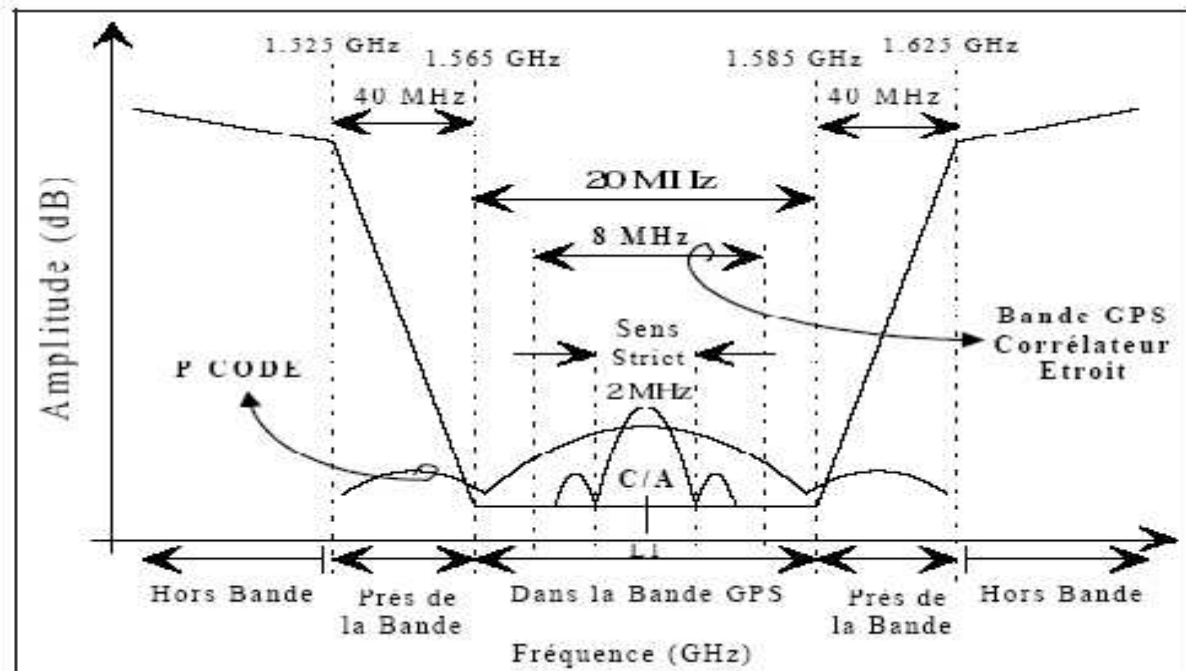
**Tableau 3.5 : Seuil de  $[J/S]_{dB}$  pour (BEB)**

Dans le cas d'une CWI, le début de dégradation ( $S/N$ ) n'est pas représentatif de la perturbation apportée au récepteur. En effet, la localisation fréquentielle de la CWI à l'intérieur de la bande de prédétection de 100Hz est l'aspect décisif sur le brouillage ou non du récepteur.

#### **4-Les Origines Des Brouilleurs :**

##### **4-1-Énumération des types de brouilleurs :**

Les types de brouilleurs nuisibles à un récepteur GPS ont été répertoriés selon leur origine en montrant bien leur position fréquentielle par rapport à la bande GPS. Dans un premier temps, les brouilleurs potentiel qui se situent à l'intérieur de la bande GPS sont énumérés et caractérisés puis ceux se trouvant à sens d'un récepteur avec corrélation étroite à plus ou moins 4MHz de la fréquence L1 (1575.42MHz) soit de (1571.42 à 1579.42 MHz).



**Figure 3.4 : Définition des régions fréquentielles du système GPS**



On définit le spectre en fréquence du signal GPS comme le montre la figure (3.4) :

- Les récepteurs de haute qualité (traitant par exemple le multitrajet) utiliseront une bande plus large par exemple sur 20MHz.
- Un récepteur GPS à corrélateur étroit utilisera typiquement les 8MHz autour de L1.
- Les récepteurs bons marchés sont définis au sens strict comme des récepteurs qui utilisent seulement le lobe principal du signal GPS (code C/A).

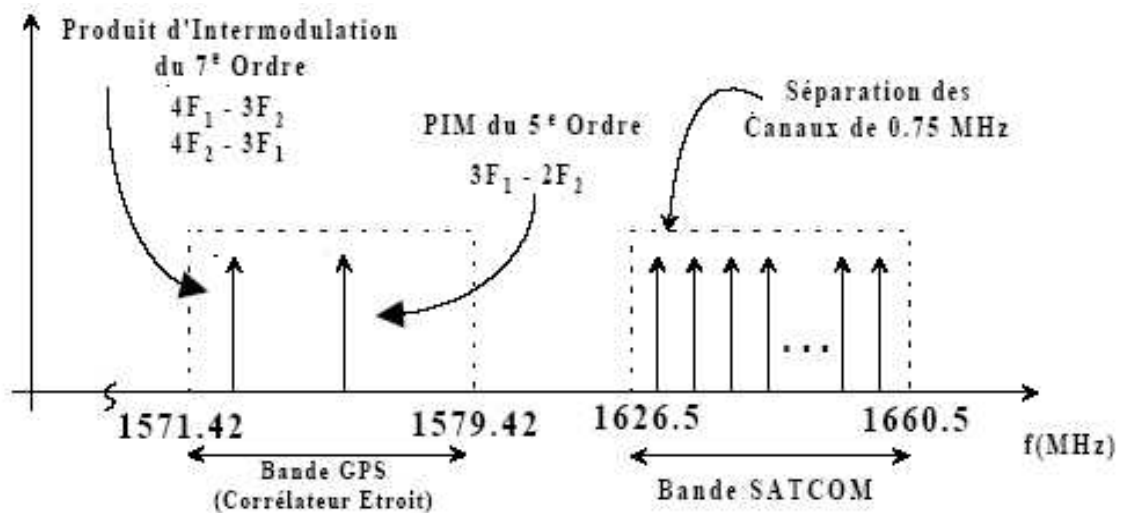
Il existe plusieurs autres candidats potentiels à la génération d'une source de brouillage pour les applications GPS. Ceux-ci peuvent être obtenus en divisant une bande de fréquence à protéger par l'ordre de l'harmonique potentiellement nuisible. Le tableau suivant identifie l'origine de la source de brouillage en fonction de l'harmonique nuisible.

La bande de fréquence spécifiée dans le tableau (3.6) indique quels types de service utilisant ces fréquences auront l'harmonique indiquée dans le spectre GPS.

<b>ORDRE DE L'HARMONIQUE</b>	<b>BANDE FREQUENTIELLE CONSIDEREE (MHz)</b>	<b>USAGE</b>
<b>L1</b>	<b>1571.42 - 1579.42</b>	<b>C/A-GPS</b>
2 <sup>e</sup>	785.71 - 788.71	UHF TV
3 <sup>e</sup>	523.807 - 526.473	UHF TV
4 <sup>e</sup>	392.855 - 394.855	Mobile/Station
5 <sup>e</sup>	314.284 - 315.884	Mobile/Station
6 <sup>e</sup>	261.903 - 263.237	Mobile/Station
7 <sup>e</sup>	224.488 - 225.631	Radiodiffusion
8 <sup>e</sup>	196.427 - 197.428	VHF TV
9 <sup>e</sup>	174.602 - 175.491	VHF TV
10 <sup>e</sup>	157.142 - 157.942	VHF Maritime
11 <sup>e</sup>	142.856 - 143.584	VHF Militaire
12 <sup>e</sup>	130.952 - 131.618	VHF COM
13 <sup>e</sup>	120.878 - 121.494	VHF COM
14 <sup>e</sup>	112.244 - 112.816	VOR/ILS
15 <sup>e</sup>	104.761 - 105.295	FM
16 <sup>e</sup>	98.214 - 98.714	FM

**Tableau 3.6 : Source et services des brouilleurs fonctions des harmoniques**

## 4-2-Brouillage par les Emetteurs SATCOM :



**Figure 3.5 :** Représentation spectrale de brouillage par les communications SATCOM

Ce type de brouilleur est considéré comme la source de brouillage la plus néfaste au bon fonctionnement des boucles internes d'un récepteur GPS. Leurs origines proviennent de deux sources :

- Soit des émetteurs SATCOM à bord du même mobile que le récepteur GPS.
- Soit des émetteurs SATCOM provenant d'un autre mobile.

La puissance des canaux dans la bande GPS varie selon plusieurs facteurs (demande, période de temps, durée de la communication, etc....).

Les communications SATCOM utilisent la bande de fréquence (1626.5 – 1660.5MHz) comme montre la figure (3.5). La largeur de bande des canaux est de 20KHz et ils sont espacés en fréquence de 0.75MHz.

La PIRE moyenne est de 18dBw et la réjection minimale est de 100dB dans la bande L1.

Les émetteurs SATCOM génèrent plusieurs produits d'inter modulation (PIM) qui peuvent tomber à l'intérieur de la bande GPS. Les canaux ( $f_1 = 1626.5$  MHz et  $f_2 = 1652$  MHz) génère des PIM du 5<sup>e</sup> Ordre ( $3f_1 - 2f_2 = 1575.5$  MHz) qui sont directement à l'intérieur de la bande L1.

Les deux causes telles les PIM des SATCOM et la proximité de leurs bandes sont considérées comme de réelles sources de perturbation potentielle.

La première partie de notre analyse traite les interférences provenant des PIM et cette analyse est suivie des problèmes dus à la proximité de la bande SATCOM avec celle du GPS.

#### 4-2-1-Brouillage par d'inter modulation des SATCOM :

Les produits d'inter modulation des SATCOM peuvent être considérés comme des brouilleurs larges bandes au sens du GPS puisque la porteuse du SATCOM est seulement utilisée à des fins de synchronisation.

Pour l'analyse d'un brouilleur à bande étroite, la probabilité d'une intermodulation due à une CWI est négligeable. Un calcul simple permet de montrer que l'isolation entre les deux antennes doit respecter l'équation (3.11) pour le cas de la première perturbation.

$$ISO \geq P_j^{TX} - R_j - R - G_e - (-204) - F_b \quad (3.11)$$

$P_j^{TX}$  : Puissance transmise du brouilleur.

$R_j$  : Réjection à l'émetteur.

$ISO$  : Isolation de l'antenne.

$R$  : Réjection des signaux hors bande GPS (0dB si le brouilleur est dans la bande GPS).

$S$  : Signal GPS (-160dBw pour le code C/A).

En utilisant (3.11) avant désétalement et pour les données suivantes :

$$R_j = 100\text{dB} \quad P_j^{TX} = 18\text{-}24\text{dBw} \quad S = -160\text{dBw} \quad R = 0\text{dB} \quad F_b = 3\text{dB} \quad G_{\text{étalement}} = 60\text{dB}$$

	DEBUT DE DEGRADATION $\Delta(S/N) = -3\text{dB}$	SEUIL DE DEMOMULATION DES DONNEES	SEUIL DE LA DDL
C/A	ISO > 35dB	ISO > 24dB	ISO > 10dB

**Tableau 3.7 : Isolation entre l'antenne du récepteur GPS et SATCOM placé sur le même mobile.**

Ces mesures ont été obtenues pour une séparation d'antenne de 1 à 3mètres. Habituellement, cette distance est supérieure à 3mètres et il peut être conclut suite à notre analyse, qu'il y a une très faible probabilité de brouillage du au PIM d'un récepteur GPS par l'émetteur SATCOM à bord de l'avion. De plus grandes que les 50dB d'isolation nécessaire. Après calcul, la distance de brouillage est de 5mètres et nous concluons que l'on peut écarter les problèmes d'inter modulations en provenance des émetteurs SATCOM.

#### 4-2-2-Brouillage du à la Proximité des Bandes :

Cette analyse concerne la spécification de la réjection de la bande SATCOM nécessaire par le filtre RF d'un récepteur GPS. En supposant les mêmes équations que précédemment (3.11) et les paramètres suivants :

$$R_j = 0\text{dB} \quad P_j^{TX} = 18\text{dBw} \quad S = -160\text{dBw} \quad F_b = 3\text{dB} \quad G_{\text{étalement}} = 60\text{dB} \quad ISO = 50\text{dB}$$

On obtient le tableau (3.8) qui représente un résumé de l'analyse du scénario où l'émetteur SATCOM serait à l'intérieur du même mobile. Il s'agit en fait de l'atténuation nécessaire par le filtre du récepteur GPS pour s'assurer des rapports S/N définis au tableau (3.4).

Une de nos conclusions est qu'il faut resserrer la bande du filtre GPS et toutes spécialement aux alentours de la fréquence de 1626.5MHz.

C/A	DEBUT DE DEGRADATION $\Delta(S/N) = -3dB$	SEUIL DE DEMODULATION DES DONNEES	SEUIL DE LA DDLL
Réjection	R > 109 dB	R > 98 dB	R > 84 dB

**Tableau 3.8 : Spécification de la réjection de la bande SATCOM par le filtre GPS**

Le tableau (3.9) montre une analyse de la distance de brouillage (avec R=40dB) due à la proximité de la bande SATCOM en utilisant une réjection du filtre GPS de R=40dB à 40MHz de L1. Nous avons utilisé (3.12)

$$\frac{J}{S} = P_j^I - R_j - 20 \log\left(\frac{4fd}{\lambda}\right) - R - S - G_e \quad (3.12)$$

$\frac{J}{S}$  : Rapport de puissance entre le brouilleur et le signal utile.

$20 \log\left(\frac{4fd}{\lambda}\right)$  : Perte en espace libre.

Avant étalement de spectre ainsi que l'équation (3.11) où isolement entre les antennes est remplacée par les pertes en espace libre :

$$20 \log\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) \geq P_j^I - R_j - R - G_e - (-204) - F_t \quad (3.13)$$

C/A	DEBUT DE DEGRADATION $\Delta(S/N) = -3dB$	SEUIL DE DEMODULATION DES DONNEES	SEUIL DE LA DDLL
D <sub>Brouillage</sub>	13500 m	3800 m	760 m

**Tableau 3.9 : La distance de brouillage due à la proximité de la bande SATCOM**

Il s'agit de la situation la plus nuisible provenant de la proximité des deux bandes. Le préamplificateur du récepteur GPS sature et travaille en région non linéaire.

Une attention particulière lors de la conception des émetteurs doit être portée sur le point de compression à 1dB, l'isolation de l'antenne et la réjection de la bande SATCOM.

**En conclusion :**

Pour les émissions SATCOM, on note que le problème résultant de l'émission d'une ou plusieurs fréquences au même temps peut être éliminé si des précautions sont prises sur les équipements placés dans l'avion.

Le système SATCOM pour le domaine de l'avionique utilisée comme moyen principal de communication entre les régions sera considérablement nuisible pour un récepteur GPS du à la proximité des bandes d'opérations.

Ce problème peut être résolu par une réorganisation de la bande de fréquence.

Une autre solution est d'interdire l'usage du SATCOM en région d'approche ou d'atterrissage.

- De limiter les puissances transmises.
- Ou d'insérer des filtres anti-brouilleurs.

#### **4-3-Brouillage par les harmoniques des stations de TV :**

**Il existe un minimum de (6) six canaux de TV qui génèrent des harmoniques dans la bande GPS. Le tableau (3.10) montre les bandes de fréquence utilisées par ces canaux de TV français (en France) et les compare avec canaux de TV américains équivalents (Etats - Unis). Tableau 3.10 : Les bandes de fréquence utilisées par les canaux de TV**

CANAUX	PIRES		EQUIVALENTE
	VHF	UHF	
		Vidéo	Audio
		55 dBW	48 dBW
		67 dBW	60 dBW
Canal 4	174-182 MHz	VHF 7	174-180 MHz
Canal 6	190-198 MHz	VHF 10	192-198 MHz
Canal 27	518-526 MHz	UHF 22	518-524 MHz
Canal 28	526-534 MHz	UHF 23	524-530 MHz
Canal 60	782-790 MHz	UHF 66	782-788 MHz
Canal 61	790-798 MHz	UHF 67	788-795 MHz

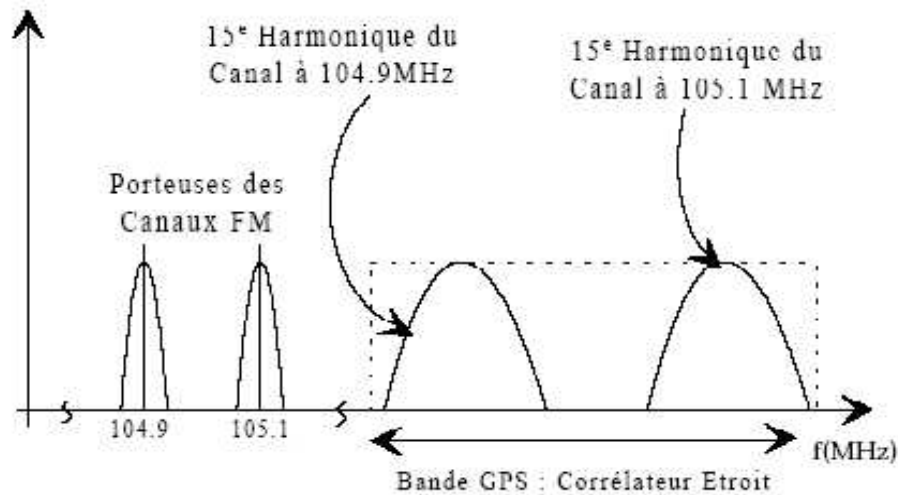
**Tableau 3.11 : Les PIREs maximums typiquement émis par une station de TV**

On voit que les émissions TV sont de véritables sources de brouillage pour le récepteur GPS. Les restrictions actuelles sont insuffisantes pour assurer une prévention des récepteurs civils contre le brouillage des harmoniques provenant de certains canaux de TV. Le problème pourrait être résolu en partie par des pressions locales aux stations de TV en vue de l'installation de filtres RF.

Mais à cause de très fortes puissances mises en jeu et les contraintes parfois relâchées par certains pays, il est nécessaire d'installer des techniques de robustesse dans les récepteurs GPS.

#### **4-4-Bouillage par les Harmoniques de la diffusion F.M :**

Plusieurs fréquences provenant de la diffusion FM (87.5 à 108MHz) constituent des sources de brouillage potentiel pour un récepteur GPS. La figure (3.6) qui montre la représentation spectral des canaux (FM) situés aux fréquences 104.9 et 105.1 MHz ayant par exemple leur harmonique du 15<sup>e</sup> ordre dans la bande GPS.



**Figure**

La représentation spectrale des canaux (FM)

**3.6 :**

Le tableau (3.12) montre les bandes de fréquence des émetteurs FM avec leurs harmoniques correspondantes entrant dans la bande GPS d'un corrélateur étroit ( $L1 \pm 4\text{MHz}$ ).

BANDE(MHz)	Harmoniques FM Potentiellement Nuisibles
104.3 - 105.7	15 <sup>e</sup>
97.8 - 99.1	16 <sup>e</sup>
92.1 - 93.2	17 <sup>e</sup>
87.5 - 88.1	18 <sup>e</sup>

**Tableau 3.12 : Harmonique nuisibles FM pour la bande GPS L1**

Les canaux FM sont espacés de 150KHz et la puissance de transmission du canal FM est de 50dBw. Nous faisons ici le même pré analyse de la distance de brouillage des harmoniques FM lorsque la puissance de l'harmonique atteint celle du bruit thermique à l'antenne.

La dégradation du signal GPS due à ces canaux FM intervient lorsque le récepteur embarqué dans un mobile se situe à une distance telle que :

Pour le canal à 104.9MHz :

$$50\text{dBW} - 80 + 10 \log(0.25) - 20 \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) \geq -136 \text{ dBW}$$

Pour le canal à 105.1MHz :

$$50\text{dBW} - 80 + 10 \log(0.5) - 20 \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) \geq -136 \text{ dBW}$$

Le tableau (3.13) est une analyse de la portée des brouilleurs FM en fonction de la puissance de l'harmonique lors de son réception à l'antenne GPS.

En résumé, ce type de brouilleur devient un problème pour un récepteur GPS lorsqu'il se situe à l'intérieur d'un rayon de 2Km de la source d'émission FM. Aucune technique de robustesse n'a encore été proposée jusqu'à maintenant.

En utilisant notre modèle d'analyse des brouilleurs, les résultats sont sensiblement les mêmes mais plus précis. Les harmoniques FM sont considérés au sens GPS (C/A).

Comme des brouilleurs larges bandes. L'analyse de la distance de brouillage est résumée au tableau (3.14) en employant les paramètres suivants dans nos calculs :

$$R_j = 80\text{dB} \quad P_j^{TX} = 50\text{dBW} \quad S = -160\text{dBW} \quad R = 0\text{dB} \quad F_b = 3\text{dB} \quad G_{\text{étalement}} = 60\text{dB}$$

	DEBUT DE DEGRADATION $\Delta(S/N) = -3\text{dB}$	SEUIL DE DEMODULATION DES DONNEES	SEUIL DE LA DDLL
C/A	5380 m	1515 m	300 m

**Tableau 3.14** : Analyse de la distance de brouillage pour les harmonique FM

Distance entre le Récepteur et la Source F.M. (m)	Niveau de Puissance de l'Interférence au Récepteur (dBW)	
	Signal à 104.9 MHz	Signal à 105.1 MHz
200	-118.5	-115.4
400	-124.5	-121.5
600	-128	-125
800	-130.5	-127.5
1000	-132.4	-129.4
1200	-134	-131
1400	-135.4	-132
1600	-136.5	-133.5
1800	-137.5	-134.5
2000	-138.5	-135.5
2200	-139.3	-136.3

**Tableau 3.13** : La portée des brouilleurs FM en fonction de la puissance de l'harmonique

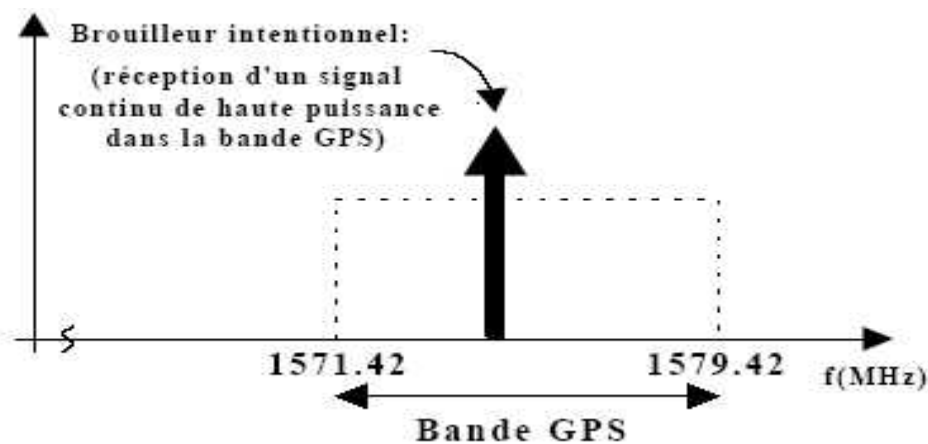
**En conclusion :**

Une solution serait d'interdire par exemple l'utilisation d'émetteurs FM à l'intérieur d'un périmètre de 5Km autour d'un aéroport.

Cette solution n'étant pas toujours réalisable facilement, on peut également penser à augmenter la réjection des harmoniques à 100dB ce qui porterait la distance de brouillage à 500m.

#### **4-5-Brouillage Intentionnel :**

Par soucis d'exhaustivité, on donne ici quelques indications sur le brouillage intentionnel bien que ce ne soit pas l'objet de cette thèse. La figure (3.7) montre une représentation d'un scénario de brouillage intentionnel. Il ne s'agit que de recevoir à l'antenne du récepteur GPS un signal de forte puissance.



**Figure 3.7 :** Spectre d'un brouilleur intentionnel

Un signal brouilleur constant et de puissance suffisante peut détruire la réception d'un signal GPS dans une zone donnée. Le rayon de perturbation centré sur la source du brouilleur est fonction de la puissance d'émission et de la fréquence centrale du brouilleur.

Si l'on assume une antenne omnidirectionnelle dont le gain est 1, le rayon de perturbation est donné par la formule suivante :

$$d = \frac{\lambda \cdot 1 \left[ \frac{1 - 2 + p}{2} b_i \right]}{4\pi} \quad (3.14)$$



PIRE A L'EMISSION (dBW)	PUISSANCE DE L'EMETTEUR (W)	PORTEE DU BROUILLEUR (m)
30	1000	3016777.0
20	100	953989.0
10	10	301678.0
0	1	95398.9
-10	0.1	30167.8
-20	0.01	9539.9
-30	0.001	3016.8
-40	0.0001	954.0
-50	0.00001	301.7
-60	1E-06	95.4
-70	1E-07	30.2

**Tableau 3.15 : L'ordre des grandeurs impliquées en fonction de la PIRE du brouilleur.**

**Pour un résumé :**

Dans ce chapitre, que ce soit dans le domaine militaire ou civil, les récepteurs doivent être conçus pour opérer dans des niveaux d'interférences et de brouillages élevés afin d'assurer un maximum de continuité de service et d'intégrité.

Ce chapitre analyse l'impact des brouilleurs non – intentionnels sur la réception des signaux GPS. Il débute par une caractérisation des problèmes de brouillage et indique leurs effets sur un récepteur.

- L'objectif principal est de mieux comprendre l'influence des brouilleurs ou des perturbations RF sur les phases de réception, d'acquisition et de poursuite des signaux GPS. La vulnérabilité d'un récepteur GPS est d'abord définie au niveau des différents composants d'un récepteur telles que la tête RF , l'AGC et le CAN, les boucles et la démodulation des données.
- Les équations fondamentales du brouillage afin d'exprimer les seuils du rapport  $C/N_0$  en fonction du rapport J/S au-delà desquels le fonctionnement du récepteur est dégradé de plus, pour clarifier les attentes actuelles souvent mises de coté par manque de clarté et par les quantités de documents, on résume clairement les normes sur les récepteurs GPS civiles établies par des organismes et les spécifications requises. La synthèse permet de définir des critères quantitatifs relatifs à l'impact d'un brouilleur sur les différentes phases de perturbation d'un récepteur GPS.

- les catégories de brouillage et tente d'identifier et de décrire les différentes sources potentielles de perturbation. Les sources qui ont une probabilité plus élevée de brouiller

Un récepteur GPS sont analysées conduisant à une première classification des techniques d'adoucissement de spectre dans le but de réaliser des récepteurs GPS robustes.

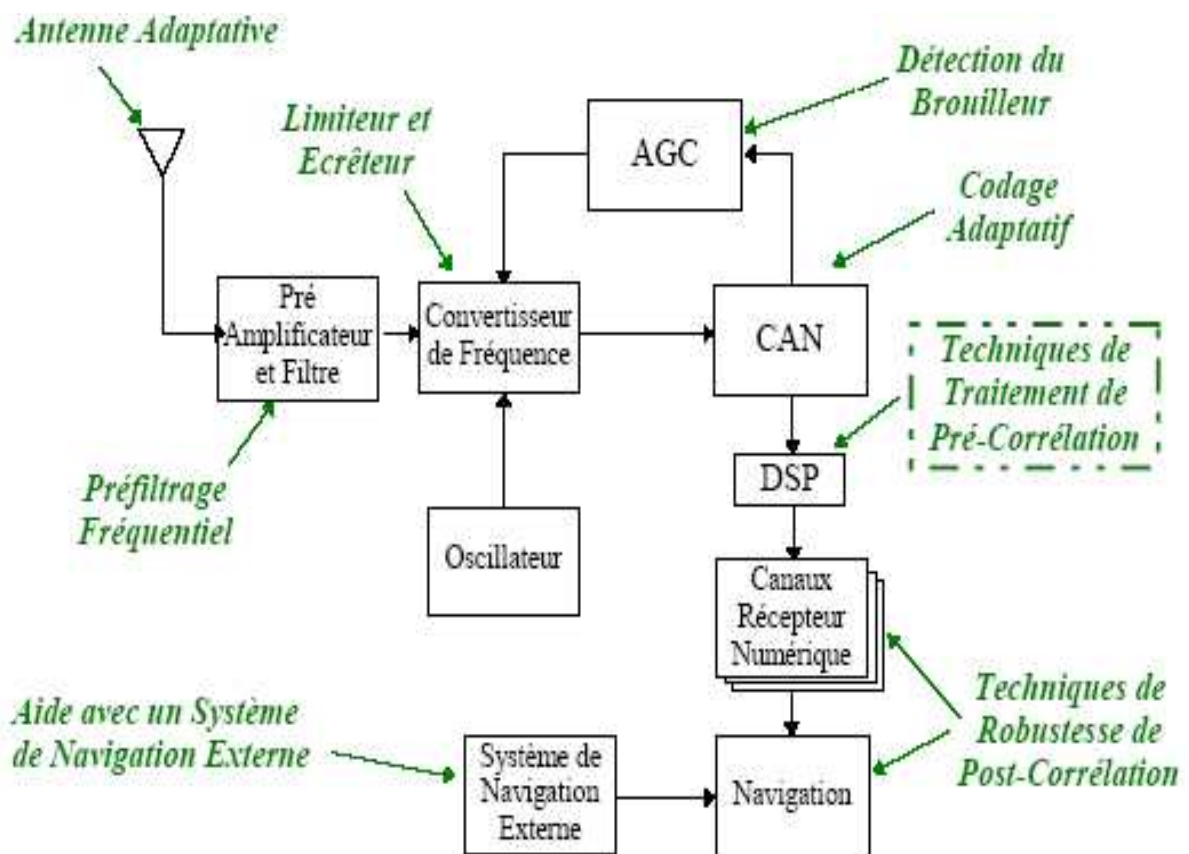
- Les différents types de brouillage sont répertoriés et on associe aux critères d'impact définis précédemment des valeurs représentatives telles que la distance, les isolations nécessaires entre les antennes et les réjections des filtres RF. On sélectionne donc ceux qui nous semblent les plus pénalisants pour un récepteur GPS.

## **Introduction :**

Comme clarifié dans le chapitre précédent plusieurs types des brouilleurs peuvent nuire au bon fonctionnement d'un récepteur GPS par conséquent à l'exploitation du message de navigation. La suppression de ces brouilleurs est envisageable en différents points de la chaîne de traitement: en radio fréquence (RF), en fréquence intermédiaire (IF), après échantillonnage du signal en fréquence intermédiaire ou encore dans les boucles de maintien. Pour cela on proposera dans notre travail l'application du filtrage adaptatif avant l'étage d'acquisition comme solution.

### 1-Dispositifs de résistance aux brouilleurs :

Comme on a vu, plusieurs types des brouilleurs peuvent léser au bon fonctionnement d'un récepteur GPS. Pour cela on a envisagé quelques dispositifs possibles pour améliorer la résistance des récepteurs GPS aux brouilleurs. La figure (4.1) liste les points vulnérables d'un récepteur et les modifications possibles qui permettraient de les renforcer.



**Figure 4.1** : Principaux dispositifs de résistance aux brouillages

Dès la réception, le brouilleur peut rencontrer une antenne à diagramme de rayonnement adaptatif qui soit capable d'éliminer une direction particulière lors de la réception. Ensuite, le préfiltrage en fréquence rejettera les brouilleurs situés hors bande.

Durant le processus de conversion en fréquence, des dispositifs de limiteur en puissance et des écrêteurs permettent d'éliminer les bouilleurs impulsionnels tels que les radars. On peut détecter et éliminer des signaux parasites trop élevés en contrôlant l'amplitude du signal et on adaptant le gain en conséquence.

Notons également le rôle de l'AGC qui normalise le signal reçu avant l'échantillonnage permet de détecter la présence de brouilleur reçue par le récepteur.

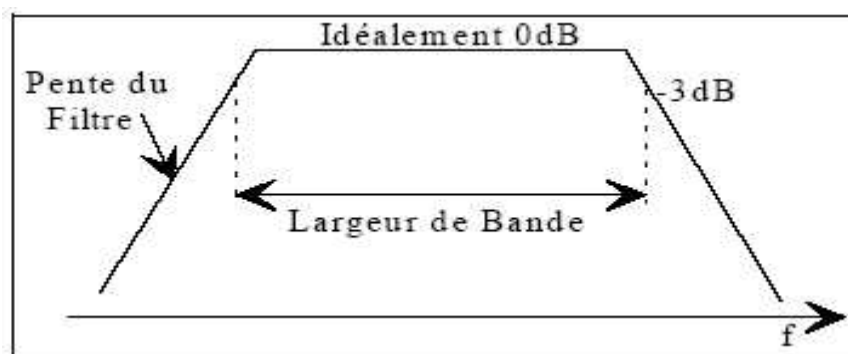
Après la numérisation du signal, on peut utiliser plusieurs techniques de traitement du signal dites de pré-corrélation, car elles interviennent en amont du corrélateur numérique.

On peut également améliorer la robustesse au niveau des canaux numérique qui consiste en général en une réduction de la bande des boucles de code et de porteuse pour réduire l'influence du bruit.

## **2- Filtrage à fréquentiel fixe :**

On peut agir successivement sur le filtre RF et les filtres FI du récepteur. En effet, si on réduit la bande passante du filtre et on augmente l'atténuation en bande coupée, on peut réduire la puissance du bruit et les effets des brouilleurs hors bande.

Cette technique est la plus classique des approches standard qui est utilisée par la plupart des constructeurs de récepteur.



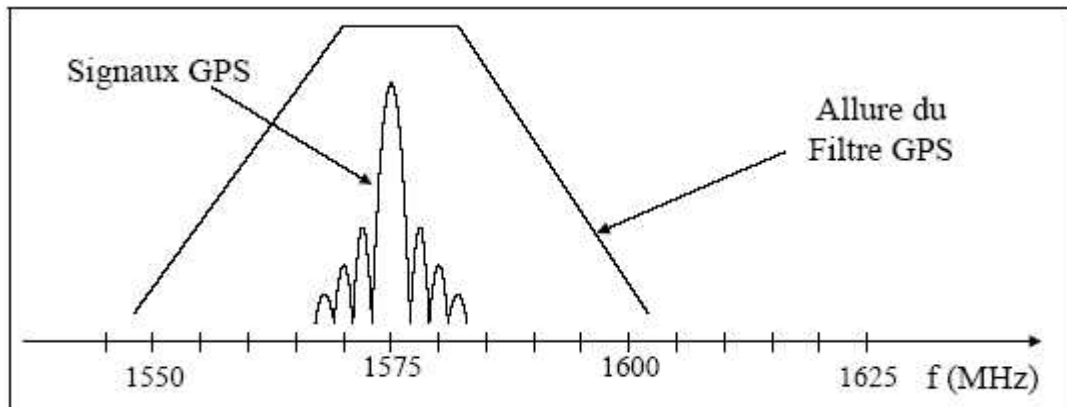
**Figure 4.2 :** Caractéristiques du filtrage fréquentiel fixe

Ce type de filtrage fixe dans le domaine fréquentiel est principalement spécifié par sa bande passante et ces caractéristiques d'atténuation. La largeur de bande du filtre définit le spectre en fréquence pour lequel une variation d'au plus 3 dB est observée sur la puissance des signaux. La pente du filtre RF est une des caractéristiques les plus importantes. Plus grande sera la pente du filtre, meilleur sera le degré de protection du récepteur face à un brouilleur hors bande.

La figure (4.3) illustre la forme d'un filtre qui effectue la protection des signaux GPS,

SPS (Standard Positioning Service) utilisant le code C/A. Dans cet exemple, le filtre passe bande possède une bande de 10 MHz qui est nécessaire pour les techniques de corrélateur à bande étroite des récepteurs GPS.

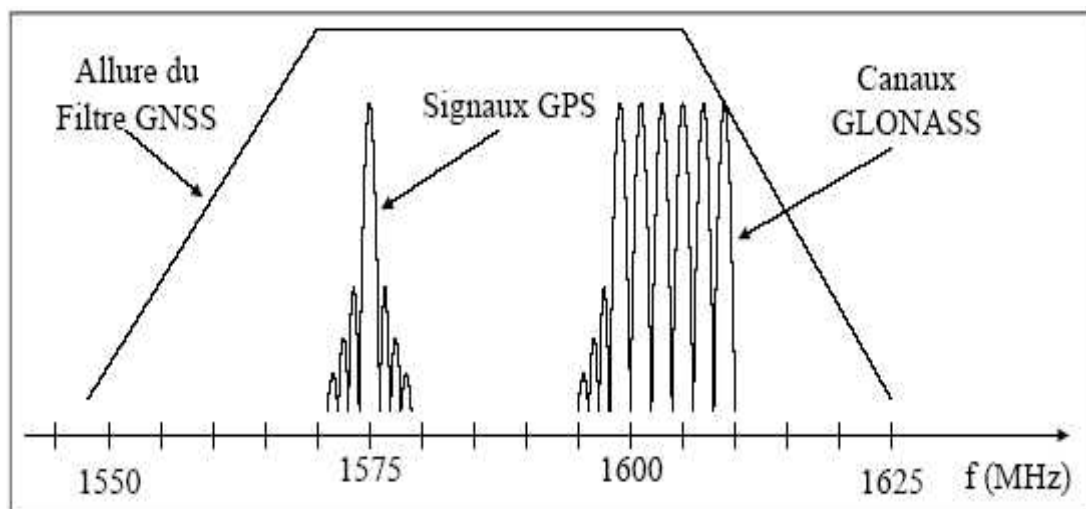
La pente du filtre est faible mais elle permet une bonne atténuation des signaux distants de plus de 25 MHz de la porteuse du signal GPS.



**Figure 4.3 :** Protection des signaux GPS à l'aide d'un filtre RF Fixe

Dans un même ordre d'idée, le filtre RF qui est placé généralement après l'amplificateur à faible bruit, peut être modifié pour accepter les deux signaux civils GPS et GLONASS.

La bande passante du filtre est généralement plus large pour laisser passer les fréquences centrales des canaux GLONASS allant de 1598 à 1600 MHz (Figure 4.4).

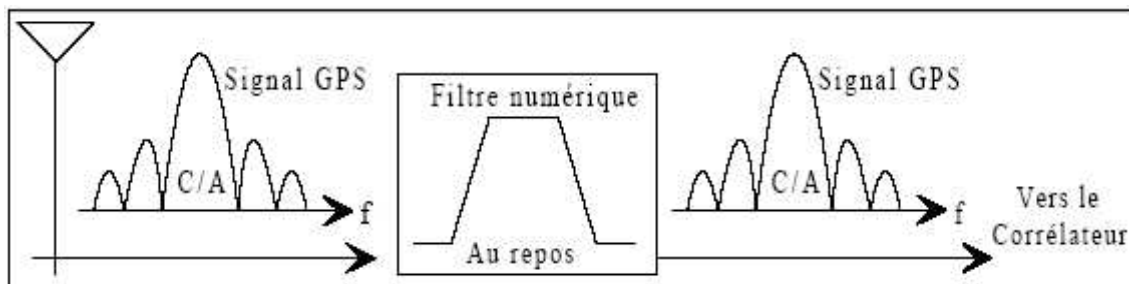


**Figure 4.4 :** Protection des signaux GPS et GLONASS à l'aide d'un filtre RF fixe

### **3- Filtrage fréquentiel adaptatif :**

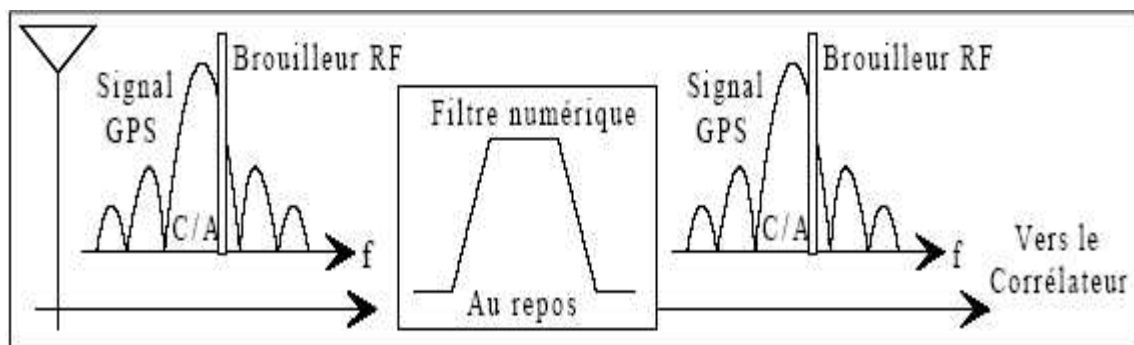
Cette méthode d'adoucissement de spectre peut être envisagée pour les brouilleurs hors bande GPS ainsi que les brouilleurs se trouvant dans la bande GPS pour autant que la largeur de bande du signal brouilleur soit faible face au signal GPS utile et que le signal brouilleur soit relativement stable en fréquence.

La figure (4.5) illustre le concept de base. Lorsqu'aucun signal brouilleur n'est détecté dans la section RF ou numérique du récepteur, le filtre est au repos et il offre une caractéristique passe-bande parfaitement adaptée aux signaux GPS. Dans ce cas le filtre peut être considéré comme transparent face au signal GPS qui le traverse.



**Figure 4.5 :** Caractéristique du filtre numérique au repos

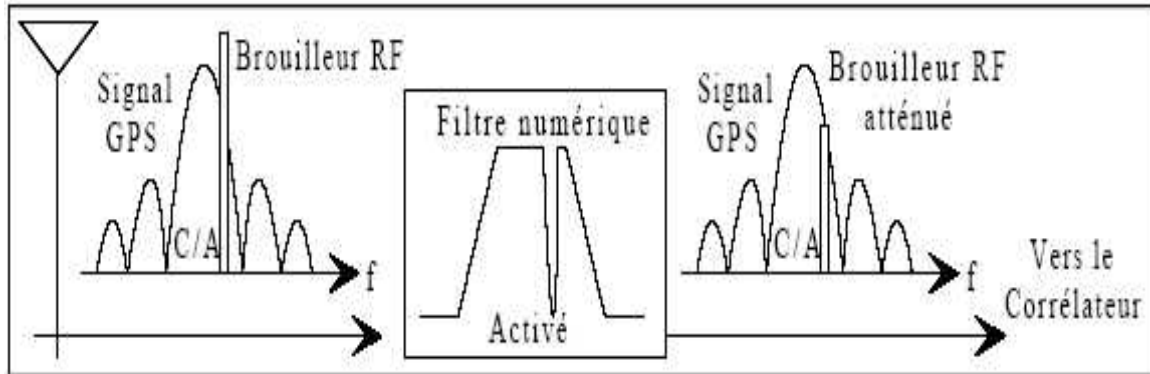
Dans la figure (4.6), l'apparition soudaine d'un brouilleur à l'entrée de l'antenne n'a pas permis au filtre de s'adapter à sa présence. Dans cette situation qui ne persiste que quelques millisecondes dans les circonstances normales, le brouilleur traverse le filtre sans aucune atténuation et perturbe les étages d'acquisition du signal utile. C'est en ce moment que les méthodes de détection de puissance et de localisation du brouilleur entrent en jeu.



**Figure 4.6 :** Apparition d'un brouilleur dans le système

Suite à la détection de la présence du brouilleur, à sa localisation et à l'analyse de ces caractéristiques, le filtre adapte sa fonction de transfert et lui introduit une composante coupe-bande qui tend à épouser la forme du spectre du brouilleur.

Les signaux de la section coupe-bande sont fortement atténués. La sortie du spectre en fréquence de la figure (4.7) le résultat où la puissance spectrale du brouilleur à spectre étroit et des signaux GPS à cet endroit est réduite. L'étage de corrélation qui suit permettra d'étaler la puissance résiduelle du brouilleur sur 2 MHz et de concentrer l'énergie du signal utile GPS



sur une largeur de bande approximative de 100 Hz.

**Figure 4.7 :** Atténuation du brouilleur suite à un filtrage adaptatif

Cette méthode de robustesse aux brouilleurs peut être efficace pour des brouilleurs à spectre étroit stables. Un intérêt de cette technique face à l'accroissement de la puissance du brouilleur est la possibilité du filtre adaptatif de réagir en accentuant l'atténuation de sa bande réjectrice et en améliorant sa position sur sa réponse fréquentielle.

#### **4- Filtres à encoche :**

Un filtre coupe-bande est un filtre numérique conçu pour atténuer une bande de fréquence  $f$  bien déterminé autour d'une fréquence centrale défini  $f_0$ . Il en existe plusieurs types des filtres utilisés dans les récepteurs GPS parmi lesquels :

- Les filtres RIF (Réponse Impulsionnelle Finie) générés par une équation de type:

$$H(Z) = \sum_{i=0}^N c_i \cdot Z^{-i} \quad (4.1)$$

Un filtre FIR avec une coupure très nette (bande de transition très courte) peut requérir jusqu'à des centaines de délais.

- Les filtres RII (Réponse Impulsionnelle Infinie) à gabarit générique est décrite par une équation de type :

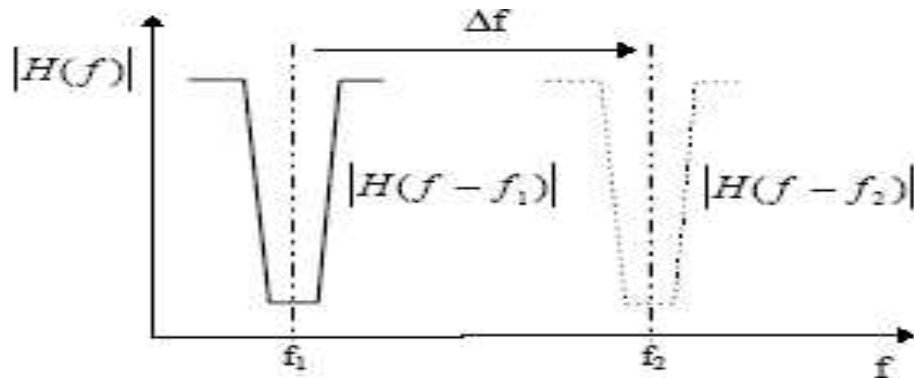
$$H(Z) = \frac{\sum_{i=0}^N a_i \cdot Z^{-i}}{\sum_{i=0}^M b_i \cdot Z^{-i}} \quad (4.2)$$

Un filtre RII est très efficaces et peuvent donner des pentes de coupure très raides.

#### **4-1-Présentation du filtre à encoche :**

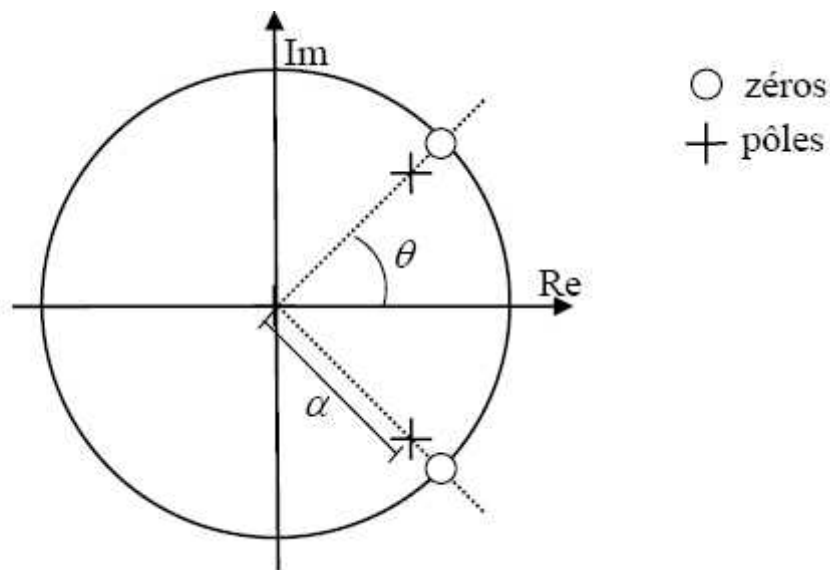
Le filtre à encoche (Notch filter) est un filtre coupe-Bande dont la largeur de bande est très étroite, qui est normalement utilisé pour retirer ou amplifier une fréquence du spectre. Son gabarit est donné dans la figure (4.8).

Plusieurs travaux ont été consacrés à l'étude d'un filtre à encoche du second ordre dit «avec contrainte» (constrained Notch filter) pour l'estimation et l'élimination de raie spectrales.



**Figure 4.8 :** Gabarit d'un filtre à encoche

La structure idéale des pôles et des zéros d'un filtre à encoche avec contrainte est montrée à la figure (4.9) (on simplifiera par la suite la notation en indiquant ce filtre comme ( Filtre à Encoche ) tout court). Les zéros se trouvent sur le cercle unité et les pôles, de module inférieur à 1 pour préserver la stabilité du filtre, ont même argument que les zéros. La position des pôles est définie relativement à la position des zéros par un coefficient constant .



**Figure 4.9 :** Les zéros et pôles d'un filtre à encoche



Pour un filtre à encoche du deuxième ordre la fonction de transfert présente deux zéros  $z_0$  et deux pôles  $p_0$  d'argument  $2\theta_0$  il est centré sur la fréquence  $f_0$ . Dans ces conditions, on peut écrire la fonction de transfert du filtre comme :

$$H(Z^{-1}) = \frac{(Z-Z_1)(Z-Z_1^*)}{(Z-P_1)(Z-P_1^*)} = \frac{Z^2 - 2\Re(Z_1)Z + Z_1Z_1^*}{Z^2 - 2\Re(P_1)Z + P_1P_1^*} = \frac{1 - 2\Re(Z_1)Z^{-1} + Z_1Z_1^*Z^{-2}}{1 - 2\Re(P_1)Z^{-1} + P_1P_1^*Z^{-2}} \quad (4.3)$$

Si on met en évidence la relation entre le pôle et le zéro :

$$\begin{aligned} |Z_1| &= 1 && \text{avec } 0 < \alpha < 1 \\ |P_1| &= \alpha \cdot |Z_1| \end{aligned} \quad (4.4)$$

La contrainte imposée sur le module du pôle ( $p_0 = \alpha z_0$ ;  $\alpha < 1$ ) permet de garantir la stabilité du filtre et d'ajuster la largeur de l'encoche.

On a :

$$H(Z^{-1}) = \frac{A(Z^{-1})}{B(Z^{-1})} = \frac{1 + a_1 Z^{-1} + Z^{-2}}{1 + \alpha a_1 Z^{-1} + \alpha^2 Z^{-2}} = \frac{A(Z^{-1})}{A(\alpha^{-1})} \quad (4.5)$$

Avec :

$$a_1 = -2 \cdot \Re(Z_1) \quad (4.6)$$

En coordonnées polaires, la fonction de transfert devient :

$$H(Z^{-1}) = \frac{1 - 2 \cos(\theta) Z^{-1} + Z^{-2}}{1 - 2 \alpha \cos(\theta) Z^{-1} + \alpha^2 Z^{-2}} \quad (4.7)$$

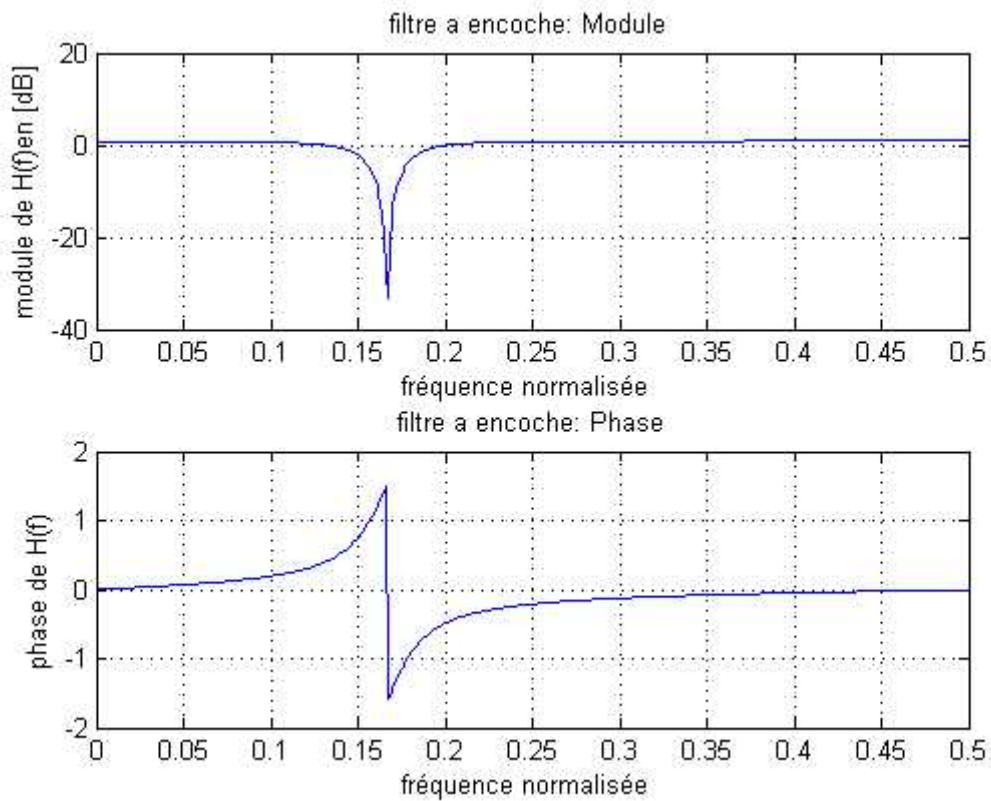
Où  $\theta$  représente l'angle entre l'axe X et le pôle on a :

$$a_1 = -2 \cos(\theta) \quad (4.8)$$

La condition de stabilité de ce filtre étant d'avoir les pôles à l'intérieur du cercle unité, on peut imposer la stabilité du filtre en vérifiant les conditions simples suivantes sur les coefficients :

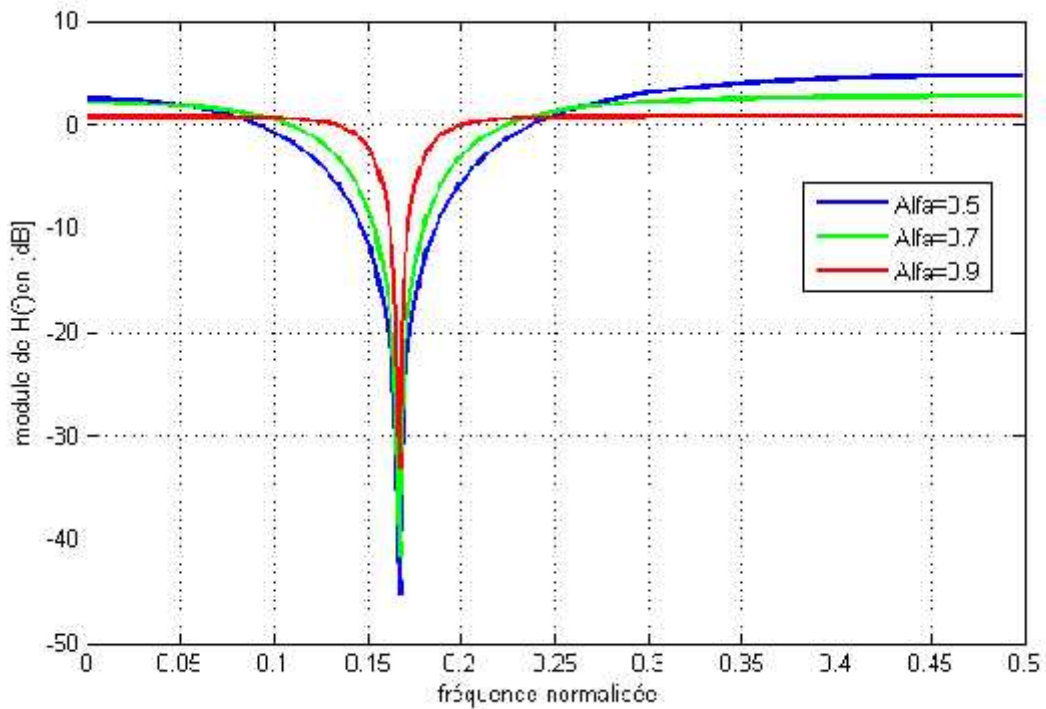
$$|a_1| < 2 \text{ et } 0 < a_0 < 1 \quad (4.9)$$

On peut tracer le module et la phase du filtre comme dans la figure (4.10) :



**Figure 4.10** : Module et phase d'un filtre à encoche

Sachant que le paramètre  $\alpha$  détermine la largeur de bande de l'encoche, On constate que pour des  $\alpha$  proches de 1, un tel filtre élimine une bande de fréquence très étroite du spectre. La figure (4.11) illustre la variation de l'ouverture de l'encoche du filtre pour différentes valeurs de  $\alpha$  :

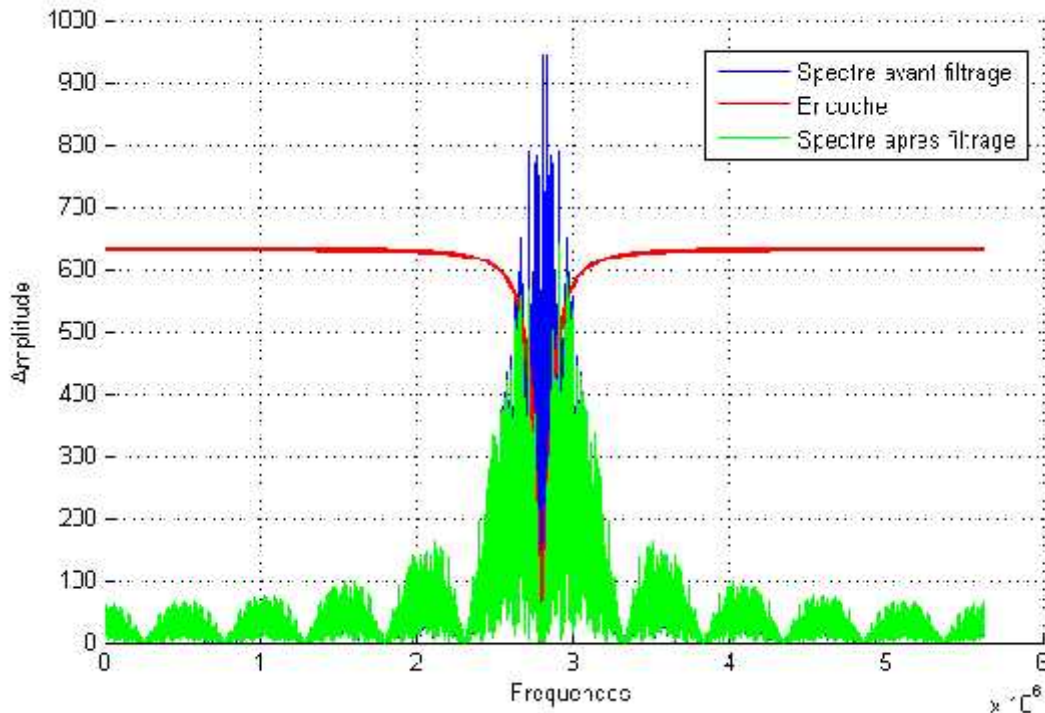


**Figure 4.11** : Module d'un filtre à encoche pour différentes valeurs de

**4-2-Application du filtre à encoche sur le signal GPS :**

Après la présentation du filtre à encoche on a pu vérifier que pour avoir une bande du filtre (ouverture de l'encoche) très faible il suffit que  $\alpha$  soit de plus en plus proche de 1; cette propriété est nécessaire pour un comportement satisfaisant du filtre, on voit ici l'application du filtrage et aux effets sur la signal GPS.

Une encoche est capable de filtrer de façon idéale une raie spectrale si sa position est connue exactement comme montre la figure (4.12) :



**Figure 4.12** : Application d'une encoche sur spectre GPS

#### **4-3-Cascade de filtre à encoche :**

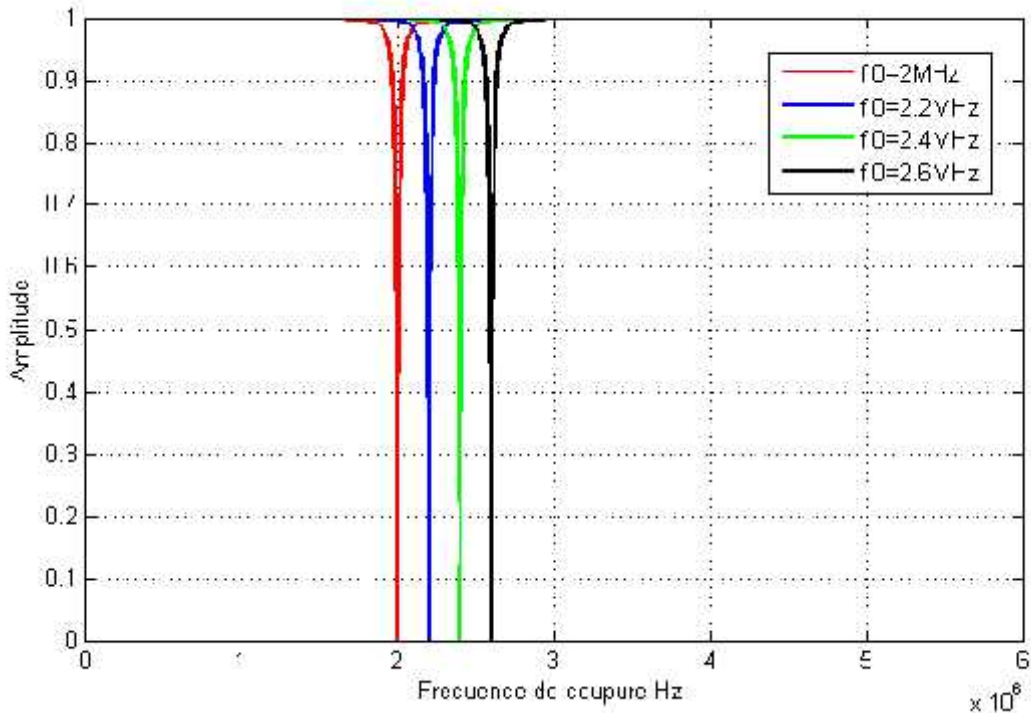
Si le signal GPS est affecté par plusieurs brouilleurs de fréquences centrales différentes, pour cela on propose d'utiliser une cascade de filtre à encoches qui s'adaptent successivement aux fréquences des brouilleurs détectés.

La fonction de transfert global résultant du produit d'une cascade d'encoches utilisée pour éliminer plusieurs brouilleurs, elle est donnée par :

$$\begin{aligned}
 H(Z^{-1}) &= \prod_{i=1}^n \frac{1+a_i.Z^{-1}+Z^{-2}}{1+a_i a_i.Z^{-1}+a_i^2 Z^{-2}} \\
 &= \frac{1+Z^{-n}+\sum_i [a_i'(Z^{-i}+Z^{2n-i})]}{1+\alpha^n.Z^{-n}+\sum_i [a_i'(\alpha^i.Z^{-i}+\alpha^{-(2n-i)}Z^{2n-i})]} \quad (4.10)
 \end{aligned}$$

Où i représente l'indice de l'encoche.

Dans notre présentation, on a utilisé quatre brouilleurs en cascade dont les fréquences centrales sont respectivement  $f_0= 2.6$  MHz, 2.4 MHz et 2.2 MHz, 2 MHz.



**Figure 4.13** : Module d'une cascade de filtres à encoche avec  $\zeta = 0.99$ .

La figure 4.13 montre une cascade de filtres à encoche chacun centré sur sa propre fréquence.

### Conclusion :

Une encoche est capable de filtrer de façon idéale une raie spectrale si sa position est connue exactement, si la position de la raie n'est pas connue de façon exacte ou si le brouilleur à une (faible) largeur de bande, on peut penser à diminuer la valeur de  $\zeta$  pour élargir la bande coupée.

# LISTE DES FIGURES

FIGURE 1.1 : LES TROIS SEGMENTS DU GPS.....	4
FIGURE 1.2 : CONSTELLATION DES SATELLITES .....	5
FIGURE 1.3 : REPRESENTATION SIMPLIFIEE DE CONSTELLATION NOMINALE DE GPS .....	7
FIGURE 1.4 : LES STATIONS DE CONTROLES.....	8
FIGURE 1.5 : LE SEGMENT UTILISATEUR.....	8
FIGURE 1.6 : DERIVATION DES FREQUENCES.....	9
FIGURE 1.7 : CODE C/A ET P .....	10
FIGURE 1.9 : NIVEAUX DE PUISSANCE.....	11
FIGURE 1.8 : GENERATION DES SIGNAUX GPS .....	11
FIGURE 1.10 : LA GENERATION DU CODE C/A .....	12
FIGURE 1.11: FORMAT DU MESSAGE DE NAVIGATION .....	15
FIGURE 1.12 : SCHEMA DE L'ACQUISITION SERIE.....	16
FIGURE 2.1 : MESURE DE PSEUDO DISTANCE.....	21
FIGURE 2.2 : MESURE DE PHASE .....	22
FIGURE 2.3 : POSITIONNEMENT AUTONOME .....	24
FIGURE 2.4 : POSITIONNEMENT RELATIF .....	25
FIGURE 2.5: ERREURS D'EPHEMERIDE ET D'HORLOGE.....	26
FIGURE 2.6 : ERREURS COURANTES.....	28
FIGURE 2.7 : STRUCTURE D'UN RECEPTEUR GPS .....	31
FIGURE 3.1 : ENSEMBLE DES PARTIES D'UN RECEPTEUR GPS GENERIQUE .....	34
FIGURE 3.2 : RESUME DE L'ENSEMBLE DES PERTURBATIONS POTENTIELLES.....	39
FIGURE 3.3 : CORRESPONDANCE ENTRE $[C/N_0]_{\text{équivalent}}$ ET $[J/S]_{\text{SEUIL}}$ .....	42

<b>FIGURE 3.4 : DEFINITION DES REGIONS FREQUENTIELLES DU SYSTEME GPS .....</b>	<b>47</b>
<b>FIGURE 3.5 : REPRESENTATION SPECTRALE DE BROUILLAGE PAR LES SATCOM .....</b>	<b>49</b>
<b>FIGURE 3.6 : LA REPRESENTATION SPECTRALE DES CANAUX (FM).....</b>	<b>53</b>
<b>FIGURE 3.7 : SPECTRE D'UN BROUILLEUR INTENTIONNEL .....</b>	<b>55</b>
<b>FIGURE 4.1 : PRINCIPAUX DISPOSITIFS DE RESISTANCE AUX BROUILLAGES .....</b>	<b>58</b>
<b>FIGURE 4.2 : CARACTERISTIQUES DU FILTRAGE FREQUENTIEL FIXE .....</b>	<b>59</b>
<b>FIGURE 4.3 : PROTECTION DES SIGNAUX GPS A L'AIDE D'UN FILTRE RF FIXE.....</b>	<b>60</b>
<b>FIGURE 4.4 : PROTECTION DES SIGNAUX GPS ET GLONASS A L'AIDE D'UN FILTRE RF FIXE .....</b>	<b>60</b>
<b>FIGURE 4.5 : CARACTERISTIQUE DU FILTRE NUMERIQUE AU REPOS.....</b>	<b>61</b>
<b>FIGURE 4.6 : APPARITION D'UN BROUILLEUR DANS LE SYSTEME.....</b>	<b>61</b>
<b>FIGURE 4.7 : ATTENUATION DU BROUILLEUR SUITE A UN FILTRAGE ADAPTATIF.....</b>	<b>62</b>
<b>FIGURE 4.8 : GABARIT D'UN FILTRE A ENCOCHE.....</b>	<b>63</b>
<b>FIGURE 4.9 : LES ZEROS ET POLES D'UN FILTRE A ENCOCHE.....</b>	<b>63</b>
<b>FIGURE 4.10 : MODULE ET PHASE D'UN FILTRE A ENCOCHE .....</b>	<b>65</b>
<b>FIGURE 4.11 : MODULE D'UN FILTRE A ENCOCHE POUR DIFFERENTES VALEURS DE A .....</b>	<b>66</b>
<b>FIGURE 4.12 : APPLICATION D'UNE ENCOCHE SUR SPECTRE GPS.....</b>	<b>67</b>
<b>FIGURE 4.13 : MODULE D'UNE CASCADE DE FILTRES A ENCOCHE AVEC <math>A = 0.99</math>. .....</b>	<b>68</b>

## Introduction :

Le système de positionnement global (GPS) est un système de navigation par satellite destiné à fournir la position, la vitesse et l'heure n'importe où à la surface de la terre ou dans ses environs. La précision du positionnement par GPS va de 100 mètres à quelques mètres en temps réel elle peut atteindre quelques millimètres pour les applications de géodésie en temps diffère. Bien qu'il y ait des milliers d'utilisateurs civils du GPS à travers le monde, le GPS a été créé et est contrôlé par le département de la défense américain (departement of defense (DOD)).

Les satellites GPS envoient des signaux codés qui peuvent être déchiffrés par des récepteurs GPS. Le récepteur mesure la distance entre la station et plusieurs satellites à l'aide des codes C/A ou P. Les éphémérides des satellites sont transmises par le message de navigation permettant de calculer la position du satellite dans un repère terrestre. Chaque mesure de distance sur un satellite définit une sphère dont le centre est le satellite. Trois satellites sont donc nécessaires pour déterminer la position du récepteur en trois dimensions. Un quatrième satellite est nécessaire pour tenir compte de la non synchronisation de l'horloge du récepteur et des horloges des satellites.





## 1-Différents types de système de navigation:

### 1-1-GLONASS:

Le GLONASS (**G**lobale **N**avigation **S**atellite **S**ystème) est un système d'origine russe concurrent au système GPS, certains récepteurs intègrent les systèmes Glonass et GPS de manière à présenter une meilleure précision par obtention d'une valeur moyenne entre les deux systèmes.

### 1-2-ENSS:

L'ENSS (**E**uropéen **N**avigation **S**atellite **S**ystème) est l'équivalent européen du système GPS, il a subi une très forte concurrence de la part du système américain GPS et s'avère peu ou pas utilisé.

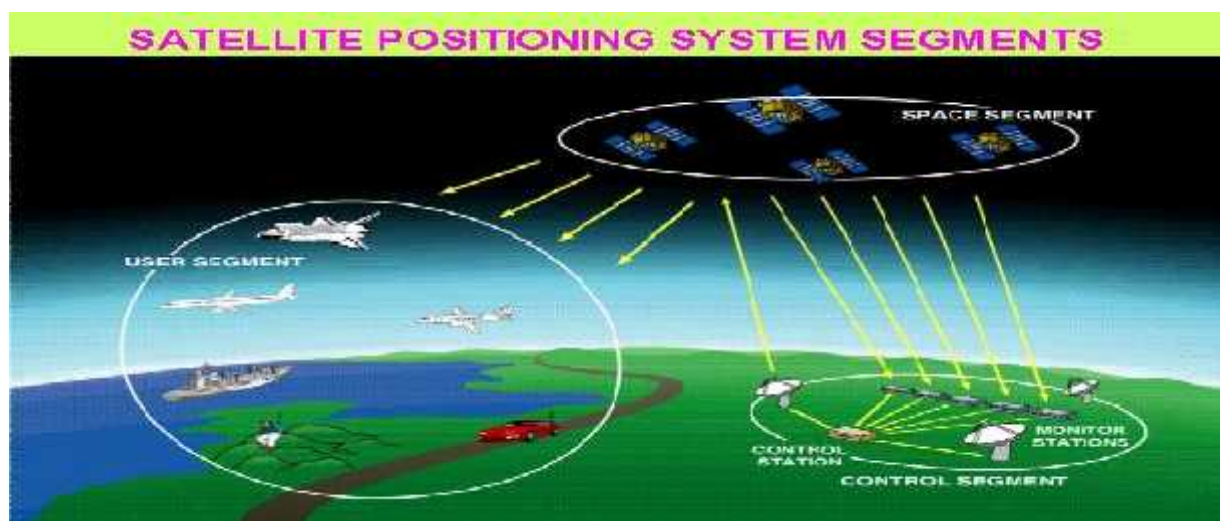
### 1-3-GALILEO:

Le système Galileo sera compatible avec GPS et il est attendu qu'il y ait de nombreux développements de récepteurs mixtes GPS - GLONASS - GALILEO. Néanmoins, il en sera indépendant, c'est-à-dire que si GPS est mis hors service GALILEO devrait continuer à fonctionner. Les premiers satellites étaient lancés en 2003 pour un ensemble pleinement opérationnel en 2008.

## 2-Description du système GPS:

**Le GPS est construit de 3 parties (3 segments) :**

- le segment Spatial (Space segment).
- le segment Utilisateur (User Segment).
- le segment de Contrôle (Control Segment).



**Figure 1.1 :** Les trois segments du GPS

## 2-1-Segment spatial:

Le segment spatial est composé d'un réseau de satellites (24+3 de réserve) en orbite quasi-circulaire autour de la terre, à une hauteur de +/- 20000 Km et dont la période de révolution est de 12 heures sidérales. Ces satellites sont répartis sur 6 plans orbitaux inclinés à 55° par rapport à l'équateur, sachant qu'elles sont espacées de 60° les une des autres.

La constellation GPS a été conçue de telle manière que partout sur terre et à tout moment, un minimum de 4 satellites soit visible au dessus de 15° d'élévation.

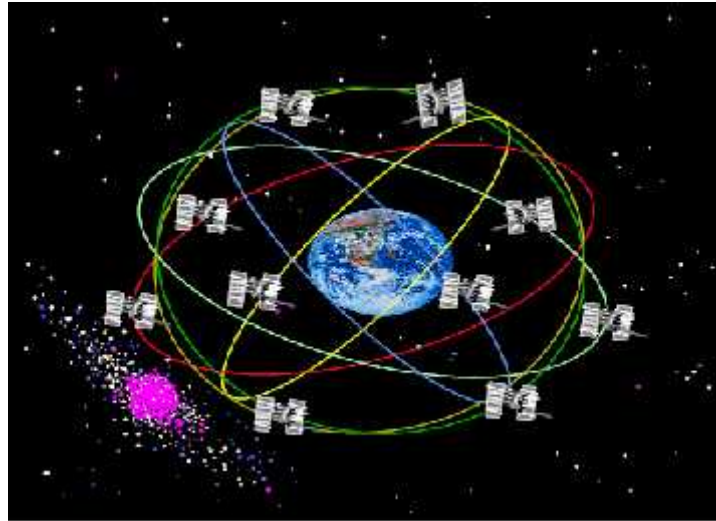
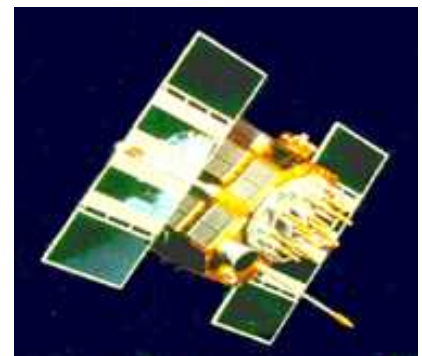


Figure 1.2 : Constellation des satellites

### 2-1-1-Caractéristique d'un satellite :

On peut dire qu'on générale un satellite est caractériser par :

- Largeur du Satellite 152 cm
- Hauteur du Satellite 191 cm
- Masse du Satellite 1066 kg
- L'air des panneaux solaires 7.2 m<sup>2</sup>
- Puissance embarquée 1136 W
- Hauteur de sa gravitation 20 180 km



Les satellites GPS sont caractérisés par une horloge ultra précise qui transmet des signaux horaires et des informations sur leurs positions.

Ils disposent de quatre horloges atomiques à leur bord, ce qui assure une grande stabilité des signaux générés. Les horloges sont quotidiennement remises à l'heure par les stations de contrôle de l'armée américaine. Les utilisateurs peuvent donc synchroniser l'horloge de leur récepteur avec cette heure précise (appelée « heure GPS »). La précision est de l'ordre de 10<sup>-12</sup> à 10<sup>-13</sup> sur un jour.

### **2-1-2-Les blocs des satellites :**

Il existe trois catégories des satellites GPS :

**Bloc I :** Satellites lancés entre 1978 et 1985 tous les satellites du bloc I sont maintenant hors service excepté un qui est activé de manière périodique, leur durée de vie est de 4.5 ans. La différence entre ces satellites et les générations suivantes est l'impossibilité de dégrader volontairement le signal transmis.

**Bloc II :** Seconde génération des satellites GPS mis sur orbite à partir de 1985. Ils ont la capacité de dégrader le signal émis. Leurs durée de vie est de 7.5 ans.

**Bloc III :** Ils ont été construits pour avoir une durée de vie de 10 ans, ils sont capables de communiquer entre eux et ont été mis sur orbite depuis 1996 afin de maintenir une constellation complète. Les satellites GPS transmettent leurs données sur deux fréquences (porteuses). Ceci afin que l'erreur introduite par la réfraction ionosphérique puisse alors être éliminée. Les signaux qui sont générés à partir de la fréquence standard 10.23 MHz sont L1 à 1575.42 MHz et L2 à 1227.6 MHz. Ces fréquences sont générées grâce à l'horloge atomique embarqué à bord de chaque satellite, les porteuses ne peuvent être utilisées directement pour le positionnement et c'est pourquoi deux codes binaires sont modulés sur les porteuses: le code C/A (Coarse Acquisition) et le code P (Precision). Il est également nécessaire de connaître les coordonnées du satellite, cette information est envoyée par le message de données qui est modulé sur les porteuses.

### **2-1-3-Couverture terrestre des satellites :**

L'arrangement des satellites permet d'avoir, dans 99 % des cas, un minimum de 4 satellites visibles à 5° au plus au dessus de l'horizon, quelque soit l'endroit où l'on se trouve sur la terre. Mais cela signifie également que pendant une minute et demie par jour le système GPS est peut ne pas indiquer une position suffisamment fiable. En outre, si le lieu n'est pas parfaitement dégagé, c'est –à-dire si le ciel n'est pas totalement visible au dessus de 5° de l'horizon, la couverture des satellites peut être totalement insuffisante. A quelques rares endroits du globe dans des zones dits de réception difficile, cette couverture n'est pas assurée dans plus de 3 % des cas.

Il arrive aussi régulièrement qu'un ou plusieurs satellites soient momentanément mis hors service. Généralement cela est dû à une maintenance périodique du satellite ou à un problème technique. Normalement un satellite n'est pas hors service plus de 24 heures, il n'y a pas plus

de 4 satellites mis hors service chaque mois et jamais plus de trois hors service en même temps. Le nombre de satellites visibles varie tout au long de la journée, et est en moyenne égale à huit.

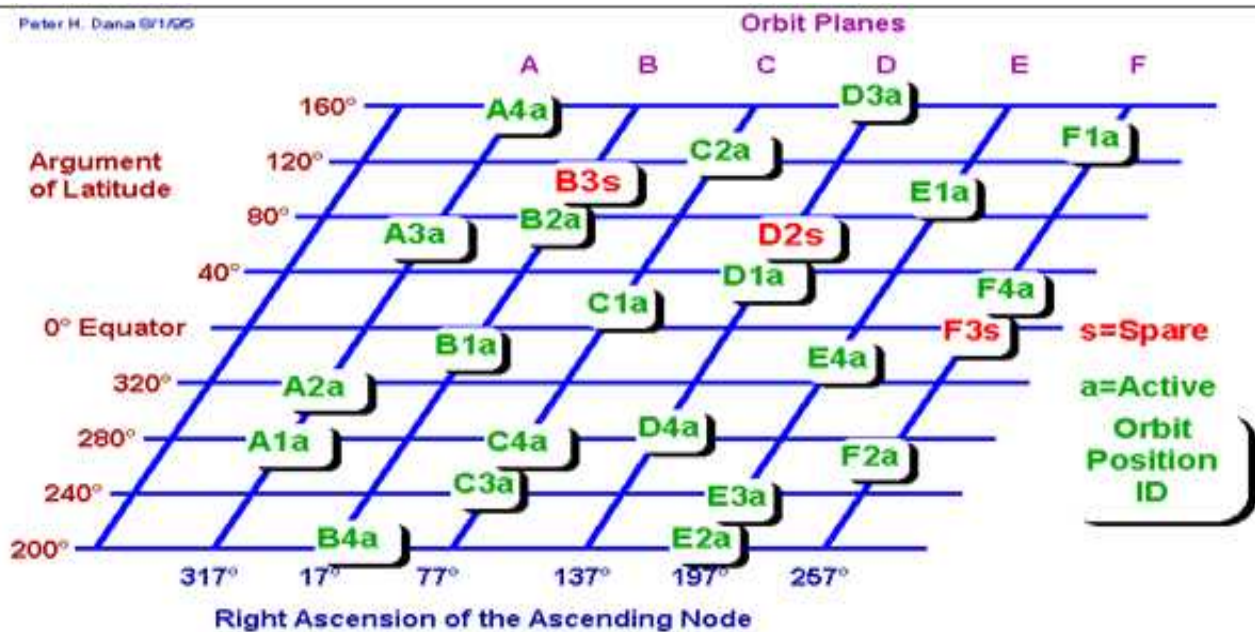


Figure 1.3 : Représentation simplifiée de constellation nominale de GPS

### 2-1-4-L'identification des satellites :

Plusieurs systèmes de numérotation des satellites coexistent :

- La numérotation séquentielle dans l'ordre de lancement (SV).
- La numérotation PRN (pseudo random noise) donné pour les codes, qui est généralement utilisé, le numéro PRN est fournie aux utilisateurs dans le message de navigation.
- Numéro lié à l'orbite et à la position sur l'orbite.
- Numéro dans le catalogue de la NASA

### 2-2-Segment de contrôle :

Le secteur de contrôle dépend de l'armée américaine et doit maintenir en permanence le système GPS opérationnel. Pour cela cinq stations de poursuite observent 24h/24 les satellites GPS, contrôlent et modifient leurs trajectoires et leurs transmettent des informations qui seront diffusées par le message de navigation. Les cinq stations sont Colorado spring (la station principale), Ascension Diegio, Garcia, Kwajalein et Hawaii. Le temps GPS est généré par la station principale de Colorado Spring.

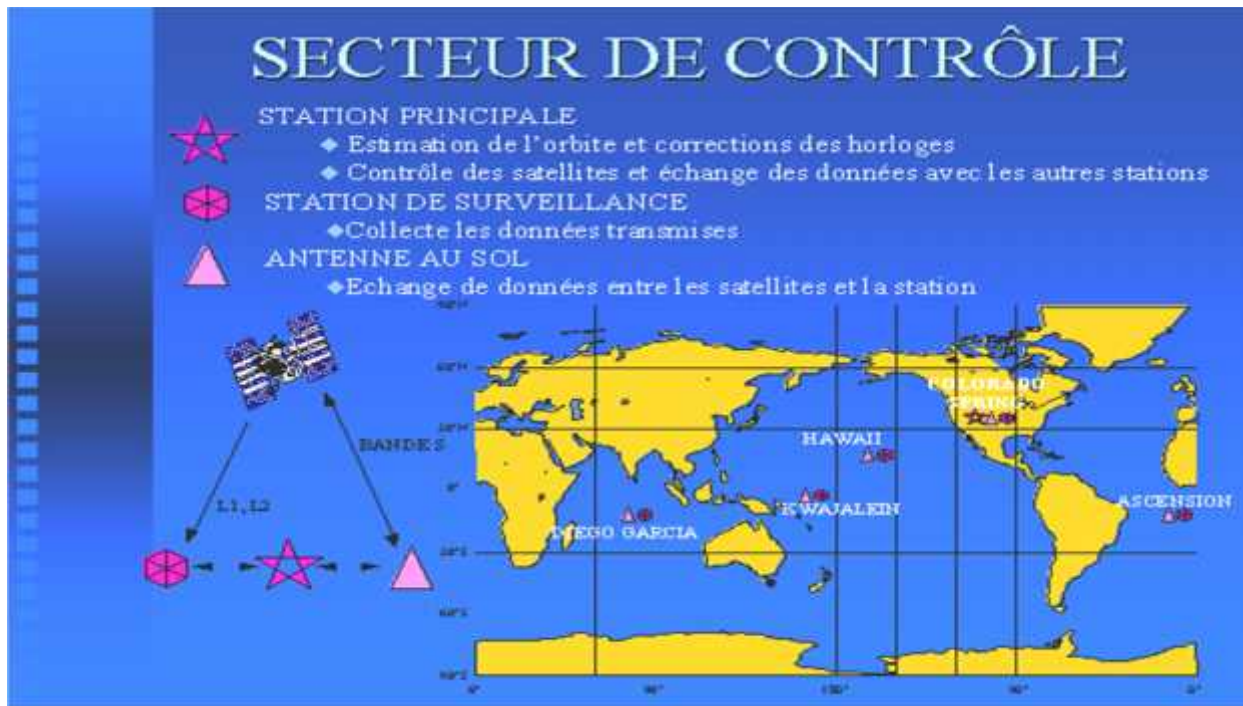


Figure 1.4 : Les stations de contrôles

### 2-3-Le segment utilisateur :

Le segment utilisateur consiste en une variété GPS militaires ou civils. Un récepteur est conçu pour recevoir, décoder et traiter les signaux émis par les satellites GPS. Les récepteurs intégrés (carte ou circuits spécifiques au GPS) dans d'autres systèmes sont également inclus dans le segment utilisateur.

Les utilisateurs disposent d'un moyen unique pour leurs applications de localisation, de navigation, de référence de temps, de géodésie voire de détermination d'attitude.

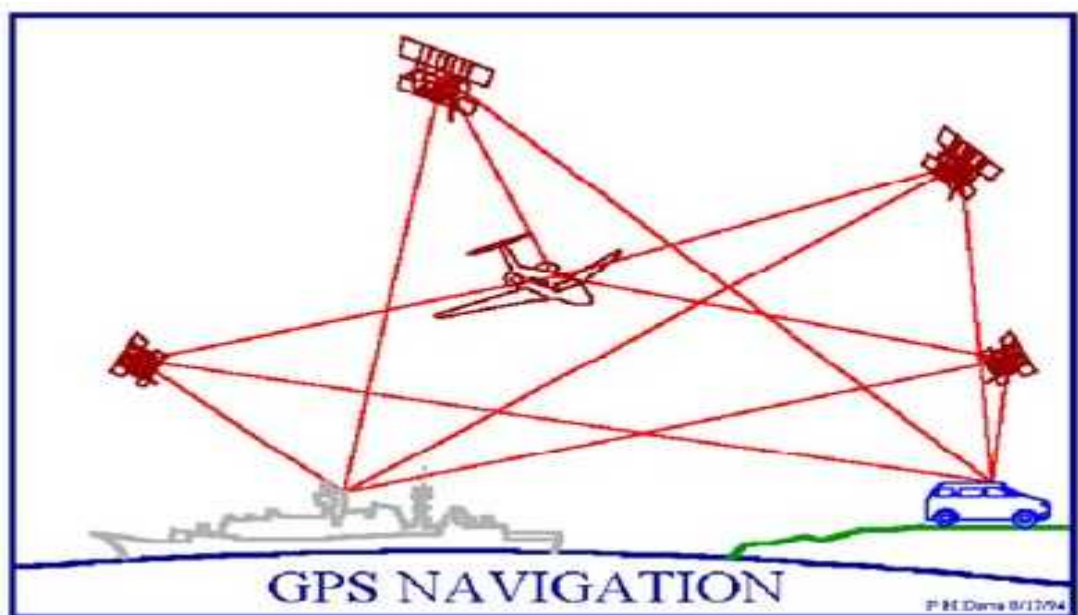


Figure 1.5 : Le segment utilisateur

### 3-Le Signal GPS :

Les satellites GPS transmettent deux codes : un code crypté pour la défense militaire américaine (signaux PPS) et un code civil (signaux SPS).

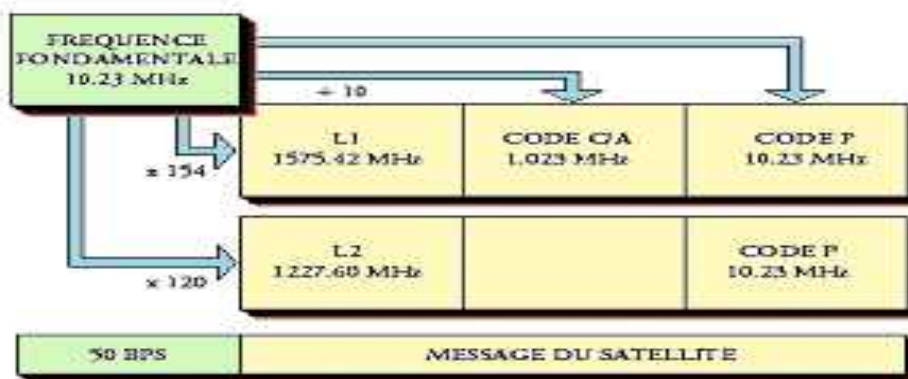
Pour l'ensemble des satellites, la fréquence fondamentale est  $f_0 = 10.23$  MHz.

A partir de la fréquence fondamentale, chaque satellite génère deux ondes porteuses :

$L_1 = 154 \cdot f_0 = 1575,42$  MHz (soit une longueur d'onde d'environ 19 cm).

$L_2 = 120 \cdot f_0 = 1227,60$  MHz (soit une longueur d'onde d'environ 24 cm).

Les signaux seront radiodiffusés sur ces deux fréquences.



**Figure 1.6 :** Dérivation des fréquences

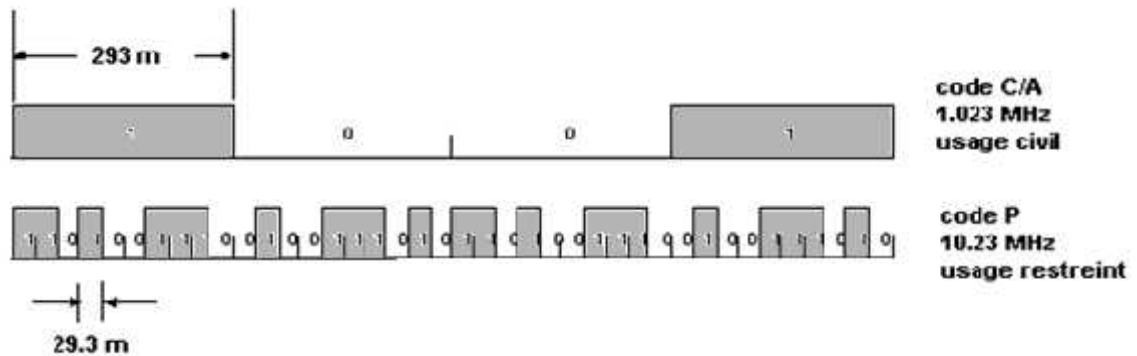
Pour des raisons techniques, ces deux ondes porteuses seront modulées par des codes pseudo aléatoires (**P**seudo **R**andom **N**oise) qui seront transmis en direction de la terre. Les informations véhiculées par ces ondes permettront de se positionner. Les codes pseudo aléatoires sont les suivants :

- Le **C/A-code** (**C**oarse/ **A**cquisition-code) disponible sur la porteuse **L1** pour les applications civiles (donc accessible à tous). C'est une série pseudo aléatoire de 0 ou 1 défini de façon déterministe par une fonction mathématique de période 1 ms à une fréquence de  $f_0/10 = 1,023$  MHz. Un code spécifique est attribué à chaque satellite afin que le récepteur puisse les identifier d'une façon univoque.  
La courte période de ce signal (1 ms), permet au récepteur une acquisition et donc une identification rapide des satellites.
- Le **P/Y-code** disponible sur les deux porteuses **L1** et **L2** pour les applications militaires. Le P-Code (**P**recision code) est une série pseudo aléatoire de fréquence

$f_0=10,23$  MHz. Le P-code est généralement rendu inaccessible aux civils par l'activation d'une fonction dite A.S (Anti-Spoofing) qui encode le P-code.

Ce code n'est accessible qu'aux utilisateurs possédant des clés de décryptage comme l'armée américaine et certains de ses alliés. Ses caractéristiques sont inconnues et il est donc impossible de le reproduire.

Les différents satellites émettent tous sur les mêmes fréquences (L1 et L2), mais un code individuel leur est assigné.



**Figure 1.7 : Code C/A et P**

### **3-1-Génération des signaux GPS:**

Les données de navigation sont transmises par un signal D prenant les valeurs 0 ou 1, dont la fréquence est de 50Hz (50 bits/s).

Le signal est tout d'abord additionné modulo 2 au code choisi (P ou C/A).

La porteuse L1 est modulée en phase par le signal  $P \oplus D$  et en quadrature par le signal  $C/A \oplus D$  (où  $\oplus$  représente l'opérateur XOR).

La porteuse L2 est simplement modulée en phase par le signal  $P \oplus D$  (voir figure 1.8).

Le signal  $S_{L1}$  est constitué de deux composantes en quadrature modulée respectivement par les codes C/A et P et le signal D, les codes C/A et P Coexistant sur la porteuse sans interférence, et l'on peut écrire :

$$\begin{aligned}
 S_{L1}(t) &= A_P.C_P(t).C_D(t).\cos(\check{S}_{L1}.t) + A_{C/A}.C_{C/A}(t).C_D(t).\sin(\check{S}_{L1}.t) \\
 S_{L2}(t) &= B_P.C_P(t).C_D(t).\cos(\check{S}_{L2}.t)
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

Avec :

$$C_P(t) = \pm 1 \text{ (code P).}$$

$$C_{C/A}(t) = \pm 1 \text{ (code C/A).}$$

$$C_D(t) = \pm 1 \text{ (message de navigation)}$$

$A_P$ ,  $A_{C/A}$  et  $B_P$  : Amplitudes des différentes composantes.

$\omega_{L1}$ ,  $\omega_{L2}$  : Pulsations respectives des signaux  $S_{L1}$  et  $S_{L2}$ .

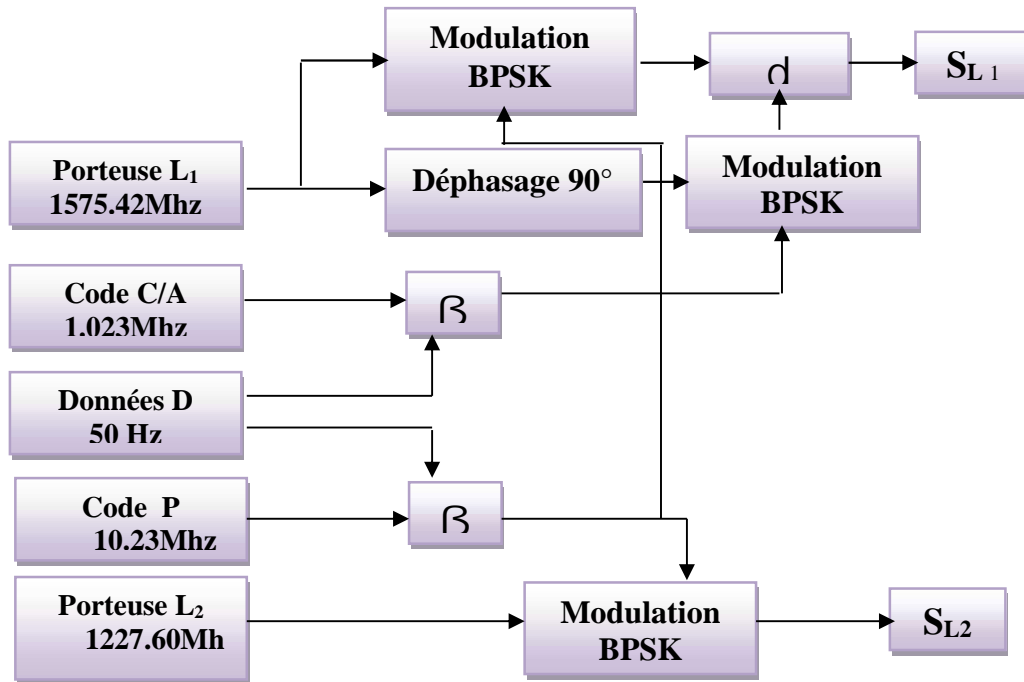


Figure 1.8 : Génération des signaux GPS

### 3-2-Les niveaux de puissance :

On obtient un spectre de raies dont l'enveloppe est montrée en Figure (1.9). Le code P génère une enveloppe en  $(\sin^2(x)/x^2)$  dont le lobe principal a une largeur de 20.46Mhz, le code C/A génère la même enveloppe avec une largeur du lobe principal de 2.046Mhz. Typiquement, la puissance associée à chaque raie est d'au moins 24 dB inférieur à la puissance totale du lobe principal, ce qui donne au lobe principal une puissance de plus de 95% de la puissance totale du signal GPS.

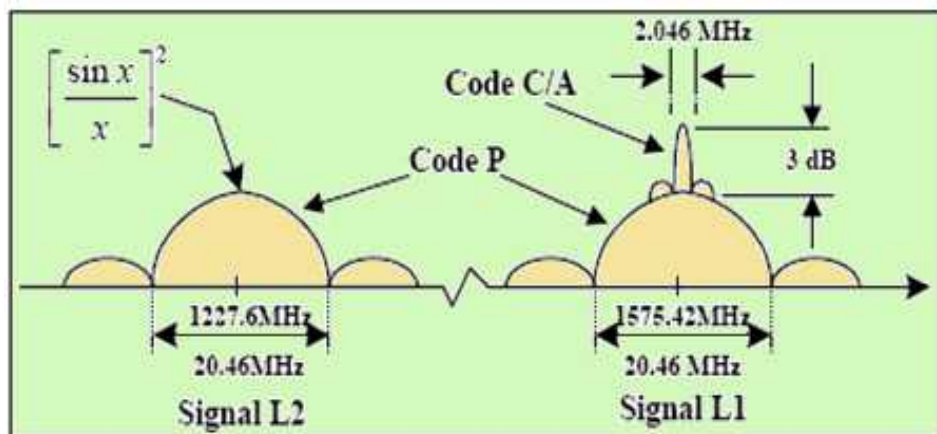


Figure 1.9 : Niveaux de puissance



### 3-3-Génération du code C/A :

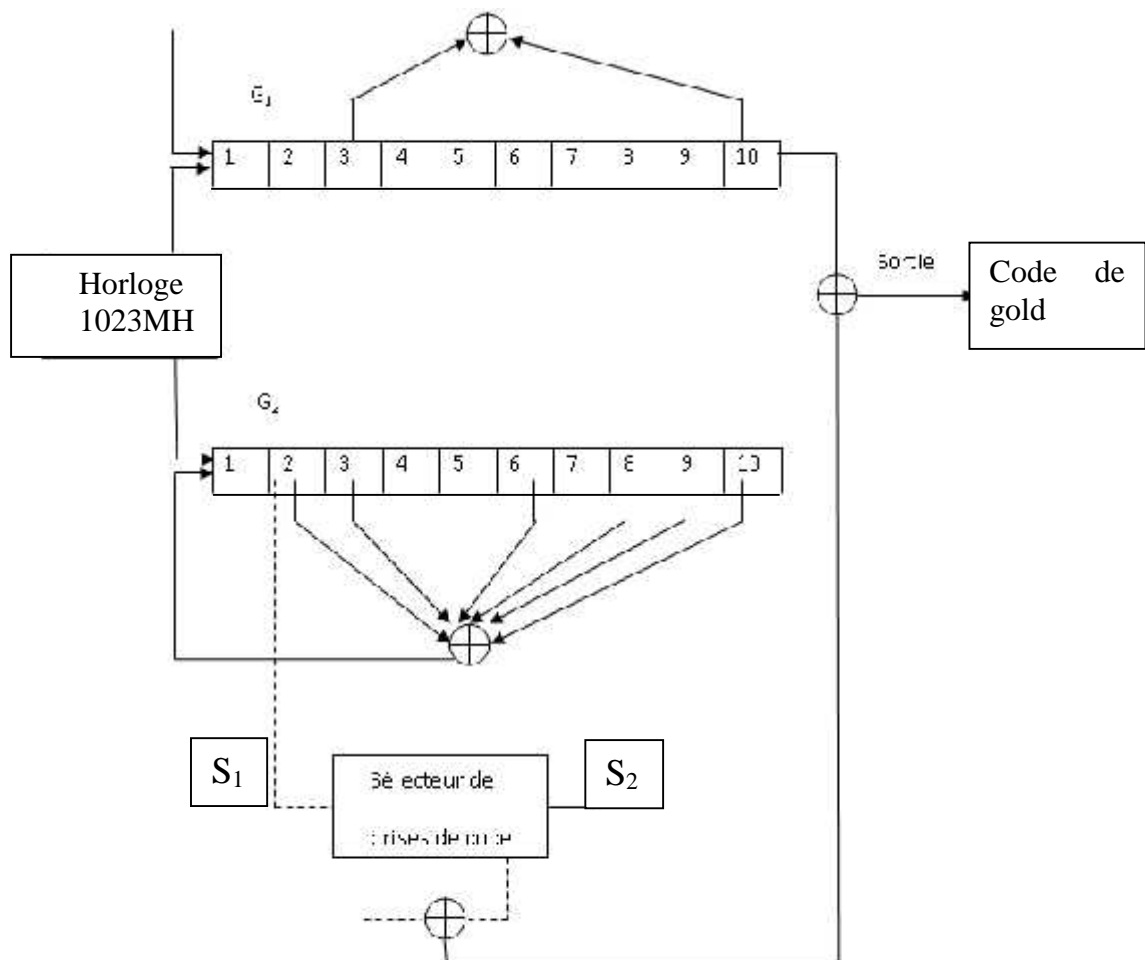
Le code C/A (Coarse/Acquisition) est un code relativement court de 1023 chips et de 1 ms de période, il est généré sous une cadence de 1.023 MHz, on note que c'est un code de Gold qui est retenu grâce à ces propriétés de corrélation. Le code est généré à partir de deux configurations linéaires de dix étages comme présente dans la figure (1.10). Ces deux registres produisent deux polynômes générateurs :

$$G_1=1+x^3+x^{10}$$

$$G_2=1+x^2+x^3+x^6+x^8+x^9+x^{10}$$

La valeur de initialisation des registres  $G_1$  et  $G_2$  est : 1111111111

Les deux registres à décalage de 10 étages sont cadencés à 1.023 MHz, pratiquement le décalage est réalisé par deux multiplexeurs sélectionnant deux sorties du registre  $G_2$ . Ces deux sorties sont additionnées modulo 2 avant d'être à leur tour additionnées à la sortie du registre  $G_1$ . Ces opérations sont réalisées par le synoptique suivant :



**Figure 1.10 :** La génération du code C/A

### **3-4-Le message de navigation :**

Nous allons à présent décrire brièvement les données de navigation contenues dans le signal GPS et la façon dont elles sont ordonnées.

#### **3-4-1-Format du message :**

Le signal émis par un satellite est composé de trames de 1500 bits. Chaque trame est divisée en sous trames contenant chacune 10 mots de 30 bits. Comme le débit du message est de 50 bits/sec, une trame est donc émise en 30 secondes.

Les sous trames 1, 2,3 contiennent un message qui en général ne change pas d'une trame à l'autre, ce sont des informations indispensables à la navigation, qui sont répétées toutes les 30 secondes, les sous trames 4 et 5, quant à elle, sont réservées à des message plus longs mais moins importants, en conséquence, il y a 25 messages différents pour les sous trames 4 et 5. On appelle alors trame principale l'ensemble des 25 trames différents, elle dure 12.5 minute.

Les mots de 30 bits se décomposent en 24 bits d'information et 6 bits de parité : les mots sont donc codés, à l'aide d'un code de hamming étendu. On rappelle qu'un code de hamming permet de corriger une erreur de transmission.

Longueur de message 1500bits (30s)	
Correction d'horloge+ les éphémérides 900bits (18s)	Des informations générales 600bits (12s)

**Tableau 1.1 : Message de navigation**

#### **3-4-2- Contenu du message :**

Pour qu'un utilisateur puisse déterminer sa position à l'aide du signal satellite, il faut qu'il connaisse la position des satellites et la distance qui le sépare de ceux-ci.

Les satellites GPS doivent donc émettre des éléments permettant de calculer leur position, ainsi que l'âge de ces informations, afin de déterminer les satellites à utiliser en priorité pour obtenir une meilleure précision. Tous ces éléments se retrouvent dans les sous trames 1, 2,3, répartis comme suit :

Sous trames	1	2	3
Contenu	L'âge des données la santé du satellite les coefficients de correction d'horloge	Les paramètres d'orbite (éphémérides)	

**Tableau 1.2 : Contenu des sous trames 1, 2 et 3**

Les éphémérides contiennent les paramètres orbitaux du satellite ainsi que leurs coefficients de correction.

Les sous trames 4 et 5 décrivent, quant à elles, les almanachs de tous les satellites en orbite et leur état de santé. L'almanach permet de calculer approximativement la position d'un satellite, et de déterminer s'il est visible ou pas.

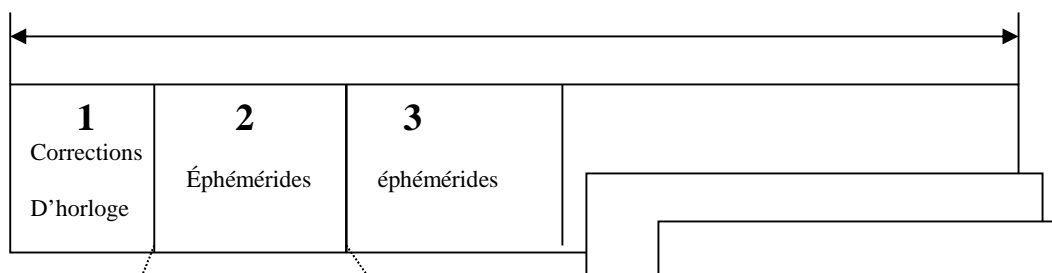
De plus, il donne une idée grossière de la vitesse relative du satellite et ainsi de l'effet doppler à prendre en compte pendant l'acquisition. La sous trame 4 contient également

Les coefficients du modèle ionosphérique, qui permet d'affiner le calcul de la distance satellite récepteur, notons pour conclure que le segment de contrôle du système GPS (les stations fixes au sol qui supervisent les satellites) calcule et rafraîchit les éphémérides régulièrement (une fois par jour), et transmet les nouvelles informations aux satellites.

Comme ces corrections ne sont pas rafraîchies simultanément, l'utilisateur a intérêt à utiliser les plus récentes (l'âge des données étant donné dans la sous trame 1).

Les informations spécifiques à chaque satellite, comme les corrections d'horloge et les éphémérides des satellites sont répétées en totalité dans toutes les "phrases" (les 900 premiers bits), soit toutes les 30 secondes pendant 18 secondes.

Les informations générales dont le contenu change à chaque phrase est transmis en totalité en 12.5 minutes (durée nécessaire pour 25 phrases).





10 mots de 0.6 secondes = 6 secondes

**Sous trame**

25 pages contenant :

- paramètre ionosphérique
- UTC temps universel coordonné
- santé de satellite

30 bits de 0.02 secondes = 0.6 secondes

**Mot**

**Figure 1.11:** Format du message de navigation

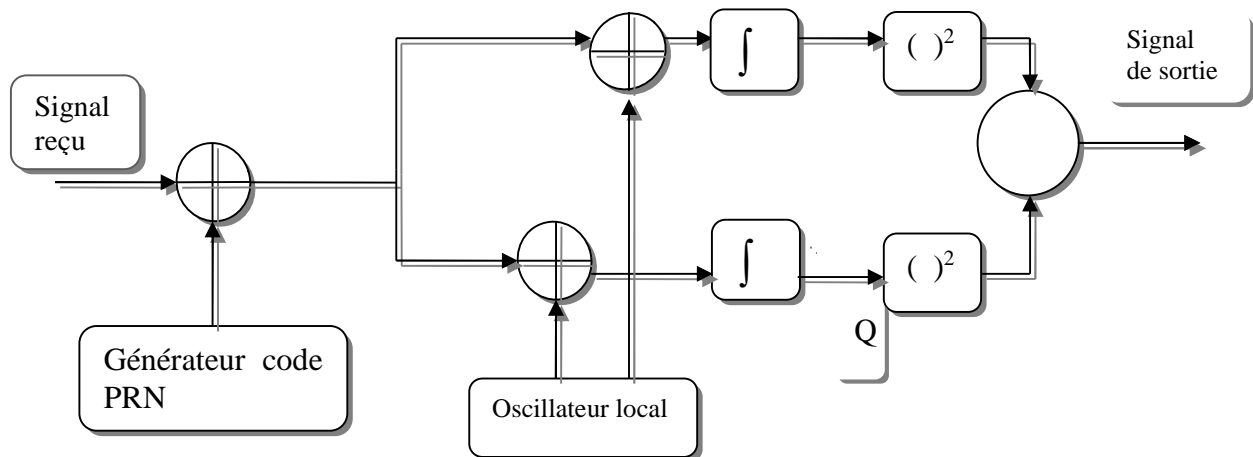
**3-4-Acquisition du signal :**

L'acquisition est une recherche tridimensionnelle dans le temps, la fréquence et le code d'accès du satellite dans le but de déterminer les satellites visibles ainsi que le code phase et la fréquence du signal reçu correspondant à un canal donné. Le code phase est nécessaire afin de générer un code PRN local qui est parfaitement aligné avec le code reçu tandis que la fréquence à son tour, affectée par un doppler variant entre  $\pm 5\text{KHz}$ , permet de générer une réplique locale utilisée afin d'enlever la porteuse du signal reçu.

Il existe trois méthode d'acquisition du signal (série, parallèle sur la fréquence, parallèle sue le code). Dans les trois méthodes, il s'agit d'une exploration des domaines temporel et fréquentiel discrétiser avec des pas prédéfinis, Pour chaque méthode le récepteur calcule la corrélation du signal reçu et avec une réplique retardée et modulée du code C/A.

Dans notre travail on s'intéresse à l'acquisition en série dont le synoptique correspondant est représenté par le schéma de la figure (1.12):





**Figure 1.12** : Schéma de l'acquisition série

D'après cette figure, on constate que l'algorithme est basé sur la multiplication du signal reçu par un code PRN et une porteuse générée localement. Le générateur PRN génère une séquence correspondante à un satellite donné, cette séquence possède un code phase entre 1 et 1023 chips. Le signal reçu est multiplié par le code PRN puis multiplié par une porteuse générée localement. Cette dernière constitue le signal 'I' tandis que la multiplication avec la porteuse déphasée de 90° génère le signal 'Q'. I et Q sont intégrés sur un temps donné, qui est la longueur d'un code C/A donc 1ms, finalement ces deux voix sont mises au carré puis additionnées.

La sortie est la valeur de la corrélation entre le signal reçu et le signal généré localement. Si cette sortie dépasse un certain seuil prédéterminé on le localise puis on récupère la fréquence et le code phase correspondant.

En acquisition série, on a deux paramètres à balayer selon plusieurs valeurs :

- La fréquence qui doit balayer les valeurs possibles entre  $F_c - 5\text{KHz}$  et  $F_c + 5\text{KHz}$  avec un pas de 500Hz.
- Un code qui glisse sur les 1023 code phases différentes.

#### **4-Les services fournis dans le GPS:**

Le GPS fournit deux types de positionnements, le positionnement précis (**pps**) et le positionnement standard (**sps**). Seul le positionnement standard est librement disponible, le

**pps** est réservé à l'armée américaine.

#### ➤ **LE PPS**

Le PPS (précise positioning service) est un système de positionnement précis. L'erreur de positionnement maximale dans 95 % des cas est inférieure à 21 mètres en horizontale et à 27.7 mètre en vertical. L'heure peut être obtenue avec une précision de 100 nanosecondes.

Les signaux du **pps** sont transmis sur deux fréquences différentes, appelées L1, L2 et qui contiennent le code de précision ou p-code. Le p-code est généralement crypté, le mode A-S (anti-spoofing) est activé. Le signal L2 est également utilisé pour déterminer le retard introduit par les couches de l'ionosphère. Le PPS n'étant normalement pas accessible aux civils, nous ne décrivons pas ce système.

#### ➤ **LE SPS**

LE SPS (standard positioning service) est la version civile du GPS communiqué sur une seule fréquence L1, et qui contient le code d'acquisition dit "grossier"(C/A, coarse acquisition code), ainsi que les différents messages de navigation.

En cas de conflit, l'armée américaine peut supprimer totalement toute utilisation du GPS dans la zone de conflit, son fonctionnement restant inchangé en dehors de la zone de conflit.

## **Introduction :**

Connaitre la position était un besoin qui s'est de plus en plus exprimé depuis l'antiquité, notamment pour les navires, les voyageurs etc. A ces époques, seule la nature

offrait un moyen de positionnement par le biais du soleil ou des étoiles, on permettant ainsi de connaître le nord géographique. Ces moyens primaires de localisation donnée un positionnement de très faible précision. Au XX<sup>ème</sup> siècle, avec l'avènement des radiocommunications, la navigation astronomique utilisant la boussole et navigation naturelle utilisant les astres ont été abandonnés pour ouvrir les portes aux systèmes de radionavigation. Ces derniers ont exploité le progrès technologique qu'ont connu les radiocommunications, en particulier les communications par satellites. C'est dans ce cadre que le système américain NAVSTAR GPS était le premier système de navigation par satellite.

## **1-Principe:**

Le principe du positionnement GPS est très proche du principe de triangulation. On mesure la distance entre l'utilisateur et un certain nombre de satellites de positions connues.

Pour cela, le récepteur mesure la différence de temps entre l'émission et la réception du signal. Le signal voyageant pratiquement à la vitesse de la lumière, on peut appliquer la relation :

$$D=c.t$$

Avec

- **D** : distance entre le récepteur et le satellite (c'est en fait le rayon d'un cercle où le satellite serait le centre).
- **c** : vitesse de propagation des signaux radios (la vitesse retenue par convention pour le système GPS est  $c = 299\,792\,458 \text{ m.s}^{-1}$ ),
- **t** : durée de signal entre l'émission et la réception.

On obtient donc des "pseudo-distances" qu'il faudra corriger des perturbations naturelles.

Comme la longueur d'onde du signal codé est de 10 à 100 m selon le code utilisé, la distance absolue que l'on obtient n'est estimée qu'à quelques mètres près.

Connaissant la position des satellites ainsi que les pseudo-distances, on définit ainsi des sphères centrées sur les satellites et dont l'intersection donne deux positions : l'une sur le globe terrestre et l'autre dans l'espace (cette dernière sera éliminée).

Les données (code et phase) enregistrées par le récepteur GPS sur le terrain sont ensuite traitées par des logiciels qui prennent en compte les différentes sources d'erreurs dues aux perturbations naturelles.

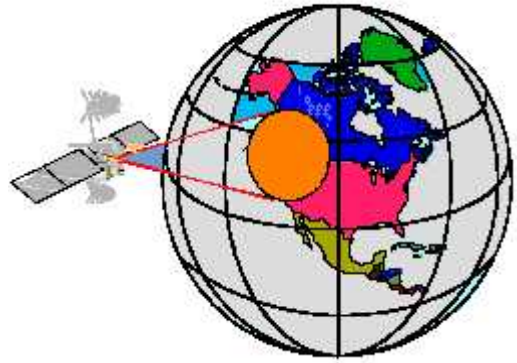
## **2-Fonctionnement de GPS:**

Les récepteurs GPS fonctionnent sur le principe de la « TÉLÉMÉTRIE ». Le récepteur calcule la distance entre un point sur terre et plusieurs satellites afin d'établir la latitude et la longitude de ce point.

## **2-1-Positionnement à partir du GPS:**

### **Un Seul Satellite Visible:**

Supposons que vous allumez votre récepteur GPS et qu'il capte le signal d'un satellite. Il vous donne sa position et sa distance de votre poste. Une seule distance ne vous aide pas beaucoup car tout ce que vous savez, c'est que vous vous trouvez quelque part dans un cercle dont la circonférence détermine votre distance du satellite. Vous êtes toujours perdu.



---

### **Deux Satellites Visibles:**

Si le récepteur capte un signal provenant d'un deuxième satellite, vous pouvez cerner un peu mieux votre position. Vous savez maintenant que vous êtes quelque part dans l'intersection de ces deux cercles. Vous ne savez toujours pas où vous vous trouvez exactement, mais votre situation s'améliore.



---

### **Trois Satellites Visibles :**

Maintenant, si votre récepteur capte Les signaux

D'un troisième satellite vous vous trouvez dans l'intersection des trois cercles Vous savez où vous vous trouvez, mais cela manque de précision!



### **Quatre Satellites Visibles :**

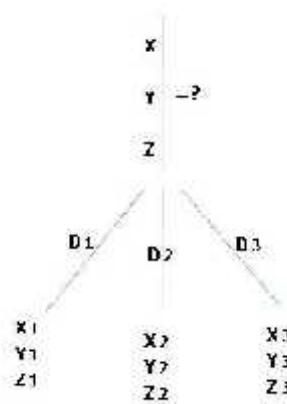




Avec quatre satellites, vous obtenez votre Positionnement par point unique (absolu) et l'élévation du point. Voilà, vous savez où vous vous trouvez, à quelques mètres près!

## 2-2-Triangulation classique :

Toute position dans l'espace tridimensionnel est repérée par 3 points. Le centre du repère étant choisit arbitrairement.



$$D_i = \sqrt{(X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2 + (Z - Z_i)^2} \quad ; i = 1, 2, 3 \quad (2.1)$$

C'est le principe utilisé d'ordinaire par les instituts géographiques, en temps normal ce système s'appuie sur un réseau de balise terrestre fixe.

Ce type de positionnement est appelé positionnement en 2D, car il donne seulement une information concernant la latitude et la longitude. Il est donc nécessaire de faire intervenir un quatrième satellite dans le positionnement afin de déterminer l'altitude du récepteur GPS, on obtient alors un positionnement 3D.

Connaissant la distance qui sépare le récepteur du satellite et la position du satellite, il est possible de dessiner une sphère imaginaire autour de chaque satellite, sur laquelle se situe obligatoirement le récepteur.

L'intersection de ces deux sphères donne un cercle de position sur lequel se situe le récepteur. En continuant ainsi, on trouve que l'intersection de trois de ces sphères donne deux points, où est susceptible de se trouver le récepteur. L'utilité d'un quatrième satellite s'avère

alors de nouveau utile afin d'éliminer un de ces deux points. La position 3D est ainsi définie par quatre satellites, donc quatre sphères de positionnement.

Certains récepteurs sont capables d'affiner leurs calculs en utilisant plus de quatre satellites (ce qui rend les mesures plus faciles) tout en ôtant les sources qui semblent peu fiables. Avec une horloge assez stable, un récepteur peut calculer la position de satellite en 3D grâce à trois satellites seulement (cela reste encore un cas extrêmement rare). L'imprécision sera alors due au décalage de l'horloge.

### **3-Les différents types de mesure:**

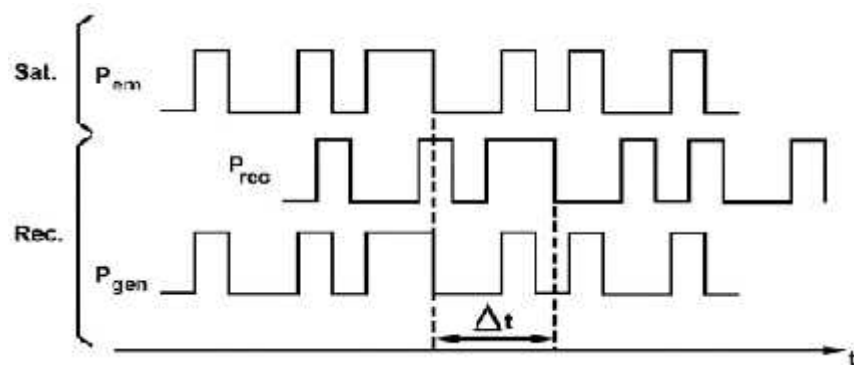
#### **3-1-La mesure de distance:**

Toute la présentation précédente reposait sur l'hypothèse que l'on connaissait exactement la distance séparant le satellite du récepteur, étudions comment calculer cette distance.

Le principe est simple : le satellite envoie un signal vers le récepteur, celui ci détermine le temps de transmission de ce signal et ainsi peut déduire la distance le séparant du satellite grâce à l'équation: **Distance = vitesse x temps**

La célérité des ondes transmises est proche de celle de la lumière : 300 000 km/s.

Il reste donc à déterminer le temps de transmission du signal. Pour cela, le récepteur et le satellite émettent au même moment une trame pseudo aléatoire identique appelée ainsi car elle est générée par des équations très complexe, la rendant ainsi unique. Une fois que cette trame sera reçue par le récepteur, celui-ci pourra la décaler dans le temps de façon à la faire coïncider avec celle qu'il a générée. La mesure du temps de transmission est déduite de ce procédé, et ainsi on peut connaître la distance séparant le récepteur du satellite.



**Figure 2.1 : Mesure de pseudo**

Pour valider tout le raisonnement qui précède, il faut que la mesure du temps soit extrêmement précise. En effet, si une erreur d'un millième de seconde est faite, cela produit une erreur de Position de 300km. A la vitesse de la lumière, une très grande précision est de rigueur. Les horloges internes des satellites sont très précises car il s'agit d'horloges atomiques au Césium, cependant celles des récepteurs sont beaucoup moins. La solution est d'utiliser un 4<sup>ème</sup> satellite.

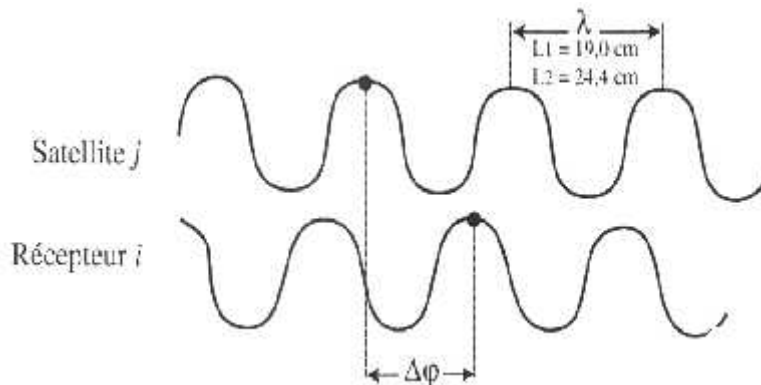
### **3-2-La mesure de phase:**

La donnée que l'on récupère à la sortie d'un récepteur GPS est la différence entre la phase de l'onde émise par un satellite et la phase d'un oscillateur interne au récepteur. La phase de l'onde reçue est affectée par l'effet Doppler (la variation de la fréquence du « son » perçu en fonction de la distance sa source et observateur) du au déplacement du satellite, la réfraction atmosphérique, et le bruit de mesure du récepteur.

On peut écrire la différence de phase  $\Phi_{ij}(t_j)$  au temps  $t$ , à la station  $j$ , et pour les satellites  $i$ , comme suit :

$$(2.2) \quad \Phi_{ij}(t_j) = \Phi_{ij}^r - \Phi_j^1 + n_{ij} + \Phi_b$$

- $t_j$  : Temps de la réception du signal à la station  $j$ .
- $\Phi_{ij}^r$  : Phase reçue à la station  $j$  en provenance du satellite  $i$ .
- $\Phi_j^1$  : Phase de l'oscillateur du récepteur  $j$ .
- $\Phi_{bruit}$  : Bruit aléatoire sur la mesure de phase.
- $n_{ij}$  : Un entier ( $n$  cycles) représentant l'ambiguïté de phase.



**Figure 2.2 : Mesure de phase**

Par ailleurs, le signal reçu au temps  $t_j$  est lié au signal émis au temps  $t_i$  par le  $i^{ème}$  satellite par relation suivante:

$$(2.3) \quad t_j = t_i + \tau_{ii}(t_j)$$

Dans laquelle  $\tau_{ij}$  est le temps de propagation qui dépend de la géométrie satellite station et des perturbations ionosphériques et troposphériques.

On en déduit que la phase de signal reçu au sol est liée à la phase transmise par le satellite par:

$$(2.4) \quad \Phi_{ii}^r(t_j) = \Phi_i^t(t_j - \tau_{ii})$$

Cependant, si l'on compare les équations (2.2) et (2.4), on se rend immédiatement compte de la difficulté qu'il y a à employer les observations de phase plutôt que les pseudo-distances. Avec ces dernières, on mesure directement la distance satellite récepteur. Avec les observations de phase, le terme d'ambiguïté (nombre de cycles entiers) doit être estimé avant que l'on puisse tirer avantage de la précision de cette observation. L'estimation de l'ambiguïté mène à des complexités dans l'utilisation des observations de phase, inexistantes avec les pseudo-distances. Le tableau qui suit, résume les avantages et les inconvénients des deux types d'observations :

	<b>Pseudo distances</b>	<b>Observations de phase</b>
<b>Avantages</b>	Non ambiguës Simples	Possibilité d'une grande exactitude de positionnement
<b>Inconvénients</b>	Faible exactitude de positionnement	Complexité plus grande

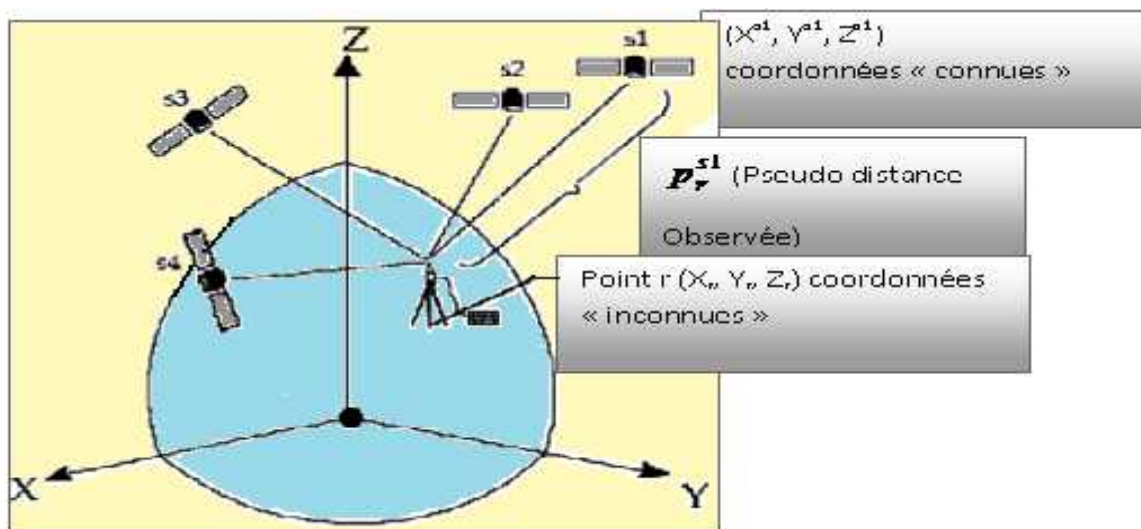
**Tableau 2.1 : Comparaison entre les deux types de mesures**

#### **4-Types de positionnement GPS :**

Jusqu'à présent, nous avons décrit les trois segments du GPS et les composantes des signaux diffusés par les satellites. Les principales méthodes de positionnement sont : Positionnement absolu et positionnement relatif.

#### **4-1-positionnement absolu :**

Le positionnement au moyen du GPS peut s'effectuer de façon absolue ou de façon relative. En positionnement absolu, les coordonnées d'un récepteur en un point (inconnu) sont établies relativement au cadre de référence des satellites d'après les positions (connues) des satellites GPS suivis. Le positionnement absolu est également dit positionnement autonome ou simplement positionnement par point unique (point positioning). Dans le positionnement relatif, les coordonnées d'un récepteur en un point inconnu sont établies relativement à celles d'un récepteur en un point connu.



**Figure 2.3 :** Positionnement autonome

La figure (2.3) illustre la notion de positionnement autonome. Grâce aux éphémérides, la position de n'importe quel satellite à n'importe quel moment dans le temps peut être calculée.

Sur la figure, s1, s2, s3 et s4 représentent quatre satellites différents qui sont suivis.

La position de ceux-ci est donnée par rapport au centre de la terre dans le système de coordonnées x, y et z, les coordonnées de s1 sont notées  $(X_{s1}, Y_{s1}, Z_{s1})$ , les coordonnées de r le point inconnu relativement au centre de la Terre sont  $(X_r, Y_r, Z_r)$ . La pseudo distance observée  $p_r^{s1}$ , permet d'établir la relation entre les coordonnées connues du satellite 1 et les

coordonnées inconnues du récepteur au moyen de l'équation d'un vecteur dans l'espace tridimensionnel :

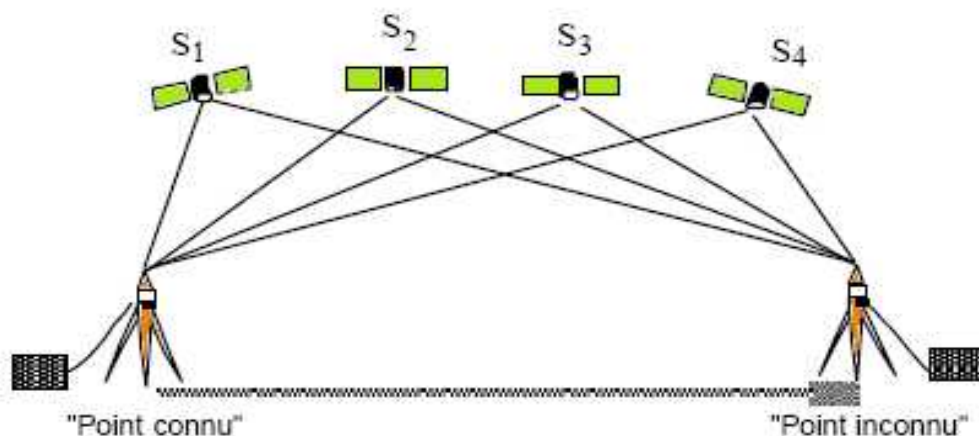
$$P_r^{s1} = \sqrt{(X^{s1} - X_r)^2 + (Y^{s1} - Y_r)^2 + (Z^{s1} - Z_r)^2} + \text{erreurs}$$

(2.5)

Une équation similaire à (2.5) décrivant la relation entre le satellite 1 et le récepteur, peut être formulée pour les différents satellites suivis. Grâce à un minimum de quatre satellites, toutes les inconnues ( $X_r$ ,  $Y_r$ ,  $Z_r$ ) et un terme relié à la synchronisation des horloges (qui fait partie des erreurs) peuvent être calculées.

#### **4-2-Positionnement relatif :**

La notion de positionnement relatif est illustrée à la figure (2.4). Plutôt que d'établir la position d'un point sur la Terre par rapport aux satellites (comme c'est le cas en positionnement autonome), la position d'un point sur la Terre est établie par rapport à celle d'un autre point connu. L'avantage du positionnement relatif sur le positionnement autonome réside dans l'exactitude beaucoup plus grande qu'il permet, puisque la plupart des erreurs dans les observations GPS sont communes aux points (connu) et (inconnu) et peuvent être annulées durant le traitement des données.



**Figure 2.4 : Positionnement relatif**

Les expressions positionnement différentiel et positionnement relatif sont parfois employés indifféremment l'une pour l'autre. Toutefois, étant donné que le positionnement différentiel désigne plus souvent un type particulier de positionnement relatif, appliquant des corrections mesurées à un point de position (connue) aux observations effectuées en un autre, de position (inconnue),

## **5-Les sources d'erreurs :**

### **5-1-Les orbites :**

L'erreur d'orbite est la différence entre la position d'un satellite calculée au moyen des éphémérides diffusées et la position réelle du satellite dans l'espace. L'influence des orbites sur la détermination dépend du mode de positionnement, pour un positionnement absolu, l'erreur sur la position du satellite affecte directement la position de la station lorsqu'on utilise en temps réel les éphémérides radiodiffusées, on obtient un positionnement à 10m près. Lors d'un positionnement relatif, l'erreur introduite par les orbites sur la ligne de base est proportionnelle à la longueur de la ligne, les orbites radiodiffusées utilisées pour le positionnement en temps réel ont généralement une précision de quelques mètres, ce qui implique une erreur de plusieurs centimètres sur une ligne de base de 100 km.

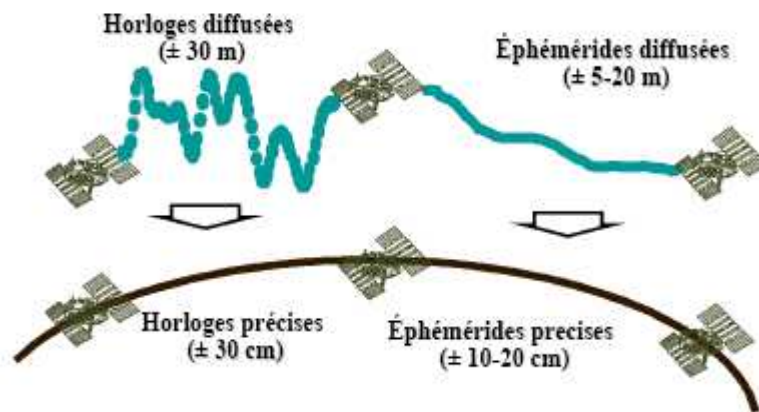


Figure 2.5: Erreurs d'éphéméride et d'horloge

### **5-2-Les dégradations volontaires du système :**

Les signaux émis par les satellites sont soumis à des dégradations volontaires visant d'une part à limiter l'utilisation civile du système GPS et d'autre part à en protéger l'utilisation militaire: l'accès sélectif (SA : *Selective Availability*) et l'anti-brouillage (AS : *Anti-Spoofing*)

#### **5-2-1-L'accès sélectif :**

L'accès sélectif (SA) consiste en au moins deux types de dégradation :

- Dégradation par déphasage de la fréquence d'horloge des satellites.
- Dégradation des données du message de navigation (éphémérides et paramètres d'horloge).

### **5-2-2-L'antibrouillage :**

L'antibrouillage (AS) consiste à ajouter au code P, sur  $L_1$  et  $L_2$ , le code W, classifié militairement et ainsi former le code Y. Une telle mesure permet d'éviter le brouillage volontaire du système par un utilisateur qui diffuserait un signal proche de celui du GPS et créant ainsi des erreurs de positionnement pour les autres utilisateurs. L'accès au code P et aux clefs de protection SA et AS correspond au service PPS de positionnement précis.

### **5-3-Les horloges :**

L'instabilité des horloges est la source d'erreur la plus importante dans les mesures GPS. Les horloges des satellites sont les plus stables et leurs dérives impliquent seulement des variations de 10 à 30 m sur la mesure de la distance satellite-station. Par contre la grande instabilité des horloges des récepteurs induit un décalage de 10 à 100m, la correction d'horloge satellite est modélisée à partir des données du message de navigation par contre la correction d'horloge récepteur est estimée lors du calcul.

### **5-4-L'ionosphère :**

Les effets induits varient entre moins d'un mètre et une cinquantaine de mètres. En positionnement relatif, lorsque les stations sont proches (quelques kilomètres) les variations ionosphériques observées sont corrélées et le calcul de la ligne de base n'est pas affecté. Pour des lignes de base plus importantes, les effets ionosphériques ne sont plus les mêmes sur les différents trajets satellite-station, une correction est alors nécessaire. Ces effets sont dépendants de plusieurs paramètres : la latitude (plus agité aux pôles et à l'équateur), l'activité solaire, le champ magnétique terrestre, la période de l'année, le jour et la nuit. L'ionosphère étant un milieu dispersif, la réfraction induite sur les signaux dépend de leurs fréquences. Cette propriété est utilisée pour la correction de ces effets sur les signaux GPS. En combinant linéairement les observations sur les deux fréquences ( $L_1$  et  $L_2$ ), on supprime au premier ordre le retard ionosphérique.

### **5-5-La troposphère :**

La troposphère est la couche basse de l'atmosphère, elle s'étend du sol jusqu'aux environs de 80 km d'altitude. C'est un milieu non dispersif pour les ondes de fréquence inférieure à 20 GHz, les combinaisons entre les deux fréquences  $L_1$  et  $L_2$  ne permettent donc pas de s'affranchir des hétérogénéités de propagation. La troposphère engendre un retard sur le signal correspondant à un allongement moyen de la distance satellite-station supérieur à 2 mètres. Cet allongement dépend de la température et de la pression le long du trajet du signal ainsi que de l'altitude de la station.



### **5-6-Les multi trajets :**

Sont introduites lorsque des signaux reçus directement se combinent à d'autres, réfléchis par des objets voisins, de telle manière que le vrai signal subit une interférence attribuable au signal réfléchi, ils ne sont pas modélisables, car ils dépendent de l'environnement de l'antenne.

Ils peuvent engendrer des interférences destructrices ou, fausser les calculs si le signal réfléchi est retenu par le récepteur, de plus, selon la direction de l'antenne et le coefficient de réflexion, le signal réfléchi peut être plus fort que le signal original.

Les mesures sur les codes sont plus sensibles et on peut avoir de 10 à 20m de différence en comparant des pseudo-distances à deux époques consécutives.

Pour les mesures de phases, en relatif, avec des distances courtes et une durée d'observation assez longue, l'erreur de trajet multiple est d'ordre du centimètre, l'effet augmente si l'on diminue le temps d'observation.

### **5-7-Les erreurs de précision :**

La position de l'observateur, ainsi qu'elle est calculée par le récepteur GPS, est fournie avec une précision de l'ordre de quelques mètres. Cette précision dépend d'un certain nombre de facteurs, l'un des plus significatifs étant le nombre de satellites (visibles). En outre, la configuration des satellites visibles c'est-à-dire les positions respectives des uns par rapport aux autres à une influence considérable sur la précision des résultats. En effet, plusieurs satellites groupés dans une même région du ciel conduisent à une précision plus faible que le même nombre de satellites judicieusement répartis sur la demi-sphère céleste au-dessus de l'observateur.

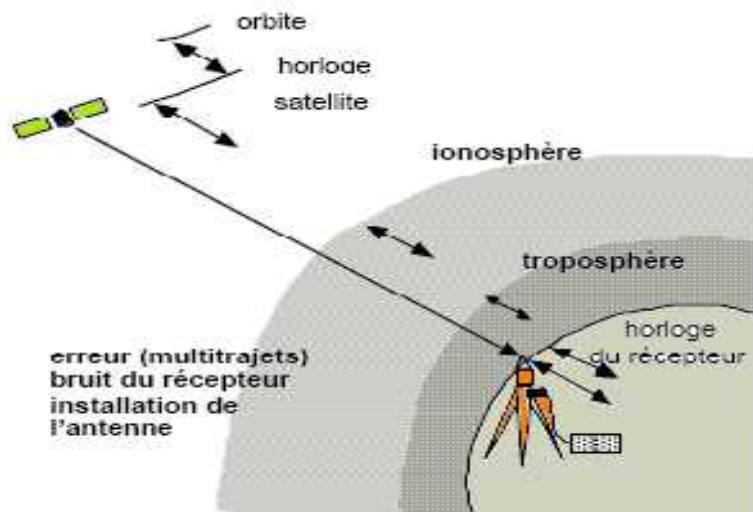


Figure 2.6 : Erreurs courantes

### **6-Les récepteurs GPS :**

Les récepteurs GPS peuvent être sous-divisés en trois catégories :

- Les récepteurs multicanaux

- Les récepteurs séquentiels
- Les récepteurs multiplex

**Les récepteurs multicanaux :** constituent le top-niveau des récepteurs GPS. Ils sont généralement utilisés pour des applications ultra précises ou dans des applications de positionnement dynamique.

**Les récepteurs séquentiels :** existent en version un ou deux canaux. Le deuxième canal est généralement utilisé pour l'acquisition d'un satellite initial et pour recevoir le message de navigation.

**Les récepteurs multiplex :** forment un compromis entre les récepteurs multicanaux et séquentiels. Ils peuvent malgré un principe de fonctionnement analogue à un récepteur séquentiel et grâce à une conception améliorée, faire un enchaînement entre les différents satellites en moins de 20 millisecondes.

La majorité des récepteur traite uniquement le code C/A (coarse acquisition) tandis que d'autres ont la capacité d'acquérir le code P (precision), un récepteur P acquiert une première fois le code C/A pour obtenir le temps GPS puis il accroche le code P.

Les récepteurs bi-fréquences estiment le retard ionosphérique améliorant de ce fait la précision des mesures. Un récepteur mono-fréquence (exploitant uniquement L1) utilise le modèle GPS de l'ionosphère pour élaborer ces corrections.

Il existe des utilisations spécifiques, pour les différents récepteurs GPS tels qu'en aéronautique ou en marine. Si le traitement des signaux GPS est identique pour un appareil d'une gamme donnée, les interfaces utilisateurs sont adaptées a l'application, un récepteur GPS dédiée à la navigation visualisera le cap ou la distance parcourue, en plus de la position, tandis qu'un récepteur de géodésie affichera les retards ionosphériques ou le biais d'horloge.

### **6-1-Structure générale d'un récepteur :**

Un récepteur GPS est constitué de sous-ensembles parfaitement délimités. On distingue :

- Une antenne.
- Un préamplificateur à faible bruit (LNA).
- Un module radiofréquence (RF).
- Un module numérique.
- Une interface utilisateur (clavier et afficheur).
- Une alimentation.

#### **6-1-1-L'antenne :**

L'antenne convertit l'énergie des ondes électromagnétiques en provenance des satellites en un courant électrique capable d'être traité par les circuits électroniques du récepteur. La taille et la forme de l'antenne sont critiques et doivent être adaptées aux signaux reçus. L'antenne peut capter uniquement L1 ou, L1 et L2.

### **6-1-2- Le préamplificateur à faible bruit :**

Le rôle du préamplificateur à faible bruit est d'amplifier le signal utile tout en minimisant le niveau du bruit thermique. Le niveau des signaux captés est très faible.

Le préamplificateur doit donc amplifier ces signaux sans dégrader de façon notable leur qualité. Ce sous-ensemble doit se situer à proximité de l'antenne pour limiter la dégradation du rapport signal à bruit. Un câble coaxial permet d'une part, de transmettre le signal au récepteur lui-même et d'autre part d'alimenter le préamplificateur.

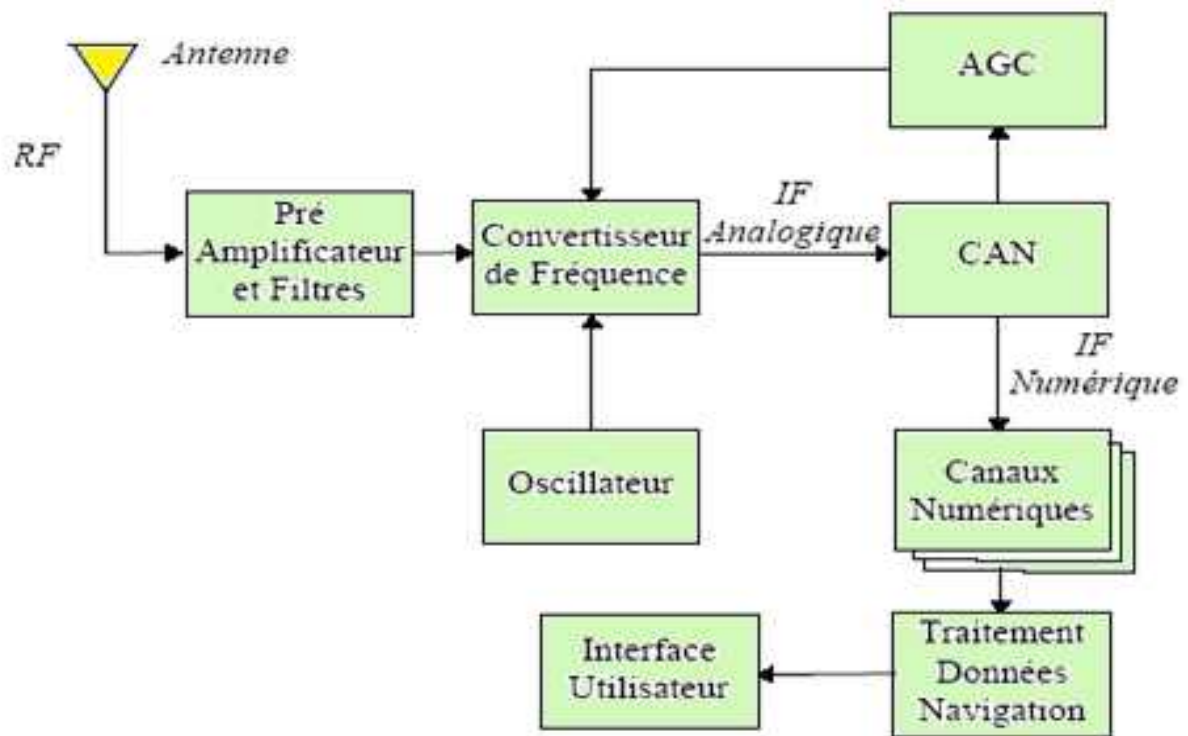
Un filtre en tête atténue les fréquences hors bande. Celui-ci peut être à large bande recouvrant les fréquences de L2 à L1 ou sélectif à double bande. Le choix du filtre dépend de l'application. Au minimum, un filtre non sélectif est nécessaire pour supprimer les fréquences images du signal avant la transposition des fréquences.

### **6-1-3-Le module RF :**

Le module RF assure la transposition des signaux L1 et L2 (le cas échéant) vers des fréquences plus faibles, appelées fréquences intermédiaires (IF). Ces IF permettent de traiter plus aisément le signal. La transposition est effectuée grâce au battement, ou produit du signal d'entrée avec une sinusoïde pure ; appelée oscillateur local (LO), générée par un synthétiseur de fréquence. Ce dernier est piloté par l'horloge à quartz du récepteur. Le signal IF contient la modulation du signal. Seule la fréquence porteuse a été décalée en préservant la dérive due à l'effet doppler. Les filtres IF offrent des bandes étroites adaptées au signal. Un dispositif de contrôle automatique de gain (GAC) régule le niveau du bruit (le signal est largement sous le bruit thermique avant sa compression par l'opération de corrélation). Le signal est numérisé après un échantillonnage, la conversion A/N a lieu directement en fréquence intermédiaires IF à quelques mégahertz pour les récepteurs C/A. ceci autorise une plus grande souplesse dans le traitement numérique pour pouvoir, par exemple prendre en compte d'autres satellites (Glonass...).

### **6-1-4-le module numérique :**

Les premières architectures des récepteurs GPS ont été analogiques. Les récepteurs d'aujourd'hui traitent numériquement le signal au plus tôt dans la chaîne. Les circuits numériques remplacent les circuits analogiques en fonction de leurs performances et de leur coût. Dans le module numérique, on distingue principalement un ou deux circuits ASIC (Application Specific Integrated Circuit) dédiés au traitement GPS et un processeur de signal. On trouve également les circuits traditionnels d'une structure programmée (mémoires, ports d'interface,...)



**Figure 2.7 :** Structure d'un récepteur GPS

### **Conclusion :**

Dans cette approche non exhaustive du GPS, nous pouvons retenir l'immense champ d'action de ce système et ses multiples applications. Cependant son utilisation courante avec un matériel classique ne permet pas d'obtenir des précisions supérieures à 50m suffisantes dans certains cas, mais pas dans tous.

### **Introduction :**

Le Système GPS a été déclaré opérationnel le 8 décembre 1993. Il présente un grand intérêt pour plusieurs communautés scientifiques et pour différentes raisons. L'utilisation du système de navigation par satellite GPS pose à l'heure actuelle au moins 4 problèmes (La disponibilité, La continuité de service, l'intégrité et la vulnérabilité aux brouillages).

Le système GPS n'est pas nécessairement plus vulnérable aux brouilleurs que les autres systèmes de radionavigation, mais la localisation de sa bande de fréquence d'opération et son principe de fonctionnement le rendent sensible à plusieurs types de brouilleurs et de perturbations.

Pour l'aviation Civile pose des problèmes liés à l'intégrité du système et à sa vulnérabilité au brouillage. L'intégrité peut être garantie, au moins partiellement, par des stations de contrôle terrestres additionnelles, par l'augmentation du nombre de satellites ou par un traitement au niveau du récepteur, tel qu'un couplage avec d'autres moyens de détection ou de navigation secondaire.

L'objet de ce chapitre est de recenser les sources potentielles de brouillage sur les signaux de GPS. Il est question alors du brouillage non Intentionnel et celui volontaire (Intentionnel) qui pourrait également être présent à cause des limitations imposées par les règles de cohabitation des systèmes dans les bandes considérées. Il faut savoir que la puissance nominale de réception des porteuses à l'entrée du récepteur est de l'ordre de

-160 dBW pour un angle d'élévation de  $5^\circ$  et en supposant un gain d'antenne du récepteur de '0' dB. Le faible niveau de ce signal fait qu'un nombre de signaux extérieurs d'origines diverses peuvent se retrouver à l'entrée du récepteur avec des niveaux comparables, voire largement supérieurs. Heureusement le gain de traitement apporté par la procédure de désétalement de spectre permet de réduire l'influence de ces brouilleurs.

## **1-Classification des brouilleurs :**

Il s'agit des brouilleurs retrouvés dans le domaine civil et des autres types de brouilleurs, on peut les classer selon leur largeur de bande:

- Brouilleurs à bande étroite: les raies parasites.
- Brouilleurs à bande semi étroite: 10 KHz à 100 KHz.
- Brouilleurs à bande large: plus de 100 KHz.

On peut faire, pour les brouilleurs GPS, une première distinction entre les brouilleurs intentionnels et les brouilleurs non intentionnels. Les premiers doivent être pris en compte pour les applications militaires, ce type de brouilleur ne sera pas considéré. On se limite ici aux problèmes concernant les récepteurs d'usage civil.

Les effets du brouillage sur un récepteur GPS est caractérisé par des puissances pour un signal brouillé en termes de :

- rapport signal à bruit (S/N)
- rapport brouilleur à signal (J/S).

On verra que les sources potentielles des brouilleurs pour une application normale sont nombreuses et qu'il est nécessaire de connaître les relations entre la puissance des signaux mise en jeu, les isolations entre émetteurs, les distances de brouillage.

## **2-Vulnérabilités d'un récepteur GPS :**

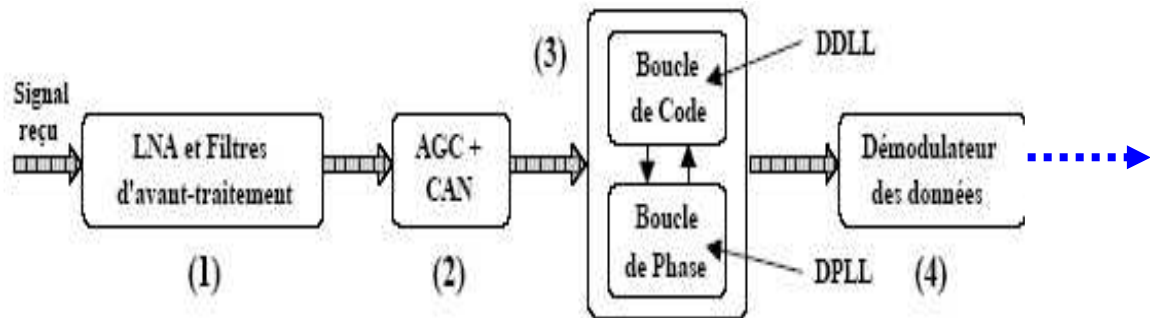
Cette section introduit l'architecture interne générique d'un récepteur GPS par l'identification de ses modules qui sont les plus vulnérables aux brouilleurs radiofréquences. La résistance aux brouillages dépendra de la structure du signal GPS, du design du récepteur ainsi que de l'architecture du système global.

Il existe plusieurs types de design de récepteurs GPS disponibles sur le marché qui utilisent différentes techniques de conversion en fréquence, d'acquisition de code, de maintien des boucles accrochées et de traitement du signal.

L'analyse qui suit est basée sur le schéma bloc de la figure (3.1) représentant l'ensemble des parties d'un récepteur GPS générique. Il existe quatre régions où le récepteur numérique est vulnérable.

1. L'étage (1) de réception RF comprenant un module d'amplification et de filtrage.
2. L'étage (2) un contrôle automatique du gain (AGC) et un convertisseur analogique numérique (CAN).
3. L'étage (3) la boucle de code (DDLL) qui isole un code particulier en provenance d'un satellite GPS.

4. L'étage (4) la boucle de phase (DPLL) qui maintient la phase de la porteuse placée en fréquence intermédiaire.
5. L'étage (5) de démodulation des données qui extrait le message de navigation.



**Figure 3.1 :** Ensemble des parties d'un récepteur GPS générique

### 2-1-Etage de réception RF :

Les brouilleurs captés par l'antenne rencontreront typiquement un amplificateur à faible bruit (LNA : low noise ampli) utilisé pour amplifier le signal GPS noyé dans le bruit.

Il y a deux types de brouillage peuvent être identifiées :

1. Des brouilleurs dans la bande GPS.
2. Des brouilleurs proches de la bande GPS.

➤ **Les brouilleurs dans la bande GPS :** contribuent à augmenter le niveau de bruit dans la bande passante du récepteur et à dégrader ainsi ses performances. Principalement les signaux tels que les harmoniques, les produits d'intermodulations ou simplement les bruits hautes fréquences contribuent aux brouillages des signaux GPS.

➤ **Les brouilleurs proches de la bande GPS :** peuvent perturber le récepteur en désensibilisant la chaîne RF (c'est-à-dire que les niveaux élevés de puissances reçues conduisent à une possibilité de désajustement du contrôle automatique de gain et à une perte de fidélité des mesures du signal GPS) ou en pénétrant l'étage de traitement du signal.

Le niveau de puissance des brouilleurs juste au dessus du niveau de puissance du signal GPS traversera facilement cet étage d'amplification, les brouilleurs de puissance moyenne peuvent amener l'amplificateur à travailler en région non linéaire. La sortie devient rapidement instable et l'amplificateur sature. A cause des signaux de brouillage, le signal GPS de faible intensité est soumis à un système non-linéaire et le fonctionnement dans ce régime,

même pour une courte période, entraîne des perturbations pouvant aller jusqu'au décrochage des boucles de maintien.

Du fait que l'amplificateur à faible bruit sature à un certain niveau, il peut être envisagé à cette étape, une technique de robustesse envers les signaux de puissances élevées.

Cette sensibilité de l'amplificateur à faible bruit due aux brouilleurs externes est une première précaution à considérer lors de la conception d'un récepteur GPS. Evidemment, cette puissance nécessaire pour causer une saturation de l'amplificateur varie selon la conception.

## **2-2-Vulnérabilité de la boucle de code :**

Le signal en provenance de l'étage de récepteur RF (antenne, LNA, filtre) entrera dans la section d'acquisition du code et de maintien de la synchronisation après que le signal ait traversé un AGC.

Encore une fois, selon les concepteurs des récepteurs GPS, les boucles de code et de phase peuvent être séparées ou imbriquées.

Dans notre modèle, le signal GPS en fréquence intermédiaire (FI) qui est échantillonné par le CAN rencontrera la boucle de code qui poursuit la phase de l'un des codes provenant des satellites GPS. La plupart des récepteurs actuels utilisent une boucle à verrouillage avance et retard (early-late DLL pour Delay Lock Loop).

La boucle de maintien du code réalise une poursuite par asservissement sur le maximum de corrélation. La corrélation du signal local de désétalement s'effectue sur la voie en retard. Les résultats de la corrélation sont comparés pour connaître le sens du biais.

La boucle de maintien du code a une bande passante faible (moins de 1 Hz) et c'est pourquoi elle peut fonctionner à des niveaux élevés de rapport brouilleur à signal (J/S). Elle constitue la section la plus résistante du récepteur, le bruit étant atténué dans un rapport égal au gain d'étalement suite à la corrélation.

Un brouilleur à spectre étroit sera en effet étalé par le code pseudo- aléatoire local multiplié par  $\sin(\tau/2)$  où

$\tau$ : Correspond à la différence de phase entre l'avance et retard.

Un corrélateur standard avec un délai entre la voie avance et retard d'une bribe

( $T_{bribe} = 2\tau = 1 \sim \text{sec}$  (microsecondes)) étale un brouilleur à spectre étroit en un spectre de raies d'enveloppe  $\sin(x)^2/x^2$  dont la largeur de bande du lobe principal est  $(1/\tau)$  (=2MHz).



Par contre, pour un corrélateur dont les voies avance et retard seraient espacées de 0.2 bride seulement, le même brouilleur serait étalé pareillement avec une largeur du lobe principal de 10MHz environ ; sont 5 fois plus efficace.

On note que le choix d'espacement entre les deux répliques 'Early' et 'Late' possède une influence sur les brouilleurs à spectre étroit.

D'où le bénéfice du contrôle de la précision du délai des codes de la boucle de désétalement mais en contre partie, le désavantage de fonctionner sur une largeur de bande plus large.

L'atténuation de la puissance du brouilleur causée par ce processus d'étalement est de l'ordre de :

- 24 dB pour un brouilleur à bande étroite.
- 60 dB pour un brouilleur large bande.

Mais dans le cas du brouilleur à bande étroite, ce gain d'étalement dépend aussi de la position fréquentielle et de la largeur de bande du brouilleur.

Pour un brouilleur large bande, l'utilisation d'un corrélateur étroit n'apporte pas de gain significatif, au contraire, du fait de l'élargissement de la bande passant.

Une boucle de code ne peut pas maintenir sa synchronisation lorsque la puissance de bruit est supérieure à la puissance du signal (après étalement). On définit typiquement le point de décrochage de la boucle de code par un seuil du rapport (J/S) de 0dB.

De cette façon, la puissance minimale du brouilleur nécessaire pour désynchroniser une boucle de code doit être à un minimum de 24dB supérieure à la puissance du signal utile (-160dBw) soit supérieure à (-136dBw) (avant étalement).

La limite du rapport (C/N) entre les phases d'acquisition et de maintien est de 6dB.

En d'autres termes, le signal utile doit être de 6dB supérieur pour l'acquisition, par rapport aux (-136dBw) nécessaires pour le maintien (ce qui implique un J/S limite de 6dB dans le cas de la boucle de phase).

### **2-3-Vulnérabilité de la boucle de phase :**

Il existe également différents types de configuration de boucle à verrouillage de phase, à chaque type est associée une largeur de bande d'opération. A l'intérieur de la boucle, le signal incluant le brouilleur est d'abord filtré avant d'être appliqué au VCO (voltage controlled oscillator) qui estime la phase de la porteuse du signal d'entrée. La bande passante

du filtre passe bas de la boucle de phase est très faible en comparaison de la largeur de bande des données (100Hz).

Ceci permet de minimiser les effets du spectre de données sur l'acquisition de la porteuse. La bande passante typique de la boucle de phase d'un récepteur GPS est de l'ordre de (1 à 10Hz).

En effet, la boucle d'acquisition du code GPS étale le brouilleur avant que le signal atteigne la boucle de phase. Ceci réduit de façon considérable la puissance d'un brouilleur dans la bande passante de la boucle de phase.

L'effet du bruit provenant du brouilleur étalé qui entre dans la boucle de phase dépend de la conception de la boucle et varie selon les concepteurs.

#### **2-4-Détection du message de navigation :**

L'étage final du processus d'acquisition d'un signal GPS mène à la démodulation des données de navigation. Le signal brouilleur à ce point été étalé par le code d'étalement local apportant un gain de 24dB. Sous des conditions normales d'opération, le rapport signal à bruit (S/N) à l'entrée du démodulateur est approximativement de 18dB.

Une analyse conservatrice permet de limiter le niveau des brouilleurs à 18dB au-dessous de la puissance du signal utile (désétalé), ce qui causera une augmentation maximum de 3dB sur le plancher de bruit et une augmentation sensible du TEB (taux d'erreur binaire).

Le démodulateur de données est caractérisé vis-à-vis du brouilleur en termes de TEB, il est évident que l'on aura une dégradation du TEB au fur et à mesure que l'on diminue le SNR (rapport signal sur bruit). On prend en générale comme référence pour établir un niveau minimum de performances, un TEB de ( $10^{-5}$ ). Une augmentation du TEB ne provient pas systématiquement de la perte du signal mais elle indique simplement une diminution de la qualité de la liaison BPSK (Binary Phase Shift Keying) modulation en phase.

Le cas extrême pour le démodulateur de données correspond à une puissance effective de brouillage (en sortie des boucles) égale à la puissance du signal utile, soit un signal à brouillage de 0dB (après étalement). La performance se dégradera graduellement entre ces deux limites (18dB et 0dB) ainsi, il est utile de définir le seuil du taux d'erreur binaire maximum en présence du brouilleur. De façon à réduire l'impact d'une seule erreur sur la démodulation des données de navigation, nous adoptons :

Une limite de TEB à ( $10^{-5}$ ). Le rapport signal sur brouilleur (S/J) est approximativement de 13.9dB après désétalement.

## **2-5-Résumé d'un récepteur GPS générique :**

Le comportement des différents composants d'un récepteur GPS face aux brouilleurs a été examiné (résistance et faiblesses).

Les performances sur la précision de localisation se dégraderont graduellement en fonction de l'augmentation de la puissance du brouilleur étalé allant de 18dB sous la puissance du signal utile (à priori n'affectant aucun des performances) à une puissance égale au signal utile (échec du démodulateur et perte de synchronisation de la boucle de phase).

- Le gain d'étalement minimum a été fixe à 24dB pour les brouilleurs à bande étroite et les signaux à porteuse pure tandis que l'on peut s'attendre en pratique à un gain d'étalement de 60dB pour les brouilleurs large bande. Le rapport (S/J) équivalent minimum après désétalement a été spécifié à 13.9dB correspondant à un TEB de ( $10^5$ ). En deçà de ce seuil, les boucles de code et de phase se désynchronisent.
- Une autre grandeur à prendre en compte pour la caractérisation du signal brouillé est le rapport (J/S) entre la puissance du brouilleur et celle du signal GPS. En effet, le bruit thermique peut être considéré comme constant, pour évaluer les signaux brouilleurs, il est donc plus pratique de les comparer directement avec le niveau de puissance du signal GPS.
- La structure logique d'un récepteur GPS dont nous avons schématisé encore plus ces principales fonctions à la figure (3.1). il y a dans cette structure différents éléments qui sont sensibles au brouillage du signal, et qui présentent une robustesse différente. Il s'agit des éléments suivants, classé en ordre de sensibilité décroissante :
  1. le démodulateur de données.
  2. la boucle de porteuse (DPLL).
  3. la boucle de code (DDLL).
- Les boucle de code et de porteuse sont caractérisées en termes de seuil de maintien, c'est -à- dire le niveau de C/N minimum pour assurer l'accrochage de la boucle. On ne veut pas ici rentrer dans les détails du fonctionnement des boucles du récepteur; on se limite à remarquer que le fonctionnement du récepteur est limité par le FLL

(fréquence Lock Loop) de la boucle de porteuse. En effet, le décrochage de la boucle de porteuse implique immédiatement la perte du signal et donc le décrochage de la boucle de code. C'est pourquoi on retrouve souvent dans la littérature des spécifications sur le seuil de fonctionnement de la boucle DPLL qui déterminent le seuil de maintien du signal.

- A l'entrée du récepteur, la saturation du préamplificateur peut être la cause de la génération de produits d'intermodulation ou d'harmoniques des étages de conversion en fréquence. Un composant très important du récepteur, l'AGC peut dégrader considérablement le processus de normalisation du signal et sa quantification par le CAN sera moins efficace.

Plusieurs autres perturbations peuvent survenir à l'intérieur d'un récepteur. Malheureusement, ces perturbations ne sont pas toujours visibles et elles se répercutent principalement sur les points que nous venons de mentionner.

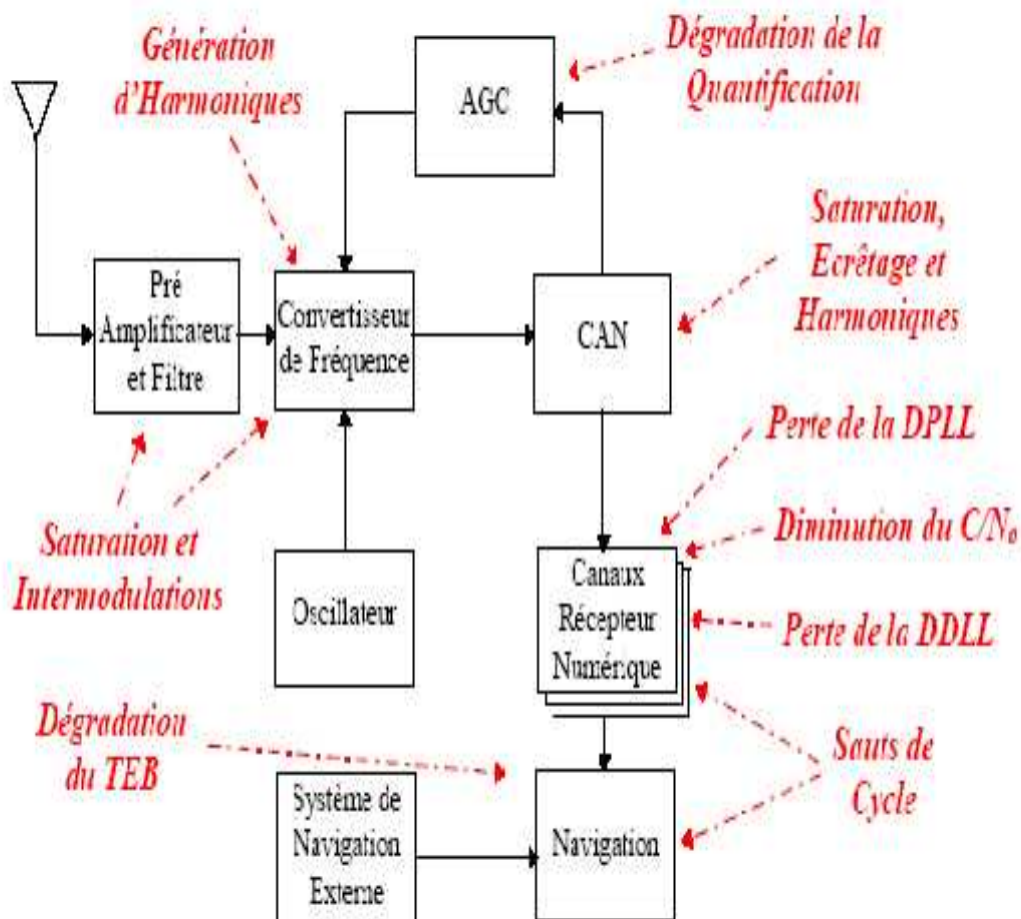


Figure 3.2 : résumé de l'ensemble des perturbations potentielles

### 3- Caractérisation Des Problèmes de brouillage :

### 3-1-Equations fondamentales du brouillage :

On s'intéresse dans notre étude au signal GPS modulé en code C/A L'équation qui détermine rapport  $(C/N_0)$  non brouillé en bande de base après les boucle est la suivante :

$$\frac{C}{N_0} = S_r + G_a - 10 \log (K \cdot T_0) - N_f - P_i \quad [\text{dB} - \text{Hz}] \quad (3.1)$$

$C/N_0$  : Rapport de puissance entre le signal utile et la densité spectrale du bruit thermique (dB-Hz).

$S_r$  : Puissance du signal GPS reçu (dBw).

$G_a$  : Gain de l'antenne de réception (dB).

$T_0$  : Température de référence du bruit thermique = 290(°K).

$K$  : La constante de Boltzmann =  $38 \cdot 10^{-23}$  (w-sec/k).

$10 \log (kT)$  : la densité de puissance du bruit thermique = -204(dBw-Hz).

$N_f$  : Le facteur de bruit de l'antenne + les pertes des câbles (dB).

$P_i$  : Les pertes d'implémentation + perte de conversion A/D (dB).

On peut considérer un récepteur muni d'une antenne de gain unitaire (0dB) et chiffrer pour un récepteur typique le facteur de bruit à 4dB et les pertes d'implémentation à 2dB. Avec ces hypothèses, on obtient en bande de base un rapport en dB du  $\left[ \frac{C}{N_0} \right]_{NB}$  non brouillé

$$\left[ \frac{C}{N_0} \right]_{NB}^d = -159.6 + 0 - (-204) - 4 - 2 = 38.4 \quad [\text{dB-Hz}] \quad (3.2)$$

Les mêmes conditions conduisent à une valeur du rapport  $\left[ \frac{C}{N_0} \right]_{NB}$  non brouillé

➤ de 35.4dB-Hz pour le code L1 P(Y)

➤ et 32.8 dB-Hz pour le code L2 P(Y)

En présence d'un brouilleur, on définit le rapport  $C/N_0$  équivalent par :

$$\left[ \frac{C}{N_0} \right]_e^d = -10 \log \left[ 10^{-\frac{\left[ \frac{C}{N_0} \right]_{NB}^d}{1}} + \frac{1}{Q \cdot R_c} \right] \quad [\text{dB} - \text{Hz}] \quad (3.3)$$

C'est la puissance du signal ramené à la puissance du bruit thermique augmentée de celle du brouilleur étalé (que l'on associe donc au bruit). Il s'agit du  $C/N_0$  vu par le récepteur après les boucles. A l'équation (3.3), on a indiqué :

$[C/N_0]_{NB}^{dB}$  : Le rapport de la puissance du signal utile dans 1Hz de bande Passante sur la densité de puissance du bruit thermique en absence de brouilleur (dB-Hz).

$[J/S]_{dB}$  : Le rapport de la puissance du brouilleur sur le signal utile (dB).

$R_C$  : Le rythme de brique du code PRN utilisé.

- Pour le code C/A 1.023 MHz.
- Pour le code P 10.23 MHz.

Q : un facteur d'ajustement du signal d'étalement.

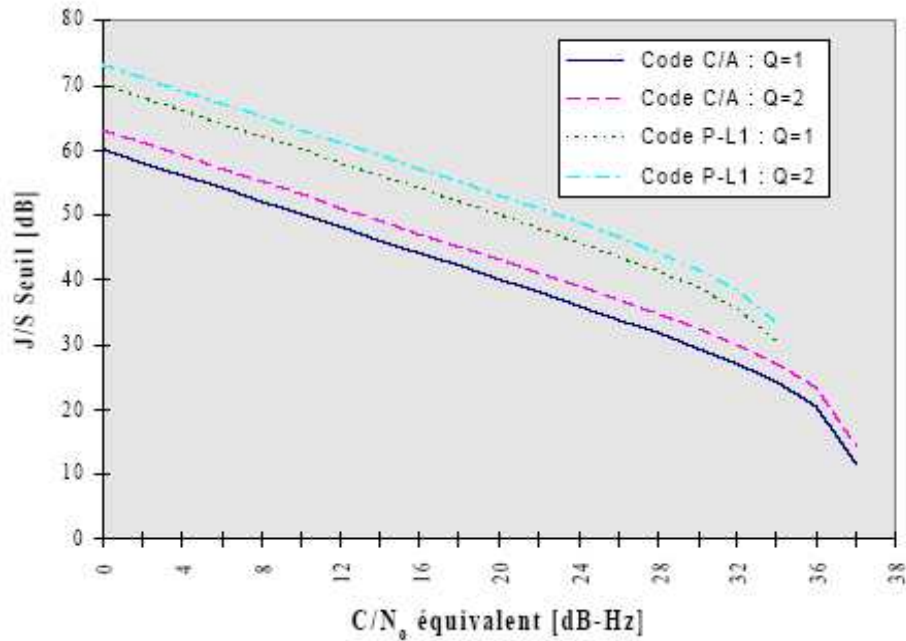
Le facteur Q tient compte de la largeur de bande des brouilleurs. Il vaut respectivement :

- Q = 1 : pour les brouilleurs bande étroite.
- Q = 1.5 : pour les brouilleurs à bande semi étroite.
- Q = 2 : pour les brouilleurs à large bande.

A l'aide de ces équations, on peut déterminer l'équivalent de la dégradation sur le rapport signal à bruit introduit par un brouilleur. Si on fixe un seuil de  $[C/N_0]_{\text{équivalent}}$  minimum pour le fonctionnement de notre récepteur, on peut déterminer le niveau de brouillage correspondant à partir de l'équation (3.3). En réorganisant l'équation, on obtient :

$$[\frac{J}{S}]_s = 10 \log \left[ Q \cdot R_C \left[ \frac{1}{\frac{[C/N_0]_d^d}{1}} - \frac{1}{\frac{[C/N_0]_N^d}{1}} \right] \right] \text{ [dB]} \quad (3.4)$$

On rappelle que le rapport  $[C/N_0]_{\text{équivalent}}$  est toujours supposé connu puisqu'il s'agit de celui qui est mesuré par le récepteur. Les courbes correspondantes à l'équation (3.4) sont montrées à la figure (3.3).



**Figure 3.3 :** correspondance entre  $[C/N_0]_{\text{équivalent}}$  et  $[J/S]_{\text{SEUIL}}$

Pour évaluer l'influence des sources potentielles de brouillage, on peut donc se servir de l'équation (3.4). Si on établit un seuil pour le  $C/N_0$  équivalent, on peut à partir de celui-ci établir un seuil pour le rapport J/S au delà du quel le signal brouilleur devient nuisible.

La puissance du signal GPS étant connue, on peut évaluer le niveau de puissance absolu des brouilleurs potentiellement (dangereux). En effet, on a pour un seuil J/S fixé :

$$\left[\frac{J}{S}\right]_S = J_r - S_r \text{ [dB]} \quad (3.5)$$

Où on a noté avec  $j_r$  et  $S_r$ , les puissances reçues à l'antenne pour le brouilleur et le signal GPS. On obtient pour la puissance du brouilleur en dBw :

$$J_r^S = \left[\frac{J}{S}\right]_S + S_r \text{ [dBW]} \quad (3.6)$$

Le niveau de puissance absolue du brouilleur vaut donc :

$$J_r^S = 10^{\frac{[J_r^S]_{\text{dB}}}{10}} \text{ [W]} \quad (3.7)$$

Pour illustrer l'impact de cette petite analyse de puissance, on peut prendre l'exemple de la règle simple qui définit le seuil de maintien de la boucle de code avec un rapport :

$$\left[\frac{C}{N_0}\right]_e^d = 28.0 \text{ [dB - Hz]} \quad (3.8)$$

C'est-à-dire une perte de 10dB-Hz (par rapport au cas non- brouillé) (équation (3.2)).

En substituant cette valeur de  $\left[C/N_0\right]_{\text{équivalent}}$  on obtient les rapports de J/S suivants :

Brouilleur à Bande Etroite Q = 1	$\left[\frac{J}{S}\right]_{dB} = 31.7 \text{ dB}$
Brouilleur à Bande Large Q = 2	$\left[\frac{J}{S}\right]_{dB} = 34.7 \text{ dB}$

**Tableau 3.1 : Limite du  $\left[J/S\right]_{dB}$  pour un  $\left[C/N_0\right] = 28\text{dB-Hz}$**

Dans le cas d'une situation plus optimale où le récepteur serait construit de sorte qu'il puisse tenir un rapport  $C/N_0$  équivalent d'environ 18dB-Hz (perte de 20dB-Hz par rapport au cas non brouillé), soit pour un brouilleur à bande large un  $\left[J/S\right]_{SEUIL}$  d'environ 45dB, on obtient une puissance du brouilleur de :

$$J_r^S = 10^{\frac{[45 \pm 1]_{dB}}{1}} = 3.467 \cdot 10^{-1} \text{ W} \quad (3.9)$$

Ceci démontre bien que seulement 3pw d'un brouilleur large bande reçu à l'antenne d'un récepteur GPS et bien positionné en fréquence peut rendre ce récepteur inutilisable. Le tableau (3.2) suivant résume l'analyse qui précède pour différentes valeurs du seuil de maintien des boucles et pour les trois types de brouilleur mentionné.

Seuil de maintien des (dB)	types de brouilleur	code C/A L1 J/S
$C/N_0 = 28 \text{ dB}$	Q=1 : bande étroit	31.7
	Q=1.5 : semi - étroit	33.7
	Q=2 : bande large	34.7
$C/N_0 = 18.5$	Q=1 : bande étroit	41.6
	Q=1.5 : semi - étroit	43.3

**Tableau 3.2 : Limite de  $\left[J/S\right]_{dB}$  pour les trois types de brouilleur**

On rappelle qu'il y a une différence entre le seuil de maintien en présence d'un brouilleur et le seuil d'accrochage du récepteur.



La détermination de ces deux seuils n'est pas facile, car à proximité des limites de fonctionnement le comportement du récepteur n'est pas linéaire, et de plus les seuils varient selon le type de récepteur. On peut définir que le seuil d'accrochage se trouve 6dB en dessus du seuil de maintien.

$$\left[\frac{J}{S}\right]_{a_i}^s \cong \left[\frac{J}{S}\right]_m^s + 6 \text{ [dB]} \quad (3.10)$$

Si un récepteur décroche, il se trouve de ce fait même dans l'impossibilité de raccrocher immédiatement dans les mêmes conditions de  $C/N_0$ , il va falloir s'éloigner du brouilleur pour récupérer une valeur de  $C/N_0$  suffisante pour la récupération du signal.

Cela peut introduire un retard assez important, allant de 10 secondes à quelques minutes selon la configuration de la plate-forme. Ceci est un aspect particulièrement critique pour les applications où l'on demande une grande fiabilité.

### **3-2-Influence de la largeur de bande :**

Il est important de mentionner quelques considérations de plus pour le code C/A qui ne s'applique pas au code P concernant la bande des brouilleurs.

On a vu à l'équation (3.3) que l'on introduit un facteur Q pour prendre en compte l'influence de bande du brouilleur sur le gain d'étalement. En effet, en bande de base le signal GPS se présente comme une sinusoïde modulée par les données transmises (avec modulation de type BPSK).

Si on considère un brouilleur de bande large  $B \gg 100 \text{ KHz}$ , l'étalement produit sur celui-ci un phénomène de recouvrement et de ce fait le brouilleur étalé se rapproche d'autant plus d'un bruit blanc que sa bande est large.

Dans ce cas le seuil de décrochage dépend non seulement de la puissance de la raie mais de sa position par rapport aux raies du spectre GPS. Si une CWI tombe entre deux raies du signal GPS elle ne posera pratiquement aucun problème à moins qu'elle entre dans la bande passante des filtres de boucle (code, phase et démodulation). Si elle se retrouve dans la bande passante du démodulateur qui est la plus large donc la plus vulnérable (50 Hz autour de la porteuse), on trouve alors pour le brouillage par CWI un seuil nettement inférieur au J/S tolérable que pour un brouilleur à bande large.

Ce phénomène est assez probable si on considère pour la fréquence de la CWI une distribution de probabilité uniforme, on obtient une probabilité de  $50/1000 = 1/20$  qu'elle

tombe dans la bande de modulation des données, et c'est souvent ce que l'on peut observer sur un récepteur GPS en laboratoire.

Le gain d'étalement par rapport à une CWI peut donc être réduit, selon le satellite et la fréquence, à une valeur comprise entre 21.3 et 24.1 dB.

Pour une CWI avec un J/S faible de 23dB la puissance du brouilleur après étalement peut donc être de l'ordre de celle du bruit thermique, correspond à un début de dégradation de la réception.

Un récepteur conventionnel pourra donc tolérer un rapport J/S de 23dB en présence d'un brouilleur large bande mais il sera perturbé s'il s'agit d'une CWI.

CODE C/A	FREQUENCE DE LA RAIE (KHz)	AMPLITUDE DE LA RAIE (dB)	CODE C/A	FREQUENCE DE LA RAIE (KHz)	AMPLITUDE DE LA RAIE (dB)
1	42	-22.71	20	30	-22.78
2	263	-23.12	21	55	-23.51
3	108	-22.04	22	12	-22.12
4	122	-22.98	23	127	-23.08
5	23	-21.53	24	123	-21.26
6	227	-21.29	25	151	-23.78
7	78	-23.27	26	102	-23.06
8	66	-21.5	27	132	-21.68
9	173	-22.09	28	203	-21.73
10	16	-22.45	29	176	-22.22
11	123	-22.64	30	63	-22.14
12	199	-22.08	31	72	-23.13
13	214	-23.53	32	74	-23.58
14	120	-22.01	33	82	-21.82
15	69	-21.9	34	55	-24.13
16	154	-22.58	35	43	-21.71
17	138	-22.5	36	23	-22.23
18	183	-21.4	37	55	-24.13
19	211	-21.77			

**Tableau 3.3 : Les cas de l'étalement de spectre pour les 37 codes C/A**

### **3-3-Critères de robustesse retenus :**

Dans les systèmes de communication conventionnelle (FDMA et TDMA) où la qualité des données (TEB) et le débit de transmission sont les critères essentiels, les effets des brouilleurs sont souvent limités par :

- Des contraintes d'énergie par bit.
- Une l'utilisation stratégie de modulation robuste.
- Et ou par la spécification des niveaux de brouillage acceptables.

Pour les applications de navigation par GPS pour le civil, il n'est pas suffisant de se limiter à l'étude seule de la perturbation des brouilleurs sur le processus de démodulation des données.

Des considérations plus poussées sur les phénomènes survenant au tout début de perturbation d'un brouilleur doivent être pris en considération, début de dégradation (sensibilité) jusqu'à la mise hors d'usage de la boucle de fréquence et de code.

La limitation de puissance des brouilleurs de type impulsionnel est assurée par le CAN et par d'autres dispositifs. Le brouilleur impulsionnel n'est pas nuisible exclusivement par sa puissance mais aussi par la durée totale de ses impulsions par la durée d'observation.

Pour notre analyse, on définit l'influence des perturbations sur un récepteur GPS selon les critères suivant :

- Début de dégradation du récepteur ( $S/N = -3\text{dB}$ ).
- Fonctionnement limite du récepteur pour la résolution de vitesse.
- Fonctionnement limite du récepteur pour la résolution de position
- Désensibilisation du récepteur (saturation).

A partir de ces états de perturbation, les spécifications en termes d'isolation des antennes entre la source du brouilleur et le récepteur GPS et les spécifications sur la réjection nécessaire par les filtres seront spécifiées.

- Pour un brouilleur large bande (BLB) défini comme un signal dont la largeur de bande est supérieure à 100KHz ( $G_{\text{étalement}} = 60\text{dB}$ ), le seuil du rapport de puissance entre le brouilleur et le signal ( $J/S$ ) avant étalement du spectre est résumé au tableau suivant :

PERTURBATIONS:	AVANT ÉTALEMENT
Début de Dégradation $\Delta S/N = -3\text{dB}$	$J/S = 25\text{ dB}$
Démodulation des Données (TEB $\leq 10^3$ )	$J/S = 30\text{ dB}$
Seuil de la DPLL	$J/S = 37\text{ dB}$
Seuil de la DDLL (Précision Doppler de 1m/s)	$J/S = 44\text{ dB}$

**Tableau 3.4 : Seuil de  $[J/S]_{\text{dB}}$  pour (BLB)**

- Pour ce qui concerne les brouilleurs à bande étroite incluant les CWI (continuous wave interference), on utilise un gain d'étalement de 24dB (du au spectre de raies discret du code C/A au lieu d'un spectre continu).

Perturbation	après desetatement	avant
desetatement		
Démodulation des Données	J/S = 14dB	J/S = 10dB
Seuil de la DPLL	J/S = 6dB	J/S = 18dB
Seuil de la DDLI	I/S = 0dB	I/S = 24dB

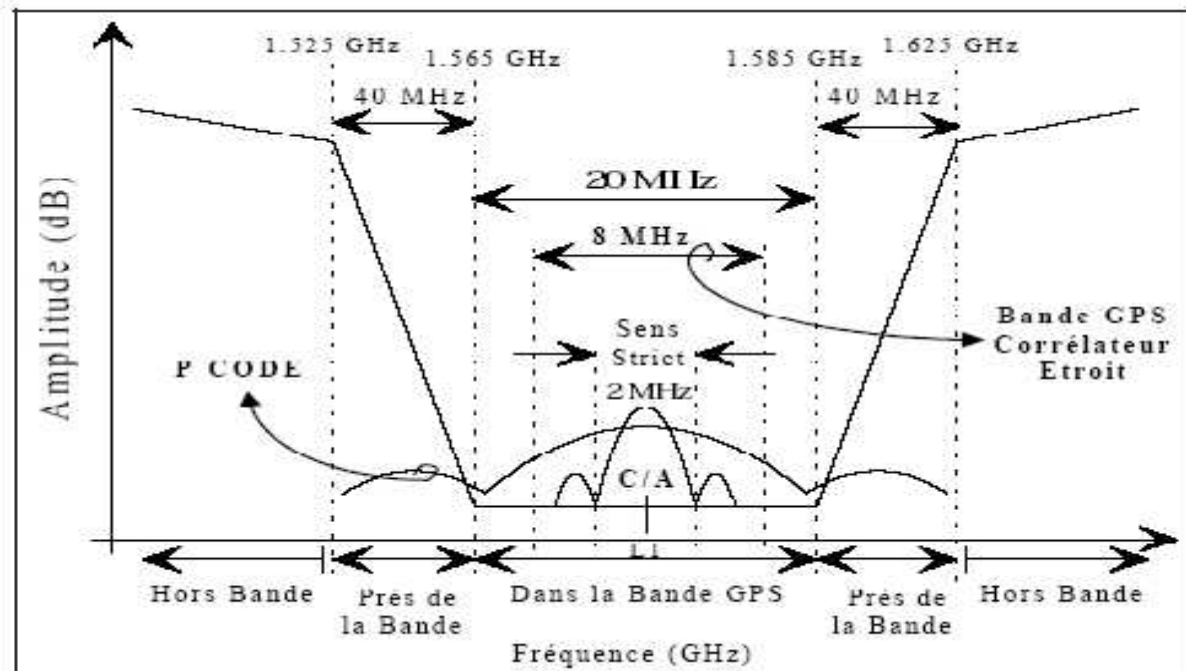
**Tableau 3.5 : Seuil de  $[J/S]_{dB}$  pour (BEB)**

Dans le cas d'une CWI, le début de dégradation ( $S/N$ ) n'est pas représentatif de la perturbation apportée au récepteur. En effet, la localisation fréquentielle de la CWI à l'intérieur de la bande de prédétection de 100Hz est l'aspect décisif sur le brouillage ou non du récepteur.

#### **4-Les Origines Des Brouilleurs :**

##### **4-1-Énumération des types de brouilleurs :**

Les types de brouilleurs nuisibles à un récepteur GPS ont été répertoriés selon leur origine en montrant bien leur position fréquentielle par rapport à la bande GPS. Dans un premier temps, les brouilleurs potentiel qui se situent à l'intérieur de la bande GPS sont énumérés et caractérisés puis ceux se trouvant à sens d'un récepteur avec corrélation étroite à plus ou moins 4MHz de la fréquence L1 (1575.42MHz) soit de (1571.42 à 1579.42 MHz).



**Figure 3.4 : Définition des régions fréquentielles du système GPS**

On définit le spectre en fréquence du signal GPS comme le montre la figure (3.4) :

- Les récepteurs de haute qualité (traitant par exemple le multitrajet) utiliseront une bande plus large par exemple sur 20MHz.
- Un récepteur GPS à corrélateur étroit utilisera typiquement les 8MHz autour de L1.
- Les récepteurs bons marchés sont définis au sens strict comme des récepteurs qui utilisent seulement le lobe principal du signal GPS (code C/A).

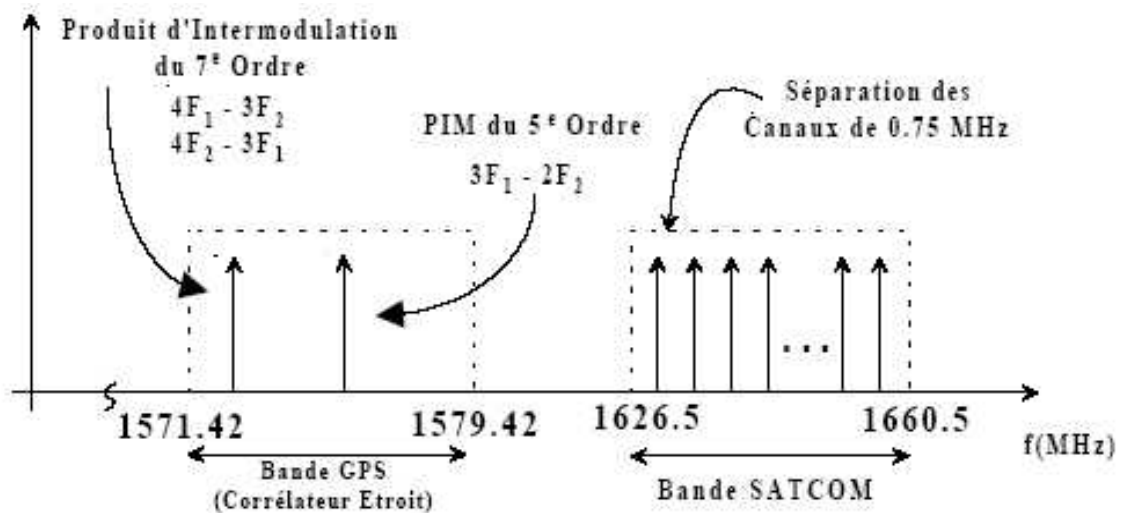
Il existe plusieurs autres candidats potentiels à la génération d'une source de brouillage pour les applications GPS. Ceux-ci peuvent être obtenus en divisant une bande de fréquence à protéger par l'ordre de l'harmonique potentiellement nuisible. Le tableau suivant identifie l'origine de la source de brouillage en fonction de l'harmonique nuisible.

La bande de fréquence spécifiée dans le tableau (3.6) indique quels types de service utilisant ces fréquences auront l'harmonique indiquée dans le spectre GPS.

<b>ORDRE DE L'HARMONIQUE</b>	<b>BANDE FREQUENTIELLE CONSIDEREE (MHz)</b>	<b>USAGE</b>
<b>L1</b>	<b>1571.42 - 1579.42</b>	<b>C/A-GPS</b>
2 <sup>e</sup>	785.71 - 788.71	UHF TV
3 <sup>e</sup>	523.807 - 526.473	UHF TV
4 <sup>e</sup>	392.855 - 394.855	Mobile/Station
5 <sup>e</sup>	314.284 - 315.884	Mobile/Station
6 <sup>e</sup>	261.903 - 263.237	Mobile/Station
7 <sup>e</sup>	224.488 - 225.631	Radiodiffusion
8 <sup>e</sup>	196.427 - 197.428	VHF TV
9 <sup>e</sup>	174.602 - 175.491	VHF TV
10 <sup>e</sup>	157.142 - 157.942	VHF Maritime
11 <sup>e</sup>	142.856 - 143.584	VHF Militaire
12 <sup>e</sup>	130.952 - 131.618	VHF COM
13 <sup>e</sup>	120.878 - 121.494	VHF COM
14 <sup>e</sup>	112.244 - 112.816	VOR/ILS
15 <sup>e</sup>	104.761 - 105.295	FM
16 <sup>e</sup>	98.214 - 98.714	FM

**Tableau 3.6 : Source et services des brouilleurs fonctions des harmoniques**

## 4-2-Brouillage par les Emetteurs SATCOM :



**Figure 3.5 :** Représentation spectrale de brouillage par les communications SATCOM

Ce type de brouilleur est considéré comme la source de brouillage la plus néfaste au bon fonctionnement des boucles internes d'un récepteur GPS. Leurs origines proviennent de deux sources :

- Soit des émetteurs SATCOM à bord du même mobile que le récepteur GPS.
- Soit des émetteurs SATCOM provenant d'un autre mobile.

La puissance des canaux dans la bande GPS varie selon plusieurs facteurs (demande, période de temps, durée de la communication, etc....).

Les communications SATCOM utilisent la bande de fréquence (1626.5 – 1660.5MHz) comme montre la figure (3.5). La largeur de bande des canaux est de 20KHz et ils sont espacés en fréquence de 0.75MHz.

La PIRE moyenne est de 18dBw et la réjection minimale est de 100dB dans la bande L1.

Les émetteurs SATCOM génèrent plusieurs produits d'inter modulation (PIM) qui peuvent tomber à l'intérieur de la bande GPS. Les canaux ( $f_1 = 1626.5$  MHz et  $f_2 = 1652$  MHz) génère des PIM du 5<sup>e</sup> Ordre ( $3f_1 - 2f_2 = 1575.5$  MHz) qui sont directement à l'intérieur de la bande L1.

Les deux causes telles les PIM des SATCOM et la proximité de leurs bandes sont considérées comme de réelles sources de perturbation potentielle.

La première partie de notre analyse traite les interférences provenant des PIM et cette analyse est suivie des problèmes dus à la proximité de la bande SATCOM avec celle du GPS.

#### 4-2-1-Brouillage par d'inter modulation des SATCOM :

Les produits d'inter modulation des SATCOM peuvent être considérés comme des brouilleurs larges bandes au sens du GPS puisque la porteuse du SATCOM est seulement utilisée à des fins de synchronisation.

Pour l'analyse d'un brouilleur à bande étroite, la probabilité d'une intermodulation due à une CWI est négligeable. Un calcul simple permet de montrer que l'isolation entre les deux antennes doit respecter l'équation (3.11) pour le cas de la première perturbation.

$$ISO \geq P_j^{TX} - R_j - R - G_e - (-204) - F_b \quad (3.11)$$

$P_j^{TX}$  : Puissance transmise du brouilleur.

$R_j$  : Réjection à l'émetteur.

$ISO$  : Isolation de l'antenne.

$R$  : Réjection des signaux hors bande GPS (0dB si le brouilleur est dans la bande GPS).

$S$  : Signal GPS (-160dBw pour le code C/A).

En utilisant (3.11) avant désétalement et pour les données suivantes :

$$R_j = 100\text{dB} \quad P_j^{TX} = 18\text{-}24\text{dBw} \quad S = -160\text{dBw} \quad R = 0\text{dB} \quad F_b = 3\text{dB} \quad G_{\text{étalement}} = 60\text{dB}$$

	DEBUT DE DEGRADATION $\Delta(S/N) = -3\text{dB}$	SEUIL DE DEMOMULATION DES DONNEES	SEUIL DE LA DDL
C/A	ISO > 35dB	ISO > 24dB	ISO > 10dB

**Tableau 3.7 : Isolation entre l'antenne du récepteur GPS et SATCOM placé sur le même mobile.**

Ces mesures ont été obtenues pour une séparation d'antenne de 1 à 3mètres. Habituellement, cette distance est supérieure à 3mètres et il peut être conclut suite à notre analyse, qu'il y a une très faible probabilité de brouillage du au PIM d'un récepteur GPS par l'émetteur SATCOM à bord de l'avion. De plus grandes que les 50dB d'isolation nécessaire. Après calcul, la distance de brouillage est de 5mètres et nous concluons que l'on peut écarter les problèmes d'inter modulations en provenance des émetteurs SATCOM.

#### 4-2-2-Brouillage du à la Proximité des Bandes :

Cette analyse concerne la spécification de la réjection de la bande SATCOM nécessaire par le filtre RF d'un récepteur GPS. En supposant les mêmes équations que précédemment (3.11) et les paramètres suivants :

$$R_j = 0\text{dB} \quad P_j^{TX} = 18\text{dBw} \quad S = -160\text{dBw} \quad F_b = 3\text{dB} \quad G_{\text{étalement}} = 60\text{dB} \quad ISO = 50\text{dB}$$

On obtient le tableau (3.8) qui représente un résumé de l'analyse du scénario où l'émetteur SATCOM serait à l'intérieur du même mobile. Il s'agit en fait de l'atténuation nécessaire par le filtre du récepteur GPS pour s'assurer des rapports S/N définis au tableau (3.4).

Une de nos conclusions est qu'il faut resserrer la bande du filtre GPS et toutes spécialement aux alentours de la fréquence de 1626.5MHz.

C/A	DEBUT DE DEGRADATION $\Delta(S/N) = -3dB$	SEUIL DE DEMODULATION DES DONNEES	SEUIL DE LA DDLL
Réjection	R > 109 dB	R > 98 dB	R > 84 dB

**Tableau 3.8 : Spécification de la réjection de la bande SATCOM par le filtre GPS**

Le tableau (3.9) montre une analyse de la distance de brouillage (avec R=40dB) due à la proximité de la bande SATCOM en utilisant une réjection du filtre GPS de R=40dB à 40MHz de L1. Nous avons utilisé (3.12)

$$\frac{J}{S} = P_j^I - R_j - 20 \log\left(\frac{4fd}{\lambda}\right) - R - S - G_e \quad (3.12)$$

$\frac{J}{S}$  : Rapport de puissance entre le brouilleur et le signal utile.

$20 \log\left(\frac{4fd}{\lambda}\right)$  : Perte en espace libre.

Avant étalement de spectre ainsi que l'équation (3.11) où isolement entre les antennes est remplacée par les pertes en espace libre :

$$20 \log\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) \geq P_j^I - R_j - R - G_e - (-204) - F_t \quad (3.13)$$

C/A	DEBUT DE DEGRADATION $\Delta(S/N) = -3dB$	SEUIL DE DEMODULATION DES DONNEES	SEUIL DE LA DDLL
D <sub>Brouillage</sub>	13500 m	3800 m	760 m

**Tableau 3.9 : La distance de brouillage due à la proximité de la bande SATCOM**

Il s'agit de la situation la plus nuisible provenant de la proximité des deux bandes. Le préamplificateur du récepteur GPS sature et travaille en région non linéaire.

Une attention particulière lors de la conception des émetteurs doit être portée sur le point de compression à 1dB, l'isolation de l'antenne et la réjection de la bande SATCOM.

**En conclusion :**



Pour les émissions SATCOM, on note que le problème résultant de l'émission d'une ou plusieurs fréquences au même temps peut être éliminé si des précautions sont prises sur les équipements placés dans l'avion.

Le système SATCOM pour le domaine de l'avionique utilisée comme moyen principal de communication entre les régions sera considérablement nuisible pour un récepteur GPS du à la proximité des bandes d'opérations.

Ce problème peut être résolu par une réorganisation de la bande de fréquence.

Une autre solution est d'interdire l'usage du SATCOM en région d'approche ou d'atterrissage.

- De limiter les puissances transmises.
- Ou d'insérer des filtres anti-brouilleurs.

#### **4-3-Brouillage par les harmoniques des stations de TV :**

**Il existe un minimum de (6) six canaux de TV qui génèrent des harmoniques dans la bande GPS. Le tableau (3.10) montre les bandes de fréquence utilisées par ces canaux de TV français (en France) et les compare avec canaux de TV américains équivalents (Etats - Unis). Tableau 3.10 : Les bandes de fréquence utilisées par les canaux de TV**

CANAUX	PIRES		EQUIVALENTE
	VHF	UHF	
	Vidéo	Audio	
	55 dBW	48 dBW	
	67 dBW	60 dBW	
Canal 4	174-182 MHz	VHF 7	174-180 MHz
Canal 6	190-198 MHz	VHF 10	192-198 MHz
Canal 27	518-526 MHz	UHF 22	518-524 MHz
Canal 28	526-534 MHz	UHF 23	524-530 MHz
Canal 60	782-790 MHz	UHF 66	782-788 MHz
Canal 61	790-798 MHz	UHF 67	788-795 MHz

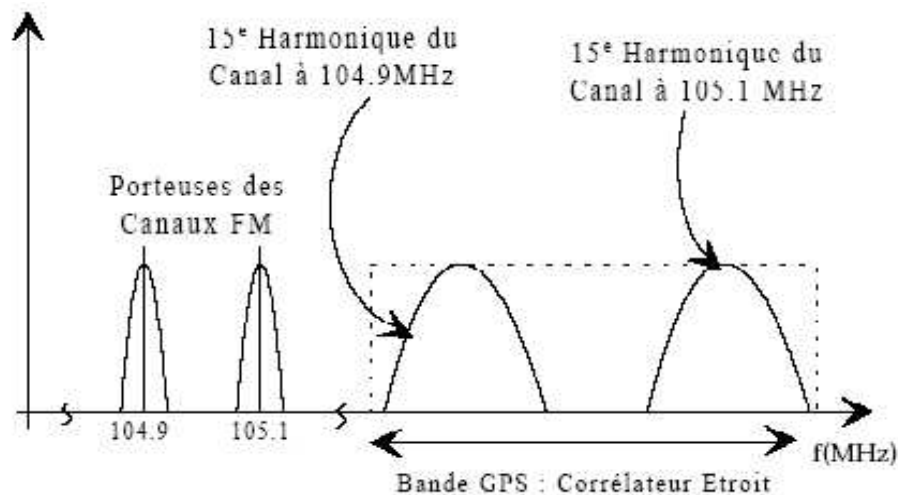
**Tableau 3.11 : Les PIREs maximums typiquement émis par une station de TV**

On voit que les émissions TV sont de véritables sources de brouillage pour le récepteur GPS. Les restrictions actuelles sont insuffisantes pour assurer une prévention des récepteurs civils contre le brouillage des harmoniques provenant de certains canaux de TV. Le problème pourrait être résolu en partie par des pressions locales aux stations de TV en vue de l'installation de filtres RF.

Mais à cause de très fortes puissances mises en jeu et les contraintes parfois relâchées par certains pays, il est nécessaire d'installer des techniques de robustesse dans les récepteurs GPS.

#### **4-4-Bouillage par les Harmoniques de la diffusion F.M :**

Plusieurs fréquences provenant de la diffusion FM (87.5 à 108MHz) constituent des sources de brouillage potentiel pour un récepteur GPS. La figure (3.6) qui montre la représentation spectral des canaux (FM) situés aux fréquences 104.9 et 105.1 MHz ayant par exemple leur harmonique du 15<sup>e</sup> ordre dans la bande GPS.



**Figure 3.6 :** La représentation spectrale des canaux (FM)

Le tableau (3.12) montre les bandes de fréquence des émetteurs FM avec leurs harmoniques correspondantes entrant dans la bande GPS d'un corréléteur étroit ( $L1 \pm 4\text{MHz}$ ).

BANDE(MHz)	Harmoniques FM Potentiellement Nuisibles
104.3 - 105.7	15 <sup>e</sup>
97.8 - 99.1	16 <sup>e</sup>
92.1 - 93.2	17 <sup>e</sup>
87.5 - 88.1	18 <sup>e</sup>

**Tableau 3.12 : Harmonique nuisibles FM pour la bande GPS L1**

Les canaux FM sont espacés de 150KHz et la puissance de transmission du canal FM est de 50dBw. Nous faisons ici le même pré analyse de la distance de brouillage des harmoniques FM lorsque la puissance de l'harmonique atteint celle du bruit thermique à l'antenne.

La dégradation du signal GPS due à ces canaux FM intervient lorsque le récepteur embarqué dans un mobile se situe à un distance telle que :

Pour le canal à 104.9MHz :

$$50\text{dBW} - 80 + 10 \log(0.25) - 20 \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) \geq -136 \text{ dBW}$$

Pour le canal à 105.1MHz :

$$50\text{dBW} - 80 + 10 \log(0.5) - 20 \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) \geq -136 \text{ dBW}$$

Le tableau (3.13) est une analyse de la portée des brouilleurs FM en fonction de la puissance de l'harmonique lors de son réception à l'antenne GPS.

En résumé, ce type de brouilleur devient un problème pour un récepteur GPS lorsqu'il se situe à l'intérieur d'un rayon de 2Km de la source d'émission FM. Aucune technique de robustesse n'a encore été proposée jusqu'à maintenant.

En utilisant notre modèle d'analyse des brouilleurs, les résultats sont sensiblement les mêmes mais plus précis. Les harmoniques FM sont considérés au sens GPS (C/A).

Comme des brouilleurs larges bandes. L'analyse de la distance de brouillage est résumée au tableau (3.14) en employant les paramètres suivants dans nos calculs :

$$R_j = 80\text{dB} \quad P_j^{TX} = 50\text{dBW} \quad S = -160\text{dBW} \quad R = 0\text{dB} \quad F_b = 3\text{dB} \quad G_{\text{étalement}} = 60\text{dB}$$

	DEBUT DE DEGRADATION $\Delta(S/N) = -3\text{dB}$	SEUIL DE DEMULATION DES DONNEES	SEUIL DE LA DDLL
C/A	5380 m	1515 m	300 m

**Tableau 3.14** : Analyse de la distance de brouillage pour les harmonique FM

Distance entre le Récepteur et la Source F.M. (m)	Niveau de Puissance de l'Interférence au Récepteur (dBW)	
	Signal à 104.9 MHz	Signal à 105.1 MHz
200	-118.5	-115.4
400	-124.5	-121.5
600	-128	-125
800	-130.5	-127.5
1000	-132.4	-129.4
1200	-134	-131
1400	-135.4	-132
1600	-136.5	-133.5
1800	-137.5	-134.5
2000	-138.5	-135.5
2200	-139.3	-136.3

**Tableau 3.13** : La portée des brouilleurs FM en fonction de la puissance de l'harmonique

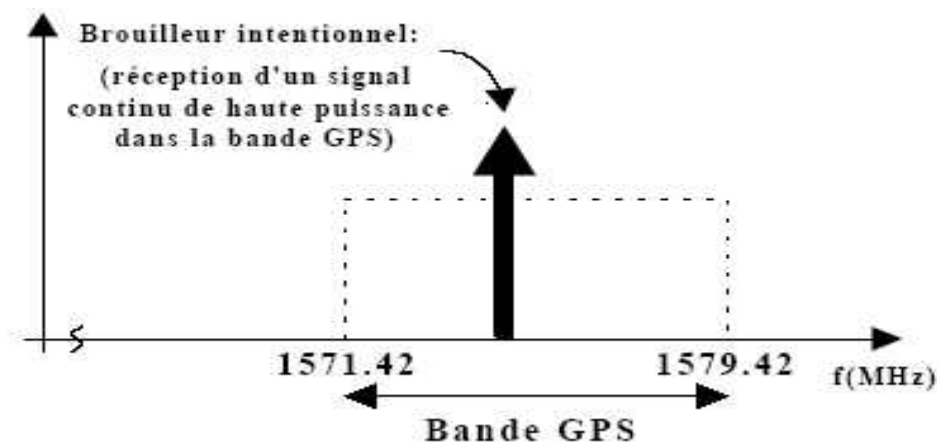
**En conclusion :**

Une solution serait d'interdire par exemple l'utilisation d'émetteurs FM à l'intérieur d'un périmètre de 5Km autour d'un aéroport.

Cette solution n'étant pas toujours réalisable facilement, on peut également penser à augmenter la réjection des harmoniques à 100dB ce qui porterait la distance de brouillage à 500m.

#### **4-5-Brouillage Intentionnel :**

Par soucis d'exhaustivité, on donne ici quelques indications sur le brouillage intentionnel bien que ce ne soit pas l'objet de cette thèse. La figure (3.7) montre une représentation d'un scénario de brouillage intentionnel. Il ne s'agit que de recevoir à l'antenne du récepteur GPS un signal de forte puissance.



**Figure 3.7 :** Spectre d'un brouilleur intentionnel

Un signal brouilleur constant et de puissance suffisante peut détruire la réception d'un signal GPS dans une zone donnée. Le rayon de perturbation centré sur la source du brouilleur est fonction de la puissance d'émission et de la fréquence centrale du brouilleur.

Si l'on assume une antenne omnidirectionnelle dont le gain est 1, le rayon de perturbation est donné par la formule suivante :

$$d = \frac{\lambda \cdot 1 \left[ \frac{1 - 2 + p}{2} b \right]}{4\pi} \quad (3.14)$$

PIRE A L'EMISSION (dBW)	PUISSANCE DE L'EMETTEUR (W)	PORTEE DU BROUILLEUR (m)
30	1000	3016777.0
20	100	953989.0
10	10	301678.0
0	1	95398.9
-10	0.1	30167.8
-20	0.01	9539.9
-30	0.001	3016.8
-40	0.0001	954.0
-50	0.00001	301.7
-60	1E-06	95.4
-70	1E-07	30.2

**Tableau 3.15 : L'ordre des grandeurs impliquées en fonction de la PIRE du brouilleur.**

**Pour un résumé :**

Dans ce chapitre, que ce soit dans le domaine militaire ou civil, les récepteurs doivent être conçus pour opérer dans des niveaux d'interférences et de brouillages élevés afin d'assurer un maximum de continuité de service et d'intégrité.

Ce chapitre analyse l'impact des brouilleurs non – intentionnels sur la réception des signaux GPS. Il débute par une caractérisation des problèmes de brouillage et indique leurs effets sur un récepteur.

- L'objectif principal est de mieux comprendre l'influence des brouilleurs ou des perturbations RF sur les phases de réception, d'acquisition et de poursuite des signaux GPS. La vulnérabilité d'un récepteur GPS est d'abord définie au niveau des différents composants d'un récepteur telles que la tête RF , l'AGC et le CAN, les boucles et la démodulation des données.
- Les équations fondamentales du brouillage afin d'exprimer les seuils du rapport  $C/N_0$  en fonction du rapport J/S au-delà desquels le fonctionnement du récepteur est dégradé de plus, pour clarifier les attentes actuelles souvent mises de coté par manque de clarté et par les quantités de documents, on résume clairement les normes sur les récepteurs GPS civiles établies par des organismes et les spécifications requises. La synthèse permet de définir des critères quantitatifs relatifs à l'impact d'un brouilleur sur les différentes phases de perturbation d'un récepteur GPS.

- les catégories de brouillage et tente d'identifier et de décrire les différentes sources potentielles de perturbation. Les sources qui ont une probabilité plus élevée de brouiller

Un récepteur GPS sont analysées conduisant à une première classification des techniques d'adoucissement de spectre dans le but de réaliser des récepteurs GPS robustes.

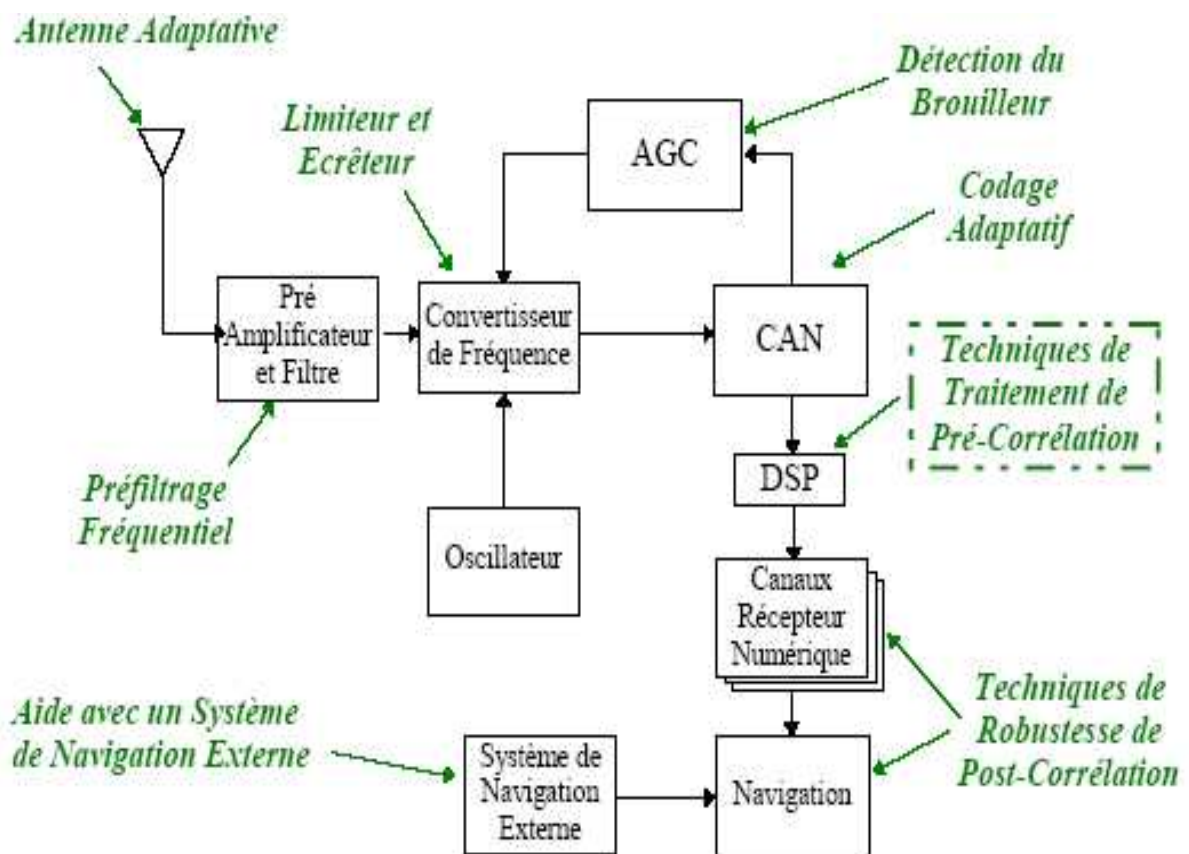
- Les différents types de brouillage sont répertoriés et on associe aux critères d'impact définis précédemment des valeurs représentatives telles que la distance, les isolations nécessaires entre les antennes et les réjections des filtres RF. On sélectionne donc ceux qui nous semblent les plus pénalisants pour un récepteur GPS.

## **Introduction :**

Comme clarifié dans le chapitre précédent plusieurs types des brouilleurs peuvent nuire au bon fonctionnement d'un récepteur GPS par conséquent à l'exploitation du message de navigation. La suppression de ces brouilleurs est envisageable en différents points de la chaîne de traitement: en radio fréquence (RF), en fréquence intermédiaire (IF), après échantillonnage du signal en fréquence intermédiaire ou encore dans les boucles de maintien. Pour cela on proposera dans notre travail l'application du filtrage adaptatif avant l'étage d'acquisition comme solution.

### 1-Dispositifs de résistance aux brouilleurs :

Comme on a vu, plusieurs types des brouilleurs peuvent léser au bon fonctionnement d'un récepteur GPS. Pour cela on a envisagé quelques dispositifs possibles pour améliorer la résistance des récepteurs GPS aux brouilleurs. La figure (4.1) liste les points vulnérables d'un récepteur et les modifications possibles qui permettraient de les renforcer.



**Figure 4.1 :** Principaux dispositifs de résistance aux brouillages

Dès la réception, le brouilleur peut rencontrer une antenne à diagramme de rayonnement adaptatif qui soit capable d'éliminer une direction particulière lors de la réception. Ensuite, le préfiltrage en fréquence rejettera les brouilleurs situés hors bande.

Durant le processus de conversion en fréquence, des dispositifs de limiteur en puissance et des écrêteurs permettent d'éliminer les brouilleurs impulsions tels que les radars. On peut détecter et éliminer des signaux parasites trop élevés en contrôlant l'amplitude du signal et on adaptant le gain en conséquence.

Notons également le rôle de l'AGC qui normalise le signal reçu avant l'échantillonnage permet de détecter la présence de brouilleur reçue par le récepteur.

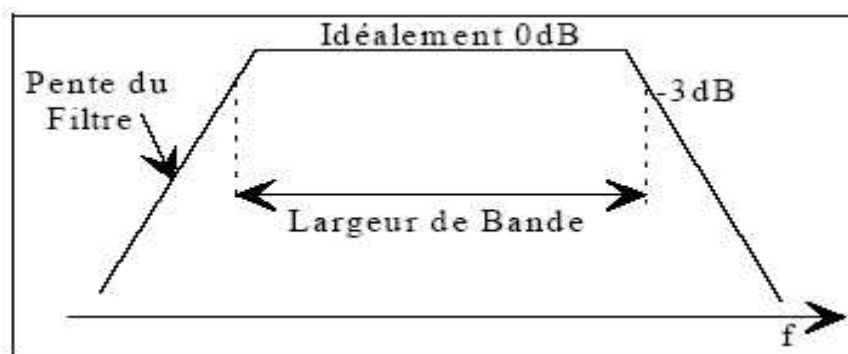
Après la numérisation du signal, on peut utiliser plusieurs techniques de traitement du signal dites de pré-corrélation, car elles interviennent en amont du corrélateur numérique.

On peut également améliorer la robustesse au niveau des canaux numérique qui consiste en général en une réduction de la bande des boucles de code et de porteuse pour réduire l'influence du bruit.

## **2- Filtrage à fréquentiel fixe :**

On peut agir successivement sur le filtre RF et les filtres FI du récepteur. En effet, si on réduit la bande passante du filtre et on augmente l'atténuation en bande coupée, on peut réduire la puissance du bruit et les effets des brouilleurs hors bande.

Cette technique est la plus classique des approches standard qui est utilisée par la plupart des constructeurs de récepteur.



**Figure 4.2 :** Caractéristiques du filtrage fréquentiel fixe

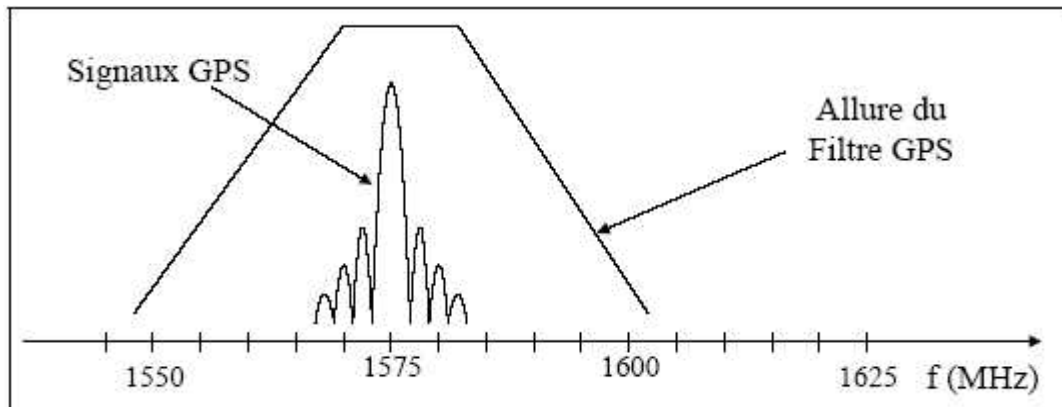
Ce type de filtrage fixe dans le domaine fréquentiel est principalement spécifié par sa bande passante et ces caractéristiques d'atténuation. La largeur de bande du filtre définit le spectre en fréquence pour lequel une variation d'au plus 3 dB est observée sur la puissance des signaux. La pente du filtre RF est une des caractéristiques les plus importantes. Plus grande sera la pente du filtre, meilleur sera le degré de protection du récepteur face à un brouilleur hors bande.

La figure (4.3) illustre la forme d'un filtre qui effectue la protection des signaux GPS,



SPS (Standard Positioning Service) utilisant le code C/A. Dans cet exemple, le filtre passe bande possède une bande de 10 MHz qui est nécessaire pour les techniques de corrélateur à bande étroite des récepteurs GPS.

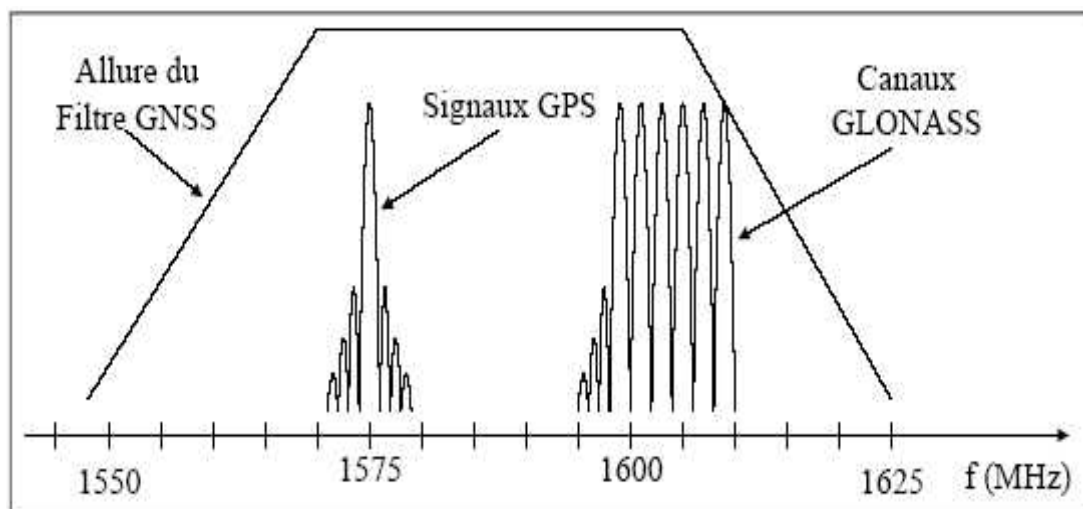
La pente du filtre est faible mais elle permet une bonne atténuation des signaux distants de plus de 25 MHz de la porteuse du signal GPS.



**Figure 4.3 :** Protection des signaux GPS à l'aide d'un filtre RF Fixe

Dans un même ordre d'idée, le filtre RF qui est placé généralement après l'amplificateur à faible bruit, peut être modifié pour accepter les deux signaux civils GPS et GLONASS.

La bande passante du filtre est généralement plus large pour laisser passer les fréquences centrales des canaux GLONASS allant de 1598 à 1600 MHz (Figure 4.4).

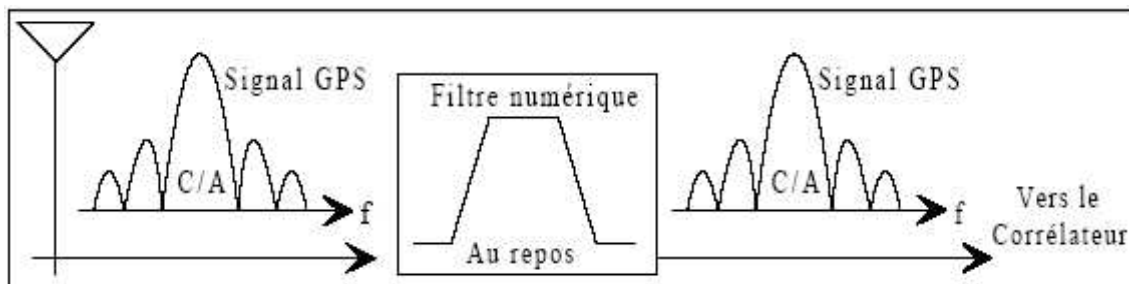


**Figure 4.4 :** Protection des signaux GPS et GLONASS à l'aide d'un filtre RF fixe

### **3- Filtrage fréquentiel adaptatif :**

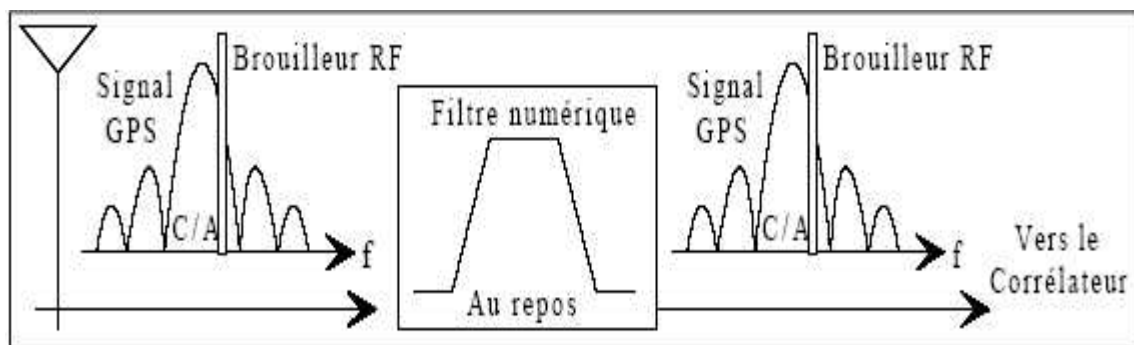
Cette méthode d'adoucissement de spectre peut être envisagée pour les brouilleurs hors bande GPS ainsi que les brouilleurs se trouvant dans la bande GPS pour autant que la largeur de bande du signal brouilleur soit faible face au signal GPS utile et que le signal brouilleur soit relativement stable en fréquence.

La figure (4.5) illustre le concept de base. Lorsqu'aucun signal brouilleur n'est détecté dans la section RF ou numérique du récepteur, le filtre est au repos et il offre une caractéristique passe-bande parfaitement adaptée aux signaux GPS. Dans ce cas le filtre peut être considéré comme transparent face au signal GPS qui le traverse.



**Figure 4.5 :** Caractéristique du filtre numérique au repos

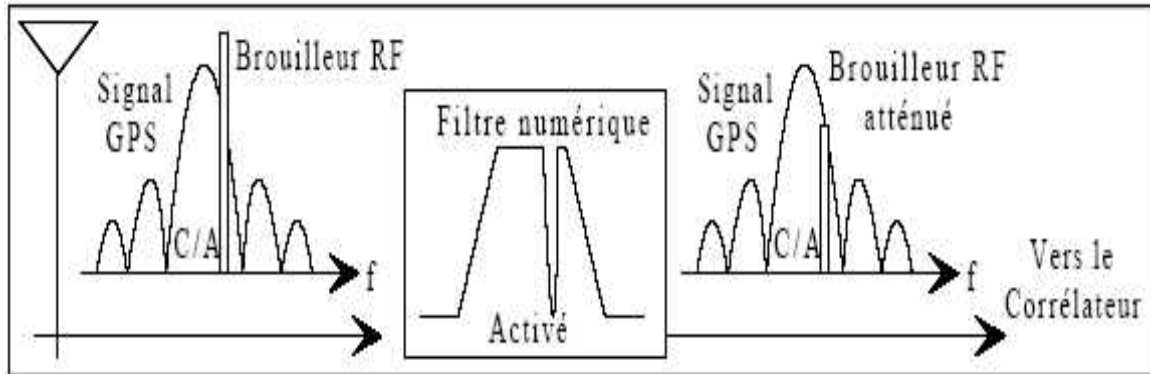
Dans la figure (4.6), l'apparition soudaine d'un brouilleur à l'entrée de l'antenne n'a pas permis au filtre de s'adapter à sa présence. Dans cette situation qui ne persiste que quelques millisecondes dans les circonstances normales, le brouilleur traverse le filtre sans aucune atténuation et perturbe les étages d'acquisition du signal utile. C'est en ce moment que les méthodes de détection de puissance et de localisation du brouilleur entrent en jeu.



**Figure 4.6 :** Apparition d'un brouilleur dans le système

Suite à la détection de la présence du brouilleur, à sa localisation et à l'analyse de ces caractéristiques, le filtre adapte sa fonction de transfert et lui introduit une composante coupe-bande qui tend à épouser la forme du spectre du brouilleur.

Les signaux de la section coupe-bande sont fortement atténués. La sortie du spectre en fréquence de la figure (4.7) le résultat où la puissance spectrale du brouilleur à spectre étroit et des signaux GPS à cet endroit est réduite. L'étage de corrélation qui suit permettra d'étaler la puissance résiduelle du brouilleur sur 2 MHz et de concentrer l'énergie du signal utile GPS



sur une largeur de bande approximative de 100 Hz.

**Figure 4.7 :** Atténuation du brouilleur suite à un filtrage adaptatif

Cette méthode de robustesse aux brouilleurs peut être efficace pour des brouilleurs à spectre étroit stables. Un intérêt de cette technique face à l'accroissement de la puissance du brouilleur est la possibilité du filtre adaptatif de réagir en accentuant l'atténuation de sa bande réjectrice et en améliorant sa position sur sa réponse fréquentielle.

#### **4- Filtres à encoche :**

Un filtre coupe-bande est un filtre numérique conçu pour atténuer une bande de fréquence  $f$  bien déterminé autour d'une fréquence centrale défini  $f_0$ . Il en existe plusieurs types des filtres utilisés dans les récepteurs GPS parmi lesquels :

- Les filtres RIF (Réponse Impulsionnelle Finie) générés par une équation de type:

$$H(Z) = \sum_{i=0}^N c_i \cdot Z^{-i} \quad (4.1)$$

Un filtre FIR avec une coupure très nette (bande de transition très courte) peut requérir jusqu'à des centaines de délais.

- Les filtres RII (Réponse Impulsionnelle Infinie) à gabarit générique est décrite par une équation de type :

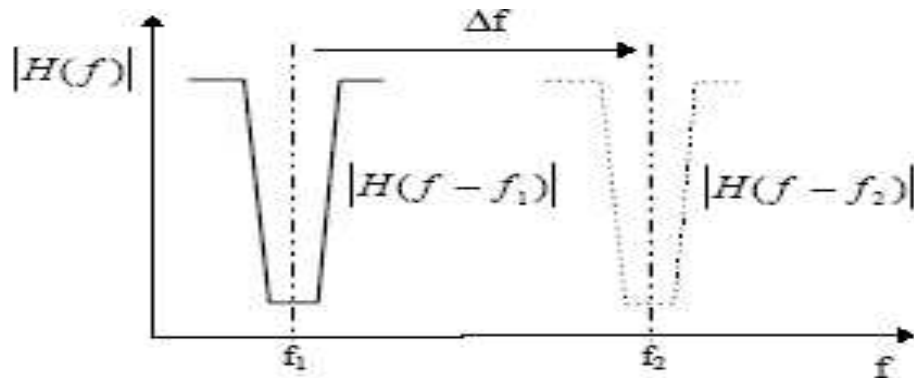
$$H(Z) = \frac{\sum_{i=0}^N a_i \cdot Z^{-i}}{\sum_{i=0}^M b_i \cdot Z^{-i}} \quad (4.2)$$

Un filtre RII est très efficaces et peuvent donner des pentes de coupure très raides.

#### **4-1-Présentation du filtre à encoche :**

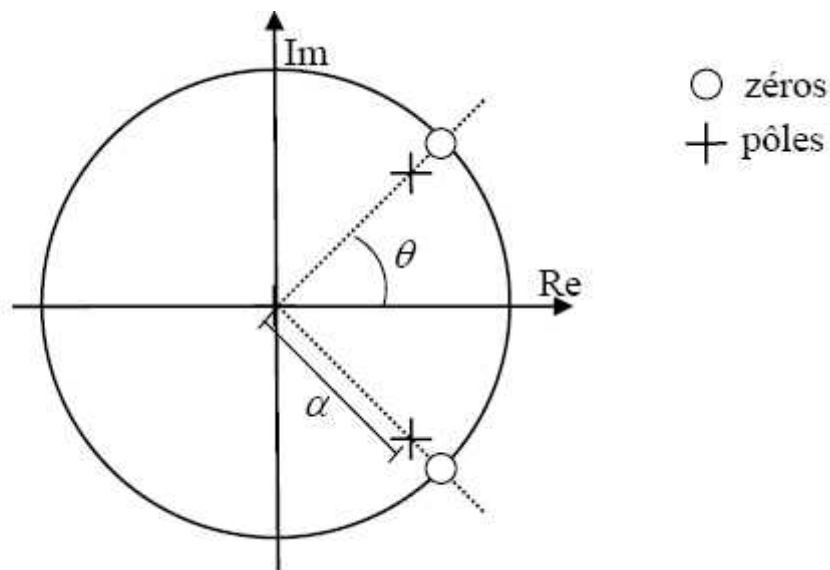
Le filtre à encoche (Notch filter) est un filtre coupe-Bande dont la largeur de bande est très étroite, qui est normalement utilisé pour retirer ou amplifier une fréquence du spectre. Son gabarit est donné dans la figure (4.8).

Plusieurs travaux ont été consacrés à l'étude d'un filtre à encoche du second ordre dit «avec contrainte» (constrained Notch filter) pour l'estimation et l'élimination de raie spectrales.



**Figure 4.8 :** Gabarit d'un filtre à encoche

La structure idéale des pôles et des zéros d'un filtre à encoche avec contrainte est montrée à la figure (4.9) (on simplifiera par la suite la notation en indiquant ce filtre comme ( Filtre à Encoche ) tout court). Les zéros se trouvent sur le cercle unité et les pôles, de module inférieur à 1 pour préserver la stabilité du filtre, ont même argument que les zéros. La position des pôles est définie relativement à la position des zéros par un coefficient constant .



**Figure 4.9 :** Les zéros et pôles d'un filtre à encoche

Pour un filtre à encoche du deuxième ordre la fonction de transfert présente deux zéros  $z_0$  et deux pôles  $p_0$  d'argument  $2\theta_0$  il est centré sur la fréquence  $f_0$ . Dans ces conditions, on peut écrire la fonction de transfert du filtre comme :

$$H(Z^{-1}) = \frac{(Z-Z_1)(Z-Z_1^*)}{(Z-P_1)(Z-P_1^*)} = \frac{Z^2 - 2\Re(Z_1)Z + Z_1Z_1^*}{Z^2 - 2\Re(P_1)Z + P_1P_1^*} = \frac{1 - 2\Re(Z_1)Z^{-1} + Z_1Z_1^*Z^{-2}}{1 - 2\Re(P_1)Z^{-1} + P_1P_1^*Z^{-2}} \quad (4.3)$$

Si on met en évidence la relation entre le pôle et le zéro :

$$\begin{aligned} |Z_1| &= 1 && \text{avec } 0 < \alpha < 1 \\ |P_1| &= \alpha \cdot |Z_1| \end{aligned} \quad (4.4)$$

La contrainte imposée sur le module du pôle ( $p_0 = \alpha z_0$ ;  $\alpha < 1$ ) permet de garantir la stabilité du filtre et d'ajuster la largeur de l'encoche.

On a :

$$H(Z^{-1}) = \frac{A(Z^{-1})}{B(Z^{-1})} = \frac{1 + a_1 Z^{-1} + Z^{-2}}{1 + \alpha a_1 Z^{-1} + \alpha^2 Z^{-2}} = \frac{A(Z^{-1})}{A(\alpha^{-1})} \quad (4.5)$$

Avec :

$$a_1 = -2 \cdot \Re(Z_1) \quad (4.6)$$

En coordonnées polaires, la fonction de transfert devient :

$$H(Z^{-1}) = \frac{1 - 2 \cos(\theta) Z^{-1} + Z^{-2}}{1 - 2 \alpha \cos(\theta) Z^{-1} + \alpha^2 Z^{-2}} \quad (4.7)$$

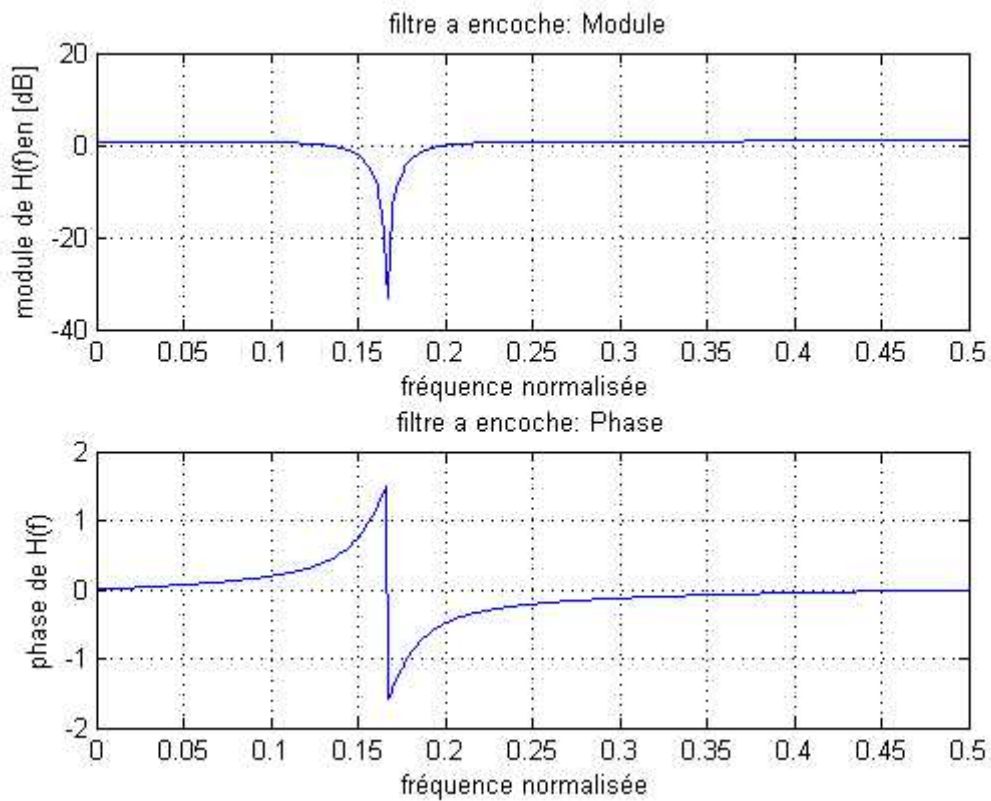
Où  $\theta$  représente l'angle entre l'axe X et le pôle on a :

$$a_1 = -2 \cos(\theta) \quad (4.8)$$

La condition de stabilité de ce filtre étant d'avoir les pôles à l'intérieur du cercle unité, on peut imposer la stabilité du filtre en vérifiant les conditions simples suivantes sur les coefficients :

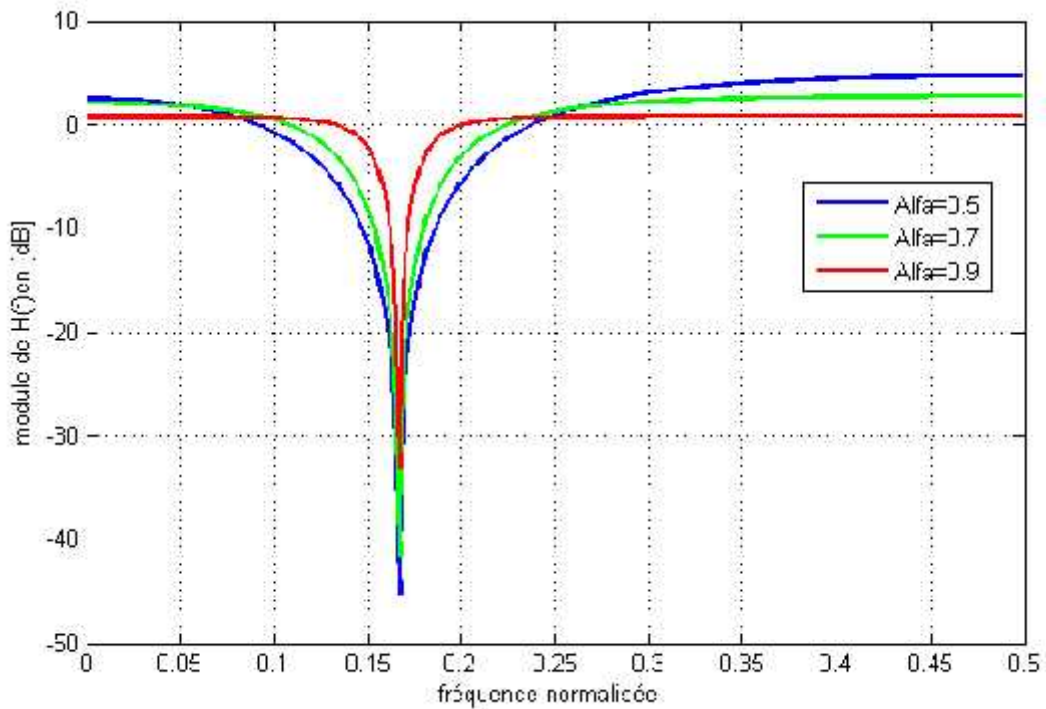
$$|a_1| < 2 \text{ et } 0 < a_0 < 1 \quad (4.9)$$

On peut tracer le module et la phase du filtre comme dans la figure (4.10) :



**Figure 4.10** : Module et phase d'un filtre à encoche

Sachant que le paramètre  $\alpha$  détermine la largeur de bande de l'encoche, On constate que pour des  $\alpha$  proches de 1, un tel filtre élimine une bande de fréquence très étroite du spectre. La figure (4.11) illustre la variation de l'ouverture de l'encoche du filtre pour différentes valeurs de  $\alpha$  :

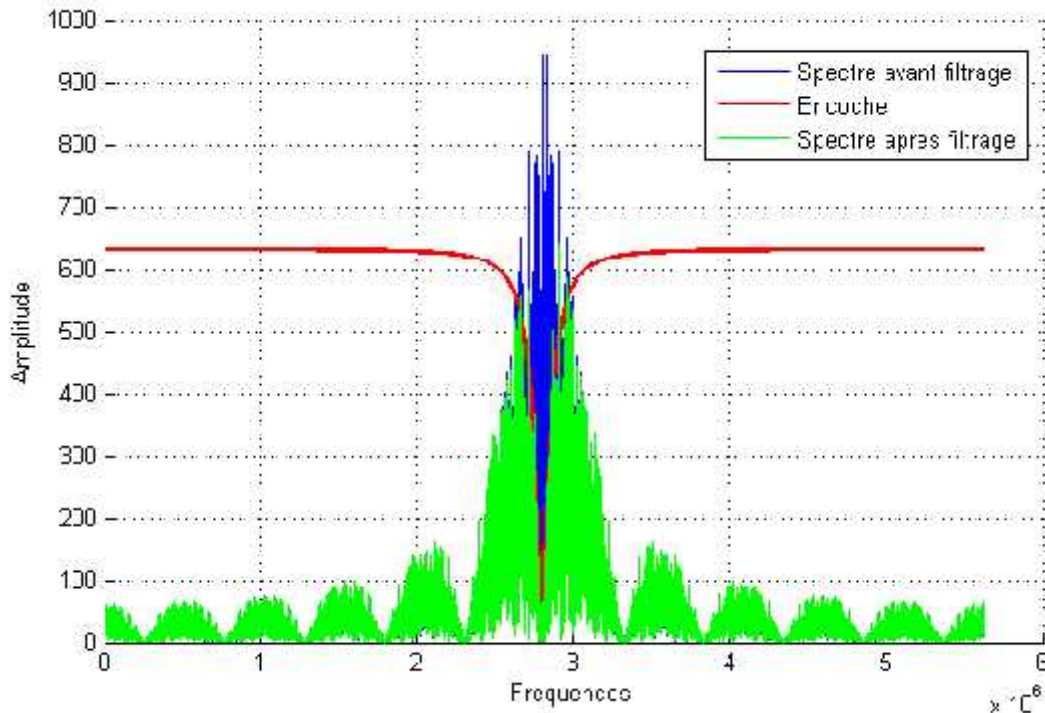


**Figure 4.11** : Module d'un filtre à encoche pour différentes valeurs de

**4-2-Application du filtre à encoche sur le signal GPS :**

Après la présentation du filtre à encoche on a pu vérifier que pour avoir une bande du filtre (ouverture de l'encoche) très faible il suffit que  $\alpha$  soit de plus en plus proche de 1; cette propriété est nécessaire pour un comportement satisfaisant du filtre, on voit ici l'application du filtrage et aux effets sur la signal GPS.

Une encoche est capable de filtrer de façon idéale une raie spectrale si sa position est connue exactement comme montre la figure (4.12) :



**Figure 4.12** : Application d'une encoche sur spectre GPS

#### **4-3-Cascade de filtre à encoche :**

Si le signal GPS est affecté par plusieurs brouilleurs de fréquences centrales différentes, pour cela on propose d'utiliser une cascade de filtre à encoches qui s'adaptent successivement aux fréquences des brouilleurs détectés.

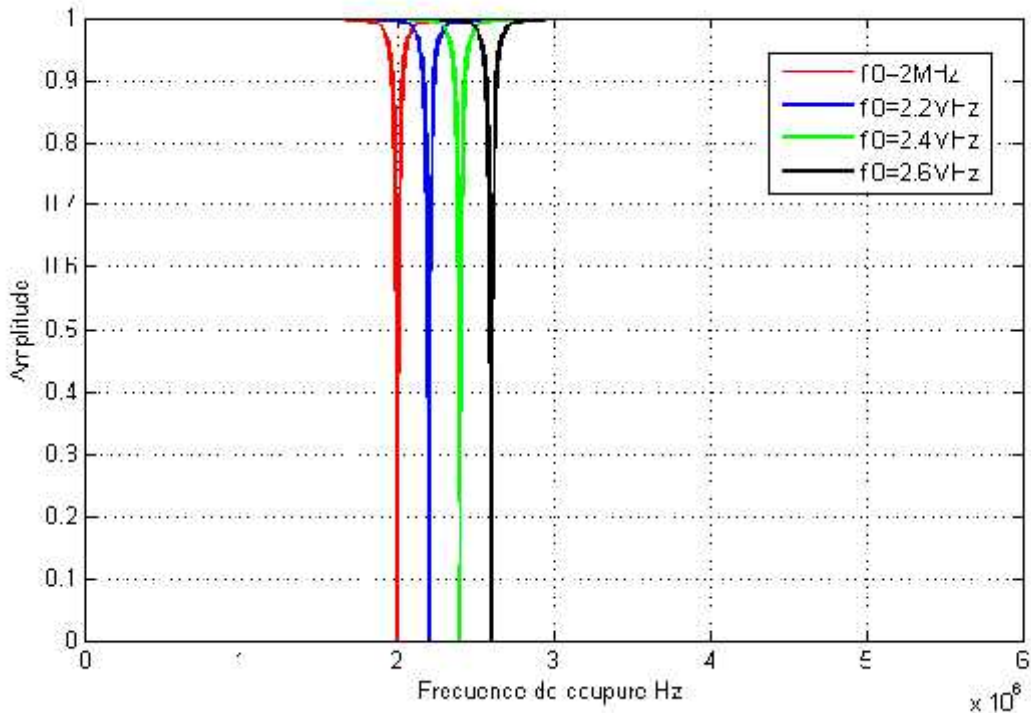
La fonction de transfert global résultant du produit d'une cascade d'encoches utilisée pour éliminer plusieurs brouilleurs, elle est donnée par :

$$\begin{aligned}
 H(Z^{-1}) &= \prod_{i=1}^n \frac{1+a_i.Z^{-1}+Z^{-2}}{1+a_i a_i.Z^{-1}+a_i^2 Z^{-2}} \\
 &= \frac{1+Z^{-n}+\sum_i [a_i'(Z^{-i}+Z^{2n-i})]}{1+\alpha^n.Z^{-n}+\sum_i [a_i'(\alpha^i.Z^{-i}+\alpha^{-(2n-i)}Z^{2n-i})]} \quad (4.10)
 \end{aligned}$$

Où  $i$  représente l'indice de l'encoche.

Dans notre présentation, on a utilisé quatre brouilleurs en cascade dont les fréquences centrales sont respectivement  $f_0= 2.6$  MHz, 2.4 MHz et 2.2 MHz, 2 MHz.





**Figure 4.13** : Module d'une cascade de filtres à encoche avec  $\zeta = 0.99$ .

La figure 4.13 montre une cascade de filtres à encoche chacun centré sur sa propre fréquence.

### Conclusion :

Une encoche est capable de filtrer de façon idéale une raie spectrale si sa position est connue exactement, si la position de la raie n'est pas connue de façon exacte ou si le brouilleur à une (faible) largeur de bande, on peut penser à diminuer la valeur de  $\zeta$  pour élargir la bande coupée.

# TABLES DES MATIERES

## Résumée

## Nomenclature

## Liste des figures

## Liste des tableaux

Introduction générale.....	1
<b>CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE SYSTEME GPS</b>	
Introduction .....	3
1-Différents types de système de navigation.....	4
1-1-GLONASS .....	4
1-2-ENSS .....	4
1-3-GALILEO .....	4
2-Description du système GPS.....	4
2-1-Segment spatial .....	5
2-1-1-Caractéristique d'un satellite .....	5
2-1-2-Les blocs des satellites .....	6
2-1-3-Couverture terrestre des satellites .....	6
2-1-4-L'identification des satellites .....	7
2-2-Segment de contrôle .....	7
2-3- Segment utilisateur .....	8
3-Le Signal GPS.....	9
3-1-Génération des signaux GPS .....	10
3-2-Les niveaux de puissance .....	11
3-3-Génération du code C/A .....	12
3-4-Le message de navigation.....	13
3-4-1-Format du message.....	13
3-4-2- Contenu du message.....	13
3-4-Acquisition du signal .....	15
4-Les services fournis dans le GPS .....	16

## **CHAPITRE II : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU GPS**

Introduction : .....	17
1-Principe .....	18
2-Fonctionnement de GPS .....	18
2-1-Positionnement à partir du GPS .....	19
2-2-Triangulation classique .....	20
3-Les différents types de mesure.....	21
3-1-La mesure de distance.....	21
3-2-La mesure de phase.....	22
4-Types de positionnement GPS .....	23
4-1-positionnement absolu .....	24
4-2-Positionnement relatif.....	25
5-Les sources d'erreurs .....	26
5-1-Les orbites.....	26
5-2-Les dégradations volontaires du système .....	26
5-2-1-L'accès sélectif .....	26
5-2-2-L'antibrouillage .....	27
5-3-Les horloges.....	27
5-4-L'ionosphère .....	27
5-5-La troposphère .....	27
5-6-Les multi trajets .....	28
5-7-Les erreurs de précision .....	28
6-Les récepteurs GPS .....	28
6-1-Structure générale d'un récepteur .....	29
6-1-1-L'antenne.....	29
6-1-2- Le préamplificateur à faible bruit.....	30
6-1-3-Le module RF.....	30
6-1-4-le module numérique .....	30

## **CHAPITRE III : CLASSIFICATION ET ANALYSE DES TYPES DES BROUILLEURS**

Introduction .....	31
1-Classification des brouilleurs .....	33
2-Vulnérabilités d'un récepteur GPS .....	33

2-1-Etage de réception RF.....	34
2-2-Vulnérabilité de la boucle de code .....	35
2-3-Vulnérabilité de la boucle de phase .....	36
2-4-Détection du message de navigation .....	37
2-5-Résumé d'un récepteur GPS générique .....	38
3-Caractérisation Des Problèmes de brouillage .....	39
3-1-Equations fondamentales du brouillage.....	40
3-2-Influence de la largeur de bande.....	44
3-3-Critères de robustesse retenus.....	45
4-Les Origines Des Brouilleurs.....	47
4-1-Enumération des types de brouilleurs.....	47
4-2-Brouillage par les Emetteurs SATCOM :.....	49
4-2-1-Brouillage par d'inter modulation des SATCOM .....	50
4-2-2-Brouillage du à la Proximité des Bandes .....	50
4-3-Brouillage par les harmoniques des stations de TV .....	52
4-4-Bouillage par les Harmoniques de la diffusion F.M .....	52
4-5-Brouillage Intentionnel .....	55
<b>CHAPITRE IV : REJECTION DES BROUILLEURS PAR FILTRE A ENCOCHE</b>	
Introduction .....	57
1-Dispositifs de résistance aux brouilleurs.....	58
2- Filtrage à fréquentiel fixe.....	59
3- Filtrage fréquentiel adaptatif.....	60
4- Filtres à encoche .....	62
4-1-Présentation du filtre à encoche.....	63
4-2-Application du filtre à encoche sur le signal GPS .....	66
4-3-Cascade de filtre à encoche .....	67
Application.....	68
Conclusion générale et perspectives.....	75
Bibliographie	



## Introduction :

Le système de positionnement global (GPS) est un système de navigation par satellite destiné à fournir la position, la vitesse et l'heure n'importe où à la surface de la terre ou dans ses environs. La précision du positionnement par GPS va de 100 mètres à quelques mètres en temps réel elle peut atteindre quelques millimètres pour les applications de géodésie en temps diffère. Bien qu'il y ait des milliers d'utilisateurs civils du GPS à travers le monde, le GPS a été créé et est contrôlé par le département de la défense américain (departement of defense (DOD)).

Les satellites GPS envoient des signaux codés qui peuvent être déchiffrés par des récepteurs GPS. Le récepteur mesure la distance entre la station et plusieurs satellites à l'aide des codes C/A ou P. Les éphémérides des satellites sont transmises par le message de navigation permettant de calculer la position du satellite dans un repère terrestre. Chaque mesure de distance sur un satellite définit une sphère dont le centre est le satellite. Trois satellites sont donc nécessaires pour déterminer la position du récepteur en trois dimensions. Un quatrième satellite est nécessaire pour tenir compte de la non synchronisation de l'horloge du récepteur et des horloges des satellites.



## 1-Différents types de système de navigation:

### 1-1-GLONASS:

Le GLONASS (**G**lobale **N**avigation **S**atellite **S**ystème) est un système d'origine russe concurrent au système GPS, certains récepteurs intègrent les systèmes Glonass et GPS de manière à présenter une meilleure précision par obtention d'une valeur moyenne entre les deux systèmes.

### 1-2-ENSS:

L'ENSS (**E**uropéen **N**avigation **S**atellite **S**ystème) est l'équivalent européen du système GPS, il a subi une très forte concurrence de la part du système américain GPS et s'avère peu ou pas utilisé.

### 1-3-GALILEO:

Le système Galileo sera compatible avec GPS et il est attendu qu'il y ait de nombreux développements de récepteurs mixtes GPS - GLONASS - GALILEO. Néanmoins, il en sera indépendant, c'est-à-dire que si GPS est mis hors service GALILEO devrait continuer à fonctionner. Les premiers satellites étaient lancés en 2003 pour un ensemble pleinement opérationnel en 2008.

## 2-Description du système GPS:

**Le GPS est construit de 3 parties (3 segments) :**

- le segment Spatial (Space segment).
- le segment Utilisateur (User Segment).
- le segment de Contrôle (Control Segment).



**Figure 1.1 :** Les trois segments du GPS

## 2-1-Segment spatial:

Le segment spatial est composé d'un réseau de satellites (24+3 de réserve) en orbite quasi-circulaire autour de la terre, à une hauteur de +/- 20000 Km et dont la période de révolution est de 12 heures sidérales. Ces satellites sont répartis sur 6 plans orbitaux inclinés à 55° par rapport à l'équateur, sachant qu'elles sont espacées de 60° les une des autres.

La constellation GPS a été conçue de telle manière que partout sur terre et à tout moment, un minimum de 4 satellites soit visible au dessus de 15° d'élévation.

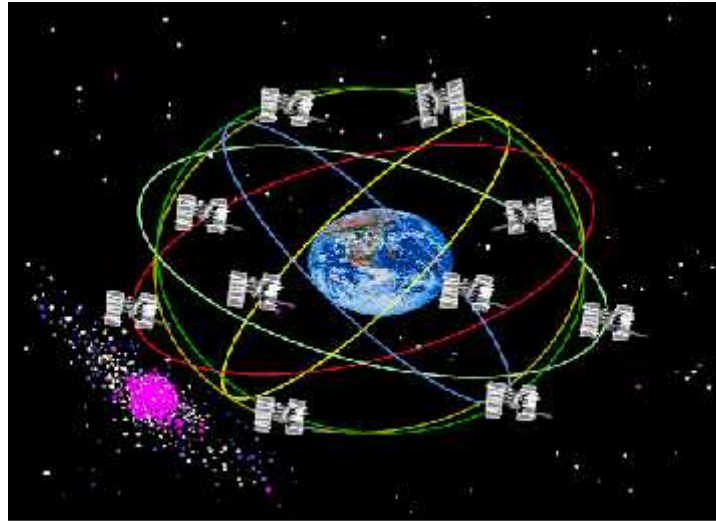
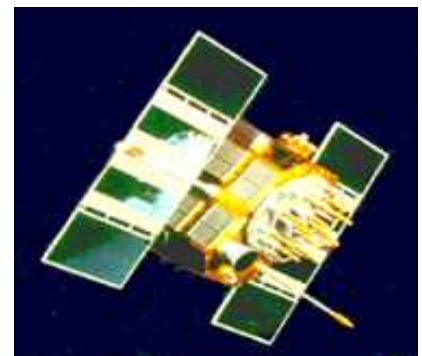


Figure 1.2 : Constellation des satellites

### 2-1-1-Caractéristique d'un satellite :

On peut dire qu'on générale un satellite est caractériser par :

- Largeur du Satellite 152 cm
- Hauteur du Satellite 191 cm
- Masse du Satellite 1066 kg
- L'air des panneaux solaires 7.2 m<sup>2</sup>
- Puissance embarquée 1136 W
- Hauteur de sa gravitation 20 180 km



Les satellites GPS sont caractérisés par une horloge ultra précise qui transmet des signaux horaires et des informations sur leurs positions.

Ils disposent de quatre horloges atomiques à leur bord, ce qui assure une grande stabilité des signaux générés. Les horloges sont quotidiennement remises à l'heure par les stations de contrôle de l'armée américaine. Les utilisateurs peuvent donc synchroniser l'horloge de leur récepteur avec cette heure précise (appelée « heure GPS »). La précision est de l'ordre de 10<sup>-12</sup> à 10<sup>-13</sup> sur un jour.



### **2-1-2-Les blocs des satellites :**

Il existe trois catégories des satellites GPS :

**Bloc I :** Satellites lancés entre 1978 et 1985 tous les satellites du bloc I sont maintenant hors service excepté un qui est activé de manière périodique, leur durée de vie est de 4.5 ans. La différence entre ces satellites et les générations suivantes est l'impossibilité de dégrader volontairement le signal transmis.

**Bloc II :** Seconde génération des satellites GPS mis sur orbite à partir de 1985. Ils ont la capacité de dégrader le signal émis. Leurs durée de vie est de 7.5 ans.

**Bloc III :** Ils ont été construits pour avoir une durée de vie de 10 ans, ils sont capables de communiquer entre eux et ont été mis sur orbite depuis 1996 afin de maintenir une constellation complète. Les satellites GPS transmettent leurs données sur deux fréquences (porteuses). Ceci afin que l'erreur introduite par la réfraction ionosphérique puisse alors être éliminée. Les signaux qui sont générés à partir de la fréquence standard 10.23 MHz sont L1 à 1575.42 MHz et L2 à 1227.6 MHz. Ces fréquences sont générées grâce à l'horloge atomique embarqué à bord de chaque satellite, les porteuses ne peuvent être utilisées directement pour le positionnement et c'est pourquoi deux codes binaires sont modulés sur les porteuses: le code C/A (Coarse Acquisition) et le code P (Precision). Il est également nécessaire de connaître les coordonnées du satellite, cette information est envoyée par le message de données qui est modulé sur les porteuses.

### **2-1-3-Couverture terrestre des satellites :**

L'arrangement des satellites permet d'avoir, dans 99 % des cas, un minimum de 4 satellites visibles à 5° au plus au dessus de l'horizon, quelque soit l'endroit où l'on se trouve sur la terre. Mais cela signifie également que pendant une minute et demie par jour le système GPS est peut ne pas indiquer une position suffisamment fiable. En outre, si le lieu n'est pas parfaitement dégagé, c'est –à-dire si le ciel n'est pas totalement visible au dessus de 5° de l'horizon, la couverture des satellites peut être totalement insuffisante. A quelques rares endroits du globe dans des zones dits de réception difficile, cette couverture n'est pas assurée dans plus de 3 % des cas.

Il arrive aussi régulièrement qu'un ou plusieurs satellites soient momentanément mis hors service. Généralement cela est dû à une maintenance périodique du satellite ou à un problème technique. Normalement un satellite n'est pas hors service plus de 24 heures, il n'y a pas plus

de 4 satellites mis hors service chaque mois et jamais plus de trois hors service en même temps. Le nombre de satellites visibles varie tout au long de la journée, et est en moyenne égale à huit.

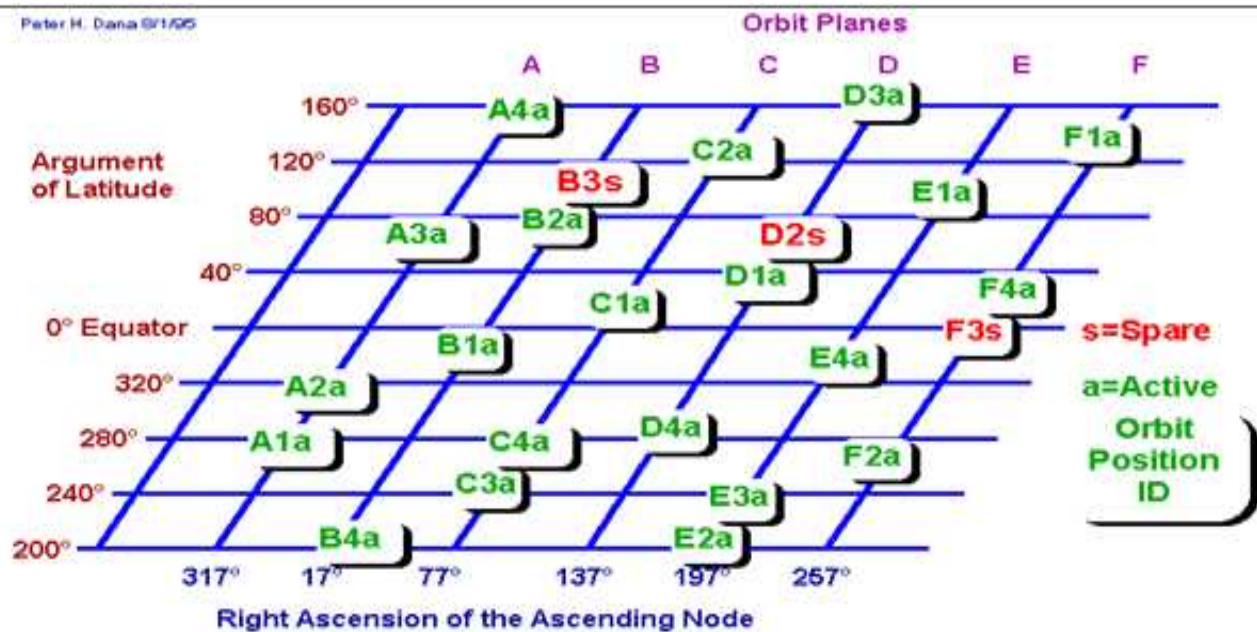


Figure 1.3 : Représentation simplifiée de constellation nominale de GPS

#### 2-1-4-L'identification des satellites :

Plusieurs systèmes de numérotation des satellites coexistent :

- La numérotation séquentielle dans l'ordre de lancement (SV).
- La numérotation PRN (pseudo random noise) donné pour les codes, qui est généralement utilisé, le numéro PRN est fournie aux utilisateurs dans le message de navigation.
- Numéro lié à l'orbite et à la position sur l'orbite.
- Numéro dans le catalogue de la NASA

#### 2-2-Segment de contrôle :

Le secteur de contrôle dépend de l'armée américaine et doit maintenir en permanence le système GPS opérationnel. Pour cela cinq stations de poursuite observent 24h/24 les satellites GPS, contrôlent et modifient leurs trajectoires et leurs transmettent des informations qui seront diffusées par le message de navigation. Les cinq stations sont Colorado spring (la station principale), Ascension Diegio, Garcia, Kwajalein et Hawaii. Le temps GPS est généré par la station principale de Colorado Spring.

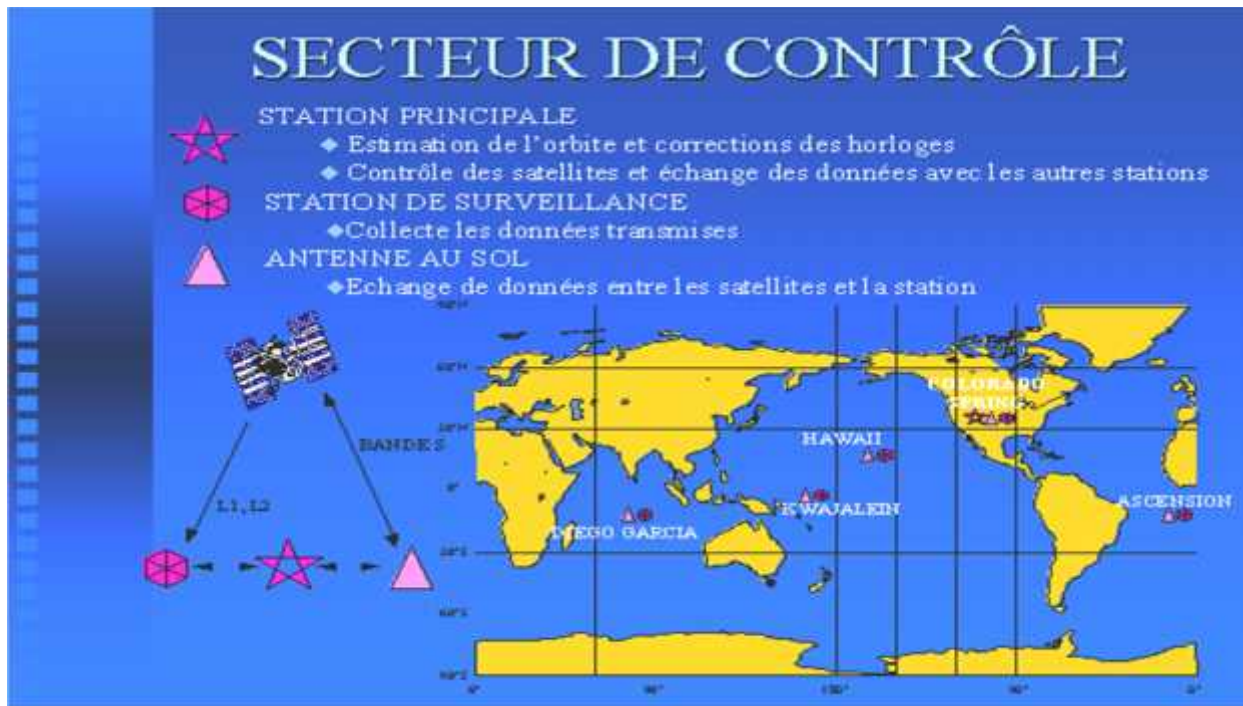


Figure 1.4 : Les stations de contrôles

### 2-3-Le segment utilisateur :

Le segment utilisateur consiste en une variété GPS militaires ou civils. Un récepteur est conçu pour recevoir décoder et traiter les signaux émis par les satellites GPS. Les récepteurs intégrés (carte ou circuits spécifiques au GPS) dans d'autres systèmes sont également inclus dans le segment utilisateur.

Les utilisateurs disposent d'un moyen unique pour leurs applications de localisation, de navigation, de référence de temps, de géodésie voire de détermination d'attitude.

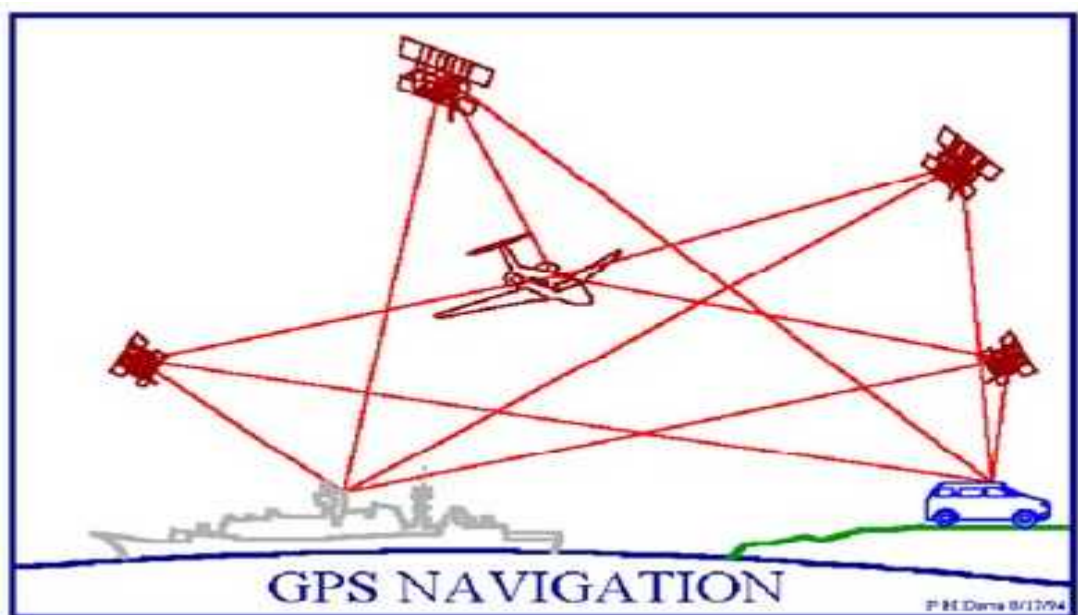


Figure 1.5 : Le segment utilisateur

### 3-Le Signal GPS :

Les satellites GPS transmettent deux codes : un code crypté pour la défense militaire américaine (signaux PPS) et un code civil (signaux SPS).

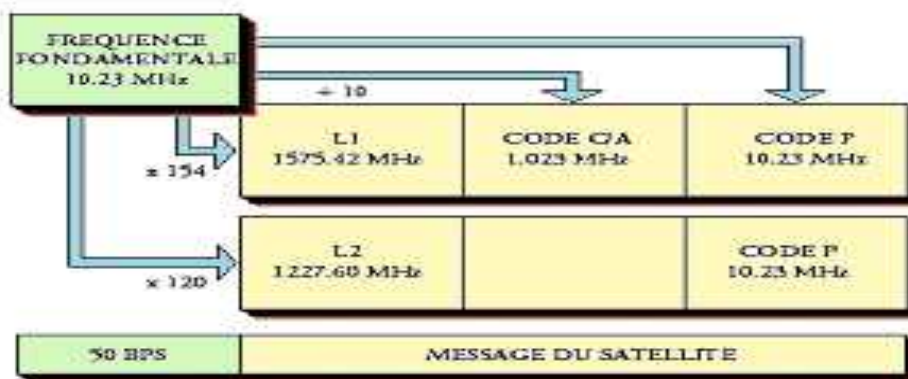
Pour l'ensemble des satellites, la fréquence fondamentale est  $f_0 = 10.23$  MHz.

A partir de la fréquence fondamentale, chaque satellite génère deux ondes porteuses :

$L_1 = 154 \cdot f_0 = 1575,42$  MHz (soit une longueur d'onde d'environ 19 cm).

$L_2 = 120 \cdot f_0 = 1227,60$  MHz (soit une longueur d'onde d'environ 24 cm).

Les signaux seront radiodiffusés sur ces deux fréquences.



**Figure 1.6 :** Dérivation des fréquences

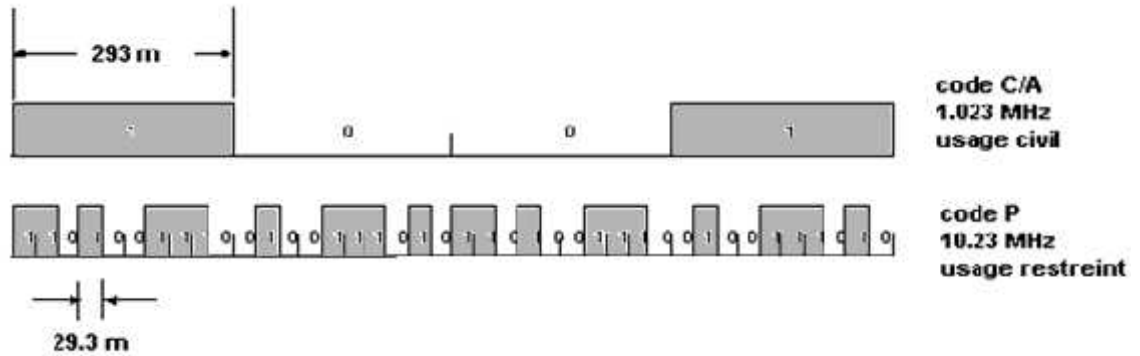
Pour des raisons techniques, ces deux ondes porteuses seront modulées par des codes pseudo aléatoires (**P**seudo **R**andom **N**oise) qui seront transmis en direction de la terre. Les informations véhiculées par ces ondes permettront de se positionner. Les codes pseudo aléatoires sont les suivants :

- Le **C/A-code** (**C**oarse/ **A**cquisition-code) disponible sur la porteuse **L1** pour les applications civiles (donc accessible à tous). C'est une série pseudo aléatoire de 0 ou 1 défini de façon déterministe par une fonction mathématique de période 1 ms à une fréquence de  $f_0/10 = 1,023$  MHz. Un code spécifique est attribué à chaque satellite afin que le récepteur puisse les identifier d'une façon univoque.  
La courte période de ce signal (1 ms), permet au récepteur une acquisition et donc une identification rapide des satellites.
- Le **P/Y-code** disponible sur les deux porteuses **L1** et **L2** pour les applications militaires. Le **P-Code** (**P**recision code) est une série pseudo aléatoire de fréquence

$f_0=10,23$  MHz. Le P-code est généralement rendu inaccessible aux civils par l'activation d'une fonction dite A.S (Anti-Spoofing) qui encode le P-code.

Ce code n'est accessible qu'aux utilisateurs possédant des clés de décryptage comme l'armée américaine et certains de ses alliés. Ses caractéristiques sont inconnues et il est donc impossible de le reproduire.

Les différents satellites émettent tous sur les mêmes fréquences (L1 et L2), mais un code individuel leur est assigné.



**Figure 1.7 : Code C/A et P**

### **3-1-Génération des signaux GPS:**

Les données de navigation sont transmises par un signal D prenant les valeurs 0 ou 1, dont la fréquence est de 50Hz (50 bits/s).

Le signal est tout d'abord additionné modulo 2 au code choisi (P ou C/A).

La porteuse L1 est modulée en phase par le signal  $P \oplus D$  et en quadrature par le signal  $C/A \oplus D$  (où  $\oplus$  représente l'opérateur XOR).

La porteuse L2 est simplement modulée en phase par le signal  $P \oplus D$  (voir figure 1.8).

Le signal  $S_{L1}$  est constitué de deux composantes en quadrature modulée respectivement par les codes C/A et P et le signal D, les codes C/A et P Coexistant sur la porteuse sans interférence, et l'on peut écrire :

$$\begin{aligned}
 S_{L1}(t) &= A_P.C_P(t).C_D(t).\cos(\check{S}_{L1}.t) + A_{C/A}.C_{C/A}(t).C_D(t).\sin(\check{S}_{L1}.t) \\
 S_{L2}(t) &= B_P.C_P(t).C_D(t).\cos(\check{S}_{L2}.t)
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

Avec :

$$C_P(t) = \pm 1 \text{ (code P).}$$

$$C_{C/A}(t) = \pm 1 \text{ (code C/A).}$$

$$C_D(t) = \pm 1 \text{ (message de navigation)}$$

$A_P$ ,  $A_{C/A}$  et  $B_P$  : Amplitudes des différentes composantes.

$\omega_{L1}$ ,  $\omega_{L2}$  : Pulsations respectives des signaux  $S_{L1}$  et  $S_{L2}$ .

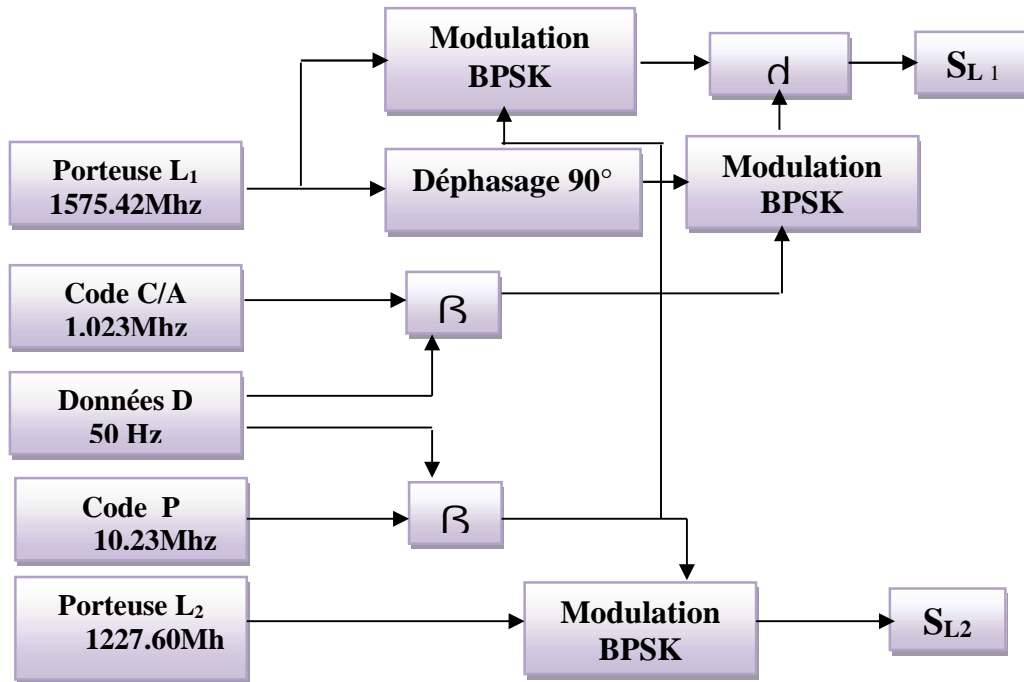


Figure 1.8 : Génération des signaux GPS

### 3-2-Les niveaux de puissance :

On obtient un spectre de raies dont l'enveloppe est montrée en Figure (1.9). Le code P génère une enveloppe en  $(\sin^2(x)/x^2)$  dont le lobe principal a une largeur de 20.46Mhz, le code C/A génère la même enveloppe avec une largeur du lobe principal de 2.046Mhz. Typiquement, la puissance associée à chaque raie est d'au moins 24 dB inférieur à la puissance totale du lobe principal, ce qui donne au lobe principal une puissance de plus de 95% de la puissance totale du signal GPS.

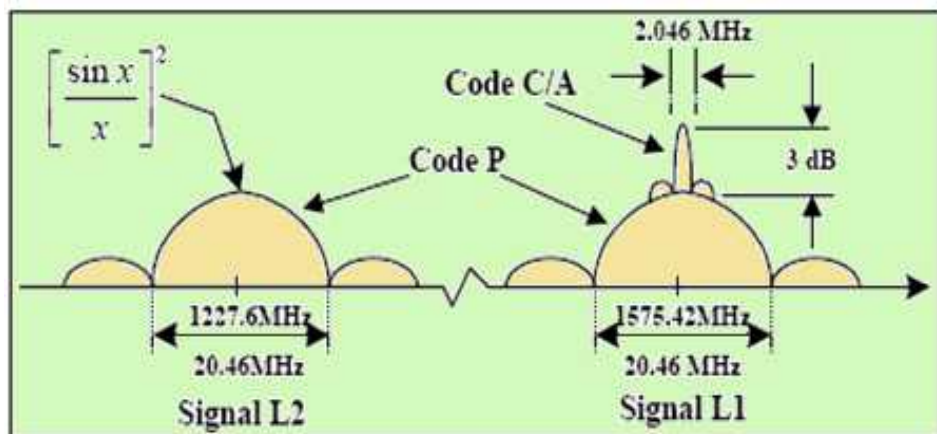


Figure 1.9 : Niveaux de puissance

### 3-3-Génération du code C/A :

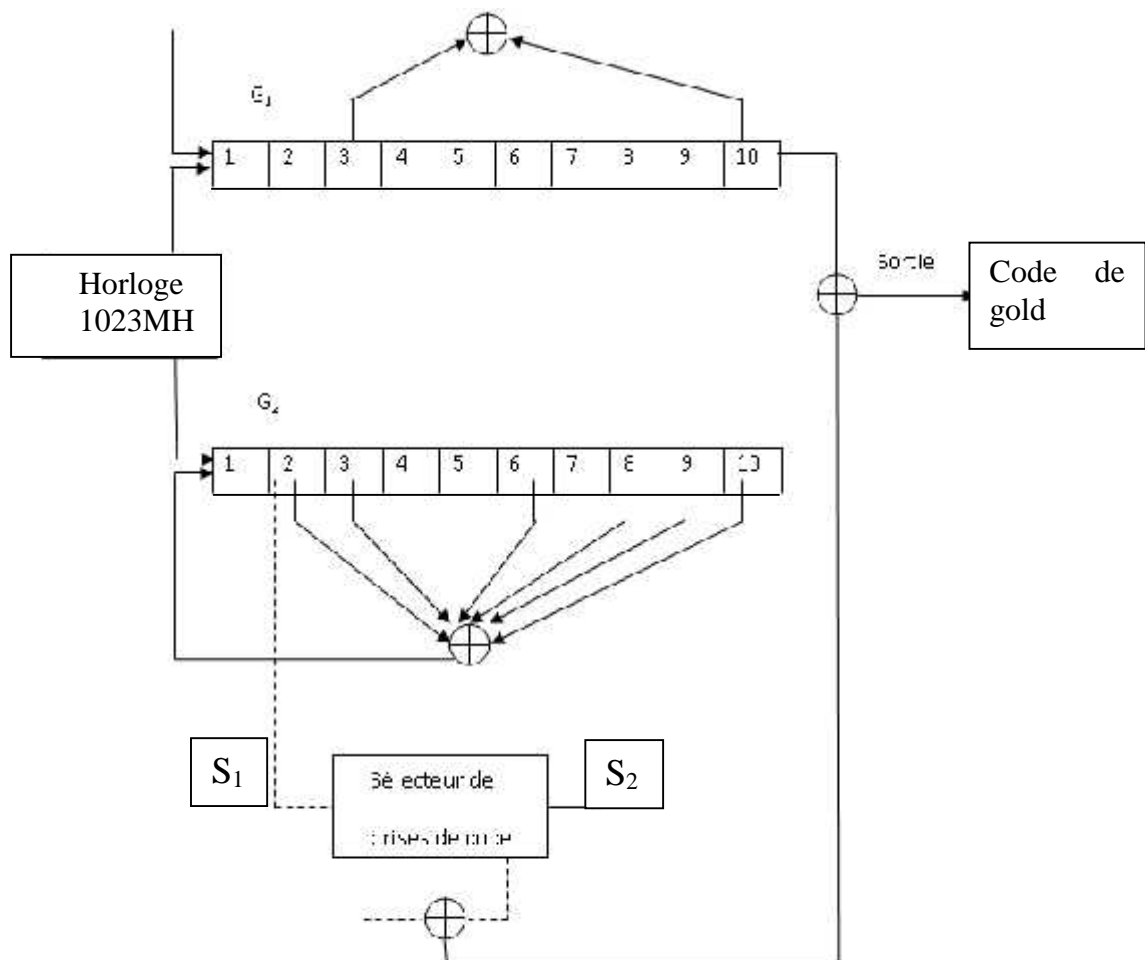
Le code C/A (Coarse/Acquisition) est un code relativement court de 1023 chips et de 1 ms de période, il est généré sous une cadence de 1.023 MHz, on note que c'est un code de Gold qui est retenu grâce à ces propriétés de corrélation. Le code est généré à partir de deux configurations linéaires de dix étages comme présente dans la figure (1.10). Ces deux registres produisent deux polynômes générateurs :

$$G_1=1+x^3+x^{10}$$

$$G_2=1+x^2+x^3+x^6+x^8+x^9+x^{10}$$

La valeur de initialisation des registres  $G_1$  et  $G_2$  est : 1111111111

Les deux registres à décalage de 10 étages sont cadencés à 1.023 MHz, pratiquement le décalage est réalisé par deux multiplexeurs sélectionnant deux sorties du registre  $G_2$ . Ces deux sorties sont additionnées modulo 2 avant d'être à leur tour additionnées à la sortie du registre  $G_1$ . Ces opérations sont réalisées par le synoptique suivant :



**Figure 1.10 :** La génération du code C/A

### **3-4-Le message de navigation :**

Nous allons à présent décrire brièvement les données de navigation contenues dans le signal GPS et la façon dont elles sont ordonnées.

#### **3-4-1-Format du message :**

Le signal émis par un satellite est composé de trames de 1500 bits. Chaque trame est divisée en sous trames contenant chacune 10 mots de 30 bits. Comme le débit du message est de 50 bits/sec, une trame est donc émise en 30 secondes.

Les sous trames 1, 2,3 contiennent un message qui en général ne change pas d'une trame à l'autre, ce sont des informations indispensables à la navigation, qui sont répétées toutes les 30 secondes, les sous trames 4 et 5, quant à elle, sont réservées à des message plus longs mais moins importants, en conséquence, il y a 25 messages différents pour les sous trames 4 et 5. On appelle alors trame principale l'ensemble des 25 trames différents, elle dure 12.5 minute.

Les mots de 30 bits se décomposent en 24 bits d'information et 6 bits de parité : les mots sont donc codés, à l'aide d'un code de hamming étendu. On rappelle qu'un code de hamming permet de corriger une erreur de transmission.

Longueur de message 1500bits (30s)	
Correction d'horloge+ les éphémérides 900bits (18s)	Des informations générales 600bits (12s)

**Tableau 1.1 : Message de navigation**

#### **3-4-2- Contenu du message :**

Pour qu'un utilisateur puisse déterminer sa position à l'aide du signal satellite, il faut qu'il connaisse la position des satellites et la distance qui le sépare de ceux-ci.

Les satellites GPS doivent donc émettre des éléments permettant de calculer leur position, ainsi que l'âge de ces informations, afin de déterminer les satellites à utiliser en priorité pour obtenir une meilleure précision. Tous ces éléments se retrouvent dans les sous trames 1, 2,3, répartis comme suit :



Sous trames	1	2	3
Contenu	L'âge des données la santé du satellite les coefficients de correction d'horloge	Les paramètres d'orbite (éphémérides)	

**Tableau 1.2 : Contenu des sous trames 1, 2 et 3**

Les éphémérides contiennent les paramètres orbitaux du satellite ainsi que leurs coefficients de correction.

Les sous trames 4 et 5 décrivent, quant à elles, les almanachs de tous les satellites en orbite et leur état de santé. L'almanach permet de calculer approximativement la position d'un satellite, et de déterminer s'il est visible ou pas.

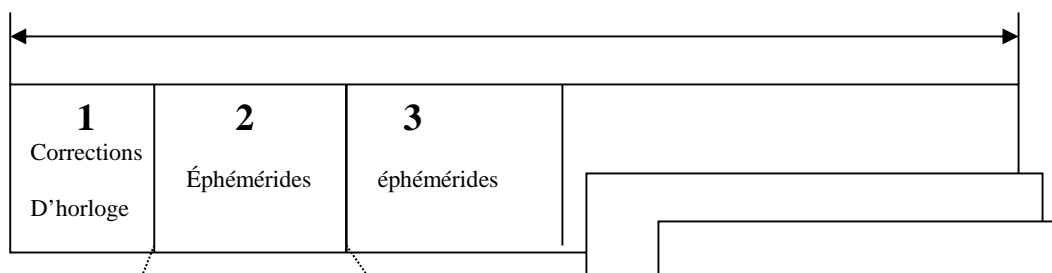
De plus, il donne une idée grossière de la vitesse relative du satellite et ainsi de l'effet doppler à prendre en compte pendant l'acquisition. La sous trame 4 contient également

Les coefficients du modèle ionosphérique, qui permet d'affiner le calcul de la distance satellite récepteur, notons pour conclure que le segment de contrôle du système GPS (les stations fixes au sol qui supervisent les satellites) calcule et rafraîchit les éphémérides régulièrement (une fois par jour), et transmet les nouvelles informations aux satellites.

Comme ces corrections ne sont pas rafraîchies simultanément, l'utilisateur a intérêt à utiliser les plus récentes (l'âge des données étant donné dans la sous trame 1).

Les informations spécifiques à chaque satellite, comme les corrections d'horloge et les éphémérides des satellites sont répétées en totalité dans toutes les "phrases" (les 900 premiers bits), soit toutes les 30 secondes pendant 18 secondes.

Les informations générales dont le contenu change à chaque phrase est transmis en totalité en 12.5 minutes (durée nécessaire pour 25 phrases).





10 mots de 0.6 secondes = 6 secondes

**Sous trame**

25 pages contenant :

- paramètre ionosphérique
- UTC temps universel coordonné
- santé de satellite

30 bits de 0.02 secondes = 0.6 secondes

**Mot**

**Figure 1.11:** Format du message de navigation

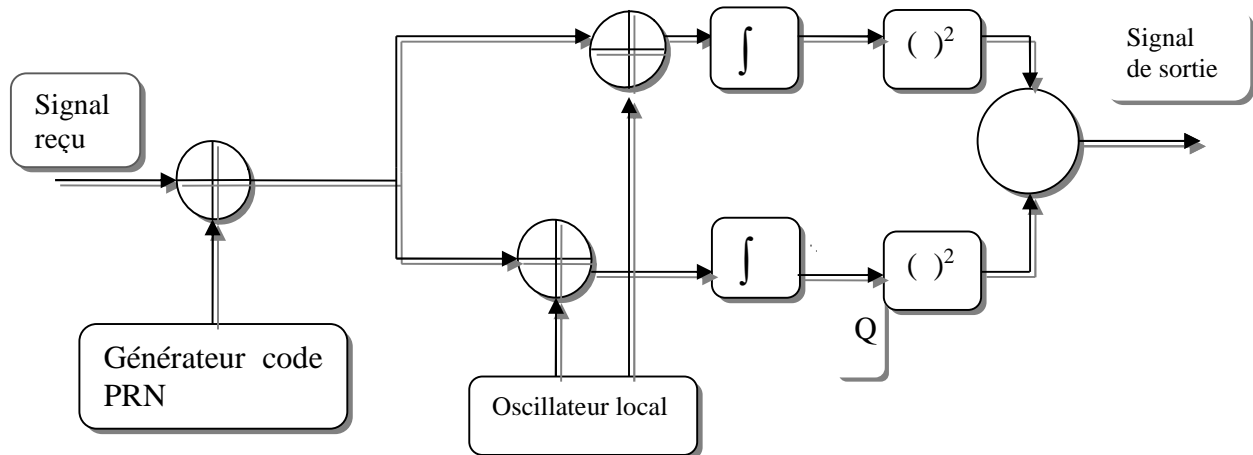
**3-4-Acquisition du signal :**

L'acquisition est une recherche tridimensionnelle dans le temps, la fréquence et le code d'accès du satellite dans le but de déterminer les satellites visibles ainsi que le code phase et la fréquence du signal reçu correspondant à un canal donné. Le code phase est nécessaire afin de générer un code PRN local qui est parfaitement aligné avec le code reçu tandis que la fréquence à son tour, affectée par un doppler variant entre  $\pm 5\text{KHz}$ , permet de générer une réplique locale utilisée afin d'enlever la porteuse du signal reçu.

Il existe trois méthode d'acquisition du signal (série, parallèle sur la fréquence, parallèle sue le code). Dans les trois méthodes, il s'agit d'une exploration des domaines temporel et fréquentiel discrétiser avec des pas prédéfinis, Pour chaque méthode le récepteur calcule la corrélation du signal reçu et avec une réplique retardée et modulée du code C/A.

Dans notre travail on s'intéresse à l'acquisition en série dont le synoptique correspondant est représenté par le schéma de la figure (1.12):





**Figure 1.12 :** Schéma de l'acquisition série

D'après cette figure, on constate que l'algorithme est basé sur la multiplication du signal reçu par un code PRN et une porteuse générée localement. Le générateur PRN génère une séquence correspondante à un satellite donné, cette séquence possède un code phase entre 1 et 1023 chips. Le signal reçu est multiplié par le code PRN puis multiplié par une porteuse générée localement. Cette dernière constitue le signal 'I' tandis que la multiplication avec la porteuse déphasée de 90° génère le signal 'Q'. I et Q sont intégrés sur un temps donné, qui est la longueur d'un code C/A donc 1ms, finalement ces deux voix sont mises au carré puis additionnées.

La sortie est la valeur de la corrélation entre le signal reçu et le signal généré localement. Si cette sortie dépasse un certain seuil prédéterminé on le localise puis on récupère la fréquence et le code phase correspondant.

En acquisition série, on a deux paramètres à balayer selon plusieurs valeurs :

- La fréquence qui doit balayer les valeurs possibles entre  $F_i - 5\text{KHz}$  et  $F_i + 5\text{KHz}$  avec un pas de 500Hz.
- Un code qui glisse sur les 1023 code phases différentes.

#### **4-Les services fournis dans le GPS:**

Le GPS fournit deux types de positionnements, le positionnement précis (**pps**) et le positionnement standard (**sps**). Seul le positionnement standard est librement disponible, le

**pps** est réservé à l'armée américaine.

#### ➤ **LE PPS**

Le PPS (précise positioning service) est un système de positionnement précis. L'erreur de positionnement maximale dans 95 % des cas est inférieure à 21 mètres en horizontale et à 27.7 mètre en vertical. L'heure peut être obtenue avec une précision de 100 nanosecondes.

Les signaux du **pps** sont transmis sur deux fréquences différentes, appelées L1, L2 et qui contiennent le code de précision ou p-code. Le p-code est généralement crypté, le mode A-S (anti-spoofing) est activé. Le signal L2 est également utilisé pour déterminer le retard introduit par les couches de l'ionosphère. Le PPS n'étant normalement pas accessible aux civils, nous ne décrivons pas ce système.

#### ➤ **LE SPS**

LE SPS (standard positioning service) est la version civile du GPS communiqué sur une seule fréquence L1, et qui contient le code d'acquisition dit "grossier"(C/A, coarse acquisition code), ainsi que les différents messages de navigation.

En cas de conflit, l'armée américaine peut supprimer totalement toute utilisation du GPS dans la zone de conflit, son fonctionnement restant inchangé en dehors de la zone de conflit.

## **Introduction :**

Connaitre la position était un besoin qui s'est de plus en plus exprimé depuis l'antiquité, notamment pour les navires, les voyageurs etc. A ces époques, seule la nature

offrait un moyen de positionnement par le biais du soleil ou des étoiles, on permettant ainsi de connaître le nord géographique. Ces moyens primaires de localisation donnée un positionnement de très faible précision. Au XX<sup>ème</sup> siècle, avec l'avènement des radiocommunications, la navigation astronomique utilisant la boussole et navigation naturelle utilisant les astres ont été abandonnés pour ouvrir les portes aux systèmes de radionavigation. Ces derniers ont exploité le progrès technologique qu'ont connu les radiocommunications, en particulier les communications par satellites. C'est dans ce cadre que le système américain NAVSTAR GPS était le premier système de navigation par satellite.

## **1-Principe:**

Le principe du positionnement GPS est très proche du principe de triangulation. On mesure la distance entre l'utilisateur et un certain nombre de satellites de positions connues.

Pour cela, le récepteur mesure la différence de temps entre l'émission et la réception du signal. Le signal voyageant pratiquement à la vitesse de la lumière, on peut appliquer la relation :

$$D=c.t$$

Avec

- **D** : distance entre le récepteur et le satellite (c'est en fait le rayon d'un cercle où le satellite serait le centre).
- **c** : vitesse de propagation des signaux radios (la vitesse retenue par convention pour le système GPS est  $c = 299\,792\,458 \text{ m.s}^{-1}$ ),
- **t** : durée de signal entre l'émission et la réception.

On obtient donc des "pseudo-distances" qu'il faudra corriger des perturbations naturelles.

Comme la longueur d'onde du signal codé est de 10 à 100 m selon le code utilisé, la distance absolue que l'on obtient n'est estimée qu'à quelques mètres près.

Connaissant la position des satellites ainsi que les pseudo-distances, on définit ainsi des sphères centrées sur les satellites et dont l'intersection donne deux positions : l'une sur le globe terrestre et l'autre dans l'espace (cette dernière sera éliminée).

Les données (code et phase) enregistrées par le récepteur GPS sur le terrain sont ensuite traitées par des logiciels qui prennent en compte les différentes sources d'erreurs dues aux perturbations naturelles.

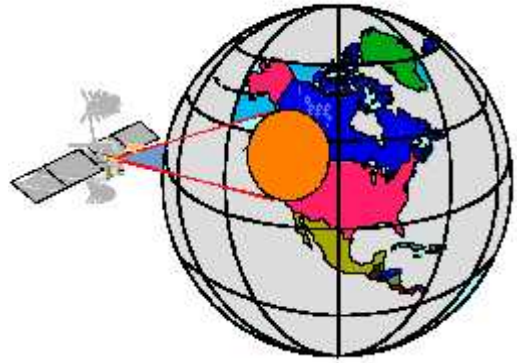
## **2-Fonctionnement de GPS:**

Les récepteurs GPS fonctionnent sur le principe de la « TÉLÉMÉTRIE ». Le récepteur calcule la distance entre un point sur terre et plusieurs satellites afin d'établir la latitude et la longitude de ce point.

## **2-1-Positionnement à partir du GPS:**

### **Un Seul Satellite Visible:**

Supposons que vous allumez votre récepteur GPS et qu'il capte le signal d'un satellite. Il vous donne sa position et sa distance de votre poste. Une seule distance ne vous aide pas beaucoup car tout ce que vous savez, c'est que vous vous trouvez quelque part dans un cercle dont la circonférence détermine votre distance du satellite. Vous êtes toujours perdu.



---

### **Deux Satellites Visibles:**

Si le récepteur capte un signal provenant d'un deuxième satellite, vous pouvez cerner un peu mieux votre position. Vous savez maintenant que vous êtes quelque part dans l'intersection de ces deux cercles. Vous ne savez toujours pas où vous vous trouvez exactement, mais votre situation s'améliore.



---

### **Trois Satellites Visibles :**

Maintenant, si votre récepteur capte Les signaux

D'un troisième satellite vous vous trouvez dans l'intersection des trois cercles Vous savez où vous vous trouvez, mais cela manque de précision!



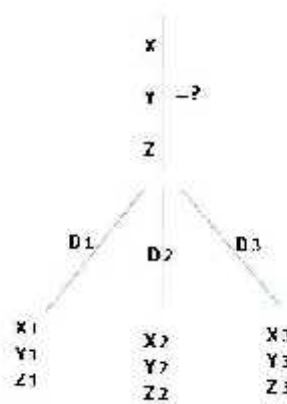
### **Quatre Satellites Visibles :**



Avec quatre satellites, vous obtenez votre Positionnement par point unique (absolu) et l'élévation du point. Voilà, vous savez où vous vous trouvez, à quelques mètres près!

## 2-2-Triangulation classique :

Toute position dans l'espace tridimensionnel est repérée par 3 points. Le centre du repère étant choisit arbitrairement.



$$D_i = \sqrt{(X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2 + (Z - Z_i)^2} \quad ; i = 1, 2, 3 \quad (2.1)$$

C'est le principe utilisé d'ordinaire par les instituts géographiques, en temps normal ce système s'appuie sur un réseau de balise terrestre fixe.

Ce type de positionnement est appelé positionnement en 2D, car il donne seulement une information concernant la latitude et la longitude. Il est donc nécessaire de faire intervenir un quatrième satellite dans le positionnement afin de déterminer l'altitude du récepteur GPS, on obtient alors un positionnement 3D.

Connaissant la distance qui sépare le récepteur du satellite et la position du satellite, il est possible de dessiner une sphère imaginaire autour de chaque satellite, sur laquelle se situe obligatoirement le récepteur.

L'intersection de ces deux sphères donne un cercle de position sur lequel se situe le récepteur. En continuant ainsi, on trouve que l'intersection de trois de ces sphères donne deux points, où est susceptible de se trouver le récepteur. L'utilité d'un quatrième satellite s'avère

alors de nouveau utile afin d'éliminer un de ces deux points. La position 3D est ainsi définie par quatre satellites, donc quatre sphères de positionnement.

Certains récepteurs sont capables d'affiner leurs calculs en utilisant plus de quatre satellites (ce qui rend les mesures plus faciles) tout en ôtant les sources qui semblent peu fiables. Avec une horloge assez stable, un récepteur peut calculer la position de satellite en 3D grâce à trois satellites seulement (cela reste encore un cas extrêmement rare). L'imprécision sera alors due au décalage de l'horloge.

### **3-Les différents types de mesure:**

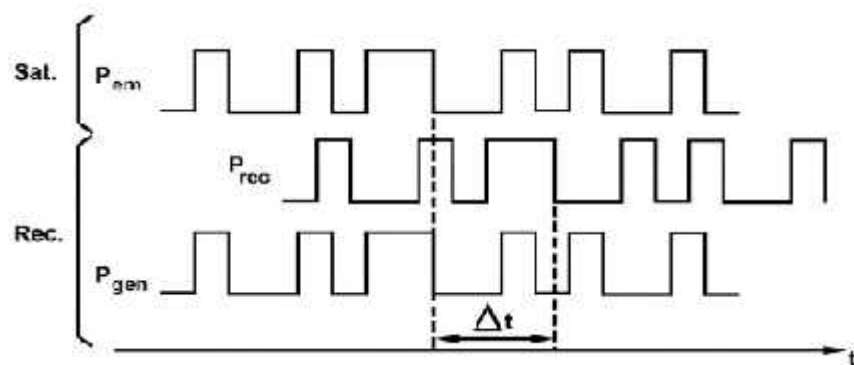
#### **3-1-La mesure de distance:**

Toute la présentation précédente reposait sur l'hypothèse que l'on connaissait exactement la distance séparant le satellite du récepteur, étudions comment calculer cette distance.

Le principe est simple : le satellite envoie un signal vers le récepteur, celui ci détermine le temps de transmission de ce signal et ainsi peut déduire la distance le séparant du satellite grâce à l'équation: **Distance = vitesse x temps**

La célérité des ondes transmises est proche de celle de la lumière : 300 000 km/s.

Il reste donc à déterminer le temps de transmission du signal. Pour cela, le récepteur et le satellite émettent au même moment une trame pseudo aléatoire identique appelée ainsi car elle est générée par des équations très complexe, la rendant ainsi unique. Une fois que cette trame sera reçue par le récepteur, celui-ci pourra la décaler dans le temps de façon à la faire coïncider avec celle qu'il a générée. La mesure du temps de transmission est déduite de ce procédé, et ainsi on peut connaître la distance séparant le récepteur du satellite.



**Figure 2.1 : Mesure de pseudo**



Pour valider tout le raisonnement qui précède, il faut que la mesure du temps soit extrêmement précise. En effet, si une erreur d'un millième de seconde est faite, cela produit une erreur de Position de 300km. A la vitesse de la lumière, une très grande précision est de rigueur. Les horloges internes des satellites sont très précises car il s'agit d'horloges atomiques au Césium, cependant celles des récepteurs sont beaucoup moins. La solution est d'utiliser un 4<sup>ème</sup> satellite.

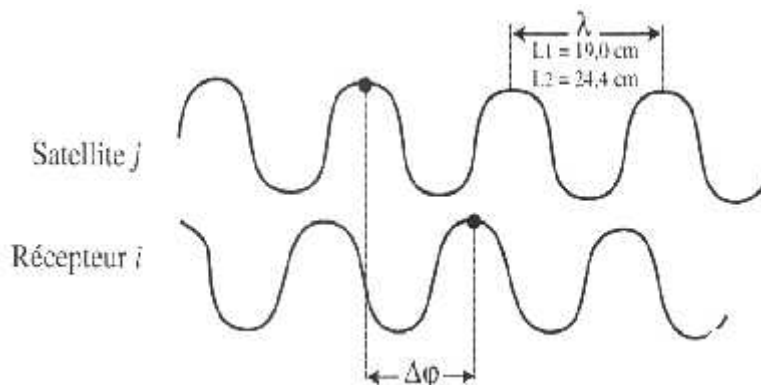
### **3-2-La mesure de phase:**

La donnée que l'on récupère à la sortie d'un récepteur GPS est la différence entre la phase de l'onde émise par un satellite et la phase d'un oscillateur interne au récepteur. La phase de l'onde reçue est affectée par l'effet Doppler (la variation de la fréquence du « son » perçu en fonction de la distance sa source et observateur) du au déplacement du satellite, la réfraction atmosphérique, et le bruit de mesure du récepteur.

On peut écrire la différence de phase  $\Phi_{ij}(t_j)$  au temps  $t$ , à la station  $j$ , et pour les satellites  $i$ , comme suit :

$$(2.2) \quad \Phi_{ij}(t_j) = \Phi_{ij}^r - \Phi_j^1 + n_{ij} + \Phi_b$$

- $t_j$  : Temps de la réception du signal à la station  $j$ .
- $\Phi_{ij}^r$  : Phase reçue à la station  $j$  en provenance du satellite  $i$ .
- $\Phi_j^1$  : Phase de l'oscillateur du récepteur  $j$ .
- $\Phi_{bruit}$  : Bruit aléatoire sur la mesure de phase.
- $n_{ij}$  : Un entier ( $n$  cycles) représentant l'ambiguïté de phase.



**Figure 2.2 : Mesure de phase**

Par ailleurs, le signal reçu au temps  $t_j$  est lié au signal émis au temps  $t_i$  par le  $i^{ème}$  satellite par relation suivante:

$$(2.3) \quad t_j = t_i + \tau_{ii}(t_j)$$

Dans laquelle  $\tau_{ij}$  est le temps de propagation qui dépend de la géométrie satellite station et des perturbations ionosphériques et troposphériques.

On en déduit que la phase de signal reçu au sol est reliée à la phase transmise par le satellite par:

$$(2.4) \quad \Phi_{ii}^r(t_j) = \Phi_i^t(t_j - \tau_{ii})$$

Cependant, si l'on compare les équations (2.2) et (2.4), on se rend immédiatement compte de la difficulté qu'il y a à employer les observations de phase plutôt que les pseudo-distances. Avec ces dernières, on mesure directement la distance satellite récepteur. Avec les observations de phase, le terme d'ambiguïté (nombre de cycles entiers) doit être estimé avant que l'on puisse tirer avantage de la précision de cette observation. L'estimation de l'ambiguïté mène à des complexités dans l'utilisation des observations de phase, inexistantes avec les pseudo-distances. Le tableau qui suit, résume les avantages et les inconvénients des deux types d'observations :

	<b>Pseudo distances</b>	<b>Observations de phase</b>
<b>Avantages</b>	Non ambiguës Simples	Possibilité d'une grande exactitude de positionnement
<b>Inconvénients</b>	Faible exactitude de positionnement	Complexité plus grande

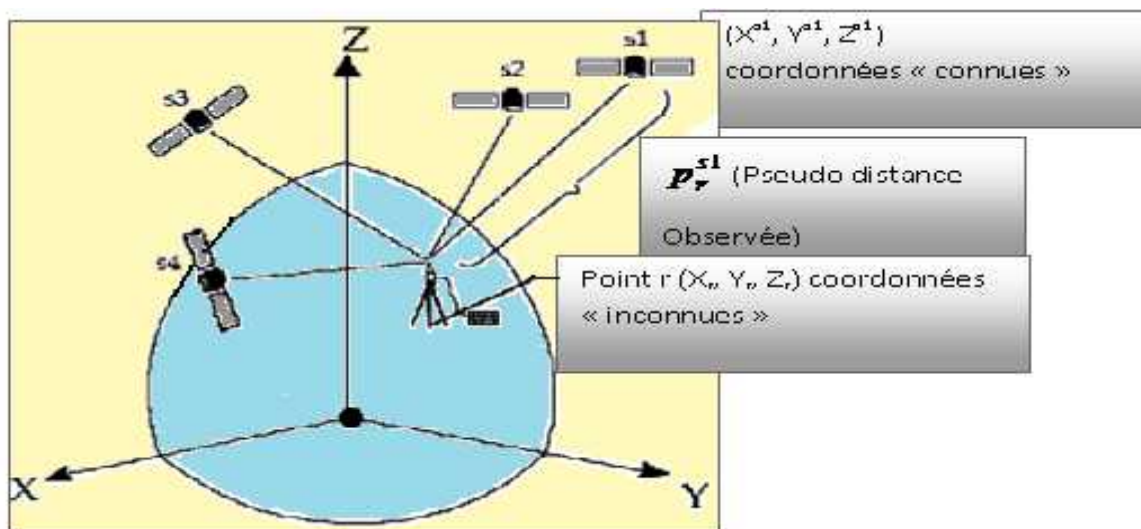
**Tableau 2.1 : Comparaison entre les deux types de mesures**

#### **4-Types de positionnement GPS :**

Jusqu'à présent, nous avons décrit les trois segments du GPS et les composantes des signaux diffusés par les satellites. Les principales méthodes de positionnement sont : Positionnement absolu et positionnement relatif.

#### **4-1-positionnement absolu :**

Le positionnement au moyen du GPS peut s'effectuer de façon absolue ou de façon relative. En positionnement absolu, les coordonnées d'un récepteur en un point (inconnu) sont établies relativement au cadre de référence des satellites d'après les positions (connues) des satellites GPS suivis. Le positionnement absolu est également dit positionnement autonome ou simplement positionnement par point unique (point positioning). Dans le positionnement relatif, les coordonnées d'un récepteur en un point inconnu sont établies relativement à celles d'un récepteur en un point connu.



**Figure 2.3 :** Positionnement autonome

La figure (2.3) illustre la notion de positionnement autonome. Grâce aux éphémérides, la position de n'importe quel satellite à n'importe quel moment dans le temps peut être calculée.

Sur la figure, s1, s2, s3 et s4 représentent quatre satellites différents qui sont suivis.

La position de ceux-ci est donnée par rapport au centre de la terre dans le système de coordonnées x, y et z, les coordonnées de s1 sont notées  $(X_{s1}, Y_{s1}, Z_{s1})$ , les coordonnées de r le point inconnu relativement au centre de la Terre sont  $(X_r, Y_r, Z_r)$ . La pseudo distance observée  $p_r^{s1}$ , permet d'établir la relation entre les coordonnées connues du satellite 1 et les

coordonnées inconnues du récepteur au moyen de l'équation d'un vecteur dans l'espace tridimensionnel :

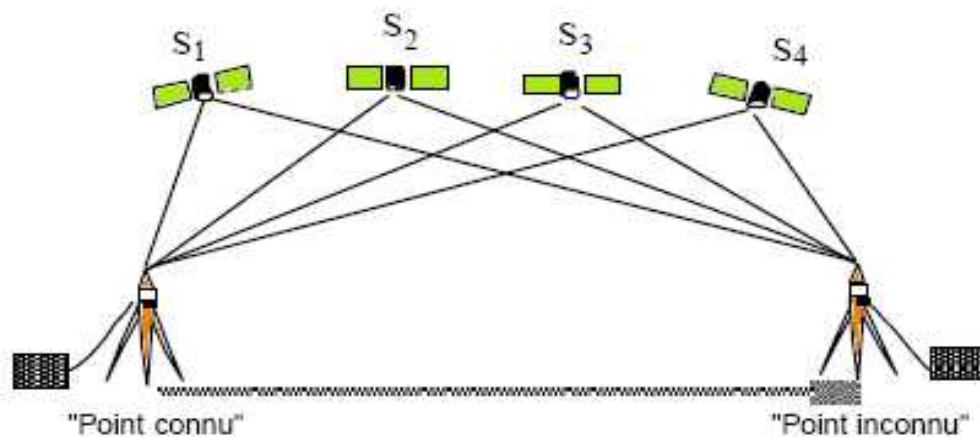
$$P_r^{s1} = \sqrt{(X^{s1} - X_r)^2 + (Y^{s1} - Y_r)^2 + (Z^{s1} - Z_r)^2} + \text{erreurs}$$

(2.5)

Une équation similaire à (2.5) décrivant la relation entre le satellite 1 et le récepteur, peut être formulée pour les différents satellites suivis. Grâce à un minimum de quatre satellites, toutes les inconnues ( $X_r$ ,  $Y_r$ ,  $Z_r$ ) et un terme relié à la synchronisation des horloges qui fait partie des erreurs) peuvent être calculées.

#### **4-2-Positionnement relatif :**

La notion de positionnement relatif est illustrée à la figure (2.4). Plutôt que d'établir la position d'un point sur la Terre par rapport aux satellites (comme c'est le cas en positionnement autonome), la position d'un point sur la Terre est établie par rapport à celle d'un autre point connu. L'avantage du positionnement relatif sur le positionnement autonome réside dans l'exactitude beaucoup plus grande qu'il permet, puisque la plupart des erreurs dans les observations GPS sont communes aux points (connu) et (inconnu) et peuvent être annulées durant le traitement des données.



**Figure 2.4 : Positionnement relatif**

Les expressions positionnement différentiel et positionnement relatif sont parfois employés indifféremment l'une pour l'autre. Toutefois, étant donné que le positionnement différentiel désigne plus souvent un type particulier de positionnement relatif, appliquant des corrections mesurées à un point de position (connue) aux observations effectuées en un autre, de position (inconnue),

## **5-Les sources d'erreurs :**

### **5-1-Les orbites :**

L'erreur d'orbite est la différence entre la position d'un satellite calculée au moyen des éphémérides diffusées et la position réelle du satellite dans l'espace. L'influence des orbites sur la détermination dépend du mode de positionnement, pour un positionnement absolu, l'erreur sur la position du satellite affecte directement la position de la station lorsqu'on utilise en temps réel les éphémérides radiodiffusées, on obtient un positionnement à 10m près. Lors d'un positionnement relatif, l'erreur introduite par les orbites sur la ligne de base est proportionnelle à la longueur de la ligne, les orbites radiodiffusées utilisées pour le positionnement en temps réel ont généralement une précision de quelques mètres, ce qui implique une erreur de plusieurs centimètres sur une ligne de base de 100 km.

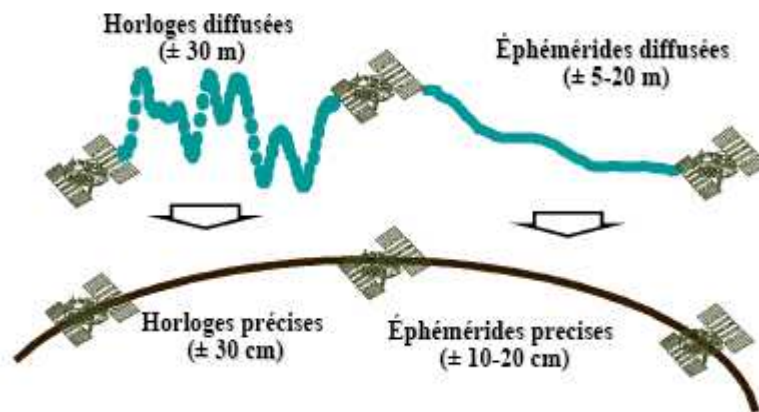


Figure 2.5: Erreurs d'éphéméride et d'horloge

### **5-2-Les dégradations volontaires du système :**

Les signaux émis par les satellites sont soumis à des dégradations volontaires visant d'une part à limiter l'utilisation civile du système GPS et d'autre part à en protéger l'utilisation militaire: l'accès sélectif (SA : *Selective Availability*) et l'anti-brouillage (AS : *Anti-Spoofing*)

#### **5-2-1-L'accès sélectif :**

L'accès sélectif (SA) consiste en au moins deux types de dégradation :

- Dégradation par déphasage de la fréquence d'horloge des satellites.
- Dégradation des données du message de navigation (éphémérides et paramètres d'horloge).

### **5-2-2-L'antibrouillage :**

L'antibrouillage (AS) consiste à ajouter au code P, sur  $L_1$  et  $L_2$ , le code W, classifié militairement et ainsi former le code Y. Une telle mesure permet d'éviter le brouillage volontaire du système par un utilisateur qui diffuserait un signal proche de celui du GPS et créant ainsi des erreurs de positionnement pour les autres utilisateurs. L'accès au code P et aux clefs de protection SA et AS correspond au service PPS de positionnement précis.

### **5-3-Les horloges :**

L'instabilité des horloges est la source d'erreur la plus importante dans les mesures GPS. Les horloges des satellites sont les plus stables et leurs dérives impliquent seulement des variations de 10 à 30 m sur la mesure de la distance satellite-station. Par contre la grande instabilité des horloges des récepteurs induit un décalage de 10 à 100m, la correction d'horloge satellite est modélisée à partir des données du message de navigation par contre la correction d'horloge récepteur est estimée lors du calcul.

### **5-4-L'ionosphère :**

Les effets induits varient entre moins d'un mètre et une cinquantaine de mètres. En positionnement relatif, lorsque les stations sont proches (quelques kilomètres) les variations ionosphériques observées sont corrélées et le calcul de la ligne de base n'est pas affecté. Pour des lignes de base plus importantes, les effets ionosphériques ne sont plus les mêmes sur les différents trajets satellite-station, une correction est alors nécessaire. Ces effets sont dépendants de plusieurs paramètres : la latitude (plus agité aux pôles et à l'équateur), l'activité solaire, le champ magnétique terrestre, la période de l'année, le jour et la nuit. L'ionosphère étant un milieu dispersif, la réfraction induite sur les signaux dépend de leurs fréquences. Cette propriété est utilisée pour la correction de ces effets sur les signaux GPS. En combinant linéairement les observations sur les deux fréquences ( $L_1$  et  $L_2$ ), on supprime au premier ordre le retard ionosphérique.

### **5-5-La troposphère :**

La troposphère est la couche basse de l'atmosphère, elle s'étend du sol jusqu'aux environs de 80 km d'altitude. C'est un milieu non dispersif pour les ondes de fréquence inférieure à 20 GHz, les combinaisons entre les deux fréquences  $L_1$  et  $L_2$  ne permettent donc pas de s'affranchir des hétérogénéités de propagation. La troposphère engendre un retard sur le signal correspondant à un allongement moyen de la distance satellite-station supérieur à 2 mètres. Cet allongement dépend de la température et de la pression le long du trajet du signal ainsi que de l'altitude de la station.

### **5-6-Les multi trajets :**

Sont introduites lorsque des signaux reçus directement se combinent à d'autres, réfléchis par des objets voisins, de telle manière que le vrai signal subit une interférence attribuable au signal réfléchi, ils ne sont pas modélisables, car ils dépendent de l'environnement de l'antenne.

Ils peuvent engendrer des interférences destructrices ou, fausser les calculs si le signal réfléchi est retenu par le récepteur, de plus, selon la direction de l'antenne et le coefficient de réflexion, le signal réfléchi peut être plus fort que le signal original.

Les mesures sur les codes sont plus sensibles et on peut avoir de 10 à 20m de différence en comparant des pseudo-distances à deux époques consécutives.

Pour les mesures de phases, en relatif, avec des distances courtes et une durée d'observation assez longue, l'erreur de trajet multiple est d'ordre du centimètre, l'effet augmente si l'on diminue le temps d'observation.

### **5-7-Les erreurs de précision :**

La position de l'observateur, ainsi qu'elle est calculée par le récepteur GPS, est fournie avec une précision de l'ordre de quelques mètres. Cette précision dépend d'un certain nombre de facteurs, l'un des plus significatifs étant le nombre de satellites (visibles). En outre, la configuration des satellites visibles c'est-à-dire les positions respectives des uns par rapport aux autres à une influence considérable sur la précision des résultats. En effet, plusieurs satellites groupés dans une même région du ciel conduisent à une précision plus faible que le même nombre de satellites judicieusement répartis sur la demi-sphère céleste au-dessus de l'observateur.

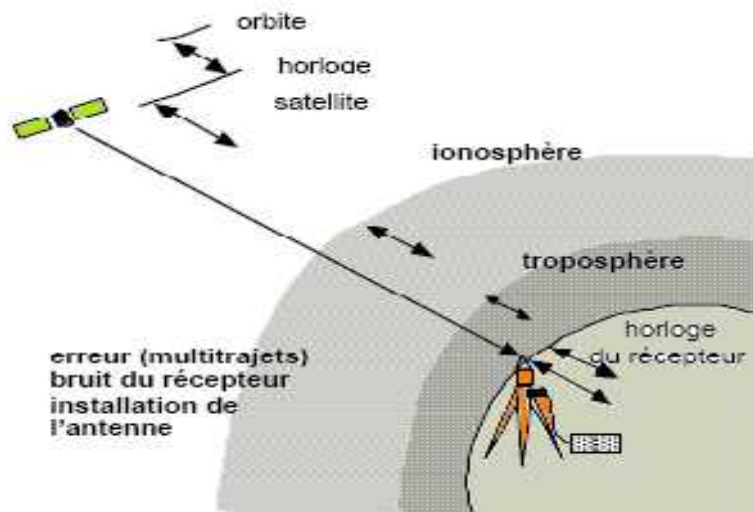


Figure 2.6 : Erreurs courantes

### **6-Les récepteurs GPS :**

Les récepteurs GPS peuvent être sous-divisés en trois catégories :

- Les récepteurs multicanaux

- Les récepteurs séquentiels
- Les récepteurs multiplex

**Les récepteurs multicanaux :** constituent le top-niveau des récepteurs GPS. Ils sont généralement utilisés pour des applications ultra précises ou dans des applications de positionnement dynamique.

**Les récepteurs séquentiels :** existent en version un ou deux canaux. Le deuxième canal est généralement utilisé pour l'acquisition d'un satellite initial et pour recevoir le message de navigation.

**Les récepteurs multiplex :** forment un compromis entre les récepteurs multicanaux et séquentiels. Ils peuvent malgré un principe de fonctionnement analogue à un récepteur séquentiel et grâce à une conception améliorée, faire un enchaînement entre les différents satellites en moins de 20 millisecondes.

La majorité des récepteur traite uniquement le code C/A (coarse acquisition) tandis que d'autres ont la capacité d'acquérir le code P (precision), un récepteur P acquiert une première fois le code C/A pour obtenir le temps GPS puis il accroche le code P.

Les récepteurs bi-fréquences estiment le retard ionosphérique améliorant de ce fait la précision des mesures. Un récepteur mono-fréquence (exploitant uniquement L1) utilise le modèle GPS de l'ionosphère pour élaborer ces corrections.

Il existe des utilisations spécifiques, pour les différents récepteurs GPS tels qu'en aéronautique ou en marine. Si le traitement des signaux GPS est identique pour un appareil d'une gamme donnée, les interfaces utilisateurs sont adaptées a l'application, un récepteur GPS dédiée à la navigation visualisera le cap ou la distance parcourue, en plus de la position, tandis qu'un récepteur de géodésie affichera les retards ionosphériques ou le biais d'horloge.

### **6-1-Structure générale d'un récepteur :**

Un récepteur GPS est constitué de sous-ensembles parfaitement délimités. On distingue :

- Une antenne.
- Un préamplificateur à faible bruit (LNA).
- Un module radiofréquence (RF).
- Un module numérique.
- Une interface utilisateur (clavier et afficheur).
- Une alimentation.

#### **6-1-1-L'antenne :**



L'antenne convertit l'énergie des ondes électromagnétiques en provenance des satellites en un courant électrique capable d'être traité par les circuits électroniques du récepteur. La taille et la forme de l'antenne sont critiques et doivent être adaptées aux signaux reçus. L'antenne peut capter uniquement L1 ou, L1 et L2.

### **6-1-2- Le préamplificateur à faible bruit :**

Le rôle du préamplificateur à faible bruit est d'amplifier le signal utile tout en minimisant le niveau du bruit thermique. Le niveau des signaux captés est très faible.

Le préamplificateur doit donc amplifier ces signaux sans dégrader de façon notable leur qualité. Ce sous-ensemble doit se situer à proximité de l'antenne pour limiter la dégradation du rapport signal à bruit. Un câble coaxial permet d'une part, de transmettre le signal au récepteur lui-même et d'autre part d'alimenter le préamplificateur.

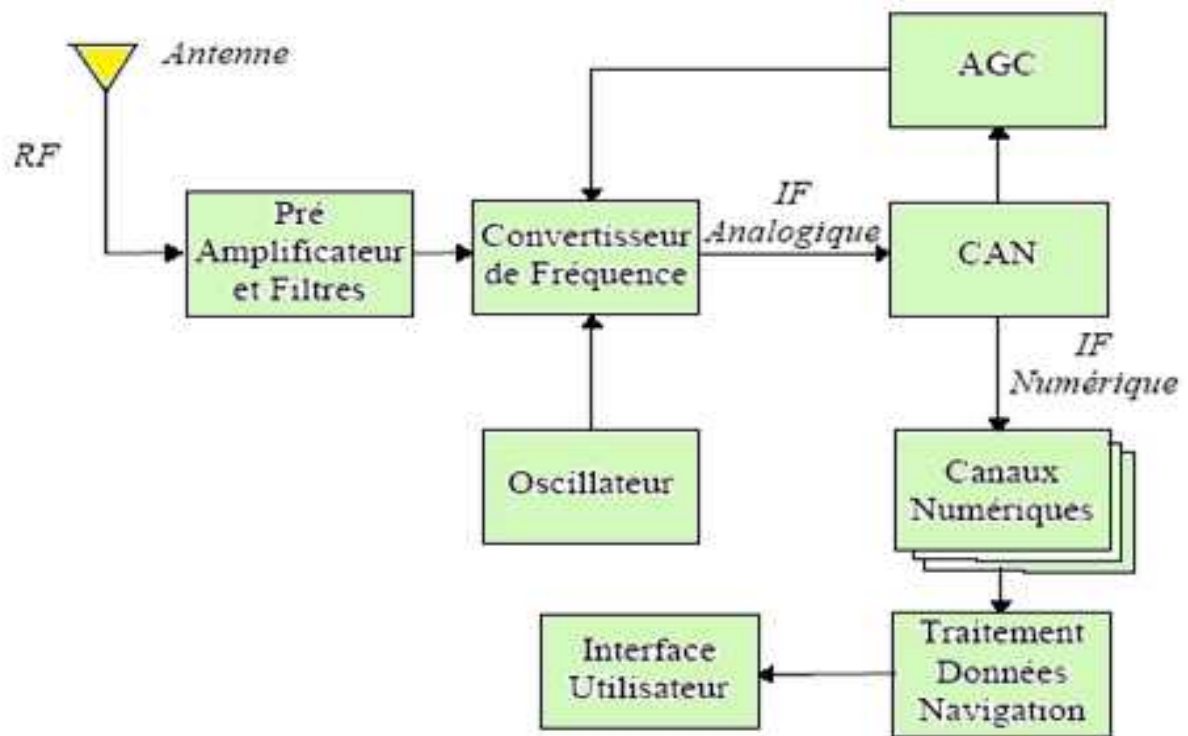
Un filtre en tête atténue les fréquences hors bande. Celui-ci peut être à large bande recouvrant les fréquences de L2 à L1 ou sélectif à double bande. Le choix du filtre dépend de l'application. Au minimum, un filtre non sélectif est nécessaire pour supprimer les fréquences images du signal avant la transposition des fréquences.

### **6-1-3-Le module RF :**

Le module RF assure la transposition des signaux L1 et L2 (le cas échéant) vers des fréquences plus faibles, appelées fréquences intermédiaires (IF). Ces IF permettent de traiter plus aisément le signal. La transposition est effectuée grâce au battement, ou produit du signal d'entrée avec une sinusoïde pure ; appelée oscillateur local (LO), générée par un synthétiseur de fréquence. Ce dernier est piloté par l'horloge à quartz du récepteur. Le signal IF contient la modulation du signal. Seule la fréquence porteuse a été décalée en préservant la dérive due à l'effet doppler. Les filtres IF offrent des bandes étroites adaptées au signal. Un dispositif de contrôle automatique de gain (GAC) régule le niveau du bruit (le signal est largement sous le bruit thermique avant sa compression par l'opération de corrélation). Le signal est numérisé après un échantillonnage, la conversion A/N a lieu directement en fréquence intermédiaires IF à quelques mégahertz pour les récepteurs C/A. ceci autorise une plus grande souplesse dans le traitement numérique pour pouvoir, par exemple prendre en compte d'autres satellites (Glonass...).

### **6-1-4-le module numérique :**

Les premières architectures des récepteurs GPS ont été analogiques. Les récepteurs d'aujourd'hui traitent numériquement le signal au plus tôt dans la chaîne. Les circuits numériques remplacent les circuits analogiques en fonction de leurs performances et de leur coût. Dans le module numérique, on distingue principalement un ou deux circuits ASIC (Application Specific Integrated Circuit) dédiés au traitement GPS et un processeur de signal. On trouve également les circuits traditionnels d'une structure programmé (mémoires, ports d'interface,...)



**Figure 2.7 :** Structure d'un récepteur GPS

### **Conclusion :**

Dans cette approche non exhaustive du GPS, nous pouvons retenir l'immense champ d'action de ce système et ses multiples applications. Cependant son utilisation courante avec un matériel classique ne permet pas d'obtenir des précisions supérieures à 50m suffisantes dans certains cas, mais pas dans tous.

### **Introduction :**

Le Système GPS a été déclaré opérationnel le 8 décembre 1993. Il présente un grand intérêt pour plusieurs communautés scientifiques et pour différentes raisons. L'utilisation du système de navigation par satellite GPS pose à l'heure actuelle au moins 4 problèmes (La disponibilité, La continuité de service, l'intégrité et la vulnérabilité aux brouillages).

Le système GPS n'est pas nécessairement plus vulnérable aux brouilleurs que les autres systèmes de radionavigation, mais la localisation de sa bande de fréquence d'opération et son principe de fonctionnement le rendent sensible à plusieurs types de brouilleurs et de perturbations.

Pour l'aviation Civile pose des problèmes liés à l'intégrité du système et à sa vulnérabilité au brouillage. L'intégrité peut être garantie, au moins partiellement, par des stations de contrôle terrestres additionnelles, par l'augmentation du nombre de satellites ou par un traitement au niveau du récepteur, tel qu'un couplage avec d'autres moyens de détection ou de navigation secondaire.

L'objet de ce chapitre est de recenser les sources potentielles de brouillage sur les signaux de GPS. Il est question alors du brouillage non Intentionnel et celui volontaire (Intentionnel) qui pourrait également être présent à cause des limitations imposées par les règles de cohabitation des systèmes dans les bandes considérées. Il faut savoir que la puissance nominale de réception des porteuses à l'entrée du récepteur est de l'ordre de

-160 dBW pour un angle d'élévation de  $5^\circ$  et en supposant un gain d'antenne du récepteur de '0' dB. Le faible niveau de ce signal fait qu'un nombre de signaux extérieurs d'origines diverses peuvent se retrouver à l'entrée du récepteur avec des niveaux comparables, voire largement supérieurs. Heureusement le gain de traitement apporté par la procédure de désétalement de spectre permet de réduire l'influence de ces brouilleurs.

## **1-Classification des brouilleurs :**

Il s'agit des brouilleurs retrouvés dans le domaine civil et des autres types de brouilleurs, on peut les classer selon leur largeur de bande:

- Brouilleurs à bande étroite: les raies parasites.
- Brouilleurs à bande semi étroite: 10 KHz à 100 KHz.
- Brouilleurs à bande large: plus de 100 KHz.

On peut faire, pour les brouilleurs GPS, une première distinction entre les brouilleurs intentionnels et les brouilleurs non intentionnels. Les premiers doivent être pris en compte pour les applications militaires, ce type de brouilleur ne sera pas considéré. On se limite ici aux problèmes concernant les récepteurs d'usage civil.

Les effets du brouillage sur un récepteur GPS est caractérisé par des puissances pour un signal brouillé en termes de :

- rapport signal à bruit (S/N)
- rapport brouilleur à signal (J/S).

On verra que les sources potentielles des brouilleurs pour une application normale sont nombreuses et qu'il est nécessaire de connaître les relations entre la puissance des signaux mise en jeu, les isolations entre émetteurs, les distances de brouillage.

## **2-Vulnérabilités d'un récepteur GPS :**

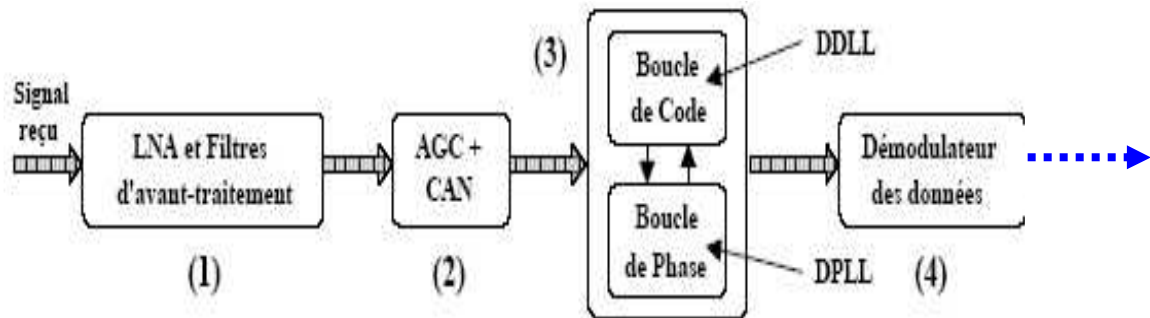
Cette section introduit l'architecture interne générique d'un récepteur GPS par l'identification de ses modules qui sont les plus vulnérables aux brouilleurs radiofréquences. La résistance aux brouillages dépendra de la structure du signal GPS, du design du récepteur ainsi que de l'architecture du système global.

Il existe plusieurs types de design de récepteurs GPS disponibles sur le marché qui utilisent différentes techniques de conversion en fréquence, d'acquisition de code, de maintien des boucles accrochées et de traitement du signal.

L'analyse qui suit est basée sur le schéma bloc de la figure (3.1) représentant l'ensemble des parties d'un récepteur GPS générique. Il existe quatre régions où le récepteur numérique est vulnérable.

1. L'étage (1) de réception RF comprenant un module d'amplification et de filtrage.
2. L'étage (2) un contrôle automatique du gain (AGC) et un convertisseur analogique numérique (CAN).
3. L'étage (3) la boucle de code (DDLL) qui isole un code particulier en provenance d'un satellite GPS.

4. L'étage (4) la boucle de phase (DPLL) qui maintient la phase de la porteuse placée en fréquence intermédiaire.
5. L'étage (5) de démodulation des données qui extrait le message de navigation.



**Figure 3.1 :** Ensemble des parties d'un récepteur GPS générique

### 2-1-Etage de réception RF :

Les brouilleurs captés par l'antenne rencontreront typiquement un amplificateur à faible bruit (LNA : low noise ampli) utilisé pour amplifier le signal GPS noyé dans le bruit.

Il y a deux types de brouillage peuvent être identifiées :

1. Des brouilleurs dans la bande GPS.
2. Des brouilleurs proches de la bande GPS.

➤ **Les brouilleurs dans la bande GPS :** contribuent à augmenter le niveau de bruit dans la bande passante du récepteur et à dégrader ainsi ses performances. Principalement les signaux tels que les harmoniques, les produits d'intermodulations ou simplement les bruits hautes fréquences contribuent aux brouillages des signaux GPS.

➤ **Les brouilleurs proches de la bande GPS :** peuvent perturber le récepteur en désensibilisant la chaîne RF (c'est-à-dire que les niveaux élevés de puissances reçues conduisent à une possibilité de désajustement du contrôle automatique de gain et à une perte de fidélité des mesures du signal GPS) ou en pénétrant l'étage de traitement du signal.

Le niveau de puissance des brouilleurs juste au dessus du niveau de puissance du signal GPS traversera facilement cet étage d'amplification, les brouilleurs de puissance moyenne peuvent amener l'amplificateur à travailler en région non linéaire. La sortie devient rapidement instable et l'amplificateur sature. A cause des signaux de brouillage, le signal GPS de faible intensité est soumis à un système non-linéaire et le fonctionnement dans ce régime,

même pour une courte période, entraîne des perturbations pouvant aller jusqu'au décrochage des boucles de maintien.

Du fait que l'amplificateur à faible bruit sature à un certain niveau, il peut être envisagé à cette étape, une technique de robustesse envers les signaux de puissances élevées.

Cette sensibilité de l'amplificateur à faible bruit due aux brouilleurs externes est une première précaution à considérer lors de la conception d'un récepteur GPS. Evidemment, cette puissance nécessaire pour causer une saturation de l'amplificateur varie selon la conception.

## **2-2-Vulnérabilité de la boucle de code :**

Le signal en provenance de l'étage de récepteur RF (antenne, LNA, filtre) entrera dans la section d'acquisition du code et de maintien de la synchronisation après que le signal ait traversé un AGC.

Encore une fois, selon les concepteurs des récepteurs GPS, les boucles de code et de phase peuvent être séparées ou imbriquées.

Dans notre modèle, le signal GPS en fréquence intermédiaire (FI) qui est échantillonné par le CAN rencontrera la boucle de code qui poursuit la phase de l'un des codes provenant des satellites GPS. La plupart des récepteurs actuels utilisent une boucle à verrouillage avance et retard (early-late DLL pour Delay Lock Loop).

La boucle de maintien du code réalise une poursuite par asservissement sur le maximum de corrélation. La corrélation du signal local de désétalement s'effectue sur la voie en retard. Les résultats de la corrélation sont comparés pour connaître le sens du biais.

La boucle de maintien du code a une bande passante faible (moins de 1 Hz) et c'est pourquoi elle peut fonctionner à des niveaux élevés de rapport brouilleur à signal (J/S). Elle constitue la section la plus résistante du récepteur, le bruit étant atténué dans un rapport égal au gain d'étalement suite à la corrélation.

Un brouilleur à spectre étroit sera en effet étalé par le code pseudo- aléatoire local multiplié par  $\sin(\tau/2)$  où

$\tau$ : Correspond à la différence de phase entre l'avance et retard.

Un corrélateur standard avec un délai entre la voie avance et retard d'une bribe

( $T_{bribe} = 2\tau = 1 \sim \text{sec}$  (microsecondes)) étale un brouilleur à spectre étroit en un spectre de raies d'enveloppe  $\frac{\sin(x)^2}{x^2}$  dont la largeur de bande du lobe principal est  $(1/\tau)$  (=2MHz).

Par contre, pour un corrélateur dont les voies avance et retard seraient espacées de 0.2 bride seulement, le même brouilleur serait étalé pareillement avec une largeur du lobe principal de 10MHz environ ; sont 5 fois plus efficace.

On note que le choix d'espacement entre les deux répliques 'Early' et 'Late' possède une influence sur les brouilleurs à spectre étroit.

D'où le bénéfice du contrôle de la précision du délai des codes de la boucle de désétalement mais en contre partie, le désavantage de fonctionner sur une largeur de bande plus large.

L'atténuation de la puissance du brouilleur causée par ce processus d'étalement est de l'ordre de :

- 24 dB pour un brouilleur à bande étroite.
- 60 dB pour un brouilleur large bande.

Mais dans le cas du brouilleur à bande étroite, ce gain d'étalement dépend aussi de la position fréquentielle et de la largeur de bande du brouilleur.

Pour un brouilleur large bande, l'utilisation d'un corrélateur étroit n'apporte pas de gain significatif, au contraire, du fait de l'élargissement de la bande passant.

Une boucle de code ne peut pas maintenir sa synchronisation lorsque la puissance de bruit est supérieure à la puissance du signal (après étalement). On définit typiquement le point de décrochage de la boucle de code par un seuil du rapport (J/S) de 0dB.

De cette façon, la puissance minimale du brouilleur nécessaire pour désynchroniser une boucle de code doit être à un minimum de 24dB supérieure à la puissance du signal utile (-160dBw) soit supérieure à (-136dBw) (avant étalement).

La limite du rapport (C/N) entre les phases d'acquisition et de maintien est de 6dB.

En d'autres termes, le signal utile doit être de 6dB supérieur pour l'acquisition, par rapport aux (-136dBw) nécessaires pour le maintien (ce qui implique un J/S limite de 6dB dans le cas de la boucle de phase).

### **2-3-Vulnérabilité de la boucle de phase :**

Il existe également différents types de configuration de boucle à verrouillage de phase, à chaque type est associée une largeur de bande d'opération. A l'intérieur de la boucle, le signal incluant le brouilleur est d'abord filtré avant d'être appliqué au VCO (voltage controlled oscillator) qui estime la phase de la porteuse du signal d'entrée. La bande passante

du filtre passe bas de la boucle de phase est très faible en comparaison de la largeur de bande des données (100Hz).

Ceci permet de minimiser les effets du spectre de données sur l'acquisition de la porteuse. La bande passante typique de la boucle de phase d'un récepteur GPS est de l'ordre de (1 à 10Hz).

En effet, la boucle d'acquisition du code GPS étale le brouilleur avant que le signal atteigne la boucle de phase. Ceci réduit de façon considérable la puissance d'un brouilleur dans la bande passante de la boucle de phase.

L'effet du bruit provenant du brouilleur étalé qui entre dans la boucle de phase dépend de la conception de la boucle et varie selon les concepteurs.

#### **2-4-Détection du message de navigation :**

L'étage final du processus d'acquisition d'un signal GPS mène à la démodulation des données de navigation. Le signal brouilleur à ce point été étalé par le code d'étalement local apportant un gain de 24dB. Sous des conditions normales d'opération, le rapport signal à bruit (S/N) à l'entrée du démodulateur est approximativement de 18dB.

Une analyse conservatrice permet de limiter le niveau des brouilleurs à 18dB au-dessous de la puissance du signal utile (désétalé), ce qui causera une augmentation maximum de 3dB sur le plancher de bruit et une augmentation sensible du TEB (taux d'erreur binaire).

Le démodulateur de données est caractérisé vis-à-vis du brouilleur en termes de TEB, il est évident que l'on aura une dégradation du TEB au fur et à mesure que l'on diminue le SNR (rapport signal sur bruit). On prend en générale comme référence pour établir un niveau minimum de performances, un TEB de ( $10^{-5}$ ). Une augmentation du TEB ne provient pas systématiquement de la perte du signal mais elle indique simplement une diminution de la qualité de la liaison BPSK (Binary Phase Shift Keying) modulation en phase.

Le cas extrême pour le démodulateur de données correspond à une puissance effective de brouillage (en sortie des boucles) égale à la puissance du signal utile, soit un signal à brouillage de 0dB (après étalement). La performance se dégradera graduellement entre ces deux limites (18dB et 0dB) ainsi, il est utile de définir le seuil du taux d'erreur binaire maximum en présence du brouilleur. De façon à réduire l'impact d'une seule erreur sur la démodulation des données de navigation, nous adoptons :



Une limite de TEB à  $(10^{-5})$ . Le rapport signal sur brouilleur (S/J) est approximativement de 13.9dB après désétalement.

## **2-5-Résumé d'un récepteur GPS générique :**

Le comportement des différents composants d'un récepteur GPS face aux brouilleurs a été examiné (résistance et faiblesses).

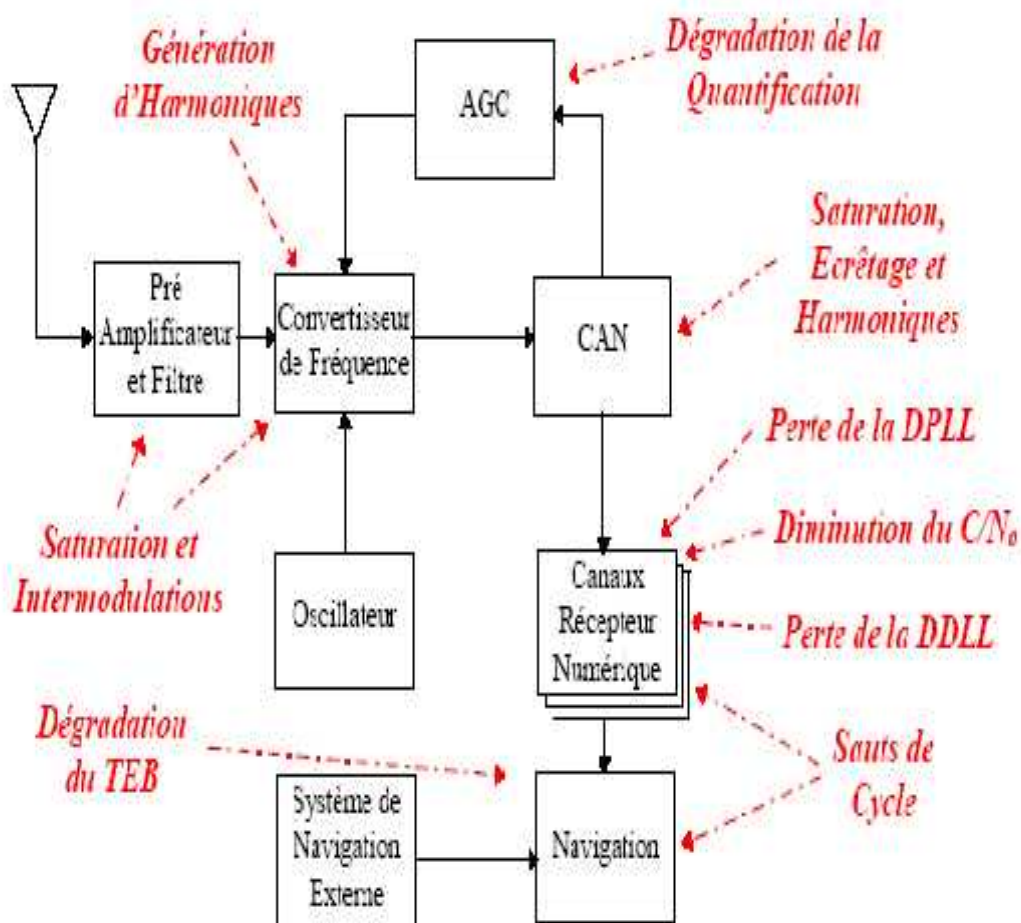
Les performances sur la précision de localisation se dégraderont graduellement en fonction de l'augmentation de la puissance du brouilleur étalé allant de 18dB sous la puissance du signal utile (à priori n'affectant aucun des performances) à une puissance égale au signal utile (échec du démodulateur et perte de synchronisation de la boucle de phase).

- Le gain d'étalement minimum a été fixe à 24dB pour les brouilleurs à bande étroite et les signaux à porteuse pure tandis que l'on peut s'attendre en pratique à un gain d'étalement de 60dB pour les brouilleurs large bande. Le rapport (S/J) équivalent minimum après désétalement a été spécifié à 13.9dB correspondant à un TEB de  $(10^5)$ . En deçà de ce seuil, les boucles de code et de phase se désynchronisent.
- Une autre grandeur à prendre en compte pour la caractérisation du signal brouillé est le rapport (J/S) entre la puissance du brouilleur et celle du signal GPS. En effet, le bruit thermique peut être considéré comme constant, pour évaluer les signaux brouilleurs, il est donc plus pratique de les comparer directement avec le niveau de puissance du signal GPS.
- La structure logique d'un récepteur GPS dont nous avons schématisé encore plus ces principales fonctions à la figure (3.1). il y a dans cette structure différents éléments qui sont sensibles au brouillage du signal, et qui présentent une robustesse différente. Il s'agit des éléments suivants, classé en ordre de sensibilité décroissante :
  1. le démodulateur de données.
  2. la boucle de porteuse (DPLL).
  3. la boucle de code (DDLL).
- Les boucle de code et de porteuse sont caractérisées en termes de seuil de maintien, c'est -à- dire le niveau de C/N minimum pour assurer l'accrochage de la boucle. On ne veut pas ici rentrer dans les détails du fonctionnement des boucles du récepteur; on

se limite à remarquer que le fonctionnement du récepteur est limité par le FLL (fréquence Lock Loop) de la boucle de porteuse. En effet, le décrochage de la boucle de porteuse implique immédiatement la perte du signal et donc le décrochage de la boucle de code. C'est pourquoi on retrouve souvent dans la littérature des spécifications sur le seuil de fonctionnement de la boucle DPLL qui déterminent le seuil de maintien du signal.

- A l'entrée du récepteur, la saturation du préamplificateur peut être la cause de la génération de produits d'intermodulation ou d'harmoniques des étages de conversion en fréquence. Un composant très important du récepteur, l'AGC peut dégrader considérablement le processus de normalisation du signal et sa quantification par le CAN sera moins efficace.

Plusieurs autres perturbations peuvent survenir à l'intérieur d'un récepteur. Malheureusement, ces perturbations ne sont pas toujours visibles et elles se répercutent principalement sur les points que nous venons de mentionner.



**Figure 3.2** : résumé de l'ensemble des perturbations potentielles

### **3-Characterisation Des Problèmes de brouillage :**

### 3-1-Equations fondamentales du brouillage :

On s'intéresse dans notre étude au signal GPS modulé en code C/A L'équation qui détermine rapport ( $C/N_0$ ) non brouillé en bande de base après les boucle est la suivante :

$$\frac{C}{N_0} = S_r + G_a - 10 \log (K \cdot T_0) - N_f - P_i \quad [\text{dB} - \text{Hz}] \quad (3.1)$$

$C/N_0$  : Rapport de puissance entre le signal utile et la densité spectrale du bruit thermique (dB-Hz).

$S_r$  : Puissance du signal GPS reçu (dBw).

$G_a$  : Gain de l'antenne de réception (dB).

$T_0$  : Température de référence du bruit thermique = 290(°K).

$K$  : La constante de Boltzmann =  $38 \cdot 10^{-23}$  (w-sec/k).

$10 \log (kT)$  : la densité de puissance du bruit thermique = -204(dBw-Hz).

$N_f$  : Le facteur de bruit de l'antenne + les pertes des câbles (dB).

$P_i$  : Les pertes d'implémentation + perte de conversion A/D (dB).

On peut considérer un récepteur muni d'une antenne de gain unitaire (0dB) et chiffrer pour un récepteur typique le facteur de bruit à 4dB et les pertes d'implémentation à 2dB.

Avec ces hypothèses, on obtient en bande de base un rapport en dB du  $\left[ \frac{C}{N_0} \right]_{NB}$  non brouillé

$$\left[ \frac{C}{N_0} \right]_N^d = -159.6 + 0 - (-204) - 4 - 2 = 38.4 \quad [\text{dB-Hz}] \quad (3.2)$$

Les mêmes conditions conduisent à une valeur du rapport  $\left[ \frac{C}{N_0} \right]_{NB}$  non brouillé

- de 35.4dB-Hz pour le code L1 P(Y)
- et 32.8 dB-Hz pour le code L2 P(Y)

En présence d'un brouilleur, on définit le rapport  $C/N_0$  équivalent par :

$$\left[ \frac{C}{N_0} \right]_e^d = -10 \log \left[ 10^{-\frac{\left[ \frac{C}{N_0} \right]_N^d}{1}} + \frac{1}{\frac{\left[ \frac{I}{B} \right]_d}{Q \cdot R_c}} \right] \quad [\text{dB} - \text{Hz}] \quad (3.3)$$

C'est la puissance du signal ramené à la puissance du bruit thermique augmentée de celle du brouilleur étalé (que l'on associe donc au bruit). Il s'agit du  $C/N_0$  vu par le récepteur après les boucles. A l'équation (3.3), on a indiqué :

$\left[ C/N_0 \right]_{NB}^{dB}$  : Le rapport de la puissance du signal utile dans 1Hz de bande Passante sur la densité de puissance du bruit thermique en absence de brouilleur (dB-Hz).

$[J/S]_{dB}$  : Le rapport de la puissance du brouilleur sur le signal utile (dB).

$R_C$  : Le rythme de brique du code PRN utilisé.

➤ Pour le code C/A 1.023 MHz.

➤ Pour le code P 10.23 MHz.

$Q$  : un facteur d'ajustement du signal d'étalement.

Le facteur  $Q$  tient compte de la largeur de bande des brouilleurs. Il vaut respectivement :

➤  $Q=1$  : pour les brouilleurs bande étroite.

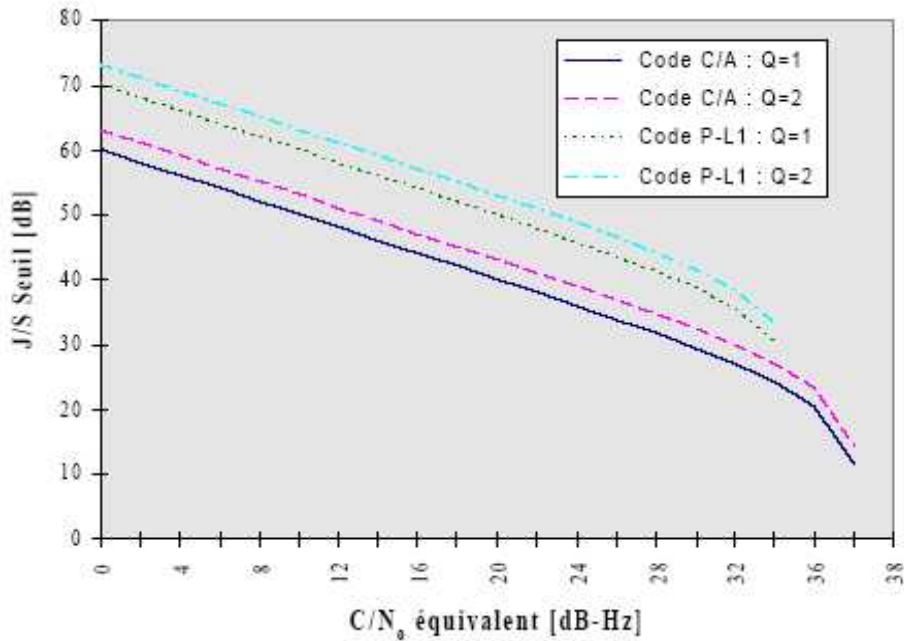
➤  $Q=1.5$  : pour les brouilleurs à bande semi étroite.

➤  $Q=2$  : pour les brouilleurs à large bande.

A l'aide de ces équations, on peut déterminer l'équivalent de la dégradation sur le rapport signal à bruit introduit par un brouilleur. Si on fixe un seuil de  $[C/N_0]_{\text{équivalent}}$  minimum pour le fonctionnement de notre récepteur, on peut déterminer le niveau de brouillage correspondant à partir de l'équation (3.3). En réorganisant l'équation, on obtient :

$$\left[ \frac{J}{S} \right]_s = 10 \log \left[ Q \cdot R_C \left[ \frac{1}{\frac{[C/N_0]_d^d}{1}} - \frac{1}{\frac{[C/N_0]_N^d}{1}} \right] \right] \text{ [dB]} \quad (3.4)$$

On rappelle que le rapport  $[C/N_0]_{\text{équivalent}}$  est toujours supposé connu puisqu'il s'agit de celui qui est mesuré par le récepteur. Les courbes correspondantes à l'équation (3.4) sont montrées à la figure (3.3).



**Figure 3.3 :** correspondance entre  $[C/N_0]_{\text{équivalent}}$  et  $[J/S]_{\text{SEUIL}}$

Pour évaluer l'influence des sources potentielles de brouillage, on peut donc se servir de l'équation (3.4). Si on établit un seuil pour le  $C/N_0$  équivalent, on peut à partir de celui-ci établir un seuil pour le rapport  $J/S$  au delà du quel le signal brouilleur devient nuisible.

La puissance du signal GPS étant connue, on peut évaluer le niveau de puissance absolu des brouilleurs potentiellement (dangereux). En effet, on a pour un seuil  $J/S$  fixé :

$$\left[\frac{J}{S}\right]_S = J_r - S_r \text{ [dB]} \quad (3.5)$$

Où on a noté avec  $j_r$  et  $S_r$ , les puissances reçues à l'antenne pour le brouilleur et le signal GPS. On obtient pour la puissance du brouilleur en dBw :

$$J_r^S = \left[\frac{J}{S}\right]_S + S_r \text{ [dBW]} \quad (3.6)$$

Le niveau de puissance absolue du brouilleur vaut donc :

$$J_r^S = 10^{\frac{[J_r^S]_{\text{dB}}}{10}} \text{ [W]} \quad (3.7)$$

Pour illustrer l'impact de cette petite analyse de puissance, on peut prendre l'exemple de la règle simple qui définit le seuil de maintien de la boucle de code avec un rapport :

$$\left[\frac{C}{N_0}\right]_e^d = 28.0 \text{ [dB - Hz]} \quad (3.8)$$

C'est-à-dire une perte de 10dB-Hz (par rapport au cas non- brouillé) (équation (3.2)).

En substituant cette valeur de  $\left[C/N_0\right]_{\text{équivalent}}$  on obtient les rapports de J/S suivants :

Brouilleur à Bande Etroite Q = 1	$\left[\frac{J}{S}\right]_{dB} = 31.7 \text{ dB}$
Brouilleur à Bande Large Q = 2	$\left[\frac{J}{S}\right]_{dB} = 34.7 \text{ dB}$

**Tableau 3.1 : Limite du  $\left[J/S\right]_{dB}$  pour un  $\left[C/N_0\right] = 28\text{dB-Hz}$**

Dans le cas d'une situation plus optimale où le récepteur serait construit de sorte qu'il puisse tenir un rapport  $C/N_0$  équivalent d'environ 18dB-Hz (perte de 20dB-Hz par rapport au cas non brouillé), soit pour un brouilleur à bande large un  $\left[J/S\right]_{SEUIL}$  d'environ 45dB, on obtient une puissance du brouilleur de :

$$J_r^S = 10^{\frac{[45 \pm 1]_{dB}}{1}} = 3.467 \cdot 10^{-1} \text{ W} \quad (3.9)$$

Ceci démontre bien que seulement 3pw d'un brouilleur large bande reçu à l'antenne d'un récepteur GPS et bien positionné en fréquence peut rendre ce récepteur inutilisable. Le tableau (3.2) suivant résume l'analyse qui précède pour différentes valeurs du seuil de maintien des boucles et pour les trois types de brouilleur mentionné.

Seuil de maintien des (dB)	types de brouilleur	code C/A L1 J/S
$C/N_0 = 28 \text{ dB}$	Q=1 : bande étroit	31.7
	Q=1.5 : semi - étroit	33.7
	Q=2 : bande large	34.7
$C/N_0 = 18.5$	Q=1 : bande étroit	41.6
	Q=1.5 : semi - étroit	43.3
	Q=2 : bande large	44.6

**Tableau 3.2 : Limite de  $\left[J/S\right]_{dB}$  pour les trois types de brouilleur**

On rappelle qu'il y a une différence entre le seuil de maintien en présence d'un brouilleur et le seuil d'accrochage du récepteur.

La détermination de ces deux seuils n'est pas facile, car à proximité des limites de fonctionnement le comportement du récepteur n'est pas linéaire, et de plus les seuils varient selon le type de récepteur. On peut définir que le seuil d'accrochage se trouve 6dB en dessus du seuil de maintien.

$$\left[\frac{J}{S}\right]_{a_i}^s \cong \left[\frac{J}{S}\right]_m^s + 6 \text{ [dB]} \quad (3.10)$$

Si un récepteur décroche, il se trouve de ce fait même dans l'impossibilité de raccrocher immédiatement dans les mêmes conditions de  $C/N_0$ , il va falloir s'éloigner du brouilleur pour récupérer une valeur de  $C/N_0$  suffisante pour la récupération du signal.

Cela peut introduire un retard assez important, allant de 10 secondes à quelques minutes selon la configuration de la plate-forme. Ceci est un aspect particulièrement critique pour les applications où l'on demande une grande fiabilité.

### **3-2-Influence de la largeur de bande :**

Il est important de mentionner quelques considérations de plus pour le code C/A qui ne s'applique pas au code P concernant la bande des brouilleurs.

On a vu à l'équation (3.3) que l'on introduit un facteur Q pour prendre en compte l'influence de bande du brouilleur sur le gain d'étalement. En effet, en bande de base le signal GPS se présente comme une sinusoïde modulée par les données transmises (avec modulation de type BPSK).

Si on considère un brouilleur de bande large  $B \gg 100 \text{ KHz}$ , l'étalement produit sur celui-ci un phénomène de recouvrement et de ce fait le brouilleur étalé se rapproche d'autant plus d'un bruit blanc que sa bande est large.

Dans ce cas le seuil de décrochage dépend non seulement de la puissance de la raie mais de sa position par rapport aux raies du spectre GPS. Si une CWI tombe entre deux raies du signal GPS elle ne posera pratiquement aucun problème à moins qu'elle entre dans la bande passante des filtres de boucle (code, phase et démodulation). Si elle se retrouve dans la bande passante du démodulateur qui est la plus large donc la plus vulnérable (50 Hz autour de la porteuse), on trouve alors pour le brouillage par CWI un seuil nettement inférieur au J/S tolérable que pour un brouilleur à bande large.

Ce phénomène est assez probable si on considère pour la fréquence de la CWI une distribution de probabilité uniforme, on obtient une probabilité de  $50/1000 = 1/20$  qu'elle

tombe dans la bande de modulation des données, et c'est souvent ce que l'on peut observer sur un récepteur GPS en laboratoire.

Le gain d'étalement par rapport à une CWI peut donc être réduit, selon le satellite et la fréquence, à une valeur comprise entre 21.3 et 24.1 dB.

Pour une CWI avec un J/S faible de 23dB la puissance du brouilleur après étalement peut donc être de l'ordre de celle du bruit thermique, correspond à un début de dégradation de la réception.

Un récepteur conventionnel pourra donc tolérer un rapport J/S de 23dB en présence d'un brouilleur large bande mais il sera perturbé s'il s'agit d'une CWI.

CODE C/A	FREQUENCE DE LA RAIE (KHz)	AMPLITUDE DE LA RAIE (dB)	CODE C/A	FREQUENCE DE LA RAIE (KHz)	AMPLITUDE DE LA RAIE (dB)
1	42	-22.71	20	30	-22.78
2	263	-23.12	21	55	-23.51
3	108	-22.04	22	12	-22.12
4	122	-22.98	23	127	-23.08
5	23	-21.53	24	123	-21.26
6	227	-21.29	25	151	-23.78
7	78	-23.27	26	102	-23.06
8	66	-21.5	27	132	-21.68
9	173	-22.09	28	203	-21.73
10	16	-22.45	29	176	-22.22
11	123	-22.64	30	63	-22.14
12	199	-22.08	31	72	-23.13
13	214	-23.53	32	74	-23.58
14	120	-22.01	33	82	-21.82
15	69	-21.9	34	55	-24.13
16	154	-22.58	35	43	-21.71
17	138	-22.5	36	23	-22.23
18	183	-21.4	37	55	-24.13
19	211	-21.77			

**Tableau 3.3 : Les cas de l'étalement de spectre pour les 37 codes C/A**

### **3-3-Critères de robustesse retenus :**

Dans les systèmes de communication conventionnelle (FDMA et TDMA) où la qualité des données (TEB) et le débit de transmission sont les critères essentiels, les effets des brouilleurs sont souvent limités par :

- Des contraintes d'énergie par bit.
- Une l'utilisation stratégie de modulation robuste.
- Et ou par la spécification des niveaux de brouillage acceptables.

Pour les applications de navigation par GPS pour le civil, il n'est pas suffisant de se limiter à l'étude seule de la perturbation des brouilleurs sur le processus de démodulation des données.



Des considérations plus poussées sur les phénomènes survenant au tout début de perturbation d'un brouilleur doivent être pris en considération, début de dégradation (sensibilité) jusqu'à la mise hors d'usage de la boucle de fréquence et de code.

La limitation de puissance des brouilleurs de type impulsionnel est assurée par le CAN et par d'autres dispositifs. Le brouilleur impulsionnel n'est pas nuisible exclusivement par sa puissance mais aussi par la durée totale de ses impulsions par la durée d'observation.

Pour notre analyse, on définit l'influence des perturbations sur un récepteur GPS selon les critères suivant :

- Début de dégradation du récepteur ( $S/N = -3\text{dB}$ ).
- Fonctionnement limite du récepteur pour la résolution de vitesse.
- Fonctionnement limite du récepteur pour la résolution de position
- Désensibilisation du récepteur (saturation).

A partir de ces états de perturbation, les spécifications en termes d'isolation des antennes entre la source du brouilleur et le récepteur GPS et les spécifications sur la réjection nécessaire par les filtres seront spécifiées.

- Pour un brouilleur large bande (BLB) défini comme un signal dont la largeur de bande est supérieure à 100KHz ( $G_{\text{étalement}} = 60\text{dB}$ ), le seuil du rapport de puissance entre le brouilleur et le signal ( $J/S$ ) avant étalement du spectre est résumé au tableau suivant :

PERTURBATIONS:	AVANT ÉTALEMENT
Début de Dégradation $\Delta S/N = -3\text{dB}$	$J/S = 25\text{ dB}$
Démodulation des Données (TEB $\leq 10^3$ )	$J/S = 30\text{ dB}$
Seuil de la DPLL	$J/S = 37\text{ dB}$
Seuil de la DDLL (Précision Doppler de 1m/s)	$J/S = 44\text{ dB}$

**Tableau 3.4 : Seuil de  $[J/S]_{\text{dB}}$  pour (BLB)**

- Pour ce qui concerne les brouilleurs à bande étroite incluant les CWI (continuous wave interference), on utilise un gain d'étalement de 24dB (du au spectre de raies discret du code C/A au lieu d'un spectre continu).

Perturbation	après desetatement	avant
desetatement		
Démodulation des Données	J/S = 14dB	J/S = 10dB
Seuil de la DPLL	J/S = 6dB	J/S = 18dB
Seuil de la DDLI	I/S = 0dB	I/S = 24dB

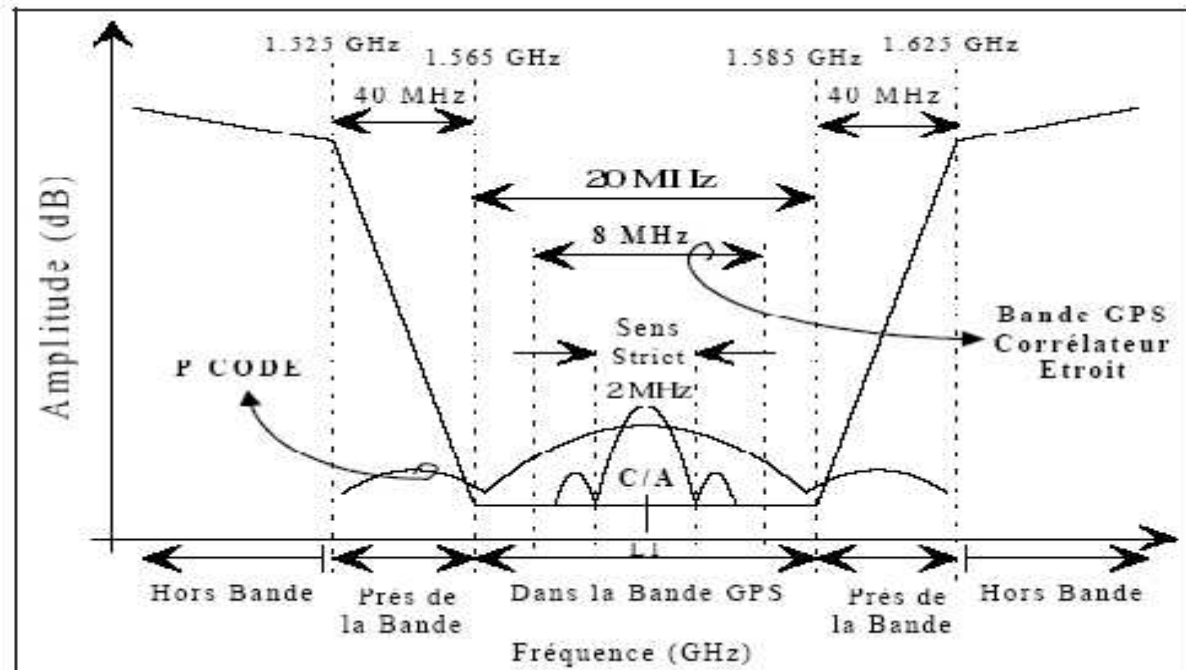
**Tableau 3.5 : Seuil de  $[J/S]_{dB}$  pour (BEB)**

Dans le cas d'une CWI, le début de dégradation ( S/N) n'est pas représentatif de la perturbation apportée au récepteur. En effet, la localisation fréquentielle de la CWI à l'intérieur de la bande de prédétection de 100Hz est l'aspect décisif sur le brouillage ou non du récepteur.

#### **4-Les Origines Des Brouilleurs :**

##### **4-1-Enumération des types de brouilleurs :**

Les types de brouilleurs nuisibles à un récepteur GPS ont été répertoriés selon leur origine en montrant bien leur position fréquentielle par rapport à la bande GPS. Dans un premier temps, les brouilleurs potentiel qui se situent à l'intérieur de la bande GPS sont énumérés et caractérisés puis ceux se trouvant à sens d'un récepteur avec corrélation étroite à plus ou moins 4MHz de la fréquence L1 (1575.42MHz) soit de (1571.42 à1579.42 MHz).



**Figure 3.4 : Définition des régions fréquentielles du système GPS**

On définit le spectre en fréquence du signal GPS comme le montre la figure (3.4) :

- Les récepteurs de haute qualité (traitant par exemple le multitrajet) utiliseront une bande plus large par exemple sur 20MHz.
- Un récepteur GPS à corrélateur étroit utilisera typiquement les 8MHz autour de L1.
- Les récepteurs bons marchés sont définis au sens strict comme des récepteurs qui utilisent seulement le lobe principal du signal GPS (code C/A).

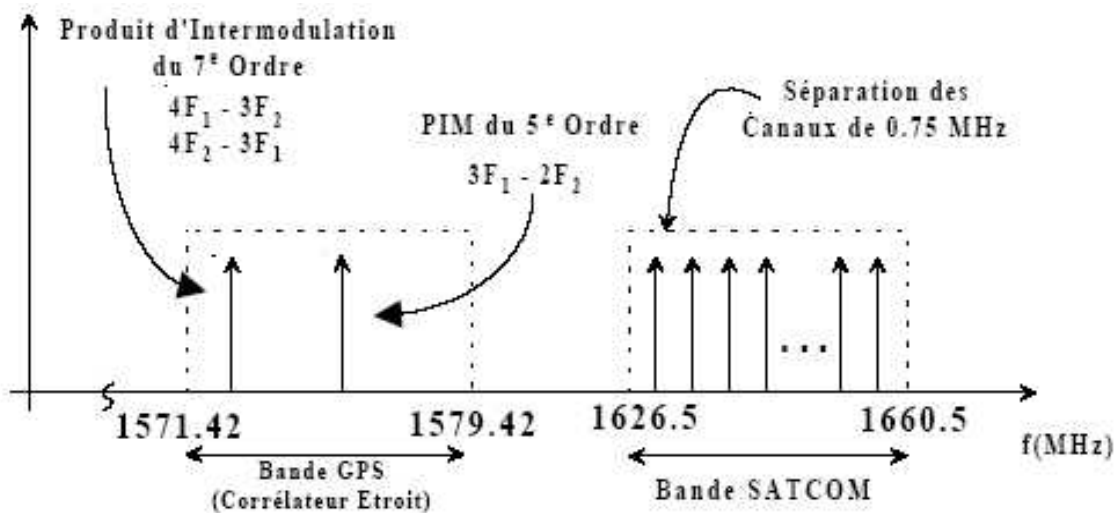
Il existe plusieurs autres candidats potentiels à la génération d'une source de brouillage pour les applications GPS. Ceux-ci peuvent être obtenus en divisant une bande de fréquence à protéger par l'ordre de l'harmonique potentiellement nuisible. Le tableau suivant identifie l'origine de la source de brouillage en fonction de l'harmonique nuisible.

La bande de fréquence spécifiée dans le tableau (3.6) indique quels types de service utilisant ces fréquences auront l'harmonique indiquée dans le spectre GPS.

<b>ORDRE DE L'HARMONIQUE</b>	<b>BANDE FREQUENTIELLE CONSIDEREE (MHz)</b>	<b>USAGE</b>
<b>L1</b>	<b>1571.42 - 1579.42</b>	<b>C/A-GPS</b>
2 <sup>e</sup>	785.71 - 788.71	UHF TV
3 <sup>e</sup>	523.807 - 526.473	UHF TV
4 <sup>e</sup>	392.855 - 394.855	Mobile/Station
5 <sup>e</sup>	314.284 - 315.884	Mobile/Station
6 <sup>e</sup>	261.903 - 263.237	Mobile/Station
7 <sup>e</sup>	224.488 - 225.631	Radiodiffusion
8 <sup>e</sup>	196.427 - 197.428	VHF TV
9 <sup>e</sup>	174.602 - 175.491	VHF TV
10 <sup>e</sup>	157.142 - 157.942	VHF Maritime
11 <sup>e</sup>	142.856 - 143.584	VHF Militaire
12 <sup>e</sup>	130.952 - 131.618	VHF COM
13 <sup>e</sup>	120.878 - 121.494	VHF COM
14 <sup>e</sup>	112.244 - 112.816	VOR/ILS
15 <sup>e</sup>	104.761 - 105.295	FM
16 <sup>e</sup>	98.214 - 98.714	FM

**Tableau 3.6 : Source et services des brouilleurs fonctions des harmoniques**

## 4-2-Brouillage par les Emetteurs SATCOM :



**Figure 3.5 :** Représentation spectrale de brouillage par les communications SATCOM

Ce type de brouilleur est considéré comme la source de brouillage la plus néfaste au bon fonctionnement des boucles internes d'un récepteur GPS. Leurs origines proviennent de deux sources :

- Soit des émetteurs SATCOM à bord du même mobile que le récepteur GPS.
- Soit des émetteurs SATCOM provenant d'un autre mobile.

La puissance des canaux dans la bande GPS varie selon plusieurs facteurs (demande, période de temps, durée de la communication, etc....).

Les communications SATCOM utilisent la bande de fréquence (1626.5 – 1660.5MHz) comme montre la figure (3.5). La largeur de bande des canaux est de 20KHz et ils sont espacés en fréquence de 0.75MHz.

La PIRE moyenne est de 18dBw et la réjection minimale est de 100dB dans la bande L1.

Les émetteurs SATCOM génèrent plusieurs produits d'inter modulation (PIM) qui peuvent tomber à l'intérieur de la bande GPS. Les canaux ( $f_1 = 1626.5$  MHz et  $f_2 = 1652$  MHz) génère des PIM du 5<sup>e</sup> Ordre ( $3f_1 - 2f_2 = 1575.5$  MHz) qui sont directement à l'intérieur de la bande L1.

Les deux causes telles les PIM des SATCOM et la proximité de leurs bandes sont considérées comme de réelles sources de perturbation potentielle.

La première partie de notre analyse traite les interférences provenant des PIM et cette analyse est suivie des problèmes dus à la proximité de la bande SATCOM avec celle du GPS.

#### 4-2-1-Brouillage par d'inter modulation des SATCOM :

Les produits d'inter modulation des SATCOM peuvent être considérés comme des brouilleurs larges bandes au sens du GPS puisque la porteuse du SATCOM est seulement utilisée à des fins de synchronisation.

Pour l'analyse d'un brouilleur à bande étroite, la probabilité d'une intermodulation due à une CWI est négligeable. Un calcul simple permet de montrer que l'isolation entre les deux antennes doit respecter l'équation (3.11) pour le cas de la première perturbation.

$$ISO = P_j^{TX} - R_j - R - G_e - (-204) - F_b \quad (3.11)$$

$P_j^{TX}$  : Puissance transmise du brouilleur.

$R_j$  : Réjection à l'émetteur.

$ISO$  : Isolation de l'antenne.

$R$  : Réjection des signaux hors bande GPS (0dB si le brouilleur est dans la bande GPS).

$S$  : Signal GPS (-160dBw pour le code C/A).

En utilisant (3.11) avant désétalement et pour les données suivantes :

$$R_j = 100\text{dB} \quad P_j^{TX} = 18\text{-}24\text{dBw} \quad S = -160\text{dBw} \quad R = 0\text{dB} \quad F_b = 3\text{dB} \quad G_{\text{étalement}} = 60\text{dB}$$

	DEBUT DE DEGRADATION $\Delta(S/N) = -3\text{dB}$	SEUIL DE DEMODULATION DES DONNEES	SEUIL DE LA DDLL
C/A	ISO > 35dB	ISO > 24dB	ISO > 10dB

**Tableau 3.7 : Isolation entre l'antenne du récepteur GPS et SATCOM placé sur le même mobile.**

Ces mesures ont été obtenues pour une séparation d'antenne de 1 à 3mètres. Habituellement, cette distance est supérieure à 3mètres et il peut être conclut suite à notre analyse, qu'il y a une très faible probabilité de brouillage du au PIM d'un récepteur GPS par l'émetteur SATCOM à bord de l'avion. De plus grandes que les 50dB d'isolation nécessaire. Après calcul, la distance de brouillage est de 5mètres et nous concluons que l'on peut écarter les problèmes d'inter modulations en provenance des émetteurs SATCOM.

#### 4-2-2-Brouillage du à la Proximité des Bandes :

Cette analyse concerne la spécification de la réjection de la bande SATCOM nécessaire par le filtre RF d'un récepteur GPS. En supposant les mêmes équations que précédemment (3.11) et les paramètres suivants :

$$R_j = 0\text{dB} \quad P_j^{TX} = 18\text{dBw} \quad S = -160\text{dBw} \quad F_b = 3\text{dB} \quad G_{\text{étalement}} = 60\text{dB} \quad ISO = 50\text{dB}$$

On obtient le tableau (3.8) qui représente un résumé de l'analyse du scénario où l'émetteur SATCOM serait à l'intérieur du même mobile. Il s'agit en fait de l'atténuation nécessaire par le filtre du récepteur GPS pour s'assurer des rapports S/N définis au tableau (3.4).

Une de nos conclusions est qu'il faut resserrer la bande du filtre GPS et toutes spécialement aux alentours de la fréquence de 1626.5MHz.

C/A	DEBUT DE DEGRADATION $\Delta(S/N) = -3dB$	SEUIL DE DEMODULATION DES DONNEES	SEUIL DE LA DDLL
Réjection	R > 109 dB	R > 98 dB	R > 84 dB

**Tableau 3.8 : Spécification de la réjection de la bande SATCOM par le filtre GPS**

Le tableau (3.9) montre une analyse de la distance de brouillage (avec R=40dB) due à la proximité de la bande SATCOM en utilisant une réjection du filtre GPS de R=40dB à 40MHz de L1. Nous avons utilisé (3.12)

$$\frac{J}{S} = P_j^I - R_j - 20 \log\left(\frac{4fd}{\lambda}\right) - R - S - G_e \quad (3.12)$$

$\frac{J}{S}$  : Rapport de puissance entre le brouilleur et le signal utile.

$20 \log\left(\frac{4fd}{\lambda}\right)$  : Perte en espace libre.

Avant étalement de spectre ainsi que l'équation (3.11) où isolement entre les antennes est remplacée par les pertes en espace libre :

$$20 \log\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) \geq P_j^I - R_j - R - G_e - (-204) - F_L \quad (3.13)$$

C/A	DEBUT DE DEGRADATION $\Delta(S/N) = -3dB$	SEUIL DE DEMODULATION DES DONNEES	SEUIL DE LA DDLL
D <sub>Brouillage</sub>	13500 m	3800 m	760 m

**Tableau 3.9 : La distance de brouillage due à la proximité de la bande SATCOM**

Il s'agit de la situation la plus nuisible provenant de la proximité des deux bandes. Le préamplificateur du récepteur GPS sature et travaille en région non linéaire.

Une attention particulière lors de la conception des émetteurs doit être portée sur le point de compression à 1dB, l'isolation de l'antenne et la réjection de la bande SATCOM.

**En conclusion :**

Pour les émissions SATCOM, on note que le problème résultant de l'émission d'une ou plusieurs fréquences au même temps peut être éliminé si des précautions sont prises sur les équipements placés dans l'avion.

Le système SATCOM pour le domaine de l'avionique utilisée comme moyen principal de communication entre les régions sera considérablement nuisible pour un récepteur GPS du à la proximité des bandes d'opérations.

Ce problème peut être résolu par une réorganisation de la bande de fréquence.

Une autre solution est d'interdire l'usage du SATCOM en région d'approche ou d'atterrissage.

- De limiter les puissances transmises.
- Ou d'insérer des filtres anti-brouilleurs.

#### **4-3-Brouillage par les harmoniques des stations de TV :**

**Il existe un minimum de (6) six canaux de TV qui génèrent des harmoniques dans la bande GPS. Le tableau (3.10) montre les bandes de fréquence utilisées par ces canaux de TV français (en France) et les compare avec canaux de TV américains équivalents (Etats - Unis). Tableau 3.10 : Les bandes de fréquence utilisées par les canaux de TV**

CANAUX	PIRES		EQUIVALENTE
	VHF	UHF	
		Vidéo	Audio
		55 dBW	48 dBW
		67 dBW	60 dBW
Canal 4	174-182 MHz	VHF 7	174-180 MHz
Canal 6	190-198 MHz	VHF 10	192-198 MHz
Canal 27	518-526 MHz	UHF 22	518-524 MHz
Canal 28	526-534 MHz	UHF 23	524-530 MHz
Canal 60	782-790 MHz	UHF 66	782-788 MHz
Canal 61	790-798 MHz	UHF 67	788-795 MHz

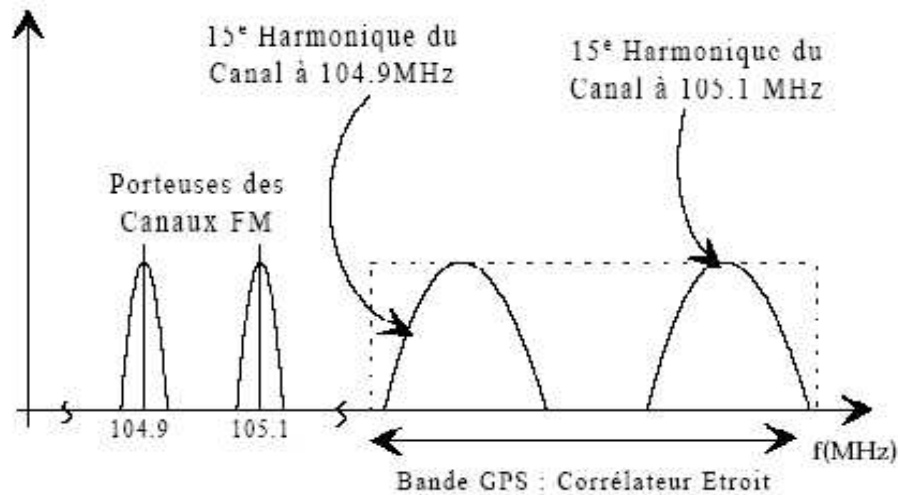
**Tableau 3.11 : Les PIREs maximums typiquement émis par une station de TV**

On voit que les émissions TV sont de véritables sources de brouillage pour le récepteur GPS. Les restrictions actuelles sont insuffisantes pour assurer une prévention des récepteurs civils contre le brouillage des harmoniques provenant de certains canaux de TV. Le problème pourrait être résolu en partie par des pressions locales aux stations de TV en vue de l'installation de filtres RF.

Mais à cause de très fortes puissances mises en jeu et les contraintes parfois relâchées par certains pays, il est nécessaire d'installer des techniques de robustesse dans les récepteurs GPS.

#### **4-4-Bouillage par les Harmoniques de la diffusion F.M :**

Plusieurs fréquences provenant de la diffusion FM (87.5 à 108MHz) constituent des sources de brouillage potentiel pour un récepteur GPS. La figure (3.6) qui montre la représentation spectral des canaux (FM) situés aux fréquences 104.9 et 105.1 MHz ayant par exemple leur harmonique du 15<sup>e</sup> ordre dans la bande GPS.



**Figure**

La représentation spectrale des canaux (FM)

**3.6 :**

Le tableau (3.12) montre les bandes de fréquence des émetteurs FM avec leurs harmoniques correspondantes entrant dans la bande GPS d'un corrélateur étroit ( $L1 \pm 4\text{MHz}$ ).

BANDE(MHz)	Harmoniques FM Potentiellement Nuisibles
104.3 - 105.7	15 <sup>e</sup>
97.8 - 99.1	16 <sup>e</sup>
92.1 - 93.2	17 <sup>e</sup>
87.5 - 88.1	18 <sup>e</sup>

**Tableau 3.12 : Harmonique nuisibles FM pour la bande GPS L1**

Les canaux FM sont espacés de 150KHz et la puissance de transmission du canal FM est de 50dBw. Nous faisons ici la même pré analyse de la distance de brouillage des harmoniques FM lorsque la puissance de l'harmonique atteint celle du bruit thermique à l'antenne.

La dégradation du signal GPS due à ces canaux FM intervient lorsque le récepteur embarqué dans un mobile se situe à une distance telle que :

Pour le canal à 104.9MHz :

$$50\text{dBW} - 80 + 10 \log(0.25) - 20 \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) \geq -136 \text{ dBW}$$

Pour le canal à 105.1MHz :



$$50\text{dBW} - 80 + 10 \log(0.5) - 20 \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) \geq -136 \text{ dBW}$$

Le tableau (3.13) est une analyse de la portée des brouilleurs FM en fonction de la puissance de l'harmonique lors de son réception à l'antenne GPS.

En résumé, ce type de brouilleur devient un problème pour un récepteur GPS lorsqu'il se situe à l'intérieur d'un rayon de 2Km de la source d'émission FM. Aucune technique de robustesse n'a encore été proposée jusqu'à maintenant.

En utilisant notre modèle d'analyse des brouilleurs, les résultats sont sensiblement les mêmes mais plus précis. Les harmoniques FM sont considérés au sens GPS (C/A).

Comme des brouilleurs larges bandes. L'analyse de la distance de brouillage est résumée au tableau (3.14) en employant les paramètres suivants dans nos calculs :

$$R_j = 80\text{dB} \quad P_j^{TX} = 50\text{dBw} \quad S = -160\text{dBw} \quad R = 0\text{dB} \quad F_b = 3\text{dB} \quad G_{\text{étalement}} = 60\text{dB}$$

	DEBUT DE DEGRADATION $\Delta(S/N) = -3\text{dB}$	SEUIL DE DEMODULATION DES DONNEES	SEUIL DE LA DDLL
C/A	5380 m	1515 m	300 m

**Tableau 3.14 : Analyse de la distance de brouillage pour les harmonique FM**

Distance entre le Récepteur et la Source F.M. (m)	Niveau de Puissance de l'Interférence au Récepteur (dBW)	
	Signal à 104.9 MHz	Signal à 105.1 MHz
200	-118.5	-115.4
400	-124.5	-121.5
600	-128	-125
800	-130.5	-127.5
1000	-132.4	-129.4
1200	-134	-131
1400	-135.4	-132
1600	-136.5	-133.5
1800	-137.5	-134.5
2000	-138.5	-135.5
2200	-139.3	-136.3

**Tableau 3.13 : La portée des brouilleurs FM en fonction de la puissance de l'harmonique**

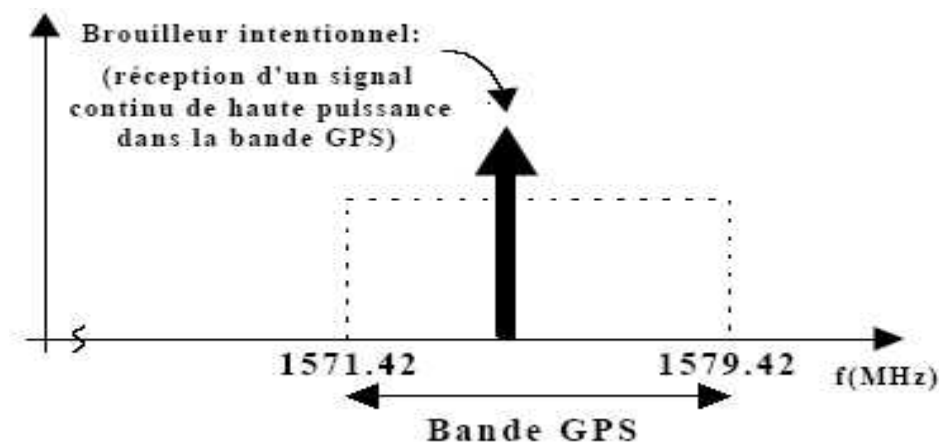
**En conclusion :**

Une solution serait d'interdire par exemple l'utilisation d'émetteurs FM à l'intérieur d'un périmètre de 5Km autour d'un aéroport.

Cette solution n'étant pas toujours réalisable facilement, on peut également penser à augmenter la réjection des harmoniques à 100dB ce qui porterait la distance de brouillage à 500m.

#### **4-5-Brouillage Intentionnel :**

Par soucis d'exhaustivité, on donne ici quelques indications sur le brouillage intentionnel bien que ce ne soit pas l'objet de cette thèse. La figure (3.7) montre une représentation d'un scénario de brouillage intentionnel. Il ne s'agit que de recevoir à l'antenne du récepteur GPS un signal de forte puissance.



**Figure 3.7 :** Spectre d'un brouilleur intentionnel

Un signal brouilleur constant et de puissance suffisante peut détruire la réception d'un signal GPS dans une zone donnée. Le rayon de perturbation centré sur la source du brouilleur est fonction de la puissance d'émission et de la fréquence centrale du brouilleur.

Si l'on assume une antenne omnidirectionnelle dont le gain est 1, le rayon de perturbation est donné par la formule suivante :

$$d = \frac{\lambda \cdot 1 \left[ \frac{1 - 2 + p}{2} b \right]}{4\pi} \quad (3.14)$$

PIRE A L'EMISSION (dBW)	PUISANCE DE L'EMETTEUR (W)	PORTEE DU BROUILLEUR (m)
30	1000	3016777.0
20	100	953989.0
10	10	301678.0
0	1	95398.9
-10	0.1	30167.8
-20	0.01	9539.9
-30	0.001	3016.8
-40	0.0001	954.0
-50	0.00001	301.7
-60	1E-06	95.4
-70	1E-07	30.2

**Tableau 3.15 : L'ordre des grandeurs impliquées en fonction de la PIRE du brouilleur.**

**Pour un résumé :**

Dans ce chapitre, que ce soit dans le domaine militaire ou civil, les récepteurs doivent être conçus pour opérer dans des niveaux d'interférences et de brouillages élevés afin d'assurer un maximum de continuité de service et d'intégrité.

Ce chapitre analyse l'impact des brouilleurs non – intentionnels sur la réception des signaux GPS. Il débute par une caractérisation des problèmes de brouillage et indique leurs effets sur un récepteur.

- L'objectif principal est de mieux comprendre l'influence des brouilleurs ou des perturbations RF sur les phases de réception, d'acquisition et de poursuite des signaux GPS. La vulnérabilité d'un récepteur GPS est d'abord définie au niveau des différents composants d'un récepteur telles que la tête RF , l'AGC et le CAN, les boucles et la démodulation des données.
- Les équations fondamentales du brouillage afin d'exprimer les seuils du rapport  $C/N_0$  en fonction du rapport J/S au-delà desquels le fonctionnement du récepteur est dégradé de plus, pour clarifier les attentes actuelles souvent mises de côté par manque de clarté et par les quantités de documents, on résume clairement les normes sur les récepteurs GPS civiles établies par des organismes et les spécifications requises. La synthèse permet de définir des critères quantitatifs relatifs à l'impact d'un brouilleur sur les différentes phases de perturbation d'un récepteur GPS.

- les catégories de brouillage et tente d'identifier et de décrire les différentes sources potentielles de perturbation. Les sources qui ont une probabilité plus élevée de brouiller

Un récepteur GPS sont analysées conduisant à une première classification des techniques d'adoucissement de spectre dans le but de réaliser des récepteurs GPS robustes.

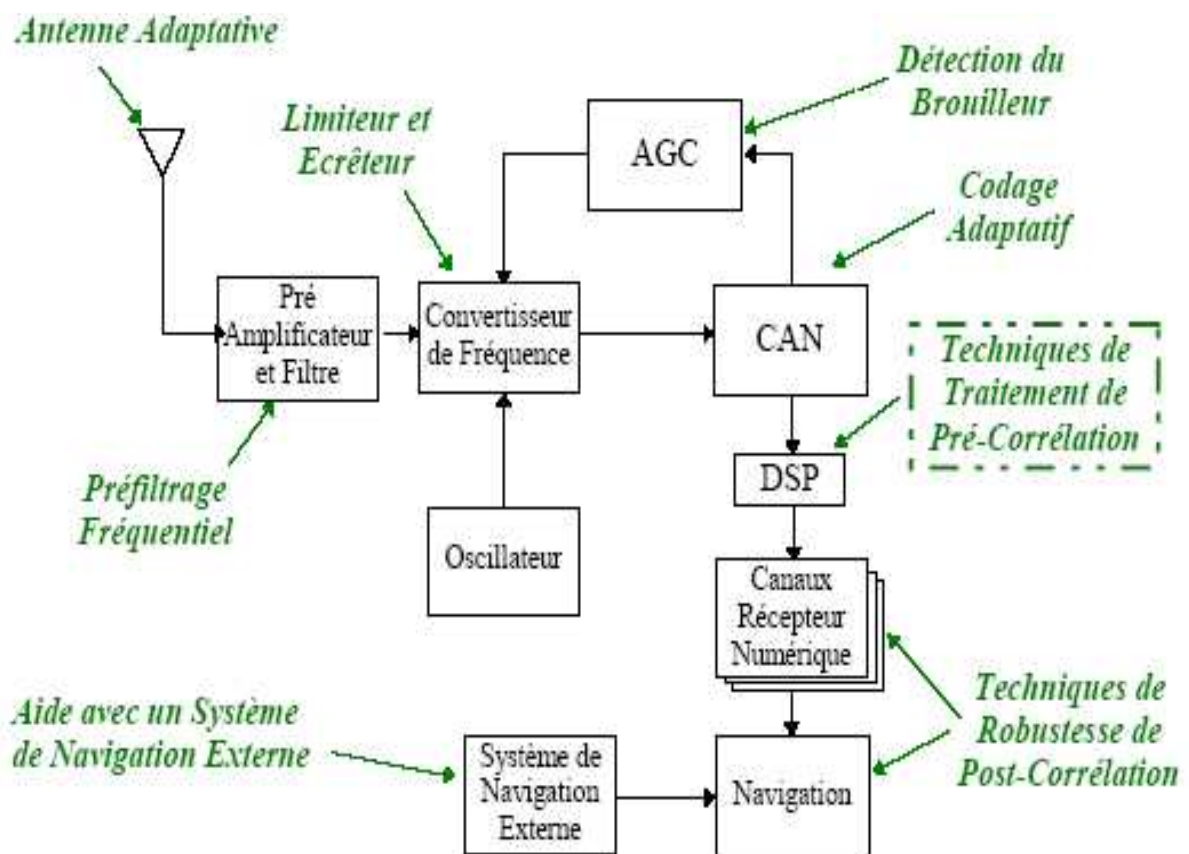
- Les différents types de brouillage sont répertoriés et on associe aux critères d'impact définis précédemment des valeurs représentatives telles que la distance, les isolations nécessaires entre les antennes et les réjections des filtres RF. On sélectionne donc ceux qui nous semblent les plus pénalisants pour un récepteur GPS.

## **Introduction :**

Comme clarifié dans le chapitre précédent plusieurs types des brouilleurs peuvent nuire au bon fonctionnement d'un récepteur GPS par conséquent à l'exploitation du message de navigation. La suppression de ces brouilleurs est envisageable en différents points de la chaîne de traitement: en radio fréquence (RF), en fréquence intermédiaire (IF), après échantillonnage du signal en fréquence intermédiaire ou encore dans les boucles de maintien. Pour cela on proposera dans notre travail l'application du filtrage adaptatif avant l'étage d'acquisition comme solution.

### 1-Dispositifs de résistance aux brouilleurs :

Comme on a vu, plusieurs types des brouilleurs peuvent léser au bon fonctionnement d'un récepteur GPS. Pour cela on a envisagé quelques dispositifs possibles pour améliorer la résistance des récepteurs GPS aux brouilleurs. La figure (4.1) liste les points vulnérables d'un récepteur et les modifications possibles qui permettraient de les renforcer.



**Figure 4.1 :** Principaux dispositifs de résistance aux brouillages

Dès la réception, le brouilleur peut rencontrer une antenne à diagramme de rayonnement adaptatif qui soit capable d'éliminer une direction particulière lors de la réception. Ensuite, le préfiltrage en fréquence rejettera les brouilleurs situés hors bande.

Durant le processus de conversion en fréquence, des dispositifs de limiteur en puissance et des écrêteurs permettent d'éliminer les brouilleurs impulsions tels que les radars. On peut détecter et éliminer des signaux parasites trop élevés en contrôlant l'amplitude du signal et on adaptant le gain en conséquence.

Notons également le rôle de l'AGC qui normalise le signal reçu avant l'échantillonnage permet de détecter la présence de brouilleur reçue par le récepteur.

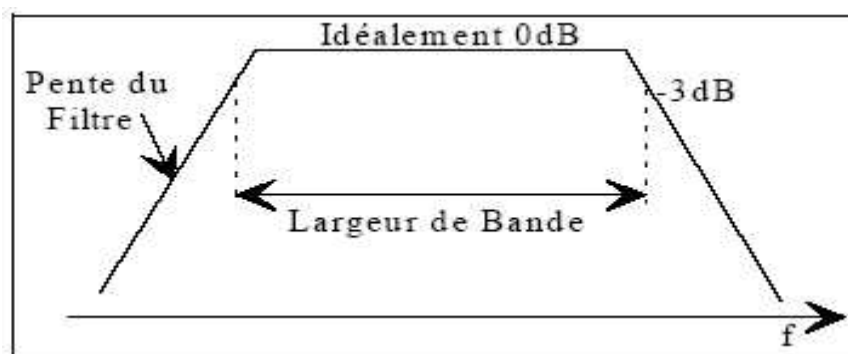
Après la numérisation du signal, on peut utiliser plusieurs techniques de traitement du signal dites de pré-corrélation, car elles interviennent en amont du corrélateur numérique.

On peut également améliorer la robustesse au niveau des canaux numérique qui consiste en général en une réduction de la bande des boucles de code et de porteuse pour réduire l'influence du bruit.

## **2- Filtrage à fréquentiel fixe :**

On peut agir successivement sur le filtre RF et les filtres FI du récepteur. En effet, si on réduit la bande passante du filtre et on augmente l'atténuation en bande coupée, on peut réduire la puissance du bruit et les effets des brouilleurs hors bande.

Cette technique est la plus classique des approches standard qui est utilisée par la plupart des constructeurs de récepteur.



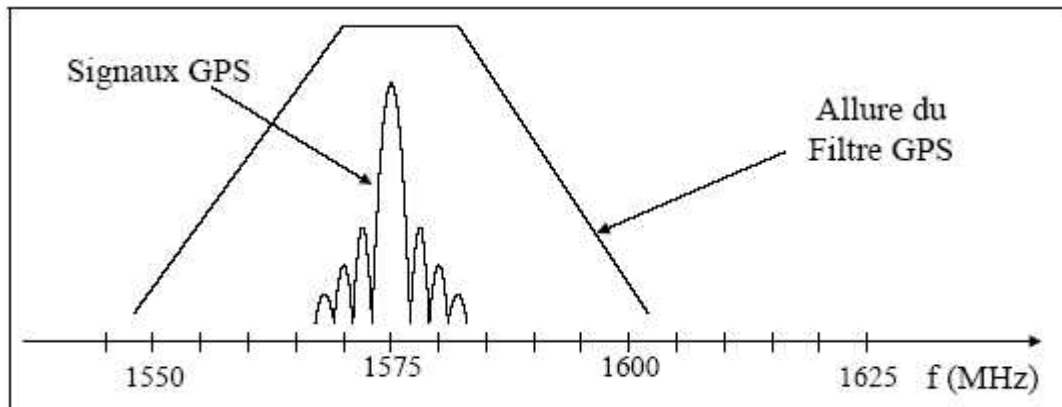
**Figure 4.2 :** Caractéristiques du filtrage fréquentiel fixe

Ce type de filtrage fixe dans le domaine fréquentiel est principalement spécifié par sa bande passante et ces caractéristiques d'atténuation. La largeur de bande du filtre définit le spectre en fréquence pour lequel une variation d'au plus 3 dB est observée sur la puissance des signaux. La pente du filtre RF est une des caractéristiques les plus importantes. Plus grande sera la pente du filtre, meilleur sera le degré de protection du récepteur face à un brouilleur hors bande.

La figure (4.3) illustre la forme d'un filtre qui effectue la protection des signaux GPS,

SPS (Standard Positioning Service) utilisant le code C/A. Dans cet exemple, le filtre passe bande possède une bande de 10 MHz qui est nécessaire pour les techniques de corrélateur à bande étroite des récepteurs GPS.

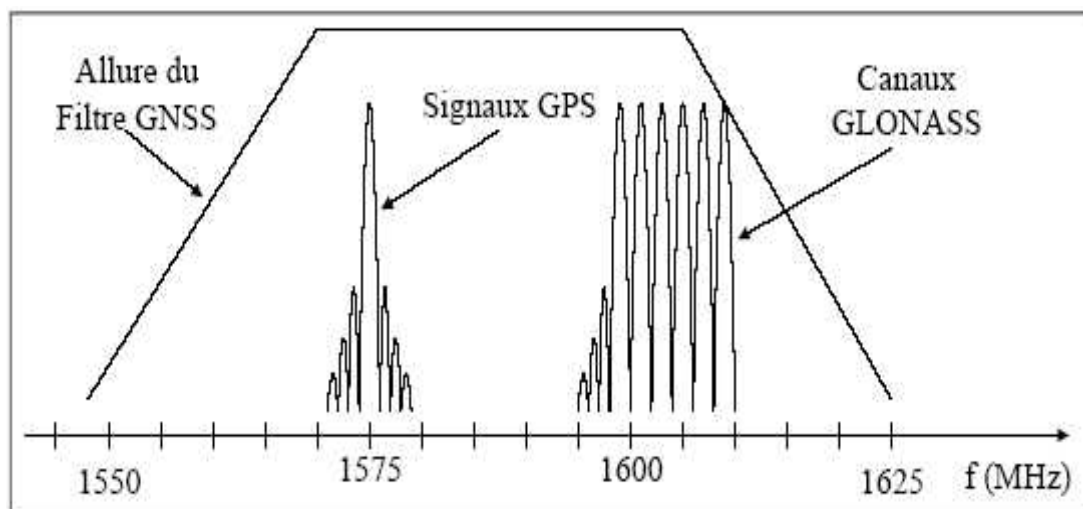
La pente du filtre est faible mais elle permet une bonne atténuation des signaux distants de plus de 25 MHz de la porteuse du signal GPS.



**Figure 4.3 :** Protection des signaux GPS à l'aide d'un filtre RF Fixe

Dans un même ordre d'idée, le filtre RF qui est placé généralement après l'amplificateur à faible bruit, peut être modifié pour accepter les deux signaux civils GPS et GLONASS.

La bande passante du filtre est généralement plus large pour laisser passer les fréquences centrales des canaux GLONASS allant de 1598 à 1600 MHz (Figure 4.4).

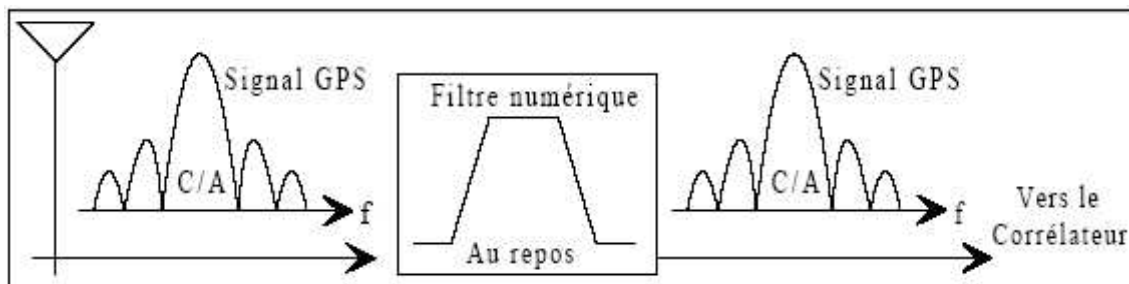


**Figure 4.4 :** Protection des signaux GPS et GLONASS à l'aide d'un filtre RF fixe

### **3- Filtrage fréquentiel adaptatif :**

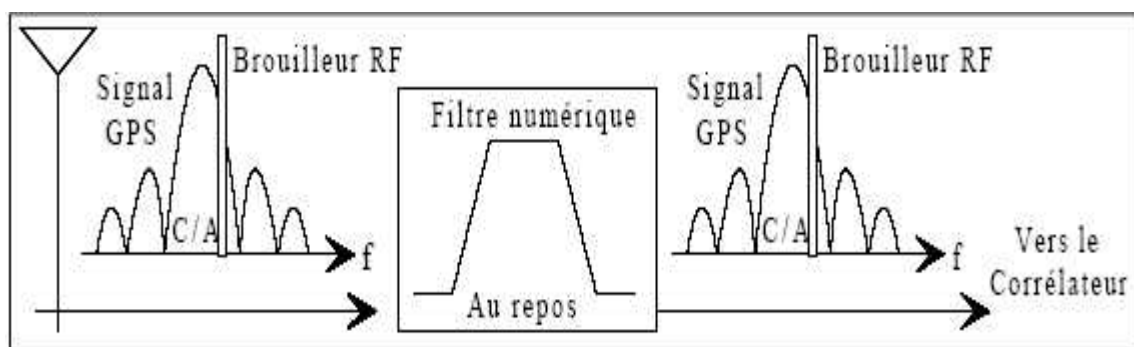
Cette méthode d'adoucissement de spectre peut être envisagée pour les brouilleurs hors bande GPS ainsi que les brouilleurs se trouvant dans la bande GPS pour autant que la largeur de bande du signal brouilleur soit faible face au signal GPS utile et que le signal brouilleur soit relativement stable en fréquence.

La figure (4.5) illustre le concept de base. Lorsqu'aucun signal brouilleur n'est détecté dans la section RF ou numérique du récepteur, le filtre est au repos et il offre une caractéristique passe-bande parfaitement adaptée aux signaux GPS. Dans ce cas le filtre peut être considéré comme transparent face au signal GPS qui le traverse.



**Figure 4.5 :** Caractéristique du filtre numérique au repos

Dans la figure (4.6), l'apparition soudaine d'un brouilleur à l'entrée de l'antenne n'a pas permis au filtre de s'adapter à sa présence. Dans cette situation qui ne persiste que quelques millisecondes dans les circonstances normales, le brouilleur traverse le filtre sans aucune atténuation et perturbe les étages d'acquisition du signal utile. C'est en ce moment que les méthodes de détection de puissance et de localisation du brouilleur entrent en jeu.

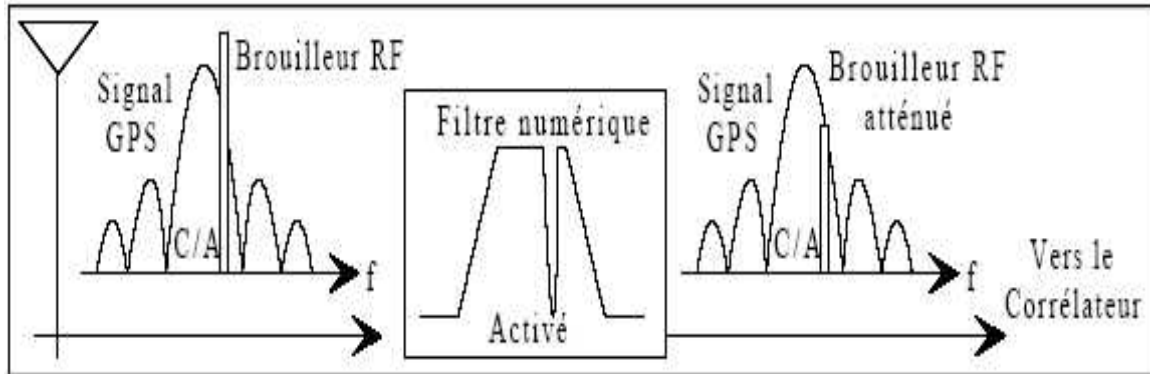


**Figure 4.6 :** Apparition d'un brouilleur dans le système

Suite à la détection de la présence du brouilleur, à sa localisation et à l'analyse de ces caractéristiques, le filtre adapte sa fonction de transfert et lui introduit une composante coupe-bande qui tend à épouser la forme du spectre du brouilleur.



Les signaux de la section coupe-bande sont fortement atténués. La sortie du spectre en fréquence de la figure (4.7) le résultat où la puissance spectrale du brouilleur à spectre étroit et des signaux GPS à cet endroit est réduite. L'étage de corrélation qui suit permettra d'étaler la puissance résiduelle du brouilleur sur 2 MHz et de concentrer l'énergie du signal utile GPS



sur une largeur de bande approximative de 100 Hz.

**Figure 4.7 :** Atténuation du brouilleur suite à un filtrage adaptatif

Cette méthode de robustesse aux brouilleurs peut être efficace pour des brouilleurs à spectre étroit stables. Un intérêt de cette technique face à l'accroissement de la puissance du brouilleur est la possibilité du filtre adaptatif de réagir en accentuant l'atténuation de sa bande réjectrice et en améliorant sa position sur sa réponse fréquentielle.

#### **4- Filtres à encoche :**

Un filtre coupe-bande est un filtre numérique conçu pour atténuer une bande de fréquence  $f$  bien déterminé autour d'une fréquence centrale défini  $f_0$ . Il en existe plusieurs types des filtres utilisés dans les récepteurs GPS parmi lesquels :

- Les filtres RIF (Réponse Impulsionnelle Finie) générés par une équation de type:

$$H(Z) = \sum_{i=0}^N c_i \cdot Z^{-i} \quad (4.1)$$

Un filtre FIR avec une coupure très nette (bande de transition très courte) peut requérir jusqu'à des centaines de délais.

- Les filtres RII (Réponse Impulsionnelle Infinie) à gabarit générique est décrite par une équation de type :

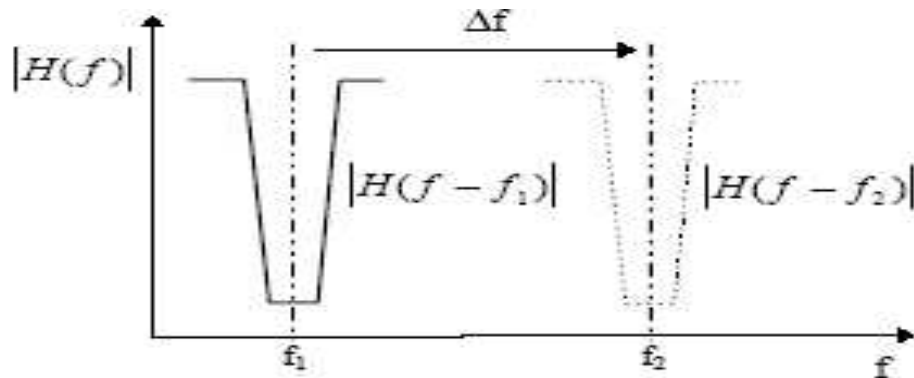
$$H(Z) = \frac{\sum_{i=0}^N a_i \cdot Z^{-i}}{\sum_{i=0}^M b_i \cdot Z^{-i}} \quad (4.2)$$

Un filtre RII est très efficaces et peuvent donner des pentes de coupure très raides.

#### **4-1-Présentation du filtre à encoche :**

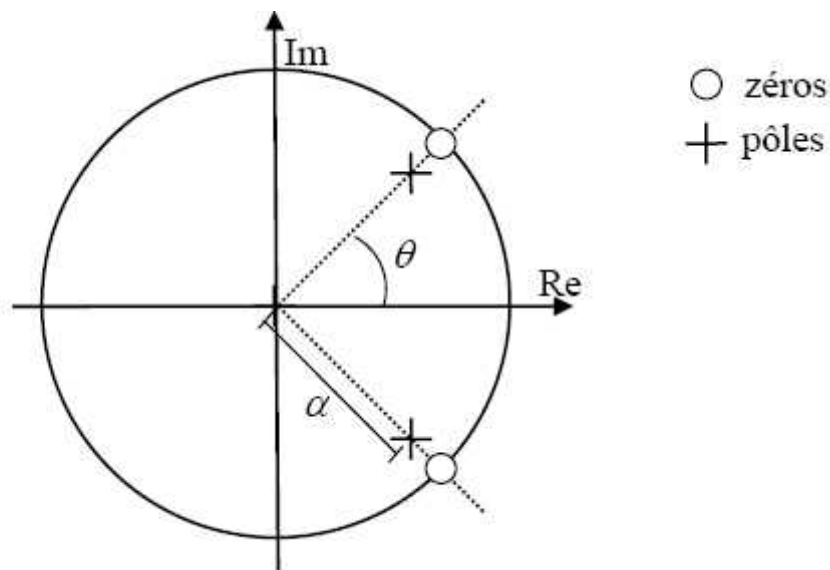
Le filtre à encoche (Notch filter) est un filtre coupe-Bande dont la largeur de bande est très étroite, qui est normalement utilisé pour retirer ou amplifier une fréquence du spectre. Son gabarit est donné dans la figure (4.8).

Plusieurs travaux ont été consacrés à l'étude d'un filtre à encoche du second ordre dit «avec contrainte» (constrained Notch filter) pour l'estimation et l'élimination de raie spectrales.



**Figure 4.8 :** Gabarit d'un filtre à encoche

La structure idéale des pôles et des zéros d'un filtre à encoche avec contrainte est montrée à la figure (4.9) (on simplifiera par la suite la notation en indiquant ce filtre comme ( Filtre à Encoche ) tout court). Les zéros se trouvent sur le cercle unité et les pôles, de module inférieur à 1 pour préserver la stabilité du filtre, ont même argument que les zéros. La position des pôles est définie relativement à la position des zéros par un coefficient constant .



**Figure 4.9 :** Les zéros et pôles d'un filtre à encoche

Pour un filtre à encoche du deuxième ordre la fonction de transfert présente deux zéros  $z_0$  et deux pôles  $p_0$  d'argument  $2\theta_0$  il est centré sur la fréquence  $f_0$ . Dans ces conditions, on peut écrire la fonction de transfert du filtre comme :

$$H(Z^{-1}) = \frac{(Z-Z_1)(Z-Z_1^*)}{(Z-P_1)(Z-P_1^*)} = \frac{Z^2 - 2\Re(Z_1)Z + Z_1Z_1^*}{Z^2 - 2\Re(P_1)Z + P_1P_1^*} = \frac{1 - 2\Re(Z_1)Z^{-1} + Z_1Z_1^*Z^{-2}}{1 - 2\Re(P_1)Z^{-1} + P_1P_1^*Z^{-2}} \quad (4.3)$$

Si on met en évidence la relation entre le pôle et le zéro :

$$\begin{aligned} |Z_1| &= 1 && \text{avec } 0 < \alpha < 1 \\ |P_1| &= \alpha \cdot |Z_1| \end{aligned} \quad (4.4)$$

La contrainte imposée sur le module du pôle ( $p_0 = \alpha z_0$ ;  $\alpha < 1$ ) permet de garantir la stabilité du filtre et d'ajuster la largeur de l'encoche.

On a :

$$H(Z^{-1}) = \frac{A(Z^{-1})}{B(Z^{-1})} = \frac{1 + a_1 Z^{-1} + Z^{-2}}{1 + \alpha a_1 Z^{-1} + \alpha^2 Z^{-2}} = \frac{A(Z^{-1})}{A(\alpha^{-1})} \quad (4.5)$$

Avec :

$$a_1 = -2 \cdot \Re(Z_1) \quad (4.6)$$

En coordonnées polaires, la fonction de transfert devient :

$$H(Z^{-1}) = \frac{1 - 2 \cos(\theta) Z^{-1} + Z^{-2}}{1 - 2 \alpha \cos(\theta) Z^{-1} + \alpha^2 Z^{-2}} \quad (4.7)$$

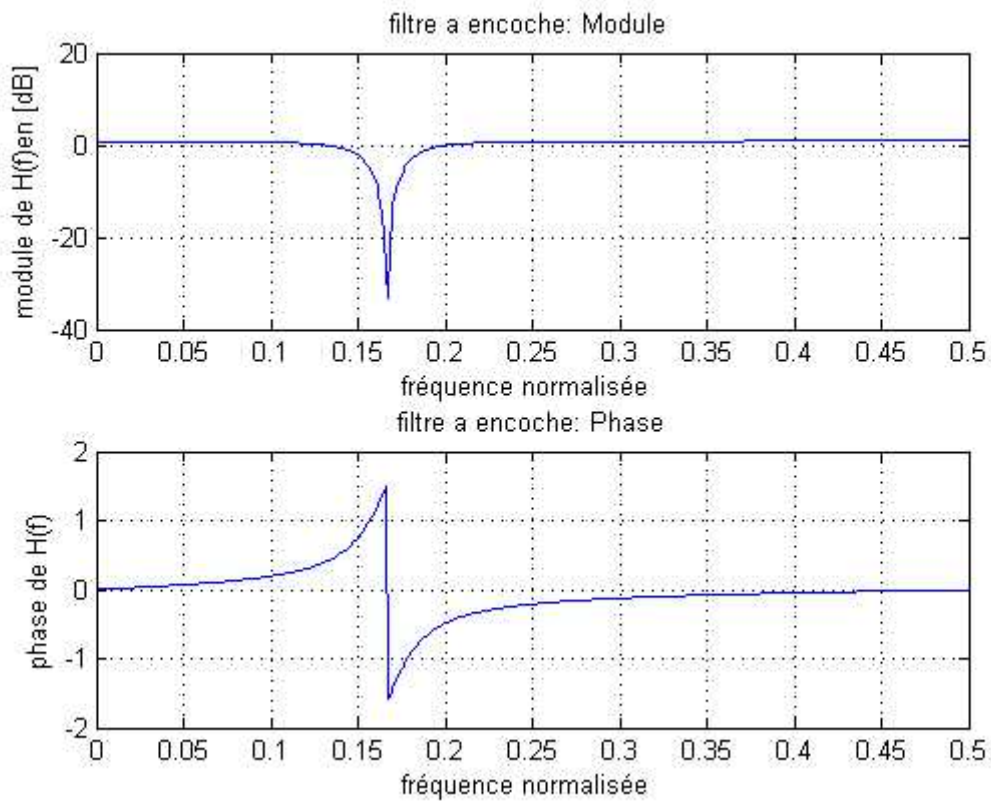
Où  $\theta$  représente l'angle entre l'axe X et le pôle on a :

$$a_1 = -2 \cos(\theta) \quad (4.8)$$

La condition de stabilité de ce filtre étant d'avoir les pôles à l'intérieur du cercle unité, on peut imposer la stabilité du filtre en vérifiant les conditions simples suivantes sur les coefficients :

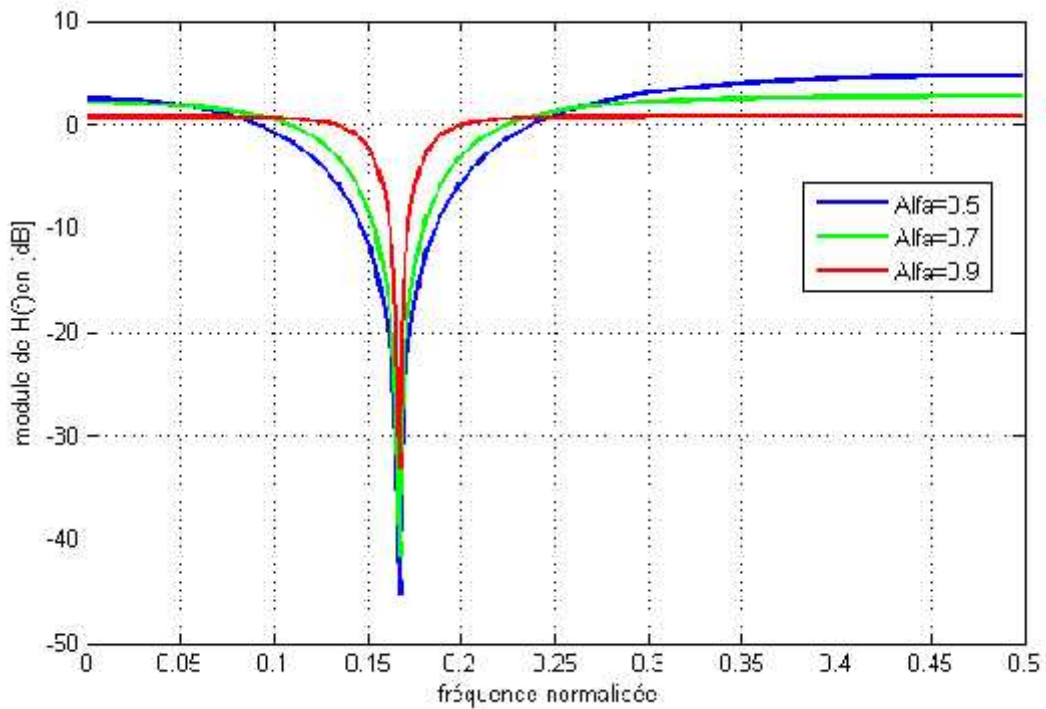
$$|a_1| < 2 \text{ et } 0 < a_0 < 1 \quad (4.9)$$

On peut tracer le module et la phase du filtre comme dans la figure (4.10) :



**Figure 4.10** : Module et phase d'un filtre à encoche

Sachant que le paramètre  $\alpha$  détermine la largeur de bande de l'encoche, On constate que pour des  $\alpha$  proches de 1, un tel filtre élimine une bande de fréquence très étroite du spectre. La figure (4.11) illustre la variation de l'ouverture de l'encoche du filtre pour différentes valeurs de  $\alpha$  :

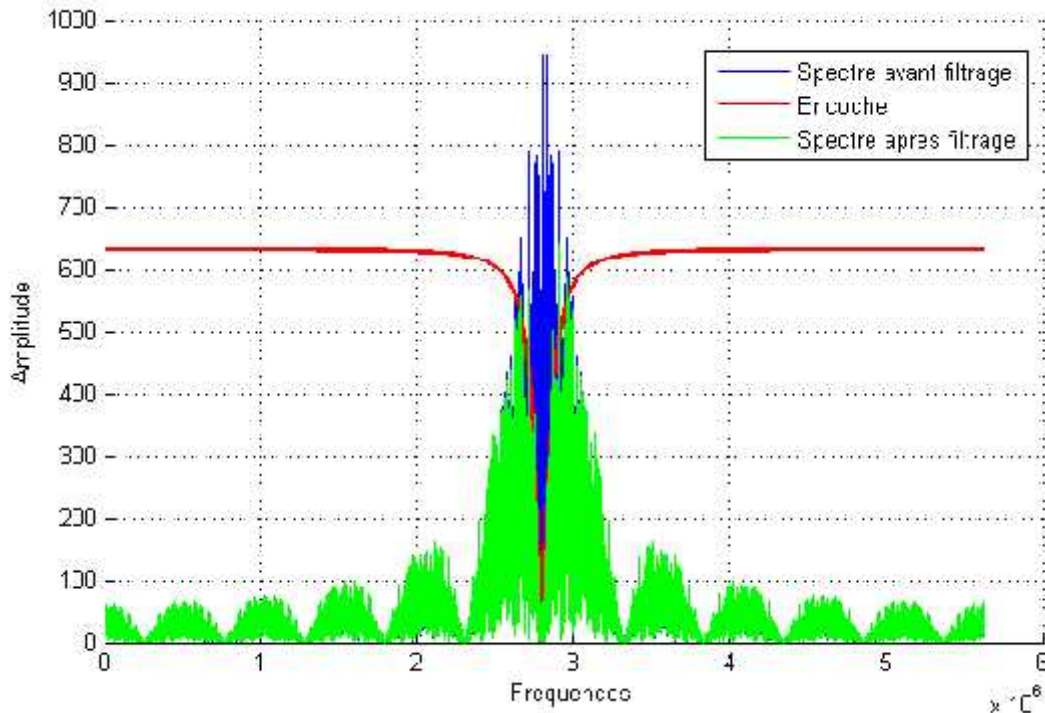


**Figure 4.11** : Module d'un filtre à encoche pour différentes valeurs de

**4-2-Application du filtre à encoche sur le signal GPS :**

Après la présentation du filtre à encoche on a pu vérifier que pour avoir une bande du filtre (ouverture de l'encoche) très faible il suffit que  $\alpha$  soit de plus en plus proche de 1; cette propriété est nécessaire pour un comportement satisfaisant du filtre, on voit ici l'application du filtrage et aux effets sur la signal GPS.

Une encoche est capable de filtrer de façon idéale une raie spectrale si sa position est connue exactement comme montre la figure (4.12) :



**Figure 4.12** : Application d'une encoche sur spectre GPS

#### **4-3-Cascade de filtre à encoche :**

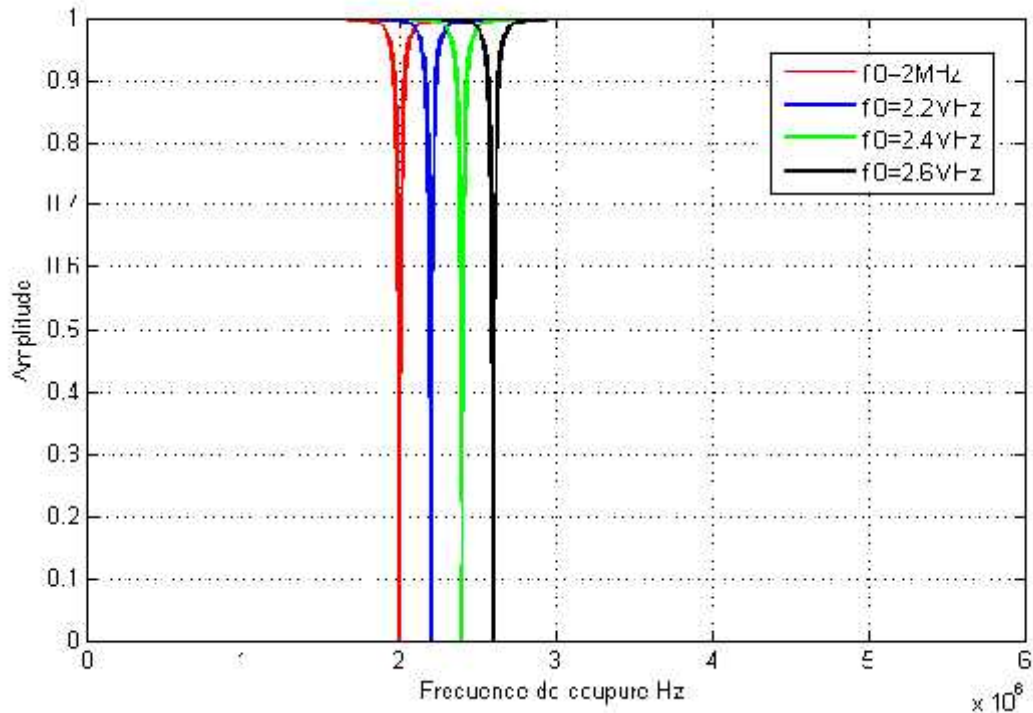
Si le signal GPS est affecté par plusieurs brouilleurs de fréquences centrales différentes, pour cela on propose d'utiliser une cascade de filtre à encoches qui s'adaptent successivement aux fréquences des brouilleurs détectés.

La fonction de transfert global résultant du produit d'une cascade d'encoches utilisée pour éliminer plusieurs brouilleurs, elle est donnée par :

$$\begin{aligned}
 H(Z^{-1}) &= \prod_{i=1}^n \frac{1+a_i.Z^{-1}+Z^{-2}}{1+a_i a_i.Z^{-1}+a_i^2 Z^{-2}} \\
 &= \frac{1+Z^{-n}+\sum_i [a_i'(Z^{-i}+Z^{2n-i})]}{1+\alpha^n.Z^{-n}+\sum_i [a_i'(\alpha^i.Z^{-i}+\alpha^{-(2n-i)}Z^{2n-i})]} \quad (4.10)
 \end{aligned}$$

Où i représente l'indice de l'encoche.

Dans notre présentation, on a utilisé quatre brouilleurs en cascade dont les fréquences centrales sont respectivement  $f_0= 2.6$  MHz, 2.4 MHz et 2.2 MHz, 2 MHz.



**Figure 4.13** : Module d'une cascade de filtres à encoche avec  $\zeta = 0.99$ .

La figure 4.13 montre une cascade de filtres à encoche chacun centré sur sa propre fréquence.

### Conclusion :

Une encoche est capable de filtrer de façon idéale une raie spectrale si sa position est connue exactement, si la position de la raie n'est pas connue de façon exacte ou si le brouilleur à une (faible) largeur de bande, on peut penser à diminuer la valeur de  $\zeta$  pour élargir la bande coupée.

# LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1.1 : MESSAGE DE NAVIGATION .....	13
TABLEAU 1.2 : CONTENU DES SOUS TRAMES 1, 2 ET 3.....	14
TABLEAU 2.1 : COMPARAISON ENTRE LES DEUX TYPES DE MESURES .....	23
TABLEAU 3.1 : LIMITE DU $[J/S]_{dB}$ POUR UN $[C/N_0]=28DB-HZ$ .....	43
TABLEAU 3.2 : LIMITE DE $[J/S]_{dB}$ POUR LES TROIS TYPES DE BROUILLEUR.....	43
TABLEAU 3.3 : LES CAS DE L'ETALEMENT DE SPECTRE POUR LES 37 CODES C/A .....	45
TABLEAU 3.4 : SEUIL DE $[J/S]_{dB}$ POUR (BLB).....	46
TABLEAU 3.5 : SEUIL DE $[J/S]_{dB}$ POUR (BEB).....	47
TABLEAU 3.6 : SOURCE ET SERVICES DES BROUILLEURS FONCTIONS DES HARMONIQUES	48
TABLEAU 3.7 : ISOLATION ENTRE L'ANTENNE DU RECEPTEUR GPS ET SATCOM PLACE SUR LE MEME MOBILE. ....	50
TABLEAU 3.8 : SPECIFICATION DE LA REJECTION DE LA BANDE SATCOM PAR LE FILTRE GPS.....	51
TABLEAU 3.9 : LA DISTANCE DE BROUILLAGE DUE A LA PROXIMITE DE LA BANDE SATCOM .....	51
TABLEAU 3.10 : LES BANDES DE FREQUENCE UTILISEES PAR LES CANAUX DE TV.....	52
TABLEAU 3.11 : LES PIRES MAXIMUMS TYPIQUEMENT EMIS PAR UNE STATION DE TV.....	52
TABLEAU 3.12 : HARMONIQUE NUISIBLES FM POUR LA BANDE GPS L1 .....	53
TABLEAU 3.13 : LA PORTEE DES BROUILLEURS FM EN FONCTION DE LA PUISSANCE DE L'HARMONIQUE.....	54
TABLEAU 3.14 : ANALYSE DE LA DISTANCE DE BROUILLAGE POUR LES HARMONIQUE FM	54
TABLEAU 3.15 : L'ORDRE DES GRANDEURS IMPLIQUEES EN FONCTION DE LA PIRE DU BROUILLEUR. ....	56





# NOMENCLATURE

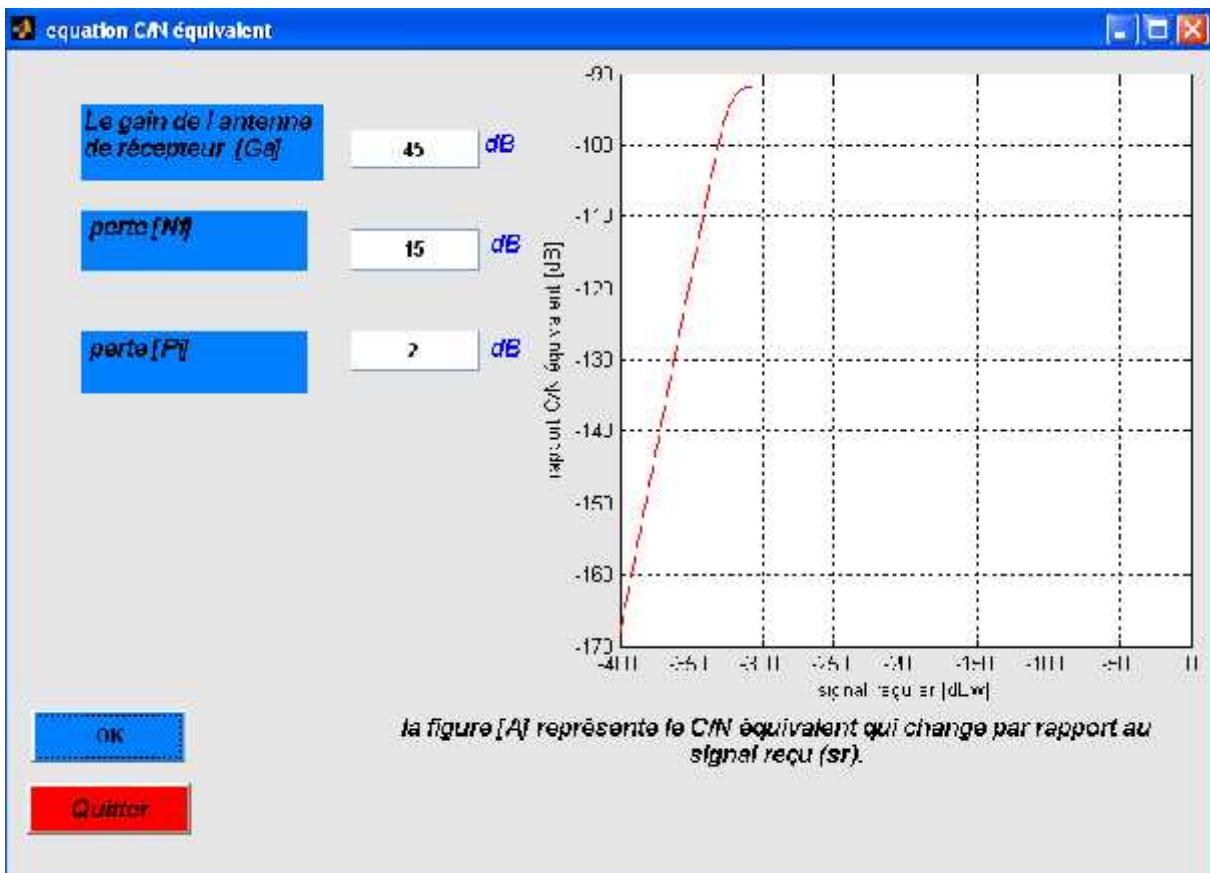
<b>AGC</b>	Automatic gain control (Control automatique de gain).
<b>Almanach</b>	C'est un fichier qui contient les paramètres tronqués des orbites du satellite
<b>AS</b>	Anti Spoofing (Anti brouillage).
<b>BPSK</b>	Binary phase shift keying (La modulation en phase).
<b>Azimut</b>	Angle horizontal mesuré dans le sens horaire entre le nord et la position d'un satellite dans le ciel.
<b>CAN</b>	Analog –to-Digital conversion (conversion analogique numérique).
<b>C/A</b>	Coarse-acquisition (Acquisition rapide).
<b>CDMA</b>	Code division multiple access (Accès multiple par partition avec code).
<b>Cinématique</b>	Type de positionnement GPS dans lequel un récepteur est déplacé pendant la collecte des données.
<b>CW</b>	Continuous wave (Les ondes continues).
<b>CWI</b>	Continuous wave interference (Les ondes continues interférences).
<b>DGPS</b>	Gps différentielle (différentiel GPS).
<b>DLL</b>	Delay lock loop (Boucle de verrouillage de code).
<b>DMA</b>	Défense mapping agency.
<b>DOD</b>	Department of defence (Département de défense).
<b>DS-CDMA</b>	Direct Sequence-CDMA (La Séquence directe CDMA).
<b>DSP</b>	Digital Signal Processing (Processeur des signaux numérique).
<b>Ephéméride</b>	C'est un fichier qui contient les paramètres complets des orbites du satellite.
<b>FDMA</b>	Frequency division multiple Access
<b>FFT</b>	Fast fourrier transforme (Transformé de fourrier rapide).
<b>FLL</b>	Frequency Lock Loop ( Boucle de verrouillage de fréquence
<b>FM</b>	Fréquence moyenne.
<b>GPS</b>	Global positioning system (System de positionnement global).

<b>IF</b>	Intermediate frequency ( Fréquence intermédiaire).
<b>L'angle de masquage</b>	Est égal 15° par rapport à l'horizon.
<b>L'altimétrie</b>	Méthode pour mesurer l'altitude.
<b>NAVSTAR</b>	Navigation Satellite Timing and Ranging ( System de navigation).
<b>NCO</b>	Numerical controlled oscillator (Oscillateur de contrôle numérique).
<b>PIM</b>	Produits d'inter modulation.
<b>PIRE</b>	Puissance isotrope rayonne équivalent.
<b>Planimétrie</b>	Mesure des surfaces planes.
<b>PLL</b>	Phase Lock Loop (Boucle de verrouillage de phase).
<b>PN</b>	Pseudo noise Séquence binaire aléatoire.
<b>PRN</b>	Pseudo random noise (Pseudo-aléatoire).
<b>Preamp</b>	Preamplifier (Pré-amplificateur).
<b>PPS</b>	Precise positioning service (Service de positionnement Précisé).
<b>RF</b>	Radio frequency (Radio fréquence).
<b>RHCP</b>	Right hand circularly polarized (Polarisation circulaire droite).
<b>RIF</b>	Réponse impulsionnelle finie.
<b>RII</b>	Réponse impulsionnelle infinie.
<b>RS</b>	Station de référence (référence stations).
<b>SATCOM</b>	Satellite communication.
<b>SA</b>	Selective availability (Dégradation volontaire).
<b>SPS</b>	Standard positioning service (Services de positionnement standard).
<b>SV</b>	Space vehicle.
<b>SVs</b>	Space vehicles.
<b>SNR</b>	Rapport signal sur bruit.
<b>TDMA</b>	Time division multiple Access.
<b>TEB</b>	Taux d'erreur binaire.
<b>TV</b>	Télévision.
<b>UTC</b>	Cordinated universal time ( temps universel coordonné).
<b>VCO</b>	Voltage Control Oscillator (Oscillateur commander en tension).

## APPLICATION

La figure A : représentée par l'équation ci-dessous, est une représentation du rapport signal sur bruit (C/N) équivalent en fonction du signal reçu (Sr).

$$\left[ \frac{C}{N_0} \right]_e^d = -10 \log \left[ 10^{-\frac{[C/N_0]_N^d}{1}} + \frac{1}{\frac{[J/B]_d}{1}} \right] \text{ [dB - Hz]} \quad (3.3)$$

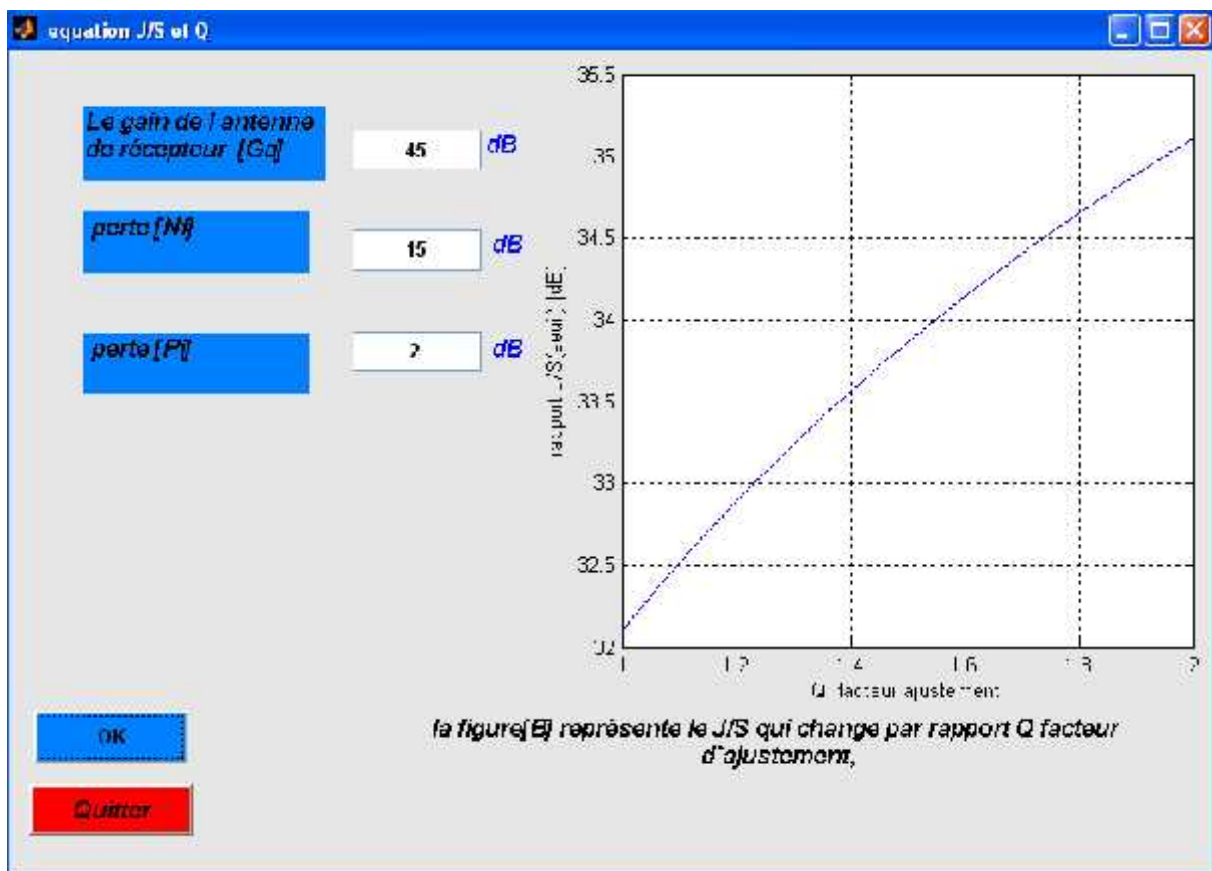


Dans cette figure nous étudions l'influence de la puissance du signal GPS reçu ( $S_r$ ) sur le rapport signal sur bruit  $\left[ \frac{C}{N_0} \right]_e^d$ . On constate que l'augmentation du signal reçu cause une augmentation du rapport  $\left[ \frac{C}{N_0} \right]_e^d$  équivalent, mais à partir d'environ (-310 dBw) l'effet de la puissance de signal reçu ( $S_r$ ) sur  $\left[ \frac{C}{N_0} \right]_e^d$  est insignifiant, le rapport signal sur bruit égale à -92 dB et il reste constant quelque soit la valeur de ( $S_r$ ).

## APPLICATION

La figure B : représentée par l'équation ci-dessous, est une représentation du  $(J/S)_s$  seuil (rapport de puissance entre le brouilleur et le signal utile) par rapport au facteur de qualité  $Q$ .

$$\left[ \frac{J}{S} \right]_s = 10 \log \left[ Q \cdot R_C \left[ \frac{1}{\frac{[C/N_C]_B}{1}} - \frac{1}{\frac{[C/N_C]_N}{1}} \right] \right] \text{ [dB]} \quad (3.4)$$

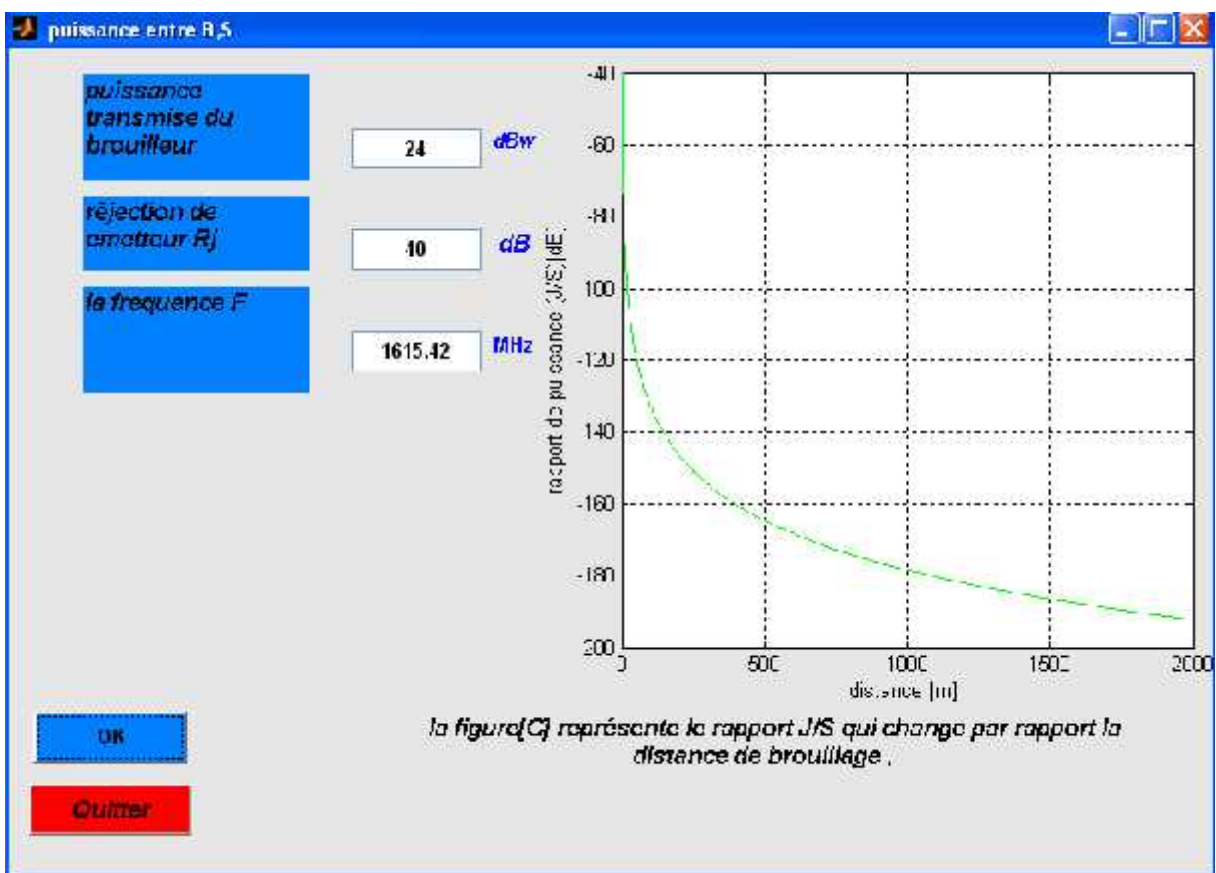


Dans cette figure on examine l'influence du facteur d'ajustement  $Q$  sur le rapport du brouilleur sur signal  $\left[ \frac{J}{S} \right]_s$ . On remarque que l'augmentation de  $Q$  entraîne l'augmentation de  $\left[ \frac{J}{S} \right]_s$ . On effet la variation de facteur d'ajustement  $Q$  donne un décalage de 3 dB entre les brouilleurs bande large et les brouilleurs bande étroite pour les seuils de rapport du brouilleur sur signal.

## APPLICATION

La figure C : représentée par l'équation ci-dessous, est une représentation de  $(J/S)$  (rapport de puissance entre le brouilleur et le signal utile) par rapport à la distance du brouillage.

$$\frac{J}{S} = P_j^T - R_j - 20 \log\left(\frac{4\pi r d}{\lambda}\right) - R - S - G_e \quad (3.12)$$



Dans cette figure on examine l'influence de la distance de brouillage sur le rapport du brouilleur sur signal  $\left[\frac{J}{S}\right]$ . On remarque que l'augmentation de distance de brouillage due à la proximité de la bande SATCOM entraîne la diminution de  $\left[\frac{J}{S}\right]$ . Pour cela il faut s'éloigner au maximum des émetteurs SATCOM.

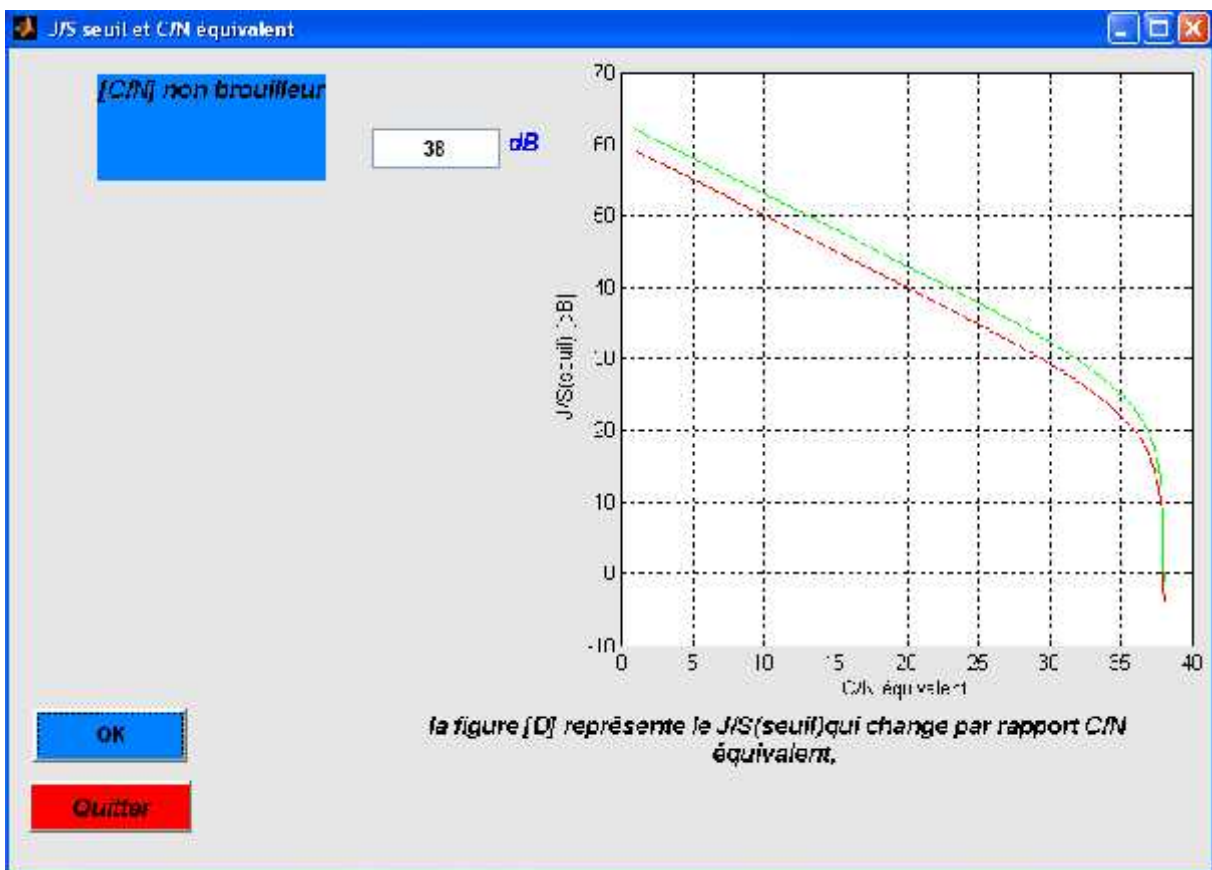
## APPLICATION

**La figure D :** représentée par l'équation ci-dessous, représente la correspondance entre (J/S) seuil et (C/N) équivalent.

Q=1 pour les brouilleurs à bande étroite (courbe en rouge) ;

Q=2 pour les brouilleurs à large bande (courbe en vert).

$$\left[ \frac{J}{S} \right]_s = 10 \log \left[ Q \cdot R_c \left[ \frac{1}{\frac{[C/N_0]_{eq}^d}{1}} - \frac{1}{\frac{[C/N_0]_{N_0}^d}{1}} \right] \right] \text{ [dB]} \quad (3.4)$$

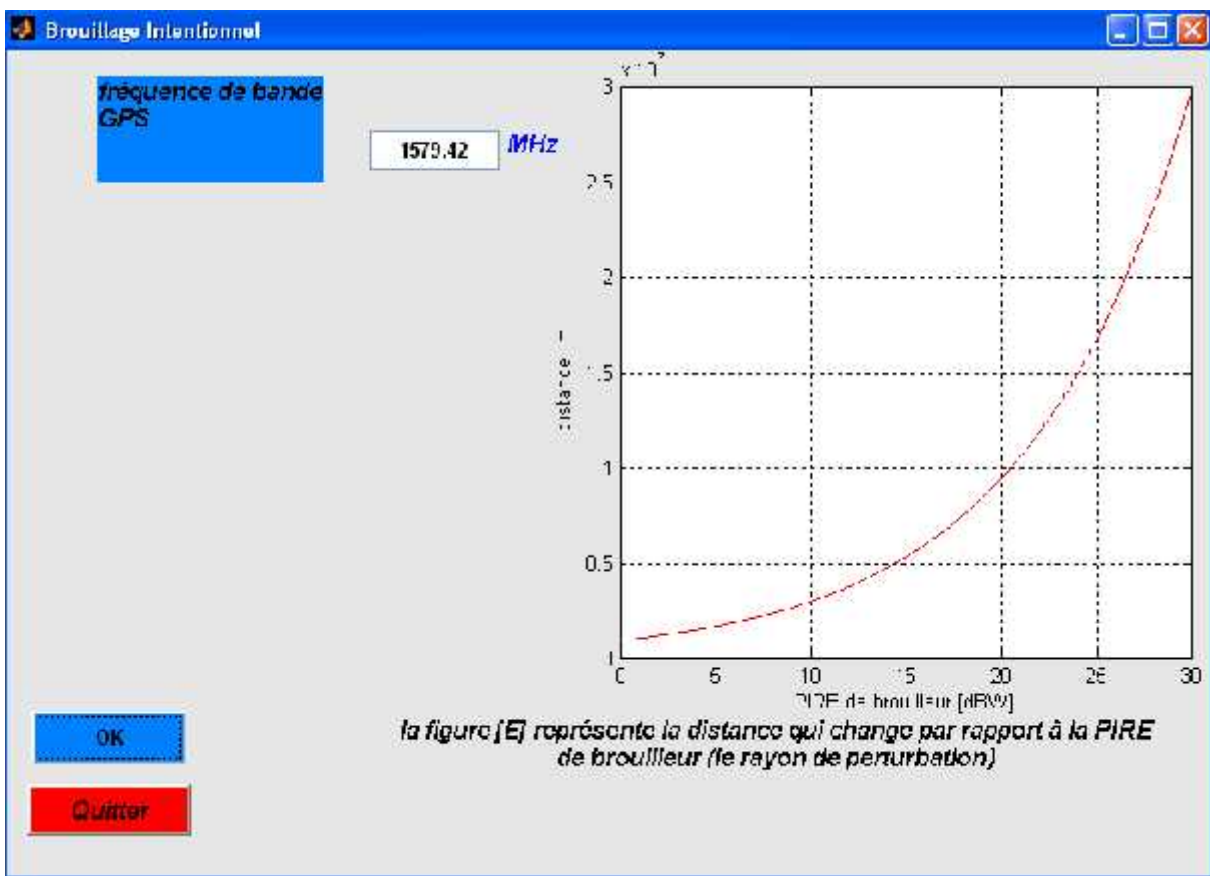


Dans cette figure nous étudions l'influence d'un brouilleur sur le SNR et on remarque que les brouilleurs à bande étroite sont les plus nuisibles que les brouilleurs à bande large. Pour évaluer l'influence des sources potentielles de brouillage, on établit un seuil pour le  $C/N_0$  équivalent, on peut à partir de celui-ci établir un seuil pour le rapport J/S au delà du quel le signal brouilleur devient nuisible.

## APPLICATION

La figure E : représentée par l'équation ci-dessous, représente le Rayon de perturbation en fonction de la PIRE du brouilleur.

$$d = \frac{\lambda \cdot 1 \left[ \frac{1 - 2 + p}{2} b \right]}{4\pi} \quad (3.14)$$

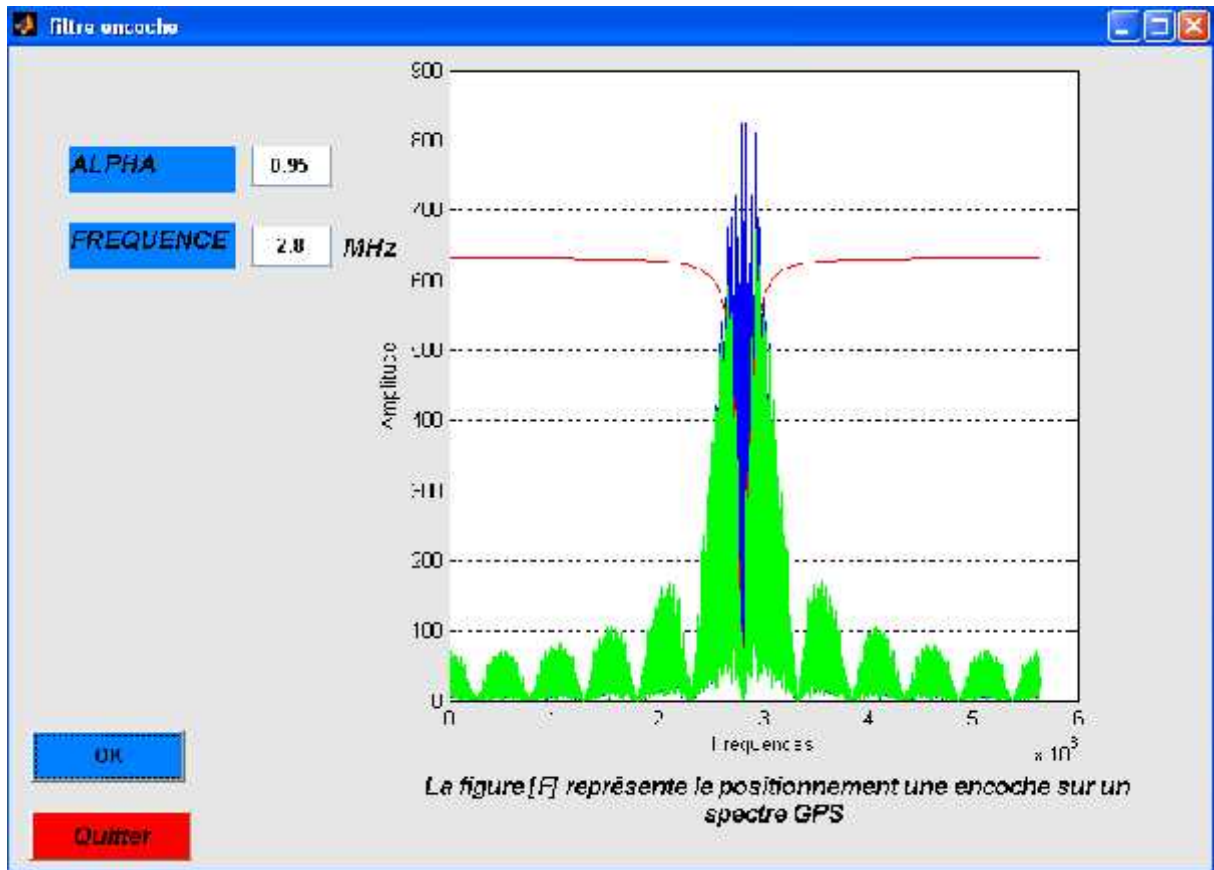


Dans cette figure on remarque que l'augmentation de la PIRE de brouilleur entraîne une augmentation de la portée de brouilleur et donc une augmentation de rayon de perturbation.



La figure E : représentée par l'équation ci-dessous (fonction de transfert du filtre à encoche), représente le positionnement d'une encoche sur spectre GPS provenant de PRN1.

$$H(Z^{-1}) = \frac{1 - 2\alpha \cos(\theta) \cdot Z^{-1} + Z^{-2}}{1 - 2\alpha \cos(\theta) \cdot Z^{-1} + \alpha^2 Z^{-2}} \quad (4.7)$$



On a pu vérifier que pour avoir une bande du filtre (ouverture de l'encoche) très faible il suffit que  $\alpha$  soit plus en plus proche de 1 ; une encoche est capable de filtrer de façon idéale une raie spectrale si sa position est connue exactement. Si la position de la raie n'est pas connue de façon exacte ou si le brouilleur a une faible largeur de bande, on peut diminuer la valeur de  $\alpha$  pour élargir la bande coupée. Ceci a une efficacité sur un brouilleur à large bande qui reste limitée car l'atténuation est considérable dans une bande très étroite, on obtient par contre de forte variation de phase en dehors de la bande coupée, ce qui introduit une dégradation sur le signal GPS due à la non linéarité dans la bande coupée et à l'énergie coupée de signal utile.

Le système GPS est un système de localisation développé par le département de la défense des États-Unis. Il a été créé à des fins militaires, à la suite des problèmes rencontrés par l'armée US pendant le conflit du Vietnam. Le programme GPS, baptisé NAVSTAR, a débuté à la fin des années 70 et le premier satellite a été lancé en 1978. Juste après la guerre du Golf (1990), le Département de la défense des États-Unis décida de rendre le système accessible aux utilisateurs civils, alors que 21 satellites étaient utilisables. La constellation est devenue pleinement opérationnelle le 8 décembre 1993 avec 24 satellites en ordre de marche. Les prévisions indiquent que l'industrie du GPS aux États-Unis devrait atteindre un volume de 8 milliards de dollars en l'an 2000. Le financement de la maintenance du dispositif actuel est d'ores et déjà assuré jusqu'en 2006.

Ce système permet à tout utilisateur de déterminer de façon continue sa position (latitude, longitude et altitude) ainsi que d'autres paramètres qui en découlent (vitesse, direction...), ceci en tout point de la surface terrestre. La position est calculée en permanence par un récepteur GPS, appareil "grand public", très prisé des navigateurs et des randonneurs. Il existe aussi des récepteurs professionnels beaucoup plus précis dont le coût peut atteindre, voire dépasser 10 000 euro. Les signaux radio émis par les satellites sont captés en permanence par le récepteur (en général de 4 à 12 satellites sont suivis simultanément). C'est la mesure très précise du temps mis par ces signaux pour effectuer le trajet satellite-récepteur qui permet de calculer une position par triangulation.



Le GPS est le résultat d'un projet lancé au début des années 60 aux Etats-Unis appelé NAVSTAR.

**1965** : Premier concept suite aux recherches du (Department of Defense).

**1972** : Etudes préliminaires de faisabilité.

**1974 – 1979** : Validation du modèle.

**1978-1986** : Mise en place de la première constellation des satellites BLOCK I. L'explosion de la navette Challenger survenue en janvier 1986 a interrompue la procédure de lancement, ce qui a entraîné une remise en cause du projet et la décision d'utiliser un lanceur spécifique pour les prochains satellites. Les lancements ont repris en 1989.

**1989-1994** : Mise en place de la deuxième constellation.

Il fallait trouver un système permettant une utilisation simple et efficace du GPS pour les civils, tout en laissant à l'armée américaine le contrôle et l'utilisation optimale du concept. C'est ainsi que furent créés les deux modes de fonctionnement :

- **Standart Positionning System (SPS)** : ouvert aux civils.
- **Précise Positionning System (PPS)** : réservé à l'armée américaine et permettant une précision supérieure au SPS.

La solution consiste à dégrader le signal des satellites : les utilisateurs civils munis d'un récepteur classique auront ainsi une perte de précision certaine, alors que les militaires, utilisant un récepteur évolué qui corrigera les erreurs selon des codes précis, bénéficieront de la meilleure précision possible. De plus le système reste entièrement sous le contrôle des USA car les satellites et les stations de contrôle leurs appartiennent.

**Introduction :**

Le système de positionnement global (GPS) est un système de navigation par satellite destiné à fournir la position, la vitesse et l'heure n'importe où à la surface de la terre ou dans ses environs. La précision du positionnement par GPS va de 100 mètres à quelques mètres en temps réel elle peut atteindre quelques millimètres pour les applications de géodésie en temps diffère. Bien qu'il y ait des milliers d'utilisateurs civils du GPS à travers le monde, le GPS a été créé et est contrôlé par le département de la défense américain (departement of defense (DOD)).

Les satellites GPS envoient des signaux codés qui peuvent être déchiffrés par des récepteurs GPS. Le récepteur mesure la distance entre la station et plusieurs satellites à l'aide des codes C/A ou P. Les éphémérides des satellites sont transmises par le message de navigation permettant de calculer la position du satellite dans un repère terrestre. Chaque mesure de distance sur un satellite définit une sphère dont le centre est le satellite. Trois satellites sont donc nécessaires pour déterminer la position du récepteur en trois dimensions. Un quatrième satellite est nécessaire pour tenir compte du non synchronisation de l'horloge du récepteur et des horloges des satellites.



## 1-Différents types de système de navigation:

### 1-1-GLONASS:

Le GLONASS (**G**lobale **N**avigation **S**atellite **S**ystème) est un système d'origine russe concurrent au système GPS, certains récepteurs intègrent les systèmes Glonass et GPS de manière à présenter une meilleure précision par obtention d'une valeur moyenne entre les deux systèmes.

### 1-2-ENSS:

L'ENSS (**E**uropéen **N**avigation **S**atellite **S**ystème) est l'équivalent européen du système GPS, il a subi une très forte concurrence de la part du système américain GPS et s'avère peu ou pas utilisé.

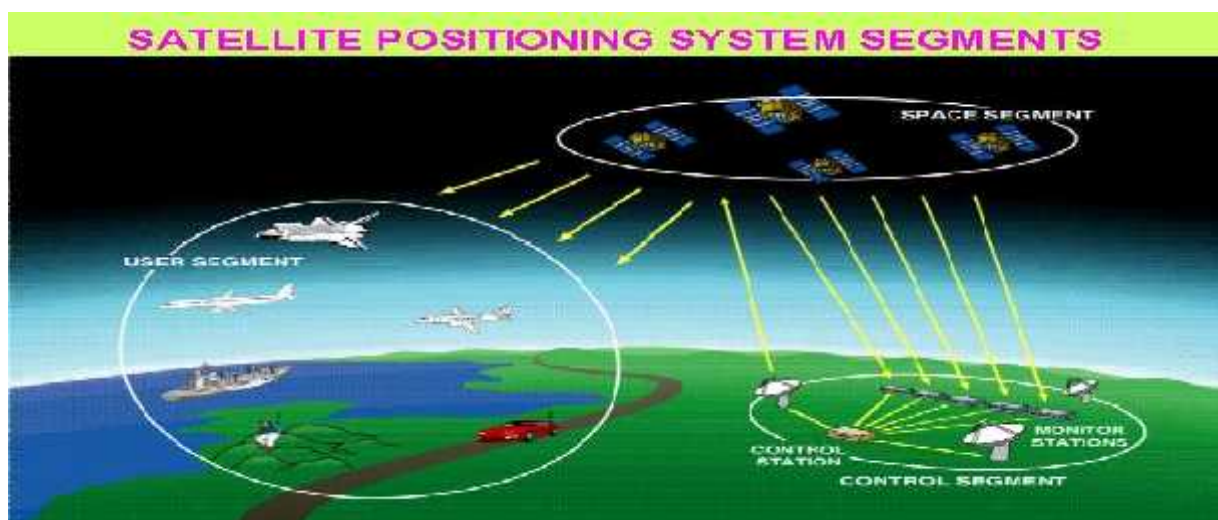
### 1-3-GALILEO:

Le système Galileo sera compatible avec GPS et il est attendu qu'il y ait de nombreux développements de récepteurs mixtes GPS - GLONASS - GALILEO. Néanmoins, il en sera indépendant, c'est-à-dire que si GPS est mis hors service GALILEO devrait continuer à fonctionner. Les premiers satellites étaient lancés en 2003 pour un ensemble pleinement opérationnel en 2008.

## 2-Description du système GPS:

**Le GPS est construit de 3 parties (3 segments) :**

- le segment Spatial (Space segment).
- le segment Utilisateur (User Segment).
- le segment de Contrôle (Control Segment).



**Figure 1.1 : Les trois segments du GPS**

## 2-1-Segment spatial:

Le segment spatial est composé d'un réseau de satellites (24+3 de réserve) en orbite quasi-circulaire autour de la terre, à une hauteur de +/- 20000 Km et dont la période de révolution est de 12 heures sidérales. Ces satellites sont répartis sur 6 plans orbitaux inclinés à 55° par rapport à l'équateur, sachant qu'elles sont espacées de 60° les une des autres. La constellation GPS a été conçue de telle manière que partout sur terre et à tout moment, un minimum de 4 satellites soit visible au dessus de 15° d'élévation.

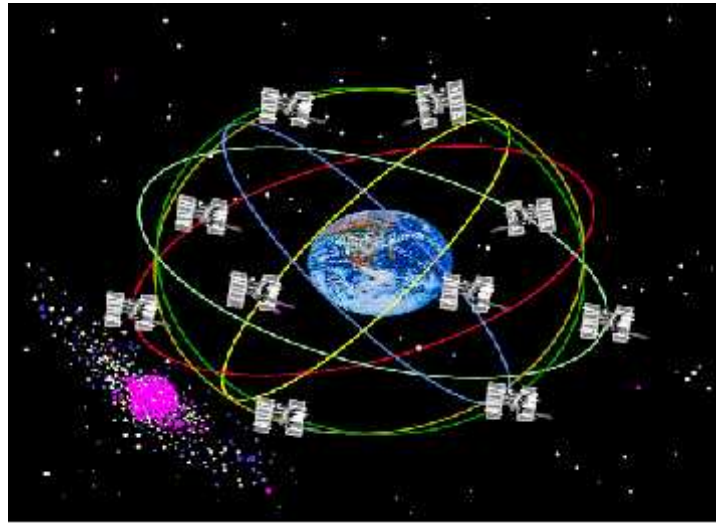
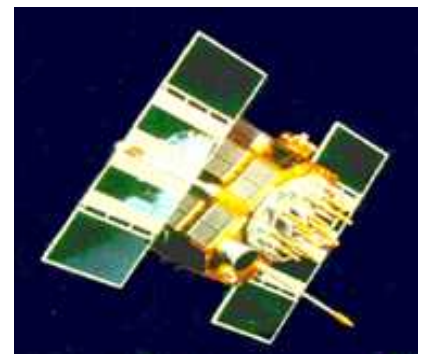


Figure 1.2 : Constellation des satellites

### 2-1-1-Caractéristique d'un satellite :

On peut dire qu'on générale un satellite est caractériser par :

- Largueur du Satellite                    152 cm
- Hauteur du Satellite                    191 cm
- Masse du Satellite                    1066 kg
- L'air des panneaux solaires            7.2 m<sup>2</sup>
- Puissance embarquée                1136 W
- Hauteur de sa gravitation            20 180 km



Les satellites GPS sont caractérisés par une horloge ultra précise qui transmet des signaux horaires et des informations sur leurs positions.

Ils disposent de quatre horloges atomiques à leur bord, ce qui assure une grande stabilité des signaux générés. Les horloges sont quotidiennement remises à l'heure par les stations de contrôle de l'armée américaine. Les utilisateurs peuvent donc synchroniser l'horloge de leur récepteur avec cette heure précise (appelée « heure GPS »). La précision est de l'ordre de 10<sup>-12</sup> à 10<sup>-13</sup> sur un jour.

### 2-1-2-Les blocs des satellites :

Il existe trois catégories des satellites GPS :

**Bloc I :** Satellites lancés entre 1978 et 1985 tous les satellites du bloc I sont maintenant hors service excepté un qui est activé de manière périodique, leur durée de vie est de 4.5 ans. La différence entre ces satellites et les générations suivantes est l'impossibilité de dégrader volontairement le signal transmis.

**Bloc II :** Seconde génération des satellites GPS mis sur orbite à partir de 1985. Ils ont la capacité de dégrader le signal émis. Leurs durée de vie est de 7.5 ans.

**Bloc III :** Ils ont été construits pour avoir une durée de vie de 10 ans, ils sont capables de communiquer entre eux et ont été mis sur orbite depuis 1996 afin de maintenir une constellation complète. Les satellites GPS transmettent leurs données sur deux fréquences (porteuses). Ceci afin que l'erreur introduite par la réfraction ionosphérique puisse alors être éliminée. Les signaux qui sont générés à partir de la fréquence standard 10.23 MHz sont L1 à 1575.42 MHz et L2 à 1227.6 MHz. Ces fréquences sont générées grâce à l'horloge atomique embarqué à bord de chaque satellite, les porteuses ne peuvent être utilisées directement pour le positionnement et c'est pourquoi deux codes binaires sont modulés sur les porteuses: le code C/A (Coarse Acquisition) et le code P (Precision). Il est également nécessaire de connaître les coordonnées du satellite, cette information est envoyée par le message de données qui est modulé sur les porteuses.

### 2-1-3-Couverture terrestre des satellites :

L'arrangement des satellites permet d'avoir, dans 99 % des cas, un minimum de 4 satellites visibles à 5° au plus au dessus de l'horizon, quelque soit l'endroit où l'on se trouve sur la terre. Mais cela signifie également que pendant une minute et demie par jour le système GPS est peut ne pas indiquer une position suffisamment fiable. En outre, si le lieu n'est pas parfaitement dégagé, c'est –à-dire si le ciel n'est pas totalement visible au dessus de 5° de l'horizon, la couverture des satellites peut être totalement insuffisante. A quelques rares endroits du globe dans des zones dits de réception difficile, cette couverture n'est pas assurée dans plus de 3 % des cas.

Il arrive aussi régulièrement qu'un ou plusieurs satellites soient momentanément mis hors service. Généralement cela est dû à une maintenance périodique du satellite ou à un problème technique. Normalement un satellite n'est pas hors service plus de 24 heures, il n'y a pas plus

de 4 satellites mis hors service chaque mois et jamais plus de trois hors service en même temps. Le nombre de satellites visibles varie tout au long de la journée, et est en moyenne égale à huit.

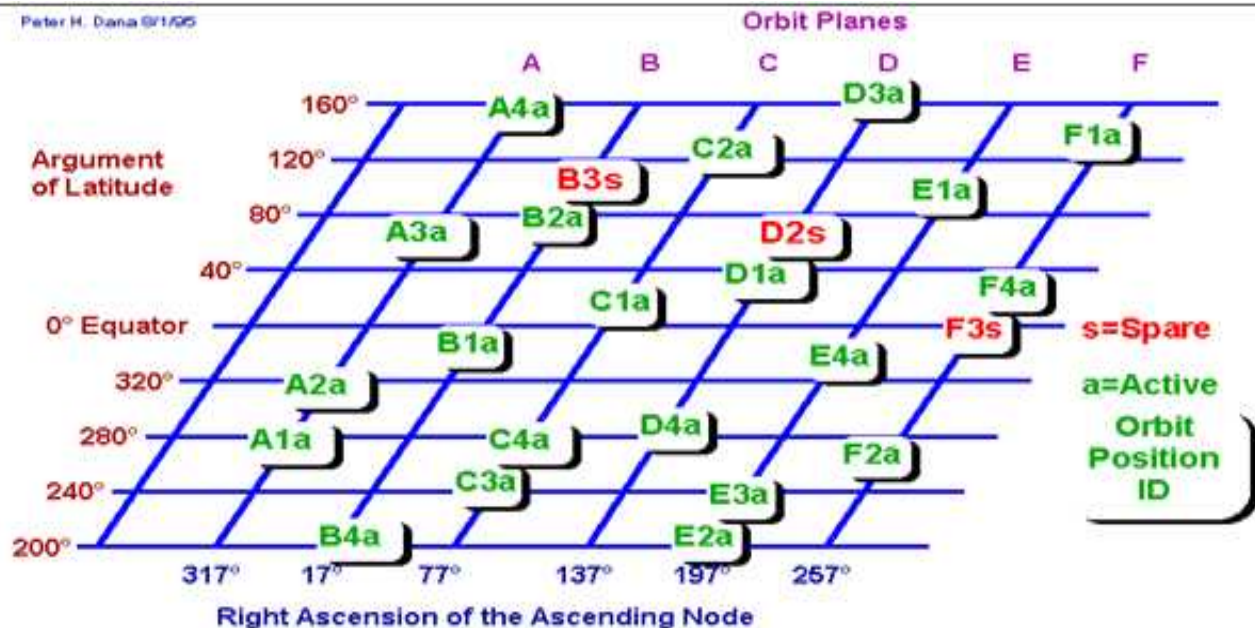


Figure 1.3 : Représentation simplifiée de constellation nominale de GPS

#### 2-1-4-L'identification des satellites :

Plusieurs systèmes de numérotation des satellites coexistent :

- La numérotation séquentielle dans l'ordre de lancement (SV).
- La numérotation PRN (pseudo random noise) donné pour les codes, qui est généralement utilisé, le numéro PRN est fournie aux utilisateurs dans le message de navigation.
- Numéro lié à l'orbite et à la position sur l'orbite.
- Numéro dans le catalogue de la NASA

#### 2-2-Segment de contrôle :

Le secteur de contrôle dépend de l'armée américaine et doit maintenir en permanence le système GPS opérationnel. Pour cela cinq stations de poursuite observent 24h/24 les satellites GPS, contrôlent et modifient leurs trajectoires et leurs transmettent des informations qui seront diffusées par le message de navigation. Les cinq stations sont Colorado spring (la station principale), Ascension Diegio, Garcia, Kwajalein et Hawaii. Le temps GPS est généré par la station principale de Colorado Spring.



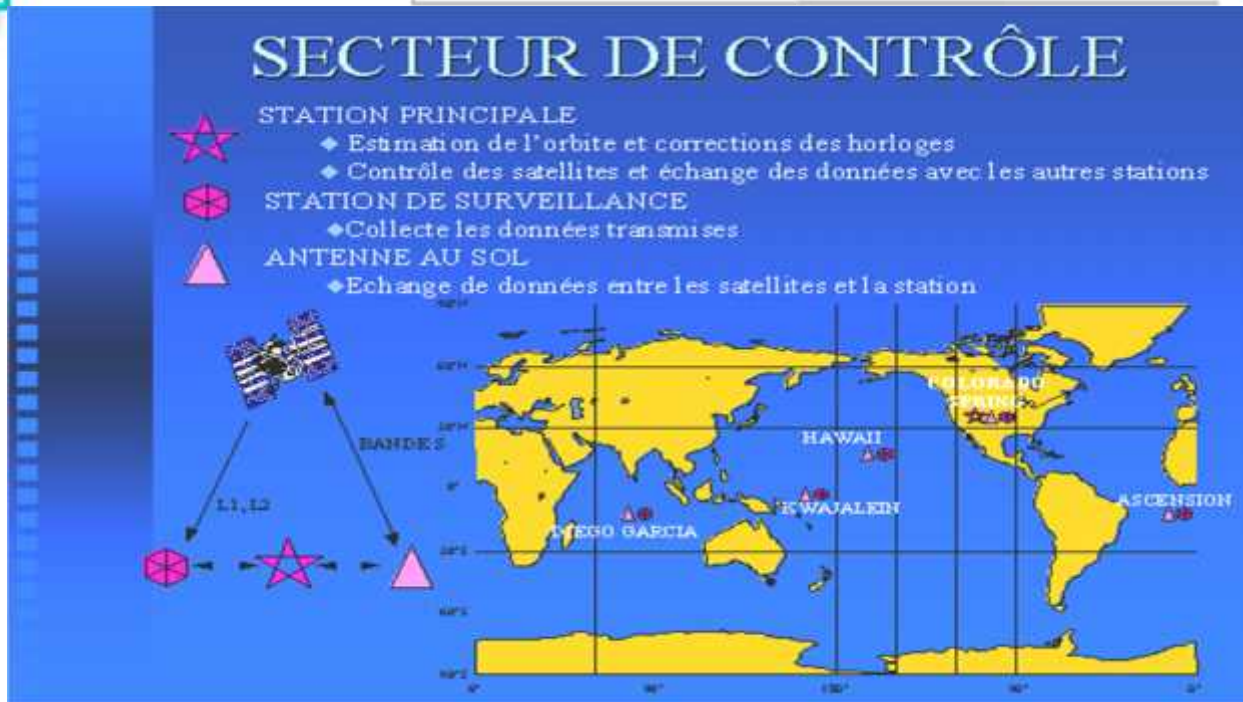


Figure 1.4 : Les stations de contrôles

### 2-3- Segment utilisateur :

Le segment utilisateur consiste en une variété GPS militaires ou civils. Un récepteur est conçu pour recevoir décoder et traiter les signaux émis par les satellites GPS. Les récepteurs intégrés (carte ou circuits spécifiques au GPS) dans d'autres systèmes sont également inclus dans le segment utilisateur.

Les utilisateurs disposent d'un moyen unique pour leurs applications de localisation, de navigation, de référence de temps, de géodésie voire de détermination d'attitude.

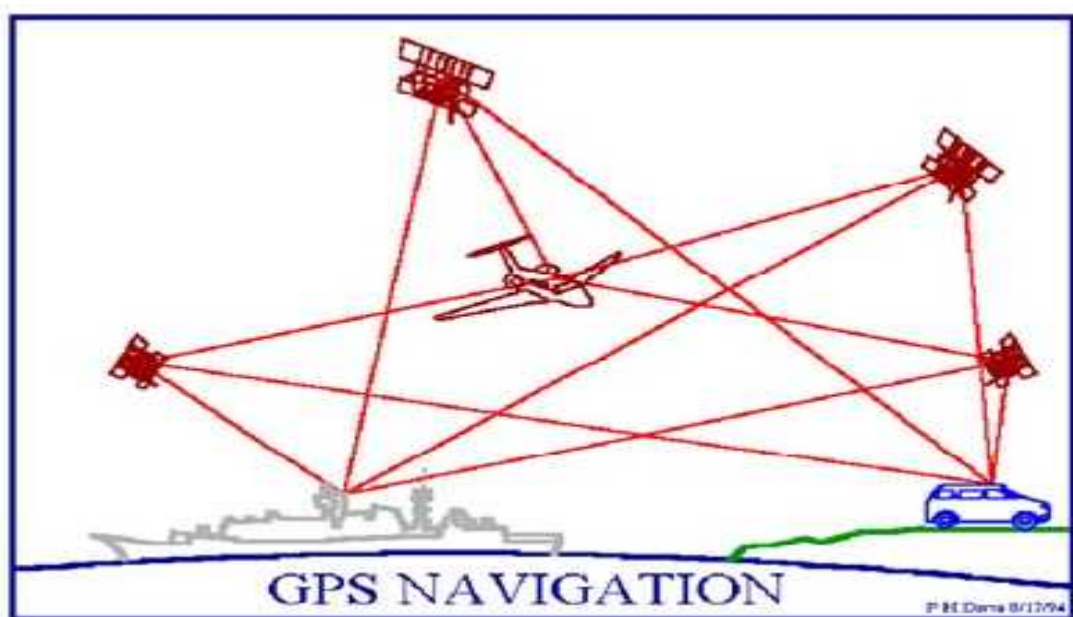


Figure 1.5 : Le segment utilisateur

### 3-Le Signal GPS :

Les satellites GPS transmettent deux codes : un code crypté pour la défense militaire américaine (signaux PPS) et un code civil (signaux SPS).

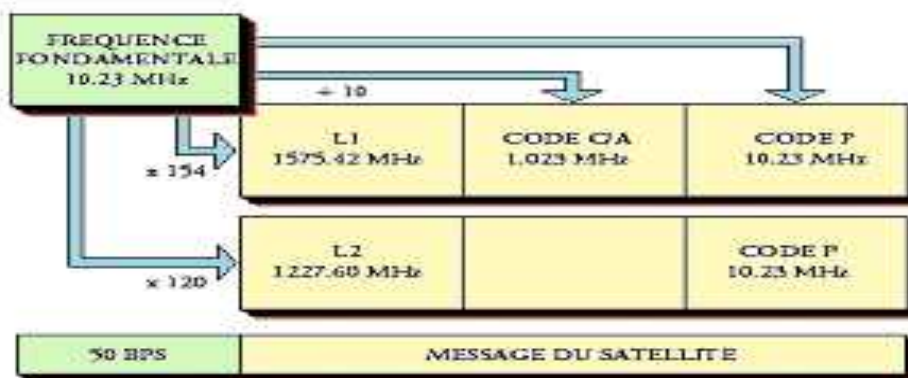
Pour l'ensemble des satellites, la fréquence fondamentale est  $f_0 = 10.23$  MHz.

A partir de la fréquence fondamentale, chaque satellite génère deux ondes porteuses :

$L_1 = 154 \cdot f_0 = 1575,42$  MHz (soit une longueur d'onde d'environ 19 cm).

$L_2 = 120 \cdot f_0 = 1227,60$  MHz (soit une longueur d'onde d'environ 24 cm).

Les signaux seront radiodiffusés sur ces deux fréquences.



**Figure 1.6 :** Dérivation des fréquences

Pour des raisons techniques, ces deux ondes porteuses seront modulées par des codes pseudo aléatoires (**P**seudo **R**andom **N**oise) qui seront transmis en direction de la terre. Les informations véhiculées par ces ondes permettront de se positionner. Les codes pseudo aléatoires sont les suivants :

➤ Le **C/A-code** (**C**oarse/ **A**cquisition-code) disponible sur la porteuse **L1** pour les applications civiles (donc accessible à tous). C'est une série pseudo aléatoire de 0 ou 1 défini de façon déterministe par une fonction mathématique de période 1 ms à une fréquence de  $f_0/10 = 1,023$  MHz. Un code spécifique est attribué à chaque satellite afin que le récepteur puisse les identifier d'une façon univoque.

La courte période de ce signal (1 ms), permet au récepteur une acquisition et donc une identification rapide des satellites.

➤ Le **P/Y-code** disponible sur les deux porteuses **L1** et **L2** pour les applications militaires. Le P-Code (**P**recision code) est une série pseudo aléatoire de fréquence

$f_0=10,23$  MHz. Le P-code est généralement rendu inaccessible aux civils par l'activation d'une fonction dite A.S (Anti-Spoofing) qui encode le P-code.

Ce code n'est accessible qu'aux utilisateurs possédant des clés de décryptage comme l'armée américaine et certains de ses alliés. Ses caractéristiques sont inconnues et il est donc impossible de le reproduire.

Les différents satellites émettent tous sur les mêmes fréquences (L1 et L2), mais un code individuel leur est assigné.

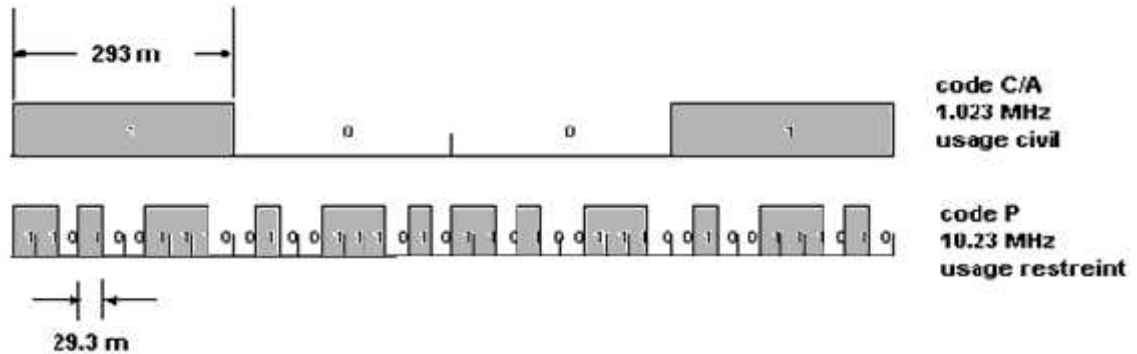


Figure 1.7 : Code C/A et P

### 3-1-Génération des signaux GPS:

Les données de navigation sont transmises par un signal D prenant les valeurs 0 ou 1, dont la fréquence est de 50Hz (50 bits/s).

Le signal est tout d'abord additionné modulo 2 au code choisi (P ou C/A).

La porteuse L1 est modulée en phase par le signal  $P \oplus D$  et en quadrature par le signal  $C/A \oplus D$  (où  $\oplus$  représente l'opérateur XOR).

La porteuse L2 est simplement modulée en phase par le signal  $P \oplus D$  (voir figure 1.8).

Le signal  $S_{L1}$  est constitué de deux composantes en quadrature modulée respectivement par les codes C/A et P et le signal D, les codes C/A et P Coexistant sur la porteuse sans interférence, et l'on peut écrire :

$$S_{L1}(t) = A_P \cdot C_P(t) \cdot C_D(t) \cdot \cos(\check{S}_{L1} \cdot t) + A_{C/A} \cdot C_{C/A}(t) \cdot C_D(t) \cdot \sin(\check{S}_{L1} \cdot t)$$

$$S_{L2}(t) = B_P \cdot C_P(t) \cdot C_D(t) \cdot \cos(\check{S}_{L2} \cdot t) \quad (1.1)$$

Avec :

$$C_P(t) = \pm 1 \text{ (code P).}$$

$$C_{C/A}(t) = \pm 1 \text{ (code C/A).}$$

$$C_D(t) = \pm 1 \text{ (message de navigation)}$$

$A_P$ ,  $A_{C/A}$  et  $B_P$  : Amplitudes des différentes composantes.

$\omega_{L1}$ ,  $\omega_{L2}$  : Pulsations respectives des signaux  $S_{L1}$  et  $S_{L2}$ .

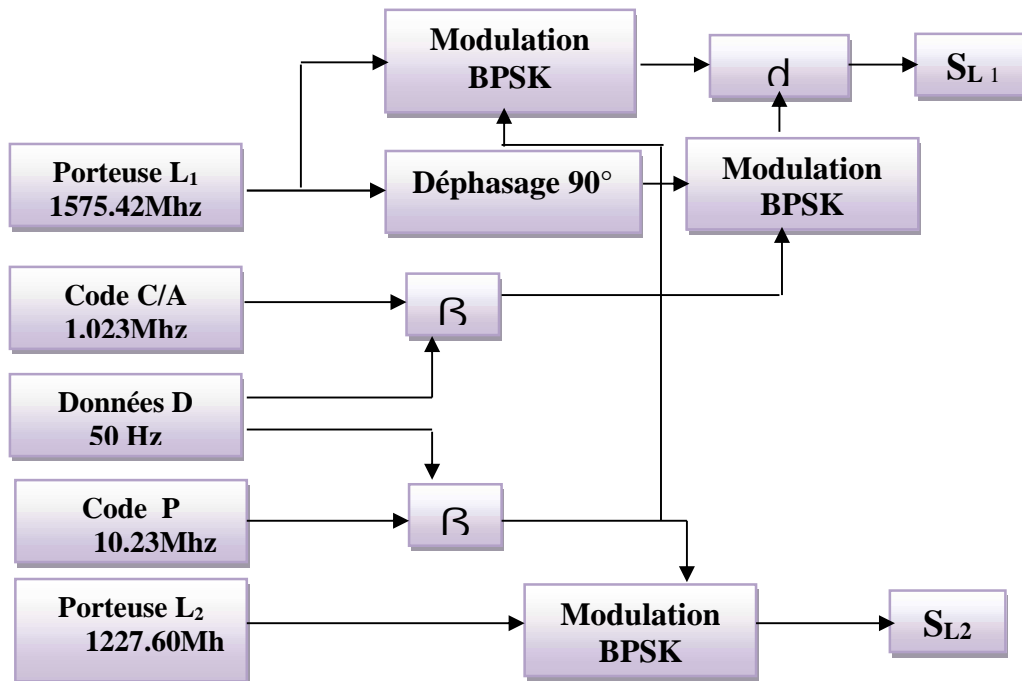


Figure 1.8 : Génération des signaux GPS

**3-2-Les niveaux de puissance :**

On obtient un spectre de raies dont l'enveloppe est montrée en Figure (1.9). Le code P génère une enveloppe en  $(\sin^2(x)/x^2)$  dont le lobe principal a une largeur de 20.46MHz, le code C/A génère la même enveloppe avec une largeur du lobe principal de 2.046MHz. Typiquement, la puissance associée à chaque raie est d'au moins 24 dB inférieur à la puissance totale du lobe principal, ce qui donne au lobe principal une puissance de plus de 95% de la puissance totale du signal GPS.

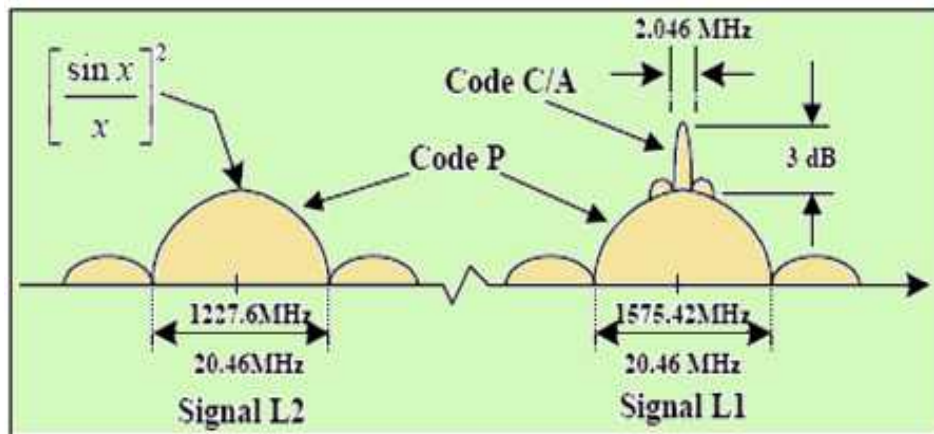


Figure 1.9 : Niveaux de puissance

### 3-3-Génération du code C/A :

Le code C/A (Coarse/Acquisition) est un code relativement court de 1023 chips et de 1 ms de période, il est généré sous une cadence de 1.023 MHz, on note que c'est un code de Gold qui est retenu grâce à ces propriétés de corrélation. Le code est généré à partir de deux configurations linéaires de dix étages comme présente dans la figure (1.10). Ces deux registres produisent deux polynômes générateurs :

$$G_1=1+x^3+x^{10}$$

$$G_2=1+x^2+x^3+x^6+x^8+x^9+x^{10}$$

La valeur de initialisation des registres  $G_1$  et  $G_2$  est : 1111111111

Les deux registres à décalage de 10 étages sont cadencés à 1.023 MHz, pratiquement le décalage est réalisé par deux multiplexeurs sélectionnant deux sorties du registre  $G_2$ . Ces deux sorties sont additionnées modulo 2 avant d'être à leur tour additionnées à la sortie du registre  $G_1$ . Ces opérations sont réalisées par le synoptique suivant :

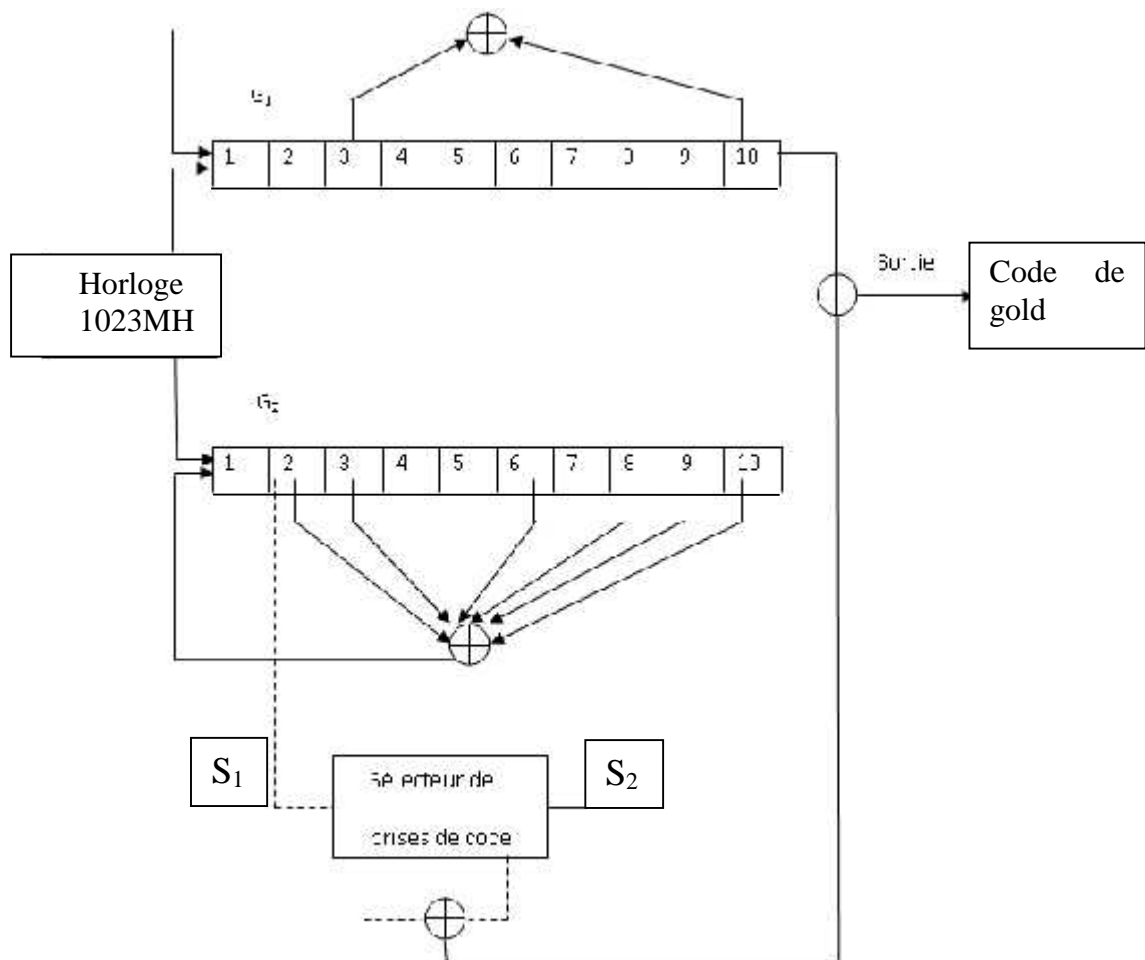


Figure 1.10 : La génération du code C/A

### **3-4-Le message de navigation :**

Nous allons à présent décrire brièvement les données de navigation contenues dans le signal GPS et la façon dont elles sont ordonnées.

#### **3-4-1-Format du message :**

Le signal émis par un satellite est composé de trames de 1500 bits. Chaque trame est divisée en sous trames contenant chacune 10 mots de 30 bits. Comme le débit du message est de 50 bits/sec, une trame est donc émise en 30 secondes.

Les sous trames 1, 2,3 contiennent un message qui en général ne change pas d'une trame à l'autre, ce sont des informations indispensables à la navigation, qui sont répétées toutes les 30 secondes, les sous trames 4 et 5, quant à elle, sont réservées à des message plus longs mais moins importants, en conséquence, il y a 25 messages différents pour les sous trames 4 et 5. On appelle alors trame principale l'ensemble des 25 trames différents, elle dure 12.5 minute.

Les mots de 30 bits se décomposent en 24 bits d'information et 6 bits de parité : les mots sont donc codés, à l'aide d'un code de hamming étendu. On rappelle qu'un code de hamming permet de corriger une erreur de transmission.

Longueur de message 1500bits (30s)	
Correction d'horloge+ les éphémérides 900bits (18s)	Des informations générales 600bits (12s)

**Tableau 1.1 :** Message de navigation

#### **3-4-2- Contenu du message :**

Pour qu'un utilisateur puisse déterminer sa position à l'aide du signal satellite, il faut qu'il connaisse la position des satellites et la distance qui le sépare de ceux-ci.

Les satellites GPS doivent donc émettre des éléments permettant de calculer leur position, ainsi que l'âge de ces informations, afin de déterminer les satellites à utiliser en priorité pour obtenir une meilleure précision. Tous ces éléments se retrouvent dans les sous trames 1, 2,3, répartis comme suit :

Sous trames	1	2	3
Contenu	L'âge des données la santé du satellite les coefficients de correction d'horloge	Les paramètres d'orbite (éphémérides)	

**Tableau 1.2 :** Contenu des sous trames 1, 2 et 3

Les éphémérides contiennent les paramètres orbitaux du satellite ainsi que leurs coefficients de correction.

Les sous trames 4 et 5 décrivent, quant à elles, les almanachs de tous les satellites en orbite et leur état de santé. L'almanach permet de calculer approximativement la position d'un satellite, et de déterminer s'il est visible ou pas.

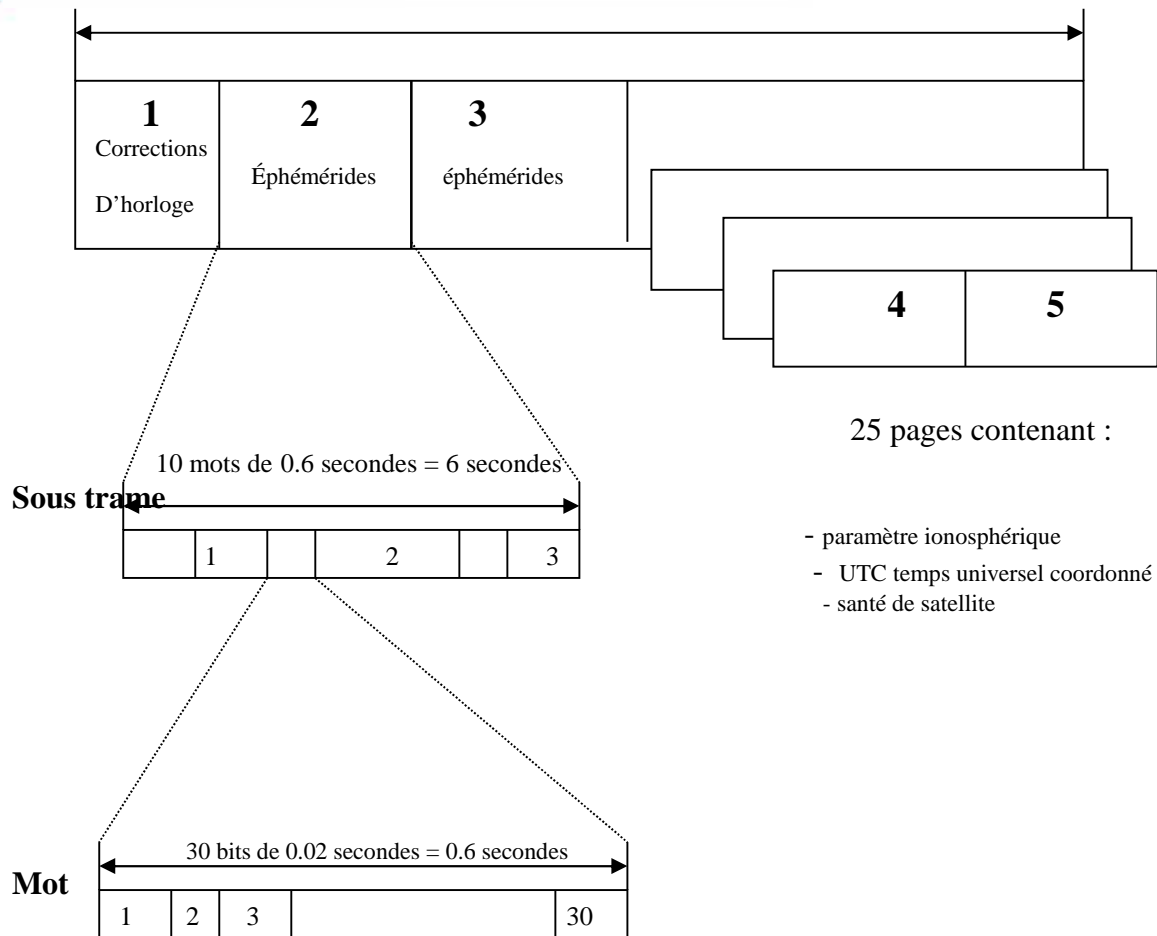
De plus, il donne une idée grossière de la vitesse relative du satellite et ainsi de l'effet doppler à prendre en compte pendant l'acquisition. La sous trame 4 contient également

Les coefficients du modèle ionosphérique, qui permet d'affiner le calcul de la distance satellite récepteur, notons pour conclure que le segment de contrôle du système GPS (les stations fixes au sol qui supervisent les satellites) calcule et rafraîchit les éphémérides régulièrement (une fois par jour), et transmet les nouvelles informations aux satellites.

Comme ces corrections ne sont pas rafraîchies simultanément, l'utilisateur a intérêt à utiliser les plus récentes (l'âge des données étant donné dans la sous trame 1).

Les informations spécifiques à chaque satellite, comme les corrections d'horloge et les éphémérides des satellites sont répétées en totalité dans toutes les "phrases" (les 900 premiers bits), soit toutes les 30 secondes pendant 18 secondes.

Les informations générales dont le contenu change à chaque phrase est transmis en totalité en 12.5 minutes (durée nécessaire pour 25 phrases).



**Figure 1.11:** Format du message de navigation

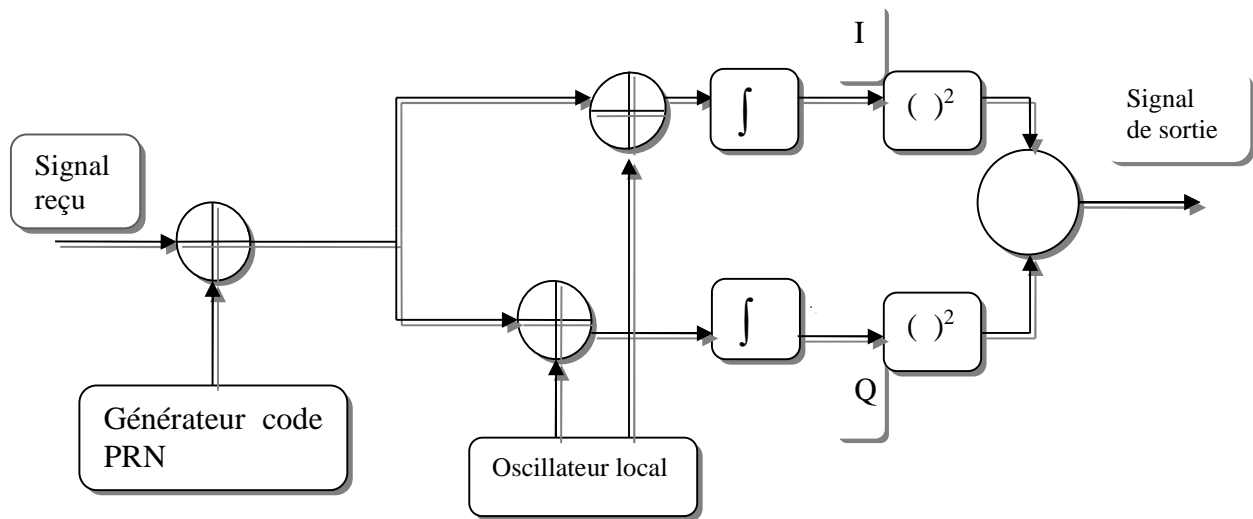
### 3-4-Acquisition du signal :

L'acquisition est une recherche tridimensionnelle dans le temps, la fréquence et le code d'accès du satellite dans le but de déterminer les satellites visibles ainsi que le code phase et la fréquence du signal reçu correspondant à un canal donné. Le code phase est nécessaire afin de générer un code PRN local qui est parfaitement aligné avec le code reçu tandis que la fréquence à son tour, affectée par un doppler variant entre  $\pm 5\text{KHz}$ , permet de générer une réplique locale utilisée afin d'enlever la porteuse du signal reçu.

Il existe trois méthodes d'acquisition du signal (série, parallèle sur la fréquence, parallèle sur le code). Dans les trois méthodes, il s'agit d'une exploration des domaines temporel et fréquentiel discrétiser avec des pas prédéfinis, Pour chaque méthode le récepteur calcule la corrélation du signal reçu et avec une réplique retardée et modulée du code C/A.



Dans notre travail on s'intéresse à l'acquisition en série dont le synoptique correspondant est représenté par le schéma de la figure (1.12):



**Figure 1.12 :** Schéma de l'acquisition série

D'après cette figure, on constate que l'algorithme est basé sur la multiplication du signal reçu par un code PRN et une porteuse générée localement. Le générateur PRN génère une séquence correspondante à un satellite donné, cette séquence possède un code phase entre 1 et 1023 chips. Le signal reçu est multiplié par le code PRN puis multiplié par une porteuse générée localement. Cette dernière constitue le signal 'I' tandis que la multiplication avec la porteuse déphasée de  $90^\circ$  génère le signal 'Q'. I et Q sont intégrés sur un temps donné, qui est la longueur d'un code C/A donc 1ms, finalement ces deux voix sont mises au carré puis additionnées.

La sortie est la valeur de la corrélation entre le signal reçu et le signal généré localement. Si cette sortie dépasse un certain seuil prédéterminé on le localise puis on récupère la fréquence et le code phase correspondant.

En acquisition série, on a deux paramètres à balayer selon plusieurs valeurs :

- La fréquence qui doit balayer les valeurs possibles entre  $F_i - 5\text{KHz}$  et  $F_i + 5\text{KHz}$  avec un pas de 500Hz.
- Un code qui glisse sur les 1023 code phases différentes.

#### **4-Les services fournis dans le GPS:**

Le GPS fournit deux types de positionnements, le positionnement précis (**pps**) et le positionnement standard (**sps**). Seul le positionnement standard est librement disponible, le **pps** est réservé à l'armée américaine.

##### ➤ **LE PPS**

Le PPS (précise positioning service) est un système de positionnement précis. L'erreur de positionnement maximale dans 95 % des cas est inférieure à 21 mètres en horizontale et à 27.7 mètre en vertical. L'heure peut être obtenue avec une précision de 100 nanosecondes.

Les signaux du **pps** sont transmis sur deux fréquences différentes, appelées L1, L2 et qui contiennent le code de précision ou p-code. Le p-code est généralement crypté, le mode A-S (anti-spoofing) est activé. Le signal L2 est également utilisé pour déterminer le retard introduit par les couches de l'ionosphère. Le PPS n'étant normalement pas accessible aux civils, nous ne décrivons pas ce système.

##### ➤ **LE SPS**

LE SPS (standard positioning service) est la version civile du GPS communiqué sur une seule fréquence L1, et qui contient le code d'acquisition dit "grossier"(C/A, coarse acquisition code), ainsi que les différents messages de navigation.

En cas de conflit, l'armée américaine peut supprimer totalement toute utilisation du GPS dans la zone de conflit, son fonctionnement restant inchangé en dehors de la zone de conflit.

## Introduction :

Connaitre la position était un besoin qui s'est de plus en plus exprimé depuis l'antiquité, notamment pour les navires, les voyageurs etc. A ces époques, seule la nature offrait un moyen de positionnement par le biais du soleil ou des étoiles, on permettant ainsi de connaître le nord géographique. Ces moyens primaires de localisation donnée un positionnement de très faible précision. Au XXème siècle, avec l'avènement des radiocommunications, la navigation astronomique utilisant la boussole et navigation naturelle utilisant les astres ont été abandonnés pour ouvrir les portes aux systèmes de radionavigation. Ces derniers ont exploité le progrès technologique qu'ont connu les radiocommunications, on particulier les communications par satellites. C'est dans se cadre que le système américain NAVSTAR GPS était le premier système de navigation par satellite.

### 1-Principe:

Le principe du positionnement GPS est très proche du principe de triangulation. On mesure la distance entre l'utilisateur et un certain nombre de satellites de positions connues. Pour cela, le récepteur mesure la différence de temps entre l'émission et la réception du signal. Le signal voyageant pratiquement à la vitesse de la lumière, on peut appliquer la relation :

$$D=c.t$$

Avec

- **D** : distance entre le récepteur et le satellite (c'est en fait le rayon d'un cercle où le satellite serait le centre).
- **c** : vitesse de propagation des signaux radios (la vitesse retenue par convention pour le système GPS est  $c = 299\,792\,458 \text{ m.s}^{-1}$ ),
- **t** : durée de signal entre l'émission et la réception.

On obtient donc des "pseudo-distances" qu'il faudra corriger des perturbations naturelles.

Comme la longueur d'onde du signal codé est de 10 à 100 m selon le code utilisé, la distance absolue que l'on obtient n'est estimée qu'à quelques mètres près.

Connaissant la position des satellites ainsi que les pseudo-distances, on définit ainsi des sphères centrées sur les satellites et dont l'intersection donne deux positions : l'une sur le globe terrestre et l'autre dans l'espace (cette dernière sera éliminée).

Les données (code et phase) enregistrées par le récepteur GPS sur le terrain sont ensuite traiter par des logiciels qui prennent en compte les différentes sources d'erreurs dues aux perturbations naturelles.

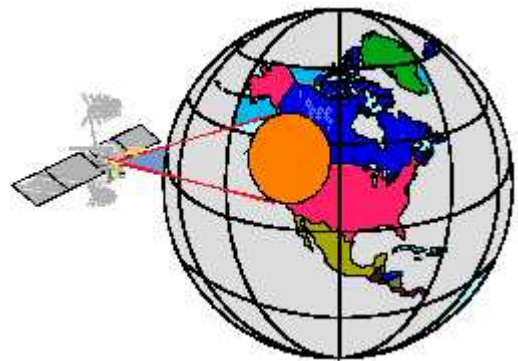
## 2-Fonctionnement de GPS:

Les récepteurs GPS fonctionnent sur le principe de la « TÉLÉMÉTRIE ». Le récepteur calcule la distance entre un point sur terre et plusieurs satellites afin d'établir la latitude et la longitude de ce point.

### 2-1-Positionnement à partir du GPS:

#### Un Seul Satellite Visible:

Supposons que vous allumez votre récepteur GPS et qu'il capte le signal d'un satellite. Il vous donne sa position et sa distance de votre poste. Une seule distance ne vous aide pas beaucoup car tout ce que vous savez, c'est que vous vous trouvez quelque part dans un cercle dont la circonférence détermine votre distance du satellite. Vous êtes toujours perdu.



#### Deux Satellites Visibles:

Si le récepteur capte un signal provenant d'un deuxième satellite, vous pouvez cerner un peu mieux votre position. Vous savez maintenant que vous êtes quelque part dans l'intersection de ces deux cercles. Vous ne savez toujours pas où vous vous trouvez exactement, mais votre situation s'améliore.



#### Trois Satellites Visibles :

Maintenant, si votre récepteur capte les signaux d'un troisième satellite, vous vous trouvez dans l'intersection des trois cercles. Vous savez où vous vous trouvez, mais cela manque de précision!

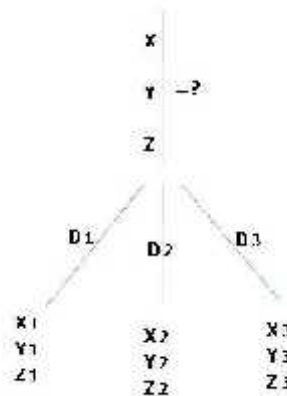


**Quatre Satellites Visibles :**

Avec quatre satellites, vous obtenez votre Positionnement par point unique (absolu) et l'élévation du point. Voilà, vous savez où vous vous trouvez, à quelques mètres près!

**2-2-Triangulation classique :**

Toute position dans l'espace tridimensionnel est repérée par 3 points. Le centre du repère étant choisis arbitrairement.



$$D_i = \sqrt{(X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2 + (Z - Z_i)^2} \quad ; i = 1, 2, 3 \quad (2.1)$$

C'est le principe utilisé d'ordinaire par les instituts géographiques, en temps normal ce système s'appuie sur un réseau de balise terrestre fixe.

Ce type de positionnement est appelé positionnement en 2D, car il donne seulement une information concernant la latitude et la longitude. Il est donc nécessaire de faire intervenir un quatrième satellite dans le positionnement afin de déterminer l'altitude du récepteur GPS, on obtient alors un positionnement 3D.

Connaissant la distance qui sépare le récepteur du satellite et la position du satellite, il est possible de dessiner une sphère imaginaire autour de chaque satellite, sur laquelle se situe obligatoirement le récepteur.

L'intersection de ces deux sphères donne un cercle de position sur lequel se situe le récepteur. En continuant ainsi, on trouve que l'intersection de trois de ces sphères donne deux points, où est susceptible de se trouver le récepteur. L'utilité d'un quatrième satellite s'avère alors de

nouveau utile afin d'éliminer un de ces deux points. La position 3D est ainsi définie par quatre satellites, donc quatre sphères de positionnement.

Certains récepteurs sont capables d'affiner leurs calculs en utilisant plus de quatre satellites (ce qui rend les mesures plus faciles) tout en ôtant les sources qui semblent peu fiables. Avec une horloge assez stable, un récepteur peut calculer la position de satellite en 3D grâce à trois satellites seulement (cela reste encore un cas extrêmement rare). L'imprécision sera alors due au décalage de l'horloge.

### 3-Les différents types de mesure:

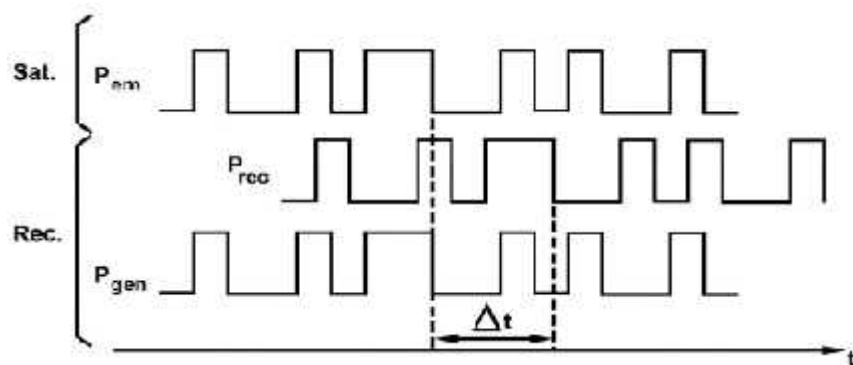
#### 3-1-La mesure de distance:

Toute la présentation précédente reposait sur l'hypothèse que l'on connaissait exactement la distance séparant le satellite du récepteur, étudions comment calculer cette distance.

Le principe est simple : le satellite envoie un signal vers le récepteur, celui-ci détermine le temps de transmission de ce signal et ainsi peut déduire la distance le séparant du satellite grâce à l'équation: **Distance = vitesse x temps**

La célérité des ondes transmises est proche de celle de la lumière : 300 000 km/s.

Il reste donc à déterminer le temps de transmission du signal. Pour cela, le récepteur et le satellite émettent au même moment une trame pseudo aléatoire identique appelée ainsi car elle est générée par des équations très complexe, la rendant ainsi unique. Une fois que cette trame sera reçue par le récepteur, celui-ci pourra la décaler dans le temps de façon à la faire coïncider avec celle qu'il a générée. La mesure du temps de transmission est déduite de ce procédé, et ainsi on peut connaître la distance séparant le récepteur du satellite.



**Figure 2.1 : Mesure de pseudo distance**

Pour valider tout le raisonnement qui précède, il faut que la mesure du temps soit extrêmement précise. En effet, si une erreur d'un millième de seconde est faite, cela produit une erreur de Position de 300km. A la vitesse de la lumière, une très grande précision est de rigueur. Les horloges internes des satellites sont très précises car il s'agit d'horloges atomiques au Césium, cependant celles des récepteurs sont beaucoup moins. La solution est d'utiliser un 4<sup>ème</sup> satellite.

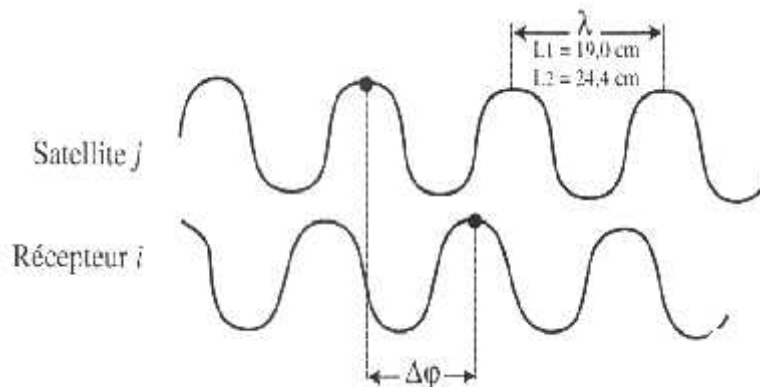
### 3-2-La mesure de phase:

La donnée que l'on récupère à la sortie d'un récepteur GPS est la différence entre la phase de l'onde émise par un satellite et la phase d'un oscillateur interne au récepteur. La phase de l'onde reçue est affectée par l'effet Doppler (la variation de la fréquence du « son » perçu en fonction de la distance sa source et observateur) du au déplacement du satellite, la réfraction atmosphérique, et le bruit de mesure du récepteur.

On peut écrire la différence de phase  $\Phi_{ij}(t_j)$  au temps  $t$ , à la station  $j$ , et pour les satellites  $i$ , comme suit :

$$\Phi_{ij}(t_j) = \Phi_{ij}^r - \Phi_j^1 + n_{ij} + \Phi_b \quad (2.2)$$

- $t_j$  : Temps de la réception du signal à la station  $j$ .
- $\Phi_{ij}^r$  : Phase reçue à la station  $j$  en provenance du satellite  $i$ .
- $\Phi_j^1$  : Phase de l'oscillateur du récepteur  $j$ .
- $\Phi_{bruit}$  : Bruit aléatoire sur la mesure de phase.
- $n_{ij}$  : Un entier ( $n$  cycles) représentant l'ambiguïté de phase.



**Figure 2.2 :** Mesure de phase

Par ailleurs, le signal reçu au temps  $t_j$  est lié au signal émis au temps  $t_i$  par le  $i^{\text{ème}}$  satellite par relation suivante:

$$t_j = t_i + \tau_{ij}(t_j) \quad (2.3)$$

Dans laquelle  $\tau_{ij}$  est le temps de propagation qui dépend de la géométrie satellite station et des perturbations ionosphériques et troposphériques.

On en déduit que la phase de signal reçu au sol est liée à la phase transmise par le satellite par:

$$\Phi_{ij}^r(t_j) = \Phi_i^t(t_j - \tau_{ij}) \quad (2.4)$$

Cependant, si l'on compare les équations (2.2) et (2.4), on se rend immédiatement compte de la difficulté qu'il y a à employer les observations de phase plutôt que les pseudo-distances. Avec ces dernières, on mesure directement la distance satellite récepteur. Avec les observations de phase, le terme d'ambiguïté (nombre de cycles entiers) doit être estimé avant que l'on puisse tirer avantage de la précision de cette observation. L'estimation de l'ambiguïté mène à des complexités dans l'utilisation des observations de phase, inexistantes avec les pseudo-distances. Le tableau qui suit, résume les avantages et les inconvénients des deux types d'observations :

	<b>Pseudo distances</b>	<b>Observations de phase</b>
<b>Avantages</b>	Non ambiguës Simples	Possibilité d'une grande exactitude de positionnement
<b>Inconvénients</b>	Faible exactitude de positionnement	Complexité plus grande

**Tableau 2.1** : Comparaison entre les deux types de mesures

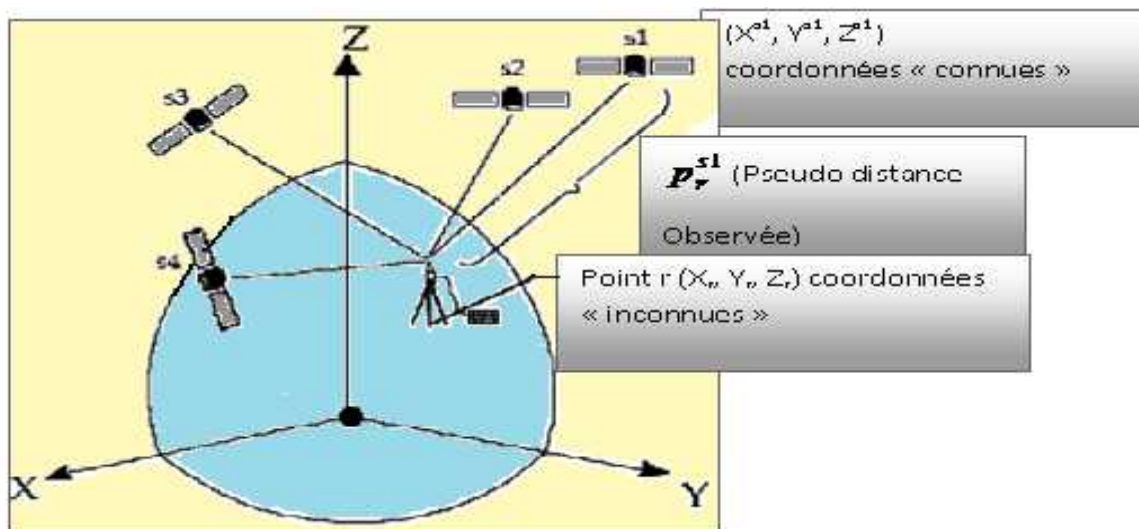


#### 4-Types de positionnement GPS :

Jusqu'à présent, nous avons décrit les trois segments du GPS et les composantes des signaux diffusés par les satellites. Les principales méthodes de positionnement sont : Positionnement absolu et positionnement relatif.

##### 4-1-positionnement absolu :

Le positionnement au moyen du GPS peut s'effectuer de façon absolue ou de façon relative. En positionnement absolu, les coordonnées d'un récepteur en un point (inconnu) sont établies relativement au cadre de référence des satellites d'après les positions (connues) des satellites GPS suivis. Le positionnement absolu est également dit positionnement autonome ou simplement positionnement par point unique (point positioning). Dans le positionnement relatif, les coordonnées d'un récepteur en un point inconnu sont établies relativement à celles d'un récepteur en un point connu.



**Figure 2.3 :** Positionnement autonome

La figure (2.3) illustre la notion de positionnement autonome. Grâce aux éphémérides, la position de n'importe quel satellite à n'importe quel moment dans le temps peut être calculée. Sur la figure, s1, s2, s3 et s4 représentent quatre satellites différents qui sont suivis.

La position de ceux-ci est donnée par rapport au centre de la terre dans le système de coordonnées x, y et z, les coordonnées de s1 sont notées  $(Xs1, Ys1, Zs1)$ , les coordonnées de r le point inconnu relativement au centre de la Terre sont  $(Xr, Yr, Zr)$ . La pseudo distance observée  $p_r^{s1}$ , permet d'établir la relation entre les coordonnées connues du satellite 1 et les

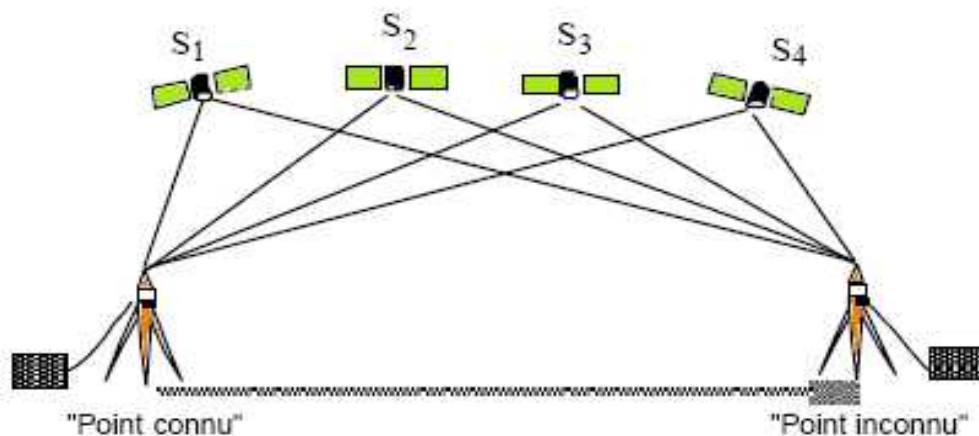
coordonnées inconnues du récepteur au moyen de l'équation d'un vecteur dans l'espace tridimensionnel :

$$P_r^{s1} = \sqrt{(X^{s1} - X_r)^2 + (Y^{s1} - Y_r)^2 + (Z^{s1} - Z_r)^2} + \text{erreurs} \quad (2.5)$$

Une équation similaire à (2.5) décrivant la relation entre le satellite 1 et le récepteur, peut être formulée pour les différents satellites suivis. Grâce à un minimum de quatre satellites, toutes les inconnues ( $X_r$ ,  $Y_r$ ,  $Z_r$ ) et un terme relié à la synchronisation des horloges qui fait partie des erreurs) peuvent être calculées.

#### 4-2-Positionnement relatif :

La notion de positionnement relatif est illustrée à la figure (2.4). Plutôt que d'établir la position d'un point sur la Terre par rapport aux satellites (comme c'est le cas en positionnement autonome), la position d'un point sur la Terre est établie par rapport à celle d'un autre point connu. L'avantage du positionnement relatif sur le positionnement autonome réside dans l'exactitude beaucoup plus grande qu'il permet, puisque la plupart des erreurs dans les observations GPS sont communes aux points (connu) et (inconnu) et peuvent être annulées durant le traitement des données.



**Figure 2.4 :** Positionnement relatif

Les expressions positionnement différentiel et positionnement relatif sont parfois employés indifféremment l'une pour l'autre. Toutefois, étant donné que le positionnement différentiel désigne plus souvent un type particulier de positionnement relatif, appliquant des corrections mesurées à un point de position (connue) aux observations effectuées en un autre, de position (inconnue),

## 5-Les sources d'erreurs :

### 5-1-Les orbites :

L'erreur d'orbite est la différence entre la position d'un satellite calculée au moyen des éphémérides diffusées et la position réelle du satellite dans l'espace. L'influence des orbites sur la détermination dépend du mode de positionnement, pour un positionnement absolu, l'erreur sur la position du satellite affecte directement la position de la station lorsqu'on utilise en temps réel les éphémérides radiodiffusées, on obtient un positionnement à 10m près. Lors d'un positionnement relatif, l'erreur introduite par les orbites sur la ligne de base est proportionnelle à la longueur de la ligne, les orbites radiodiffusées utilisées pour le positionnement en temps réel ont généralement une précision de quelques mètres, ce qui implique une erreur de plusieurs centimètres sur une ligne de base de 100 km.

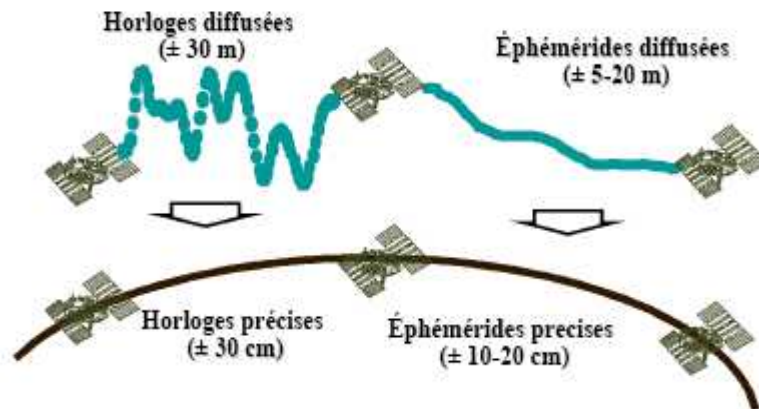


Figure 2.5: Erreurs d'éphéméride et d'horloge

### 5-2-Les dégradations volontaires du système :

Les signaux émis par les satellites sont soumis à des dégradations volontaires visant d'une part à limiter l'utilisation civile du système GPS et d'autre part à en protéger l'utilisation militaire: l'accès sélectif (SA : *Selective Availability*) et l'anti-brouillage (AS : *Anti-Spoofing*)

#### 5-2-1-L'accès sélectif :

L'accès sélectif (SA) consiste en au moins deux types de dégradation :

- Dégradation par déphasage de la fréquence d'horloge des satellites.
- Dégradation des données du message de navigation (éphémérides et paramètres d'horloge).

**5-2-2-L'antibrouillage :**

L'antibrouillage (AS) consiste à ajouter au code P, sur  $L_1$  et  $L_2$ , le code W, classifié militairement et ainsi former le code Y. Une telle mesure permet d'éviter le brouillage volontaire du système par un utilisateur qui diffuserait un signal proche de celui du GPS et créant ainsi des erreurs de positionnement pour les autres utilisateurs. L'accès au code P et aux clefs de protection SA et AS correspond au service PPS de positionnement précis.

**5-3-Les horloges :**

L'instabilité des horloges est la source d'erreur la plus importante dans les mesures GPS. Les horloges des satellites sont les plus stables et leurs dérives impliquent seulement des variations de 10 à 30 m sur la mesure de la distance satellite-station. Par contre la grande instabilité des horloges des récepteurs induit un décalage de 10 à 100m, la correction d'horloge satellite est modélisée à partir des données du message de navigation par contre la correction d'horloge récepteur est estimée lors du calcul.

**5-4-L'ionosphère :**

Les effets induits varient entre moins d'un mètre et une cinquantaine de mètres. En positionnement relatif, lorsque les stations sont proches (quelques kilomètres) les variations ionosphériques observées sont corrélées et le calcul de la ligne de base n'est pas affecté. Pour des lignes de base plus importantes, les effets ionosphériques ne sont plus les mêmes sur les différents trajets satellite-station, une correction est alors nécessaire. Ces effets sont dépendants de plusieurs paramètres : la latitude (plus agité aux pôles et à l'équateur), l'activité solaire, le champ magnétique terrestre, la période de l'année, le jour et la nuit. L'ionosphère étant un milieu dispersif, la réfraction induite sur les signaux dépend de leurs fréquences. Cette propriété est utilisée pour la correction de ces effets sur les signaux GPS. En combinant linéairement les observations sur les deux fréquences ( $L_1$  et  $L_2$ ), on supprime au premier ordre le retard ionosphérique.

**5-5-La troposphère :**

La troposphère est la couche basse de l'atmosphère, elle s'étend du sol jusqu'aux environs de 80 km d'altitude. C'est un milieu non dispersif pour les ondes de fréquence inférieure à 20 GHz, les combinaisons entre les deux fréquences  $L_1$  et  $L_2$  ne permettent donc pas de s'affranchir des hétérogénéités de propagation. La troposphère engendre un retard sur le signal correspondant à un allongement moyen de la distance satellite-station supérieur à 2

mètres. Cet allongement dépend de la température et de la pression le long du trajet du signal ainsi que de l'altitude de la station.

### **5-6-Les multi trajets :**

Sont introduites lorsque des signaux reçus directement se combinent à d'autres, réfléchis par des objets voisins, de telle manière que le vrai signal subit une interférence attribuable au signal réfléchi, ils ne sont pas modélisables, car ils dépendent de l'environnement de l'antenne.

Ils peuvent engendrer des interférences destructrices ou, fausser les calculs si le signal réfléchi est retenu par le récepteur, de plus, selon la direction de l'antenne et le coefficient de réflexion, le signal réfléchi peut être plus fort que le signal original.

Les mesures sur les codes sont plus sensibles et on peut avoir de 10 à 20m de différence en comparant des pseudo-distances à deux époques consécutives.

Pour les mesures de phases, en relatif, avec des distances courtes et une durée d'observation assez longue, l'erreur de trajet multiple est d'ordre du centimètre, l'effet augmente si l'on diminue le temps d'observation.

### **5-7-Les erreurs de précision :**

La position de l'observateur, ainsi qu'elle est calculée par le récepteur GPS, est fournie avec une précision de l'ordre de quelques mètres. Cette précision dépend d'un certain nombre de facteurs, l'un des plus significatifs étant le nombre de satellites (visibles). En outre, la configuration des satellites visibles c'est-à-dire les positions respectives des uns par rapport aux autres à une influence considérable sur la précision des résultats. En effet, plusieurs satellites groupés dans une même région du ciel conduisent à une précision plus faible que le même nombre de satellites judicieusement répartis sur la demi-sphère céleste au-dessus de l'observateur.

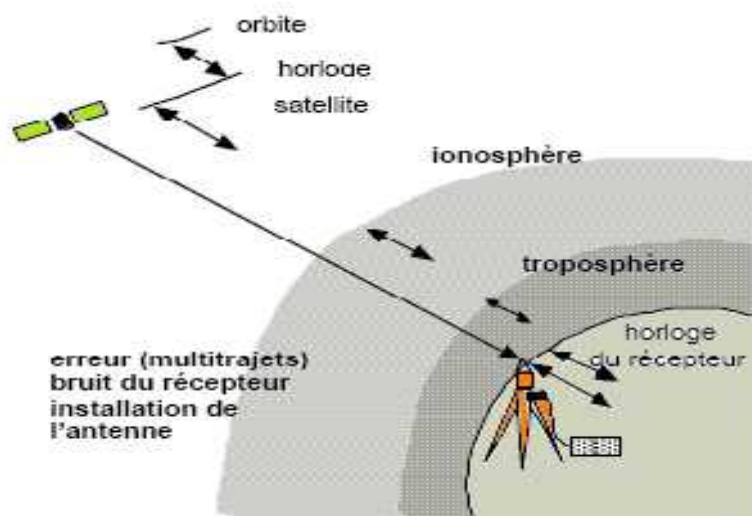


Figure 2.6 : Erreurs courantes

## **6-Les récepteurs GPS :**

Les récepteurs GPS peuvent être sous-divisés en trois catégories :

- Les récepteurs multicanaux
- Les récepteurs séquentiels
- Les récepteurs multiplex

**Les récepteurs multicanaux :** constituent le top-niveau des récepteurs GPS. Ils sont généralement utilisés pour des applications ultra précises ou dans des applications de positionnement dynamique.

**Les récepteurs séquentiels :** existent en version un ou deux canaux. Le deuxième canal est généralement utilisé pour l'acquisition d'un satellite initial et pour recevoir le message de navigation.

**Les récepteurs multiplex :** forment un compromis entre les récepteurs multicanaux et séquentiels. Ils peuvent malgré un principe de fonctionnement analogue à un récepteur séquentiel et grâce à une conception améliorée, faire un enchaînement entre les différents satellites en moins de 20 millisecondes.

La majorité des récepteur traite uniquement le code C/A (coarse acquisition) tandis que d'autres ont la capacité d'acquérir le code P (precision), un récepteur P acquiert une première fois le code C/A pour obtenir le temps GPS puis il accroche le code P.

Les récepteurs bi-fréquences estiment le retard ionosphérique améliorant de ce fait la précision des mesures. Un récepteur mono-fréquence (exploitant uniquement L1) utilise le modèle GPS de l'ionosphère pour élaborer ces corrections.

Il existe des utilisations spécifiques, pour les différents récepteurs GPS tels qu'en aéronautique ou en marine. Si le traitement des signaux GPS est identique pour un appareil d'une gamme donnée, les interfaces utilisateurs sont adaptées a l'application, un récepteur GPS dédiée à la navigation visualisera le cap ou la distance parcourue, en plus de la position, tandis qu'un récepteur de géodésie affichera les retards ionosphériques ou le biais d'horloge.

### **6-1-Structure générale d'un récepteur :**

Un récepteur GPS est constitué de sous-ensembles parfaitement délimités. On distingue :

- Une antenne.
- Un préamplificateur à faible bruit (LNA).
- Un module radiofréquence (RF).
- Un module numérique.

- Une interface utilisateur (clavier et afficheur).
- Une alimentation.

### **6-1-1-L'antenne :**

L'antenne convertit l'énergie des ondes électromagnétiques en provenance des satellites en un courant électrique capable d'être traité par les circuits électroniques du récepteur. La taille et la forme de l'antenne sont critiques et doivent être adaptées aux signaux reçus. L'antenne peut capter uniquement L1 ou, L1 et L2.

### **6-1-2- Le préamplificateur à faible bruit :**

Le rôle du préamplificateur à faible bruit est d'amplifier le signal utile tout en minimisant le niveau du bruit thermique. Le niveau des signaux captés est très faible.

Le préamplificateur doit donc amplifier ces signaux sans dégrader de façon notable leur qualité. Ce sous-ensemble doit se situer à proximité de l'antenne pour limiter la dégradation du rapport signal à bruit. Un câble coaxial permet d'une part, de transmettre le signal au récepteur lui-même et d'autre part d'alimenter le préamplificateur.

Un filtre en tête atténue les fréquences hors bande. Celui-ci peut être à large bande recouvrant les fréquences de L2 à L1 ou sélectif à double bande. Le choix du filtre dépend de l'application. Au minimum, un filtre non sélectif est nécessaire pour supprimer les fréquences images du signal avant la transposition des fréquences.

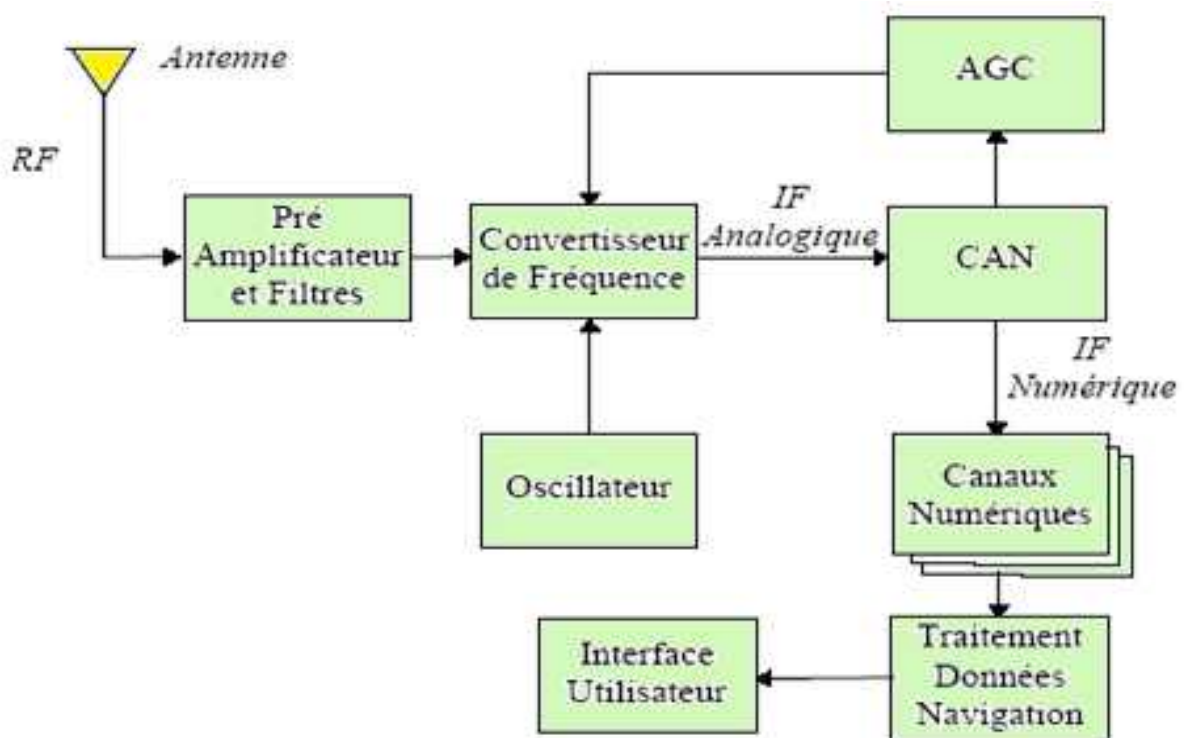
### **6-1-3-Le module RF :**

Le module RF assure la transposition des signaux L1 et L2 (le cas échéant) vers des fréquences plus faibles, appelées fréquences intermédiaires (IF). Ces IF permettent de traiter plus aisément le signal. La transposition est effectuée grâce au battement, ou produit du signal d'entrée avec une sinusoïde pure ; appelée oscillateur local (LO), générée par un synthétiseur de fréquence. Ce dernier est piloté par l'horloge à quartz du récepteur. Le signal IF contient la modulation du signal. Seule la fréquence porteuse a été décalée en préservant la dérive due à l'effet doppler. Les filtres IF offrent des bandes étroites adaptées au signal. Un dispositif de contrôle automatique de gain (GAC) régule le niveau du bruit (le signal est largement sous le bruit thermique avant sa compression par l'opération de corrélation). Le signal est numérisé après un échantillonnage, la conversion A/N a lieu directement en fréquence intermédiaires IF à quelques mégahertz pour les récepteurs C/A. ceci autorise une plus grande souplesse

dans le traitement numérique pour pouvoir, par exemple prendre en compte d'autres satellites (Glonass...).

#### **6-1-4-le module numérique :**

Les premières architectures des récepteurs GPS ont été analogiques. Les récepteurs d'aujourd'hui traitent numériquement le signal au plus tôt dans la chaîne. Les circuits numériques remplacent les circuits analogiques en fonction de leurs performances et de leur coût. Dans le module numérique, on distingue principalement un ou deux circuits ASIC (Application Specific Integrated Circuit) dédiés au traitement GPS et un processeur de signal. On trouve également les circuits traditionnels d'une structure programmé (mémoires, ports d'interface,...)



**Figure 2.7 :** Structure d'un récepteur GPS

#### **Conclusion :**

Dans cette approche non exhaustive du GPS, nous pouvons retenir l'immense champ d'action de ce système et ses multiples applications. Cependant son utilisation courante avec un matériel classique ne permet pas d'obtenir des précisions supérieures à 50m suffisantes dans certains cas, mais pas dans tous.



**Introduction :**

Le Système GPS a été déclaré opérationnel le 8 décembre 1993. Il présente un grand intérêt pour plusieurs communautés scientifiques et pour différentes raisons. L'utilisation du système de navigation par satellite GPS pose à l'heure actuelle au moins 4 problèmes (La disponibilité, La continuité de service, l'intégrité et la vulnérabilité aux brouillages).

Le système GPS n'est pas nécessairement plus vulnérable aux brouilleurs que les autres systèmes de radionavigation, mais la localisation de sa bande de fréquence d'opération et son principe de fonctionnement le rendent sensible à plusieurs types de brouilleurs et de perturbations.

Pour l'aviation Civile pose des problèmes liés à l'intégrité du système et à sa vulnérabilité au brouillage. L'intégrité peut être garantie, au moins partiellement, par des stations de contrôle terrestres additionnelles, par l'augmentation du nombre de satellites ou par un traitement au niveau du récepteur, tel qu'un couplage avec d'autres moyens de détection ou de navigation secondaire.

L'objet de ce chapitre est de recenser les sources potentielles de brouillage sur les signaux de GPS. Il est question alors du brouillage non Intentionnel et celui volontaire (Intentionnel) qui pourrait également être présent à cause des limitations imposées par les règles de cohabitation des systèmes dans les bandes considérées. Il faut savoir que la puissance nominale de réception des porteuses à l'entrée du récepteur est de l'ordre de -160 dBW pour un angle d'élévation de  $5^\circ$  et en supposant un gain d'antenne du récepteur de '0' dB. Le faible niveau de ce signal fait qu'un nombre de signaux extérieurs d'origines diverses peuvent se retrouver à l'entrée du récepteur avec des niveaux comparables, voire largement supérieurs. Heureusement le gain de traitement apporté par la procédure de désétalement de spectre permet de réduire l'influence de ces brouilleurs.

## **1-Classification des brouilleurs :**

Il s'agit des brouilleurs retrouvés dans le domaine civil et des autres types de brouilleurs, on peut les classer selon leur largeur de bande:

- Brouilleurs à bande étroite: les raies parasites.
- Brouilleurs à bande semi étroite: 10 KHz à 100 KHz.
- Brouilleurs à bande large: plus de 100 KHz.

On peut faire, pour les brouilleurs GPS, une première distinction entre les brouilleurs intentionnels et les brouilleurs non intentionnels. Les premiers doivent être pris en compte pour les applications militaires, ce type de brouilleur ne sera pas considéré. On se limite ici aux problèmes concernant les récepteurs d'usage civil.

Les effets du brouillage sur un récepteur GPS est caractérisé par des puissances pour un signal brouillé en termes de :

- rapport signal à bruit (S/N)
- rapport brouilleur à signal (J/S).

On verra que les sources potentielles des brouilleurs pour une application normale sont nombreuses et qu'il est nécessaire de connaître les relations entre la puissance des signaux mise en jeu, les isolations entre émetteurs, les distances de brouillage.

## **2-Vulnérabilités d'un récepteur GPS :**

Cette section introduit l'architecture interne générique d'un récepteur GPS par l'identification de ses modules qui sont les plus vulnérables aux brouilleurs radiofréquences. La résistance aux brouillages dépendra de la structure du signal GPS, du design du récepteur ainsi que de l'architecture du système global.

Il existe plusieurs types de design de récepteurs GPS disponibles sur le marché qui utilisent différentes techniques de conversion en fréquence, d'acquisition de code, de maintien des boucles accrochées et de traitement du signal.

L'analyse qui suit est basée sur le schéma bloc de la figure (3.1) représentant l'ensemble des parties d'un récepteur GPS générique. Il existe quatre régions où le récepteur numérique est vulnérable.

1. L'étage (1) de réception RF comprenant un module d'amplification et de filtrage.
2. L'étage (2) un contrôle automatique du gain (AGC) et un convertisseur analogique numérique (CAN).
3. L'étage (3) la boucle de code (DDLL) qui isole un code particulier en provenance d'un satellite GPS.

4. L'étage (4) la boucle de phase (DPLL) qui maintient la phase de la porteuse placée en fréquence intermédiaire.
5. L'étage (5) de démodulation des données qui extrait le message de navigation.

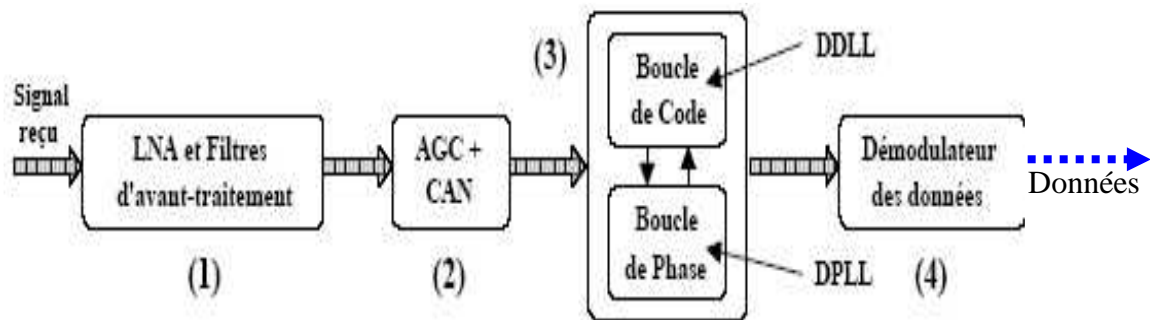


Figure 3.1 : Ensemble des parties d'un récepteur GPS générique

### 2-1-Etage de réception RF :

Les brouilleurs captés par l'antenne rencontreront typiquement un amplificateur à faible bruit (LNA : low noise ampli) utilisé pour amplifier le signal GPS noyé dans le bruit.

Il y a deux types de brouillage peuvent être identifiées :

1. Des brouilleurs dans la bande GPS.
  2. Des brouilleurs proches de la bande GPS.
- **Les brouilleurs dans la bande GPS :** contribuent à augmenter le niveau de bruit dans la bande passante du récepteur et à dégrader ainsi ses performances. Principalement les signaux tels que les harmoniques, les produits d'intermodulations ou simplement les bruits hautes fréquences contribuent aux brouillages des signaux GPS.
  - **Les brouilleurs proches de la bande GPS :** peuvent perturber le récepteur en désensibilisant la chaîne RF (c'est-à-dire que les niveaux élevés de puissances reçues conduisent à une possibilité de désajustement du contrôle automatique de gain et à une perte de fidélité des mesures du signal GPS) ou en pénétrant l'étage de traitement du signal.

Le niveau de puissance des brouilleurs juste au dessus du niveau de puissance du signal GPS traversera facilement cet étage d'amplification, les brouilleurs de puissance moyenne peuvent amener l'amplificateur à travailler en région non linéaire. La sortie devient rapidement instable et l'amplificateur sature. A cause des signaux de brouillage, le signal GPS de faible intensité est soumis à un système non-linéaire et le fonctionnement dans ce régime, même

pour une courte période, entraîne des perturbations pouvant aller jusqu'au décrochage des boucles de maintien.

Du fait que l'amplificateur à faible bruit sature à un certain niveau, il peut être envisagé à cette étape, une technique de robustesse envers les signaux de puissances élevées.

Cette sensibilité de l'amplificateur à faible bruit due aux brouilleurs externes est une première précaution à considérer lors de la conception d'un récepteur GPS. Evidemment, cette puissance nécessaire pour causer une saturation de l'amplificateur varie selon la conception.

### 2-2-Vulnérabilité de la boucle de code :

Le signal en provenance de l'étage de récepteur RF (antenne, LNA, filtre) entrera dans la section d'acquisition du code et de maintien de la synchronisation après que le signal ait traversé un AGC.

Encore une fois, selon les concepteurs des récepteurs GPS, les boucles de code et de phase peuvent être séparées ou imbriquées.

Dans notre modèle, le signal GPS en fréquence intermédiaire (FI) qui est échantillonné par le CAN rencontrera la boucle de code qui poursuit la phase de l'un des codes provenant des satellites GPS. La plupart des récepteurs actuels utilisent une boucle à verrouillage avance et retard (early-late DLL pour Delay Lock Loop).

La boucle de maintien du code réalise une poursuite par asservissement sur le maximum de corrélation. La corrélation du signal local de désétalement s'effectue sur la voie en retard. Les résultats de la corrélation sont comparés pour connaître le sens du biais.

La boucle de maintien du code a une bande passante faible (moins de 1 Hz) et c'est pourquoi elle peut fonctionner à des niveaux élevés de rapport brouilleur à signal (J/S). Elle constitue la section la plus résistante du récepteur, le bruit étant atténué dans un rapport égal au gain d'étalement suite à la corrélation.

Un brouilleur à spectre étroit sera en effet étalé par le code pseudo- aléatoire local multiplié par  $\sin(\tau/2)$  où

$\tau$ : Correspond à la différence de phase entre l'avance et retard.

Un corrélateur standard avec un délai entre la voie avance et retard d'une bribe

( $T_{bribe} = 2\tau = 1 \sim \text{sec}$  (microsecondes)) étale un brouilleur à spectre étroit en un spectre de

raies d'enveloppe  $\sin(x)^2/x^2$  dont la largeur de bande du lobe principal est  $(1/\tau)$

(=2MHz).

Par contre, pour un corrélateur dont les voies avance et retard seraient espacées de 0.2 bride seulement, le même brouilleur serait étalé pareillement avec une largeur du lobe principal de 10MHz environ ; sont 5 fois plus efficace.

On note que le choix d'espacement entre les deux répliques 'Early' et 'Late' possède une influence sur les brouilleurs à spectre étroit.

D'où le bénéfice du contrôle de la précision du délai des codes de la boucle de désétalement mais en contre partie, le désavantage de fonctionner sur une largeur de bande plus large.

L'atténuation de la puissance du brouilleur causée par ce processus d'étalement est de l'ordre de :

- 24 dB pour un brouilleur à bande étroite.
- 60 dB pour un brouilleur large bande.

Mais dans le cas du brouilleur à bande étroite, ce gain d'étalement dépend aussi de la position fréquentielle et de la largeur de bande du brouilleur.

Pour un brouilleur large bande, l'utilisation d'un corrélateur étroit n'apporte pas de gain significatif, au contraire, du fait de l'élargissement de la bande passant.

Une boucle de code ne peut pas maintenir sa synchronisation lorsque la puissance de bruit est supérieure à la puissance du signal (après étalement). On définit typiquement le point de décrochage de la boucle de code par un seuil du rapport (J/S) de 0dB.

De cette façon, la puissance minimale du brouilleur nécessaire pour désynchroniser une boucle de code doit être à un minimum de 24dB supérieure à la puissance du signal utile (-160dBw) soit supérieure à (-136dBw) (avant étalement).

La limite du rapport (C/N) entre les phases d'acquisition et de maintien est de 6dB.

En d'autres termes, le signal utile doit être de 6dB supérieur pour l'acquisition, par rapport aux (-136dBw) nécessaires pour le maintien (ce qui implique un J/S limite de 6dB dans le cas de la boucle de phase).

### **2-3-Vulnérabilité de la boucle de phase :**

Il existe également différents types de configuration de boucle à verrouillage de phase, à chaque type est associée une largeur de bande d'opération. A l'intérieur de la boucle, le signal incluant le brouilleur est d'abord filtré avant d'être appliqué au VCO (voltage controlled oscillator) qui estime la phase de la porteuse du signal d'entrée. La bande passante

du filtre passe bas de la boucle de phase est très faible en comparaison de la largeur de bande des données (100Hz).

Ceci permet de minimiser les effets du spectre de données sur l'acquisition de la porteuse. La bande passante typique de la boucle de phase d'un récepteur GPS est de l'ordre de (1 à 10Hz).

En effet, la boucle d'acquisition du code GPS étale le brouilleur avant que le signal atteigne la boucle de phase. Ceci réduit de façon considérable la puissance d'un brouilleur dans la bande passante de la boucle de phase.

L'effet du bruit provenant du brouilleur étalé qui entre dans la boucle de phase dépend de la conception de la boucle et varie selon les concepteurs.

#### **2-4-Détection du message de navigation :**

L'étape final du processus d'acquisition d'un signal GPS mène à la démodulation des données de navigation. Le signal brouilleur à ce point été étalé par le code d'étalement local apportant un gain de 24dB. Sous des conditions normales d'opération, le rapport signal à bruit (S/N) à l'entrée du démodulateur est approximativement de 18dB.

Une analyse conservatrice permet de limiter le niveau des brouilleurs à 18dB au-dessous de la puissance du signal utile (désétalé), ce qui causera une augmentation maximum de 3dB sur le plancher de bruit et une augmentation sensible du TEB (taux d'erreur binaire).

Le démodulateur de données est caractérisé vis-à-vis du brouilleur en termes de TEB, il est évident que l'on aura une dégradation du TEB au fur et à mesure que l'on diminue le SNR (rapport signal sur bruit). On prend en générale comme référence pour établir un niveau minimum de performances, un TEB de ( $10^{-5}$ ). Une augmentation du TEB ne provient pas systématiquement de la perte du signal mais elle indique simplement une diminution de la qualité de la liaison BPSK (Binary Phase Shift Keying) modulation en phase.

Le cas extrême pour le démodulateur de données correspond à une puissance effective de brouillage (en sortie des boucles) égale à la puissance du signal utile, soit un signal à brouillage de 0dB (après étalement). La performance se dégradera graduellement entre ces deux limites (18dB et 0dB) ainsi, il est utile de définir le seuil du taux d'erreur binaire maximum en présence du brouilleur. De façon à réduire l'impact d'une seule erreur sur la démodulation des données de navigation, nous adoptons :

Une limite de TEB à  $(10^{-5})$ . Le rapport signal sur brouilleur (S/J) est approximativement de 13.9dB après désétalement.

### 2-5-Résumé d'un récepteur GPS générique :

Le comportement des différents composants d'un récepteur GPS face aux brouilleurs a été examiné (résistance et faiblesses).

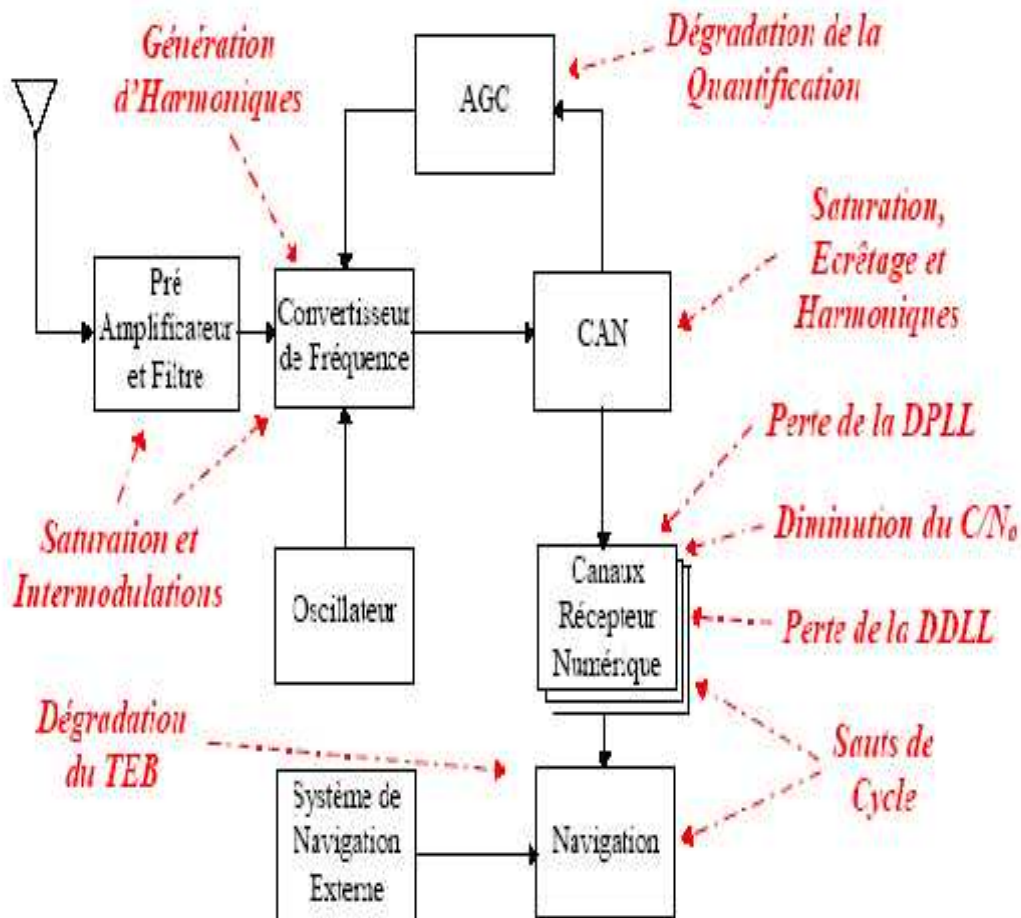
Les performances sur la précision de localisation se dégraderont graduellement en fonction de l'augmentation de la puissance du brouilleur étalé allant de 18dB sous la puissance du signal utile (à priori n'affectant aucun des performances) à une puissance égale au signal utile (échec du démodulateur et perte de synchronisation de la boucle de phase).

- Le gain d'étalement minimum a été fixe à 24dB pour les brouilleurs à bande étroite et les signaux à porteuse pure tandis que l'on peut s'attendre en pratique à un gain d'étalement de 60dB pour les brouilleurs large bande. Le rapport (S/J) équivalent minimum après désétalement a été spécifié à 13.9dB correspondant à un TEB de  $(10^5)$ . En deçà de ce seuil, les boucles de code et de phase se désynchronisent.
- Une autre grandeur à prendre en compte pour la caractérisation du signal brouillé est le rapport (J/S) entre la puissance du brouilleur et celle du signal GPS. En effet, le bruit thermique peut être considéré comme constant, pour évaluer les signaux brouilleurs, il est donc plus pratique de les comparer directement avec le niveau de puissance du signal GPS.
- La structure logique d'un récepteur GPS dont nous avons schématisé encore plus ces principales fonctions à la figure (3.1). il y a dans cette structure différents éléments qui sont sensibles au brouillage du signal, et qui présentent une robustesse différente. Il s'agit des éléments suivants, classé en ordre de sensibilité décroissante :
  1. le démodulateur de données.
  2. la boucle de porteuse (DPLL).
  3. la boucle de code (DDLL).
- Les boucle de code et de porteuse sont caractérisées en termes de seuil de maintien, c'est -à- dire le niveau de C/N minimum pour assurer l'accrochage de la boucle. On

ne veut pas ici rentrer dans les détails du fonctionnement des boucles du récepteur; on se limite à remarquer que le fonctionnement du récepteur est limité par le FLL (fréquence Lock Loop) de la boucle de porteuse. En effet, le décrochage de la boucle de porteuse implique immédiatement la perte du signal et donc le décrochage de la boucle de code. C'est pourquoi on retrouve souvent dans la littérature des spécifications sur le seuil de fonctionnement de la boucle DPLL qui déterminent le seuil de maintien du signal.

- A l'entrée du récepteur, la saturation du préamplificateur peut être la cause de la génération de produits d'intermodulation ou d'harmoniques des étages de conversion en fréquence. Un composant très important du récepteur, l'AGC peut dégrader considérablement le processus de normalisation du signal et sa quantification par le CAN sera moins efficace.

Plusieurs autres perturbations peuvent survenir à l'intérieur d'un récepteur. Malheureusement, ces perturbations ne sont pas toujours visibles et elles se répercutent principalement sur les points que nous venons de mentionner.



**Figure 3.2** : résumé de l'ensemble des perturbations potentielles



**3- Caractérisation Des Problèmes de brouillage :****3-1- Equations fondamentales du brouillage :**

On s'intéresse dans notre étude au signal GPS modulé en code C/A. L'équation qui détermine le rapport  $(C/N_0)$  non brouillé en bande de base après les boucles est la suivante :

$$\frac{C}{N_0} = S_r + G_a - 10 \log (K \cdot T_0) - N_f - P_i \quad [\text{dB} - \text{Hz}] \quad (3.1)$$

$C/N_0$  : Rapport de puissance entre le signal utile et la densité spectrale du bruit thermique (dB-Hz).

$S_r$  : Puissance du signal GPS reçu (dBw).

$G_a$  : Gain de l'antenne de réception (dB).

$T_0$  : Température de référence du bruit thermique = 290(°K).

$K$  : La constante de Boltzmann =  $38 \cdot 10^{-23}$  (w-sec/k).

$10 \log (kT)$  : la densité de puissance du bruit thermique = -204(dBw-Hz).

$N_f$  : Le facteur de bruit de l'antenne + les pertes des câbles (dB).

$P_i$  : Les pertes d'implémentation + perte de conversion A/D (dB).

On peut considérer un récepteur muni d'une antenne de gain unitaire (0dB) et chiffrer pour un récepteur typique le facteur de bruit à 4dB et les pertes d'implémentation à 2dB. Avec ces hypothèses, on obtient en bande de base un rapport en dB du  $\left[ \frac{C}{N_0} \right]_{NB}$  non brouillé de :

$$\left[ \frac{C}{N_0} \right]_{NB}^d = -159.6 + 0 - (-204) - 4 - 2 = 38.4 \quad [\text{dB-Hz}] \quad (3.2)$$

Les mêmes conditions conduisent à une valeur du rapport  $\left[ \frac{C}{N_0} \right]_{NB}$  non brouillé

- de 35.4dB-Hz pour le code L1 P(Y)
- et 32.8 dB-Hz pour le code L2 P(Y)

En présence d'un brouilleur, on définit le rapport  $C/N_0$  équivalent par :

$$\left[ \frac{C}{N_0} \right]_e^d = -10 \log \left[ 10^{\frac{\left[ \frac{C}{N_0} \right]_{NB}^d}{1}} + \frac{\left[ \frac{I}{N_0} \right]_d}{Q \cdot R_c} \right] \quad [\text{dB} - \text{Hz}] \quad (3.3)$$

C'est la puissance du signal ramené à la puissance du bruit thermique augmentée de celle du brouilleur étalé (que l'on associe donc au bruit). Il s'agit du  $C/N_0$  vu par le récepteur après les boucles. A l'équation (3.3), on a indiqué :

$\left[ C/N_0 \right]_{NB}^{dB}$  : Le rapport de la puissance du signal utile dans 1Hz de bande Passante sur la densité de puissance du bruit thermique en absence de brouilleur (dB-Hz).

$[J/S]_{dB}$  : Le rapport de la puissance du brouilleur sur le signal utile (dB).

$R_c$  : Le rythme de brique du code PRN utilisé.

- Pour le code C/A 1.023 MHz.
- Pour le code P 10.23 MHz.

Q : un facteur d'ajustement du signal d'étalement.

Le facteur Q tient compte de la largeur de bande des brouilleurs. Il vaut respectivement :

- Q= 1 : pour les brouilleurs bande étroite.
- Q = 1.5 : pour les brouilleurs à bande semi étroite.
- Q = 2 : pour les brouilleurs à large bande.

A l'aide de ces équations, on peut déterminer l'équivalent de la dégradation sur le rapport signal à bruit introduit par un brouilleur. Si on fixe un seuil de  $[C/N_0]_{\text{équivalent}}$  minimum pour le fonctionnement de notre récepteur, on peut déterminer le niveau de brouillage correspondant à partir de l'équation (3.3). En réorganisant l'équation, on obtient :

$$\left[ \frac{J}{S} \right]_s = 10 \log \left[ Q \cdot R_c \left[ \frac{1}{\frac{[C/N_0]_{\text{équivalent}}^2}{1}} - \frac{1}{\frac{[C/N_0]_{\text{équivalent}}^2}{1}} \right] \right] \text{ [dB]} \quad (3.4)$$

On rappelle que le rapport  $[C/N_0]_{\text{équivalent}}$  est toujours supposé connu puisqu'il s'agit de celui qui est mesuré par le récepteur. Les courbes correspondantes à l'équation (3.4) sont montrées à la figure (3.3).

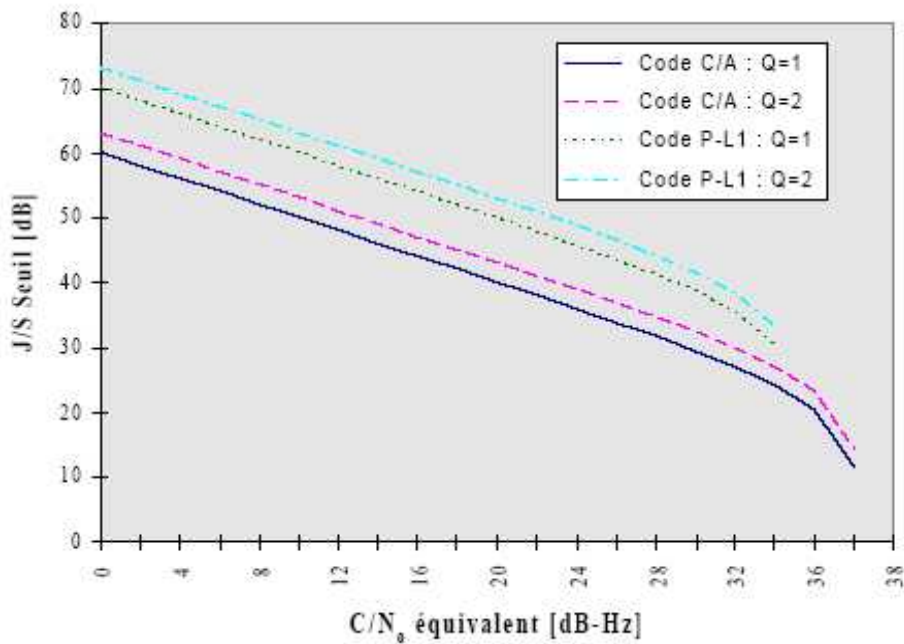


Figure 3.3 : correspondance entre  $[C/N_0]_{\text{équivalent}}$  et  $[J/S]_{\text{SEUIL}}$

Pour évaluer l'influence des sources potentielles de brouillage, on peut donc se servir de l'équation (3.4). Si on établit un seuil pour le  $C/N_0$  équivalent, on peut à partir de celui-ci établir un seuil pour le rapport J/S au delà duquel le signal brouilleur devient nuisible.

La puissance du signal GPS étant connue, on peut évaluer le niveau de puissance absolu des brouilleurs potentiellement (dangereux). En effet, on a pour un seuil J/S fixé :

$$\left[ \frac{J}{S} \right]_s = J_r - S_r \text{ [dB]} \quad (3.5)$$

Où on a noté avec  $j_r$  et  $S_r$ , les puissances reçues à l'antenne pour le brouilleur et le signal GPS. On obtient pour la puissance du brouilleur en dBw :

$$J_r^s = \left[ \frac{J}{S} \right]_s + S_r \text{ [dBW]} \quad (3.6)$$

Le niveau de puissance absolue du brouilleur vaut donc :

$$J_r^s = 10^{\frac{[J_r^s]_{\text{dB}}}{10}} \text{ [W]} \quad (3.7)$$

Pour illustrer l'impact de cette petite analyse de puissance, on peut prendre l'exemple de la règle simple qui définit le seuil de maintien de la boucle de code avec un rapport :

$$\left[ \frac{C}{N_0} \right]_e^d = 28.0 \text{ [dB - Hz]} \tag{3.8}$$

C'est-à-dire une perte de 10dB-Hz (par rapport au cas non- brouillé) (équation (3.2)).

En substituant cette valeur de  $\left[ C/N_0 \right]_{\text{équivalent}}$  on obtient les rapports de J/S suivants :

Brouilleur à Bande Etroite Q = 1	$\left[ \frac{J}{S} \right]_{dB} = 31.7 \text{ dB}$
Brouilleur à Bande Large Q = 2	$\left[ \frac{J}{S} \right]_{dB} = 34.7 \text{ dB}$

**Tableau 3.1 :** Limite du  $\left[ J/S \right]_{dB}$  pour un  $\left[ C/N_0 \right] = 28\text{dB-Hz}$

Dans le cas d'une situation plus optimale où le récepteur serait construit de sorte qu'il puisse tenir un rapport  $C/N_0$  équivalent d'environ 18dB-Hz (perte de 20dB-Hz par rapport au cas non brouillé), soit pour un brouilleur à bande large un  $\left[ J/S \right]_{SEUIL}$  d'environ 45dB, on obtient une puissance du brouilleur de :

$$J_T^S = 10^{\frac{[45 \pm 1.5]_{dB}}{10}} = 3.467 \cdot 10^{-1} \text{ W} \tag{3.9}$$

Ceci démontre bien que seulement 3pw d'un brouilleur large bande reçu à l'antenne d'un récepteur GPS et bien positionné en fréquence peut rendre ce récepteur inutilisable. Le tableau (3.2) suivant résume l'analyse qui précède pour différentes valeurs du seuil de maintien des boucles et pour les trois types de brouilleur mentionné.

Seuil de maintien des Boucles	types de brouilleur	code C/A L1 J/S (dB)
$C/N_0 = 28 \text{ dB}$	Q=1 : bande étroit	31.7
	Q=1.5 : semi - étroit	33.7
	Q=2 : bande large	34.7
$C/N_0 = 18.5$	Q=1 : bande étroit	41.6
	Q=1.5 : semi - étroit	43.3
	Q=2 : bande large	44.6

**Tableau 3.2 :** Limite de  $\left[ J/S \right]_{dB}$  pour les trois types de brouilleur

On rappelle qu'il y a une différence entre le seuil de maintien en présence d'un brouilleur et le seuil d'accrochage du récepteur.

La détermination de ces deux seuils n'est pas facile, car à proximité des limites de fonctionnement le comportement du récepteur n'est pas linéaire, et de plus les seuils varient selon le type de récepteur. On peut définir que le seuil d'accrochage se trouve 6dB en dessus du seuil de maintien.

$$\left[ \frac{J}{S} \right]_{a_i}^s \cong \left[ \frac{J}{S} \right]_m^s + 6 \text{ [dB]} \quad (3.10)$$

Si un récepteur décroche, il se trouve de ce fait même dans l'impossibilité de raccrocher immédiatement dans les mêmes conditions de  $C/N_0$ , il va falloir s'éloigner du brouilleur pour récupérer une valeur de  $C/N_0$  suffisante pour la récupération du signal.

Cela peut introduire un retard assez important, allant de 10 secondes à quelques minutes selon la configuration de la plate-forme. Ceci est un aspect particulièrement critique pour les applications où l'on demande une grande fiabilité.

### **3-2-Influence de la largeur de bande :**

Il est important de mentionner quelques considérations de plus pour le code C/A qui ne s'applique pas au code P concernant la bande des brouilleurs.

On a vu à l'équation (3.3) que l'on introduit un facteur Q pour prendre en compte l'influence de bande du brouilleur sur le gain d'étalement. En effet, en bande de base le signal GPS se présente comme une sinusoïde modulée par les données transmises (avec modulation de type BPSK).

Si on considère un brouilleur de bande large  $B \gg 100 \text{ KHz}$ , l'étalement produit sur celui-ci un phénomène de recouvrement et de ce fait le brouilleur étalé se rapproche d'autant plus d'un bruit blanc que sa bande est large.

Dans ce cas le seuil de décrochage dépend non seulement de la puissance de la raie mais de sa position par rapport aux raies du spectre GPS. Si une CWI tombe entre deux raies du signal GPS elle ne posera pratiquement aucun problème à moins qu'elle entre dans la bande passante des filtres de boucle (code, phase et démodulation). Si elle se retrouve dans la bande passante du démodulateur qui est la plus large donc la plus vulnérable (50 Hz autour de la porteuse), on trouve alors pour le brouillage par CWI un seuil nettement inférieur au J/S tolérable que pour un brouilleur à bande large.

Ce phénomène est assez probable si on considère pour la fréquence de la CWI une distribution de probabilité uniforme, on obtient une probabilité de  $50/1000 = 1/20$  qu'elle tombe dans la bande de modulation des données, et c'est souvent ce que l'on peut observer sur un récepteur GPS en laboratoire.

Le gain d'étalement par rapport à une CWI peut donc être réduit, selon le satellite et la fréquence, à une valeur comprise entre 21.3 et 24.1 dB.

Pour une CWI avec un J/S faible de 23dB la puissance du brouilleur après étalement peut donc être de l'ordre de celle du bruit thermique, correspond à un début de dégradation de la réception.

Un récepteur conventionnel pourra donc tolérer un rapport J/S de 23dB en présence d'un brouilleur large bande mais il sera perturbé s'il s'agit d'une CWI.

CODE C/A	FREQUENCE DE LA RAIE (KHz)	AMPLITUDE DE LA RAIE (dB)	CODE C/A	FREQUENCE DE LA RAIE (KHz)	AMPLITUDE DE LA RAIE (dB)
1	42	-22.71	20	30	-22.78
2	263	-23.12	21	55	-23.51
3	108	-22.04	22	12	-22.12
4	122	-22.98	23	127	-23.08
5	23	-21.53	24	123	-21.26
6	227	-21.29	25	151	-23.78
7	78	-23.27	26	102	-23.06
8	66	-21.5	27	132	-21.68
9	173	-22.09	28	203	-21.73
10	16	-22.45	29	176	-22.22
11	123	-22.64	30	63	-22.14
12	199	-22.08	31	72	-23.13
13	214	-23.53	32	74	-23.58
14	120	-22.01	33	82	-21.82
15	69	-21.9	34	55	-24.13
16	154	-22.58	35	43	-21.71
17	138	-22.5	36	23	-22.23
18	183	-21.4	37	55	-24.13
19	211	-21.77			

**Tableau 3.3 :** Les cas de l'étalement de spectre pour les 37 codes C/A

### **3-3-Critères de robustesse retenus :**

Dans les systèmes de communication conventionnelle (FDMA et TDMA) où la qualité des données (TEB) et le débit de transmission sont les critères essentiels, les effets des brouilleurs sont souvent limités par :

- Des contraintes d'énergie par bit.
- Une l'utilisation stratégie de modulation robuste.
- Et ou par la spécification des niveaux de brouillage acceptables.

Pour les applications de navigation par GPS pour le civil, il n'est pas suffisant de se limiter à l'étude seule de la perturbation des brouilleurs sur le processus de démodulation des données.

Des considérations plus poussées sur les phénomènes survenant au tout début de perturbation d'un brouilleur doivent être pris en considération, début de dégradation (sensibilité) jusqu'à la mise hors d'usage de la boucle de fréquence et de code.

La limitation de puissance des brouilleurs de type impulsionnel est assurée par le CAN et par d'autres dispositifs. Le brouilleur impulsionnel n'est pas nuisible exclusivement par sa puissance mais aussi par la durée totale de ses impulsions par la durée d'observation.

Pour notre analyse, on définit l'influence des perturbations sur un récepteur GPS selon les critères suivant :

- Début de dégradation du récepteur ( $S/N = -3\text{dB}$ ).
- Fonctionnement limite du récepteur pour la résolution de vitesse.
- Fonctionnement limite du récepteur pour la résolution de position
- Désensibilisation du récepteur (saturation).

A partir de ces états de perturbation, les spécifications en termes d'isolation des antennes entre la source du brouilleur et le récepteur GPS et les spécifications sur la réjection nécessaire par les filtres seront spécifiées.

- Pour un brouilleur large bande (BLB) défini comme un signal dont la largeur de bande est supérieure à 100KHz ( $G_{\text{étalement}} = 60\text{dB}$ ), le seuil du rapport de puissance entre le brouilleur et le signal ( $J/S$ ) avant étalement du spectre est résumé au tableau suivant :

PERTURBATIONS:	AVANT ÉTALEMENT
Début de Dégradation $\Delta S/N = -3\text{dB}$	$J/S = 25\text{ dB}$
Démodulation des Données ( $TEB \leq 10^{-5}$ )	$J/S = 30\text{ dB}$
Seuil de la DPLL	$J/S = 37\text{ dB}$
Seuil de la DDLL (Précision Doppler de 1m/s)	$J/S = 44\text{ dB}$

**Tableau 3.4 :** Seuil de  $[J/S]_{\text{dB}}$  pour (BLB)

- Pour ce qui concerne les brouilleurs à bande étroite incluant les CWI (continuous wave interference), on utilise un gain d'étalement de 24dB (du au spectre de raies discret du code C/A au lieu d'un spectre continu).

Perturbation	après desetatement	avant desetatement
Démodulation des Données	J/S = 14dB	J/S = 10dB
Seuil de la DPLL	J/S = 6dB	J/S = 18dB
Seuil de la DDLL	J/S = 0dB	J/S = 24dB

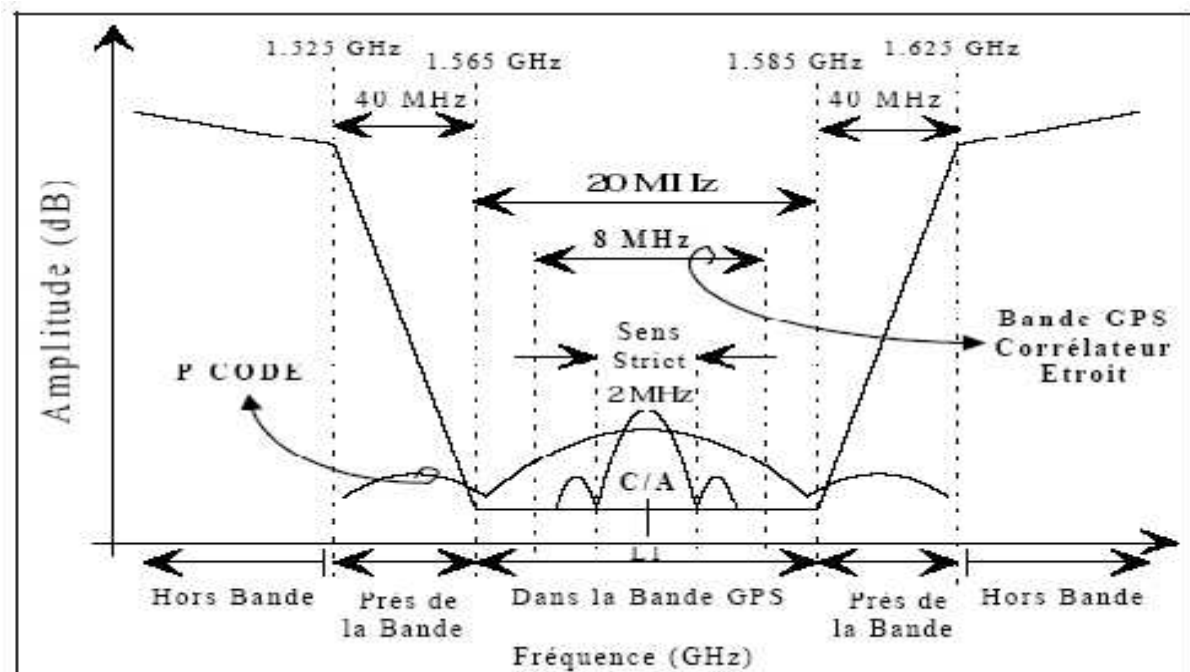
**Tableau 3.5 :** Seuil de  $[J/S]_{dB}$  pour (BEB)

Dans le cas d'une CWI, le début de dégradation ( S/N) n'est pas représentatif de la perturbation apportée au récepteur. En effet, la localisation fréquentielle de la CWI à l'intérieur de la bande de prédétection de 100Hz est l'aspect décisif sur le brouillage ou non du récepteur.

#### 4-Les Origines Des Brouilleurs :

##### 4-1-Enumération des types de brouilleurs :

Les types de brouilleurs nuisibles à un récepteur GPS ont été répertoriés selon leur origine en montrant bien leur position fréquentielle par rapport à la bande GPS. Dans un premier temps, les brouilleurs potentiel qui se situent à l'intérieur de la bande GPS sont énumérés et caractérisés puis ceux se trouvant à sens d'un récepteur avec corrélation étroite à plus ou moins 4MHz de la fréquence L1 (1575.42MHz) soit de (1571.42 à1579.42 MHz).



**Figure 3.4 :** Définition des régions fréquentielles du système GPS



On définit le spectre en fréquence du signal GPS comme le montre la figure (3.4) :

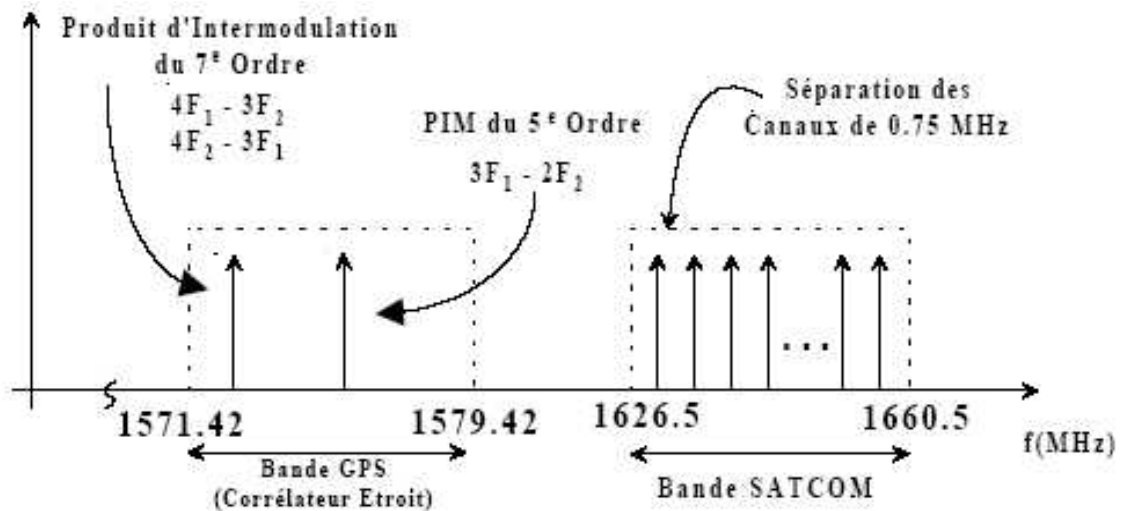
- Les récepteurs de haute qualité (traitant par exemple le multitrajet) utiliseront une bande plus large par exemple sur 20MHz.
- Un récepteur GPS à corrélateur étroit utilisera typiquement les 8MHz autour de L1.
- Les récepteurs bons marchés sont définis au sens strict comme des récepteurs qui utilisent seulement le lobe principal du signal GPS (code C/A).

Il existe plusieurs autres candidats potentiels à la génération d'une source de brouillage pour les applications GPS. Ceux-ci peuvent être obtenus en divisant une bande de fréquence à protéger par l'ordre de l'harmonique potentiellement nuisible. Le tableau suivant identifie l'origine de la source de brouillage en fonction de l'harmonique nuisible.

La bande de fréquence spécifiée dans le tableau (3.6) indique quels types de service utilisant ces fréquences auront l'harmonique indiquée dans le spectre GPS.

ORDRE DE L'HARMONIQUE	BANDE FREQUENTIELLE CONSIDEREE (MHz)	USAGE
L1	1571.42 - 1579.42	C/A-GPS
2 <sup>e</sup>	785.71 - 788.71	UHF TV
3 <sup>e</sup>	523.807 - 526.473	UHF TV
4 <sup>e</sup>	392.855 - 394.855	Mobile/Station
5 <sup>e</sup>	314.284 - 315.884	Mobile/Station
6 <sup>e</sup>	261.903 - 263.237	Mobile/Station
7 <sup>e</sup>	224.488 - 225.631	Radiodiffusion
8 <sup>e</sup>	196.427 - 197.428	VHF TV
9 <sup>e</sup>	174.602 - 175.491	VHF TV
10 <sup>e</sup>	157.142 - 157.942	VHF Maritime
11 <sup>e</sup>	142.856 - 143.584	VHF Militaire
12 <sup>e</sup>	130.952 - 131.618	VHF COM
13 <sup>e</sup>	120.878 - 121.494	VHF COM
14 <sup>e</sup>	112.244 - 112.816	VOR/ILS
15 <sup>e</sup>	104.761 - 105.295	FM
16 <sup>e</sup>	98.214 - 98.714	FM

**Tableau 3.6** : Source et services des brouilleurs fonctions des harmoniques

**4-2-Brouillage par les Emetteurs SATCOM :**

**Figure 3.5 :** Représentation spectrale de brouillage par les communications SATCOM

Ce type de brouilleur est considéré comme la source de brouillage la plus néfaste au bon fonctionnement des boucles internes d'un récepteur GPS. Leurs origines proviennent de deux sources :

- Soit des émetteurs SATCOM à bord du même mobile que le récepteur GPS.
- Soit des émetteurs SATCOM provenant d'un autre mobile.

La puissance des canaux dans la bande GPS varie selon plusieurs facteurs (demande, période de temps, durée de la communication, etc....).

Les communications SATCOM utilisent la bande de fréquence (1626.5 – 1660.5MHz) comme montre la figure (3.5). La largeur de bande des canaux est de 20KHz et ils sont espacés en fréquence de 0.75MHz.

La PIRE moyenne est de 18dBw et la réjection minimale est de 100dB dans la bande L1.

Les émetteurs SATCOM génèrent plusieurs produits d'inter modulation (PIM) qui peuvent tomber à l'intérieur de la bande GPS. Les canaux ( $f_1 = 1626.5$  MHz et  $f_2 = 1652$  MHz) génère des PIM du 5<sup>e</sup> Ordre ( $3f_1 - 2f_2 = 1575.5$  MHz) qui sont directement à l'intérieur de la bande L1.

Les deux causes telles les PIM des SATCOM et la proximité de leurs bandes sont considérées comme de réelles sources de perturbation potentielle.

La première partie de notre analyse traite les interférences provenant des PIM et cette analyse est suivie des problèmes dus à la proximité de la bande SATCOM avec celle du GPS.

**4-2-1-Brouillage par d'inter modulation des SATCOM :**

Les produits d'inter modulation des SATCOM peuvent être considérés comme des brouilleurs larges bandes au sens du GPS puisque la porteuse du SATCOM est seulement utilisée à des fins de synchronisation.

Pour l'analyse d'un brouilleur à bande étroite, la probabilité d'une intermodulation due à une CWI est négligeable. Un calcul simple permet de montrer que l'isolation entre les deux antennes doit respecter l'équation (3.11) pour le cas de la première perturbation.

$$ISO \geq P_j^{TX} - R_j - R - G_e - (-204) - F_b \quad (3.11)$$

$P_j^{TX}$  : Puissance transmise du brouilleur.

$R_j$  : Réjection à l'émetteur.

$ISO$  : Isolation de l'antenne.

$R$  : Réjection des signaux hors bande GPS (0dB si le brouilleur est dans la bande GPS).

$S$  : Signal GPS (-160dBw pour le code C/A).

En utilisant (3.11) avant désétalement et pour les données suivantes :

$$R_j = 100\text{dB} \quad P_j^{TX} = 18-24\text{dBw} \quad S = -160\text{dBw} \quad R = 0\text{dB} \quad F_b = 3\text{dB} \quad G_{\text{étalement}} = 60\text{dB}$$

	DEBUT DE DEGRADATION $\Delta(S/N) = -3\text{dB}$	SEUIL DE DEMODULATION DES DONNEES	SEUIL DE LA DDLL
C/A	ISO > 35dB	ISO > 24dB	ISO > 10dB

**Tableau 3.7 :** Isolation entre l'antenne du récepteur GPS et SATCOM placé sur le même mobile.

Ces mesures ont été obtenues pour une séparation d'antenne de 1 à 3mètres. Habituellement, cette distance est supérieure à 3mètres et il peut être conclut suite à notre analyse, qu'il y a une très faible probabilité de brouillage du au PIM d'un récepteur GPS par l'émetteur SATCOM à bord de l'avion. De plus grandes que les 50dB d'isolation nécessaire. Après calcul, la distance de brouillage est de 5mètres et nous concluons que l'on peut écarter les problèmes d'inter modulations en provenance des émetteurs SATCOM.

**4-2-2-Brouillage du à la Proximité des Bandes :**

Cette analyse concerne la spécification de la réjection de la bande SATCOM nécessaire par le filtre RF d'un récepteur GPS. En supposant les mêmes équations que précédemment (3.11) et les paramètres suivants :

$$R_j = 0\text{dB} \quad P_j^{TX} = 18\text{dBw} \quad S = -160\text{dBw} \quad F_b = 3\text{dB} \quad G_{\text{étalement}} = 60\text{dB} \quad ISO = 50\text{dB}$$

On obtient le tableau (3.8) qui représente un résumé de l'analyse du scénario où l'émetteur SATCOM serait à l'intérieur du même mobile. Il s'agit en fait de l'atténuation nécessaire par le filtre du récepteur GPS pour s'assurer des rapports S/N définis au tableau (3.4).

Une de nos conclusions est qu'il faut resserrer la bande du filtre GPS et toutes spécialement aux alentours de la fréquence de 1626.5MHz.

C/A	DEBUT DE DEGRADATION $\Delta(S/N) = -3dB$	SEUIL DE DEMODULATION DES DONNEES	SEUIL DE LA DDLL
Réjection	R > 109 dB	R > 98 dB	R > 84 dB

**Tableau 3.8 :** Spécification de la réjection de la bande SATCOM par le filtre GPS

Le tableau (3.9) montre une analyse de la distance de brouillage (avec R=40dB) due à la proximité de la bande SATCOM en utilisant une réjection du filtre GPS de R=40dB à 40MHz de L1. Nous avons utilisé (3.12)

$$\frac{J}{S} = P_J^T - R_J - 20 \log\left(\frac{4fd}{\lambda}\right) - R - S - G_e \quad (3.12)$$

$\frac{J}{S}$  : Rapport de puissance entre le brouilleur et le signal utile.

$20 \log\left(\frac{4fd}{\lambda}\right)$  : Perte en espace libre.

Avant étalement de spectre ainsi que l'équation (3.11) où isolement entre les antennes est remplacée par les pertes en espace libre :

$$20 \log\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) \geq P_J^T - R_J - R - G_e - (-204) - F_b \quad (3.13)$$

C/A	DEBUT DE DEGRADATION $\Delta(S/N) = -3dB$	SEUIL DE DEMODULATION DES DONNEES	SEUIL DE LA DDLL
D <sub>Brouillage</sub>	13500 m	3800 m	760 m

**Tableau 3.9 :** La distance de brouillage due à la proximité de la bande SATCOM

Il s'agit de la situation la plus nuisible provenant de la proximité des deux bandes. Le préamplificateur du récepteur GPS sature et travaille en région non linéaire.

Une attention particulière lors de la conception des émetteurs doit être portée sur le point de compression à 1dB, l'isolation de l'antenne et la réjection de la bande SATCOM.

**En conclusion :**

Pour les émissions SATCOM, on note que le problème résultant de l'émission d'une ou plusieurs fréquences au même temps peut être éliminé si des précautions sont prises sur les équipements placés dans l'avion.

Le système SATCOM pour le domaine de l'avionique utilisée comme moyen principal de communication entre les régions sera considérablement nuisible pour un récepteur GPS du à la proximité des bandes d'opérations.

Ce problème peut être résolu par une réorganisation de la bande de fréquence.

Une autre solution est d'interdire l'usage du SATCOM en région d'approche ou d'atterrissage.

- De limiter les puissances transmises.
- Ou d'insérer des filtres anti-brouilleurs.

**4-3-Brouillage par les harmoniques des stations de TV :**

Il existe un minimum de (6) six canaux de TV qui génèrent des harmoniques dans la bande GPS. Le tableau (3.10) montre les bandes de fréquence utilisées par ces canaux de TV français (en France) et les compare avec canaux de TV américains équivalents (Etats - Unis).

CANAUX FRANÇAIS	BANDE DE FREQUENCE	CANAUX AMERICAINS EQUIVALENTS	BANDE DE FREQUENCE EQUIVALENTE
Canal 4	174-182 MHz	VHF 7	174-180 MHz
Canal 6	190-198 MHz	VHF 10	192-198 MHz
Canal 27	518-526 MHz	UHF 22	518-524 MHz
Canal 28	526-534 MHz	UHF 23	524-530 MHz
Canal 60	782-790 MHz	UHF 66	782-788 MHz
Canal 61	790-798 MHz	UHF 67	788-795 MHz

**Tableau 3.10 :** Les bandes de fréquence utilisées par les canaux de TV

	Vidéo	Audio
VHF	55 dBW	48 dBW
UHF	67 dBW	60 dBW

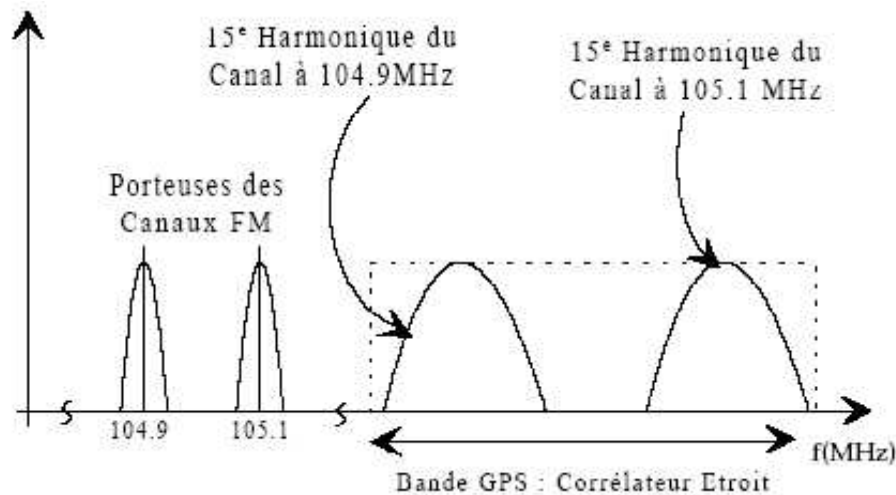
**Tableau 3.11 :** Les PIREs maximums typiquement émis par une station de TV

On voit que les émissions TV sont de véritables sources de brouillage pour le récepteur GPS. Les restrictions actuelles sont insuffisantes pour assurer une prévention des récepteurs civils contre le brouillage des harmoniques provenant de certains canaux de TV. Le problème pourrait être résolu en partie par des pressions locales aux stations de TV en vue de l'installation de filtres RF.

Mais à cause de très fortes puissances mises en jeu et les contraintes parfois relâchées par certains pays, il est nécessaire d'installer des techniques de robustesse dans les récepteurs GPS.

#### **4-4-Bouillage par les Harmoniques de la diffusion F.M :**

Plusieurs fréquences provenant de la diffusion FM (87.5 à 108MHz) constituent des sources de brouillage potentiel pour un récepteur GPS. La figure (3.6) qui montre la représentation spectral des canaux (FM) situés aux fréquences 104.9 et 105.1 MHz ayant par exemple leur harmonique du 15<sup>e</sup> ordre dans la bande GPS.



**Figure 3.6 :** La représentation spectrale des canaux (FM)

Le tableau (3.12) montre les bandes de fréquence des émetteurs FM avec leurs harmoniques correspondantes entrant dans la bande GPS d'un corrélateur étroit ( $L1 \pm 4\text{MHz}$ ).

BANDE(MHz)	Harmoniques FM Potentiellement Nuisibles
104.3 - 105.7	15 <sup>e</sup>
97.8 - 99.1	16 <sup>e</sup>
92.1 - 93.2	17 <sup>e</sup>
87.5 - 88.1	18 <sup>e</sup>

**Tableau 3.12 :** Harmonique nuisibles FM pour la bande GPS L1

Les canaux FM sont espacés de 150KHz et la puissance de transmission du canal FM est de 50dBw.

Nous faisons ici le même pré analyse de la distance de brouillage des harmoniques FM lorsque la puissance de l'harmonique atteint celle du bruit thermique à l'antenne.

La dégradation du signal GPS due à ces canaux FM intervient lorsque le récepteur embarqué dans un mobile se situe à un distance telle que :

Pour le canal à 104.9MHz :

$$50\text{dBW} - 80 + 10 \log(0.25) - 20 \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) \geq -136 \text{ dBW}$$

Pour le canal à 105.1MHz :

$$50\text{dBW} - 80 + 10 \log(0.5) - 20 \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) \geq -136 \text{ dBW}$$

Le tableau (3.13) est une analyse de la portée des brouilleurs FM en fonction de la puissance de l'harmonique lors de son réception à l'antenne GPS.

En résumé, ce type de brouilleur devient un problème pour un récepteur GPS lorsqu'il se situe à l'intérieur d'un rayon de 2Km de la source d'émission FM. Aucune technique de robustesse n'a encore été proposée jusqu'à maintenant.

En utilisant notre modèle d'analyse des brouilleurs, les résultats sont sensiblement les mêmes mais plus précis. Les harmoniques FM sont considérés au sens GPS (C/A).

Comme des brouilleurs larges bandes. L'analyse de la distance de brouillage est résumée au tableau (3.14) en employant les paramètres suivant dans nos calculs :

$$R_j = 80\text{dB} \quad P_J^{TX} = 50\text{dBW} \quad S = -160\text{dBW} \quad R = 0\text{dB} \quad F_b = 3\text{dB} \quad G_{\text{étalement}} = 60\text{dB}$$

	DEBUT DE DEGRADATION $\Delta(S/N) = -3\text{dB}$	SEUIL DE DEMODULATION DES DONNEES	SEUIL DE LA DDLL
C/A	5380 m	1515 m	300 m

**Tableau 3.14 :** Analyse de la distance de brouillage pour les harmonique FM

Distance entre le Récepteur et la Source F.M. (m)	Niveau de Puissance de l'Interférence au Récepteur (dBW)	
	Signal à 104.9 MHz	Signal à 105.1 MHz
200	-118.5	-115.4
400	-124.5	-121.5
600	-128	-125
800	-130.5	-127.5
1000	-132.4	-129.4
1200	-134	-131
1400	-135.4	-132
1600	-136.5	-133.5
1800	-137.5	-134.5
2000	-138.5	-135.5
2200	-139.3	-136.3

**Tableau 3.13 :** La portée des brouilleurs FM en fonction de la puissance de l'harmonique

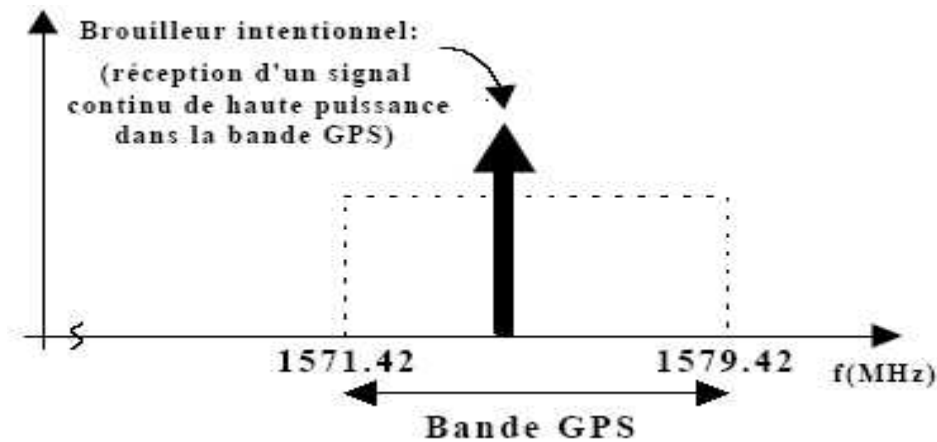
**En conclusion :**

Une solution serait d'interdire par exemple l'utilisation d'émetteurs FM à l'intérieur d'un périmètre de 5Km autre d'un aéroport.

Cette solution n'étant pas toujours réalisable facilement, on peut également penser à augmenter la réjection des harmoniques à 100dB ce qui porterait la distance de brouillage à 500m.

**4-5-Brouillage Intentionnel :**

Par soucis d'exhaustivité, on donne ici quelques indications sur le brouillage intentionnel bien que ce ne soit pas l'objet de cette thèse. La figure (3.7) montre une représentation d'un scénario de brouillage intentionnel. Il ne s'agit que de recevoir à l'antenne du récepteur GPS un signal de forte puissance.



**Figure 3.7 :** Spectre d'un brouilleur intentionnel

Un signal brouilleur constant et de puissance suffisante peut détruire la réception d'un signal GPS dans une zone donnée. Le rayon de perturbation centré sur la source du brouilleur est fonction de la puissance d'émission et de la fréquence centrale du brouilleur.

Si l'on assume une antenne omnidirectionnelle dont le gain est 1, le rayon de perturbation est donné par la formule suivante :

$$d = \frac{\lambda_1 \left[ \frac{1 - 2 + p}{2} b_i \right]}{4\pi} \quad (3.14)$$



PIRE A L'EMISSION (dBW)	PUISSANCE DE L'EMETTEUR (W)	PORTEE DU BROUILLEUR (m)
30	1000	3016777.0
20	100	953989.0
10	10	301678.0
0	1	95398.9
-10	0.1	30167.8
-20	0.01	9539.9
-30	0.001	3016.8
-40	0.0001	954.0
-50	0.00001	301.7
-60	1E-06	95.4
-70	1E-07	30.2

**Tableau 3.15** : L'ordre des grandeurs impliquées en fonction de la PIRE du brouilleur.

### Pour un résumé :

Dans ce chapitre, que ce soit dans le domaine militaire ou civil, les récepteurs doivent être conçus pour opérer dans des niveaux d'interférences et de brouillages élevés afin d'assurer un maximum de continuité de service et d'intégrité.

Ce chapitre analyse l'impact des brouilleurs non – intentionnels sur la réception des signaux GPS. Il débute par une caractérisation des problèmes de brouillage et indique leurs effets sur un récepteur.

- L'objectif principal est de mieux comprendre l'influence des brouilleurs ou des perturbations RF sur les phases de réception, d'acquisition et de poursuite des signaux GPS. La vulnérabilité d'un récepteur GPS est d'abord définie au niveau des différents composants d'un récepteur telles que la tête RF , l'AGC et le CAN, les boucles et la démodulation des données.
- Les équations fondamentales du brouillage afin d'exprimer les seuils du rapport  $C/N_0$  en fonction du rapport J/S au-delà desquels le fonctionnement du récepteur est dégradé de plus, pour clarifier les attentes actuelles souvent mises de coté par manque de clarté et par les quantités de documents, on résume clairement les normes sur les récepteurs GPS civiles établies par des organismes et les spécifications requises. La synthèse permet de définir des critères quantitatifs relatifs à l'impact d'un brouilleur sur les différentes phases de perturbation d'un récepteur GPS.

- les catégories de brouillage et tente d'identifier et de décrire les différentes sources potentielles de perturbation. Les sources qui ont une probabilité plus élevée de brouiller

Un récepteur GPS sont analysées conduisant à une première classification des techniques d'adoucissement de spectre dans le but de réaliser des récepteurs GPS robustes.

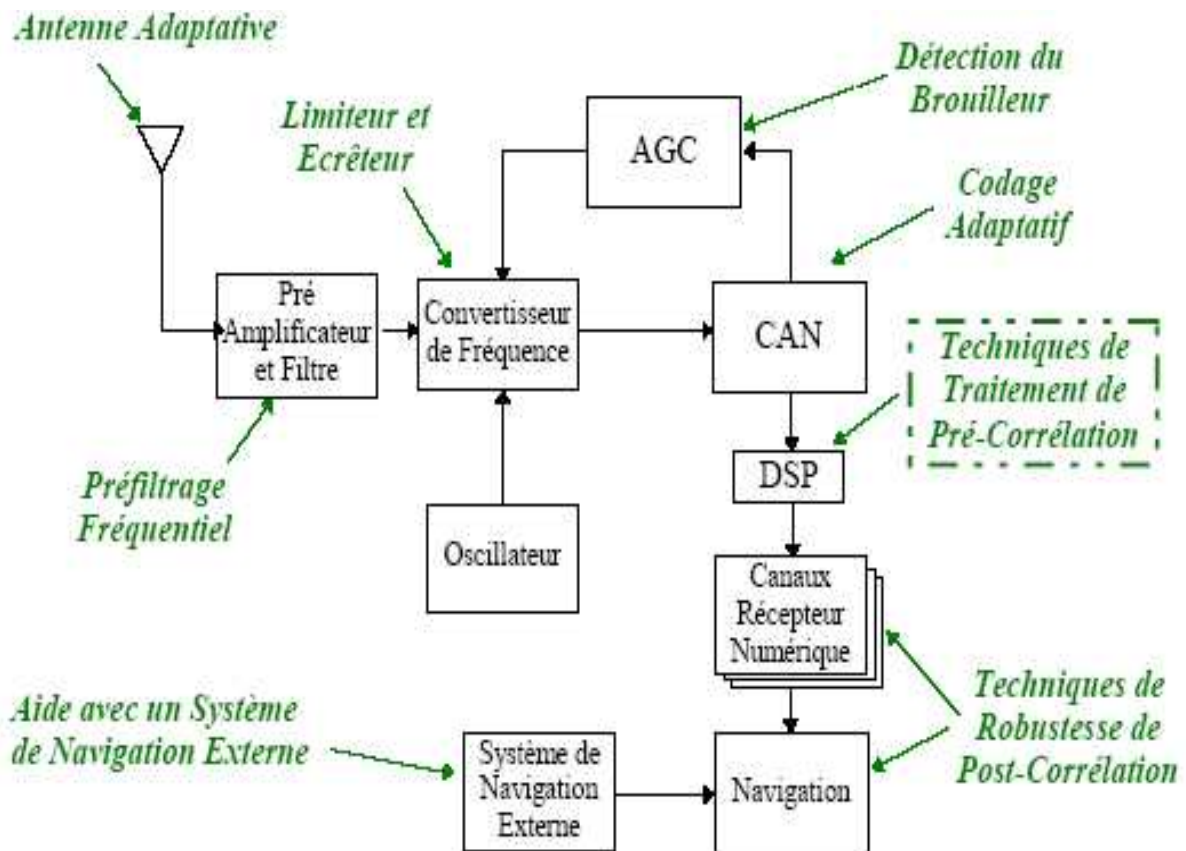
- Les différents types de brouillage sont répertoriés et on associe aux critères d'impact définis précédemment des valeurs représentatives telles que la distance, les isolations nécessaires entre les antennes et les réjections des filtres RF. On sélectionne donc ceux qui nous semblent les plus pénalisants pour un récepteur GPS.

## Introduction :

Comme clarifié dans le chapitre précédent plusieurs types des brouilleurs peuvent nuire au bon fonctionnement d'un récepteur GPS par conséquent à l'exploitation du message de navigation. La suppression de ces brouilleurs est envisageable en différents points de la chaîne de traitement: en radio fréquence (RF), en fréquence intermédiaire (IF), après échantillonnage du signal en fréquence intermédiaire ou encore dans les boucles de maintien. Pour cela on proposera dans notre travail l'application du filtrage adaptatif avant l'étape d'acquisition comme solution.

### 1-Dispositifs de résistance aux brouilleurs :

Comme on a vu, plusieurs types des brouilleurs peuvent léser au bon fonctionnement d'un récepteur GPS. Pour cela on a envisagé quelques dispositifs possibles pour améliorer la résistance des récepteurs GPS aux brouilleurs. La figure (4.1) liste les points vulnérables d'un récepteur et les modifications possibles qui permettraient de les renforcer.



**Figure 4.1** : Principaux dispositifs de résistance aux brouillages

Dès la réception, le brouilleur peut rencontrer une antenne à diagramme de rayonnement adaptatif qui soit capable d'éliminer une direction particulière lors de la réception. Ensuite, le préfiltrage en fréquence rejettera les brouilleurs situés hors bande.

Durant le processus de conversion en fréquence, des dispositifs de limiteur en puissance et des écrêteurs permettent d'éliminer les brouilleurs impulsions tels que les radars. On peut détecter et éliminer des signaux parasites trop élevés en contrôlant l'amplitude du signal et on adaptant le gain en conséquence.

Notons également le rôle de l'AGC qui normalise le signal reçu avant l'échantillonnage permet de détecter la présence de brouilleur reçue par le récepteur.

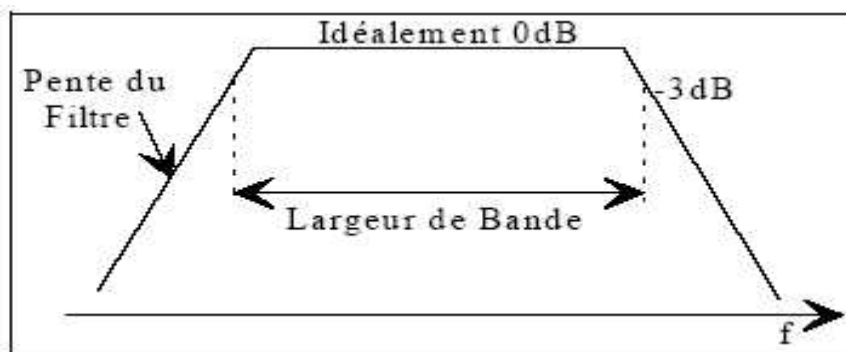
Après la numérisation du signal, on peut utiliser plusieurs techniques de traitement du signal dites de pré-corrélation, car elles interviennent en amont du corrélateur numérique.

On peut également améliorer la robustesse au niveau des canaux numérique qui consiste en général en une réduction de la bande des boucles de code et de porteuse pour réduire l'influence du bruit.

## **2- Filtrage à fréquentiel fixe :**

On peut agir successivement sur le filtre RF et les filtres FI du récepteur. En effet, si on réduit la bande passante du filtre et on augmente l'atténuation en bande coupée, on peut réduire la puissance du bruit et les effets des brouilleurs hors bande.

Cette technique est la plus classique des approches standard qui est utilisée par la plupart des constructeurs de récepteur.

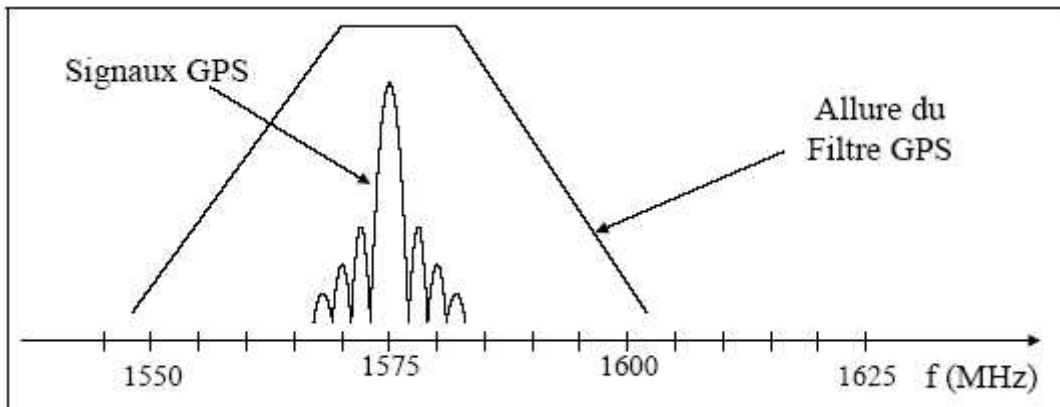


**Figure 4.2 :** Caractéristiques du filtrage fréquentiel fixe

Ce type de filtrage fixe dans le domaine fréquentiel est principalement spécifié par sa bande passante et ces caractéristiques d'atténuation. La largeur de bande du filtre définit le spectre en fréquence pour lequel une variation d'au plus 3 dB est observée sur la puissance des signaux. La pente du filtre RF est une des caractéristiques les plus importantes. Plus grande sera la pente du filtre, meilleur sera le degré de protection du récepteur face à un brouilleur hors bande.

La figure (4.3) illustre la forme d'un filtre qui effectue la protection des signaux GPS, SPS (Standard Positioning Service) utilisant le code C/A. Dans cet exemple, le filtre passe bande possède une bande de 10 MHz qui est nécessaire pour les techniques de corrélateur à bande étroite des récepteurs GPS.

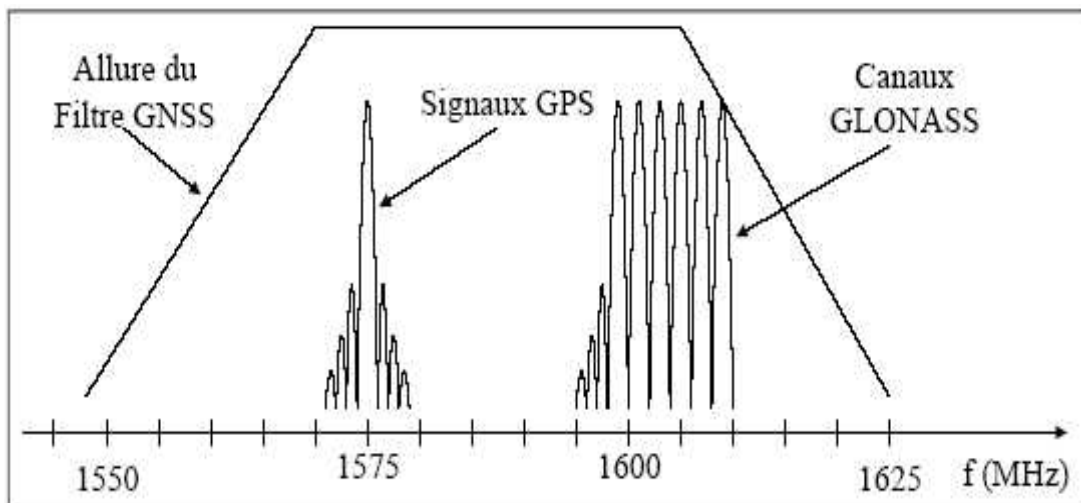
La pente du filtre est faible mais elle permet une bonne atténuation des signaux distants de plus de 25 MHz de la porteuse du signal GPS.



**Figure 4.3 :** Protection des signaux GPS à l'aide d'un filtre RF Fixe

Dans un même ordre d'idée, le filtre RF qui est placé généralement après l'amplificateur à faible bruit, peut être modifié pour accepter les deux signaux civils GPS et GLONASS.

La bande passante du filtre est généralement plus large pour laisser passer les fréquences centrales des canaux GLONASS allant de 1598 à 1600 MHz (Figure 4.4).



**Figure 4.4 :** Protection des signaux GPS et GLONASS à l'aide d'un filtre RF fixe

### 3- Filtrage fréquentiel adaptatif :

Cette méthode d'adoucissement de spectre peut être envisagée pour les brouilleurs hors bande GPS ainsi que les brouilleurs se trouvant dans la bande GPS pour autant que la largeur de bande du signal brouilleur soit faible face au signal GPS utile et que le signal brouilleur soit relativement stable en fréquence.

La figure (4.5) illustre le concept de base. Lorsqu'aucun signal brouilleur n'est détecté dans la section RF ou numérique du récepteur, le filtre est au repos et il offre une caractéristique passe-bande parfaitement adaptée aux signaux GPS. Dans ce cas le filtre peut être considéré comme transparent face au signal GPS qui le traverse.

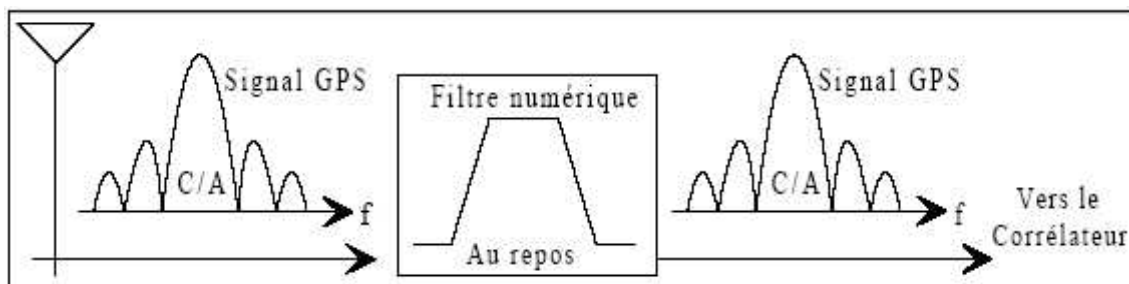


Figure 4.5 : Caractéristique du filtre numérique au repos

Dans la figure (4.6), l'apparition soudaine d'un brouilleur à l'entrée de l'antenne n'a pas permis au filtre de s'adapter à sa présence. Dans cette situation qui ne persiste que quelques millisecondes dans les circonstances normales, le brouilleur traverse le filtre sans aucune atténuation et perturbe les étages d'acquisition du signal utile. C'est en ce moment que les méthodes de détection de puissance et de localisation du brouilleur entrent en jeu.

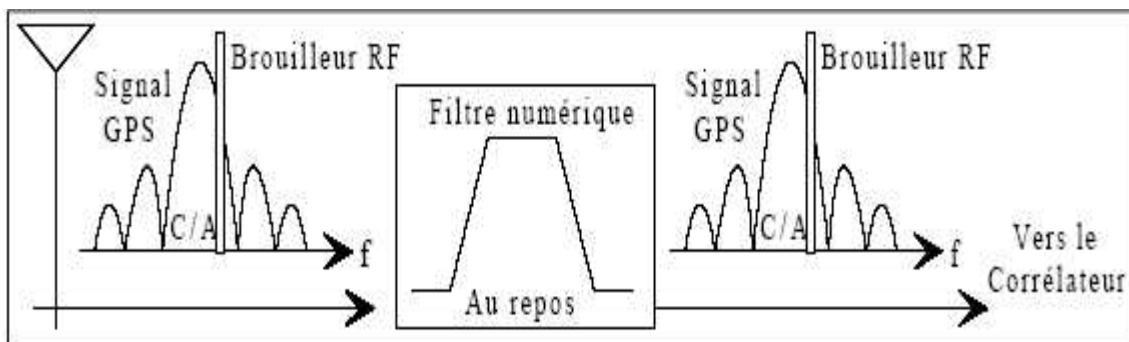


Figure 4.6 : Apparition d'un brouilleur dans le système

Suite à la détection de la présence du brouilleur, à sa localisation et à l'analyse de ces caractéristiques, le filtre adapte sa fonction de transfert et lui introduit une composante coupe-bande qui tend à épouser la forme du spectre du brouilleur.

Les signaux de la section coupe-bande sont fortement atténués. La sortie du spectre en fréquence de la figure (4.7) le résultat où la puissance spectrale du brouilleur à spectre étroit et

des signaux GPS à cet endroit est réduite. L'étage de corrélation qui suit permettra d'étaler la puissance résiduelle du brouilleur sur 2 MHz et de concentrer l'énergie du signal utile GPS sur une largeur de bande approximative de 100 Hz.

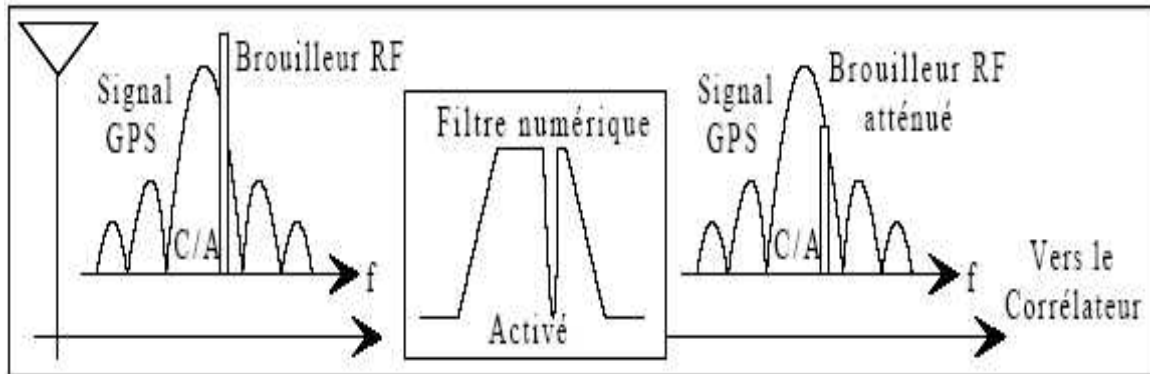


Figure 4.7 : Atténuation du brouilleur suite à un filtrage adaptatif

Cette méthode de robustesse aux brouilleurs peut être efficace pour des brouilleurs à spectre étroit stables. Un intérêt de cette technique face à l'accroissement de la puissance du brouilleur est la possibilité du filtre adaptatif de réagir en accentuant l'atténuation de sa bande réjectrice et en améliorant sa position sur sa réponse fréquentielle.

#### 4- Filtres à encoche :

Un filtre coupe-bande est un filtre numérique conçu pour atténuer une bande de fréquence  $f$  bien déterminé autour d'une fréquence centrale défini  $f_0$ . Il en existe plusieurs types des filtres utilisés dans les récepteurs GPS parmi lesquels :

- Les filtres RIF (Réponse Impulsionnelle Finie) générés par une équation de type:

$$H(Z) = \sum_{l=0}^N c_l \cdot Z^{-l} \quad (4.1)$$

Un filtre FIR avec une coupure très nette (bande de transition très courte) peut requérir jusqu'à des centaines de délais.

- Les filtres RII (Réponse Impulsionnelle Infinie) à gabarit générique est décrite par une équation de type :

$$H(Z) = \frac{\sum_{l=0}^N a_l \cdot Z^{-l}}{\sum_{l=0}^M b_l \cdot Z^{-l}} \quad (4.2)$$

Un filtre RII est très efficaces et peuvent donner des pentes de coupure très raides.

#### 4-1-Présentation du filtre à encoche :

Le filtre à encoche (Notch filter) est un filtre coupe-Bande dont la largeur de bande est très étroite, qui est normalement utilisé pour retirer ou amplifier une fréquence du spectre. Son gabarit est donné dans la figure (4.8).

Plusieurs travaux ont été consacrés à l'étude d'un filtre à encoche du second ordre dit «avec contrainte» (constrained Notch filter) pour l'estimation et l'élimination de raie spectrales.

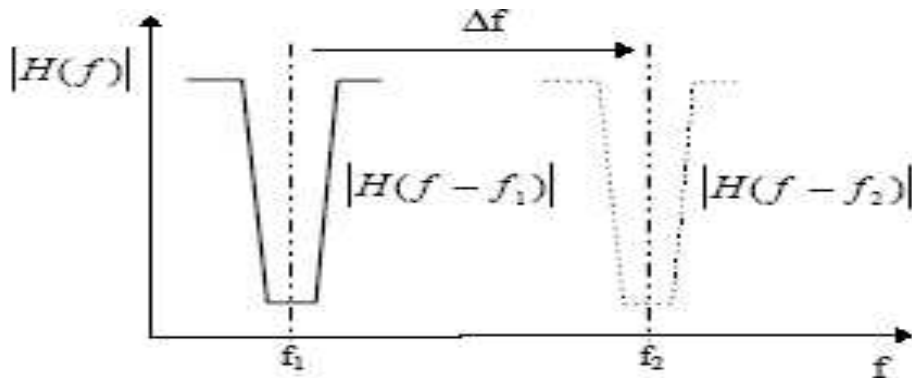


Figure 4.8 : Gabarit d'un filtre à encoche

La structure idéale des pôles et des zéros d'un filtre à encoche avec contrainte est montrée à la figure (4.9) (on simplifiera par la suite la notation en indiquant ce filtre comme ( Filtre à Encoche ) tout court). Les zéros se trouvent sur le cercle unité et les pôles, de module inférieur à 1 pour préserver la stabilité du filtre, ont même argument que les zéros. La position des pôles est définie relativement à la position des zéros par un coefficient constant .

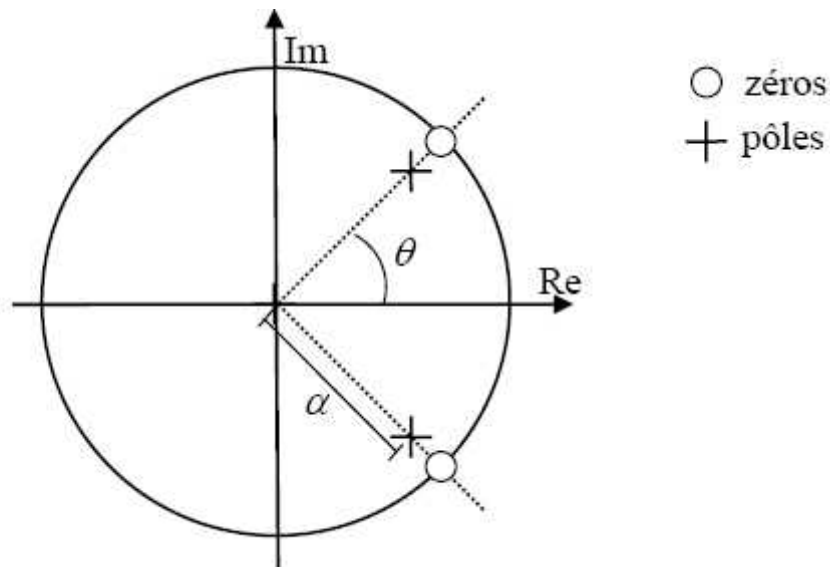


Figure 4.9 : Les zéros et pôles d'un filtre à encoche



Pour un filtre à encoche du deuxième ordre la fonction de transfert présente deux zéro  $z_0$  et deux pôles  $p_0$  d'argument  $2 f_0$  il est centré sur la fréquence  $f_0$ . Dans ces conditions, on peut écrire la fonction de transfert du filtre comme :

$$H(Z^{-1}) = \frac{(Z-Z_1)(Z-Z_1^*)}{(Z-P_1)(Z-P_1^*)} = \frac{Z^2 - 2\Re(Z_1)Z + Z_1Z_1^*}{Z^2 - 2\Re(P_1)Z + P_1P_1^*} = \frac{1 - 2\Re(Z_1)Z^{-1} + Z_1Z_1^*Z^{-2}}{1 - 2\Re(P_1)Z^{-1} + P_1P_1^*Z^{-2}} \quad (4.3)$$

Si on met en évidence la relation entre le pôle et le zéro :

$$\begin{aligned} |Z_1| &= 1 && \text{avec } 0 < \alpha < 1 \\ |P_1| &= \alpha \cdot |Z_1| \end{aligned} \quad (4.4)$$

La contrainte imposée sur le module du pôle ( $p_0 = \alpha z_0$ ;  $\alpha < 1$ ) permet de garantir la stabilité du filtre et d'ajuster la largeur de l'encoche.

On a :

$$H(Z^{-1}) = \frac{A(Z^{-1})}{B(Z^{-1})} = \frac{1 + a_1 Z^{-1} + Z^{-2}}{1 + \alpha_1 Z^{-1} + \alpha^2 Z^{-2}} = \frac{A(Z^{-1})}{A(\alpha^{-1})} \quad (4.5)$$

Avec :

$$a_1 = -2 \cdot \Re(Z_1) \quad (4.6)$$

En coordonnées polaires, la fonction de transfert devient :

$$H(Z^{-1}) = \frac{1 - 2 \cos(\theta) \cdot Z^{-1} + Z^{-2}}{1 - 2 \alpha \cos(\theta) \cdot Z^{-1} + \alpha^2 Z^{-2}} \quad (4.7)$$

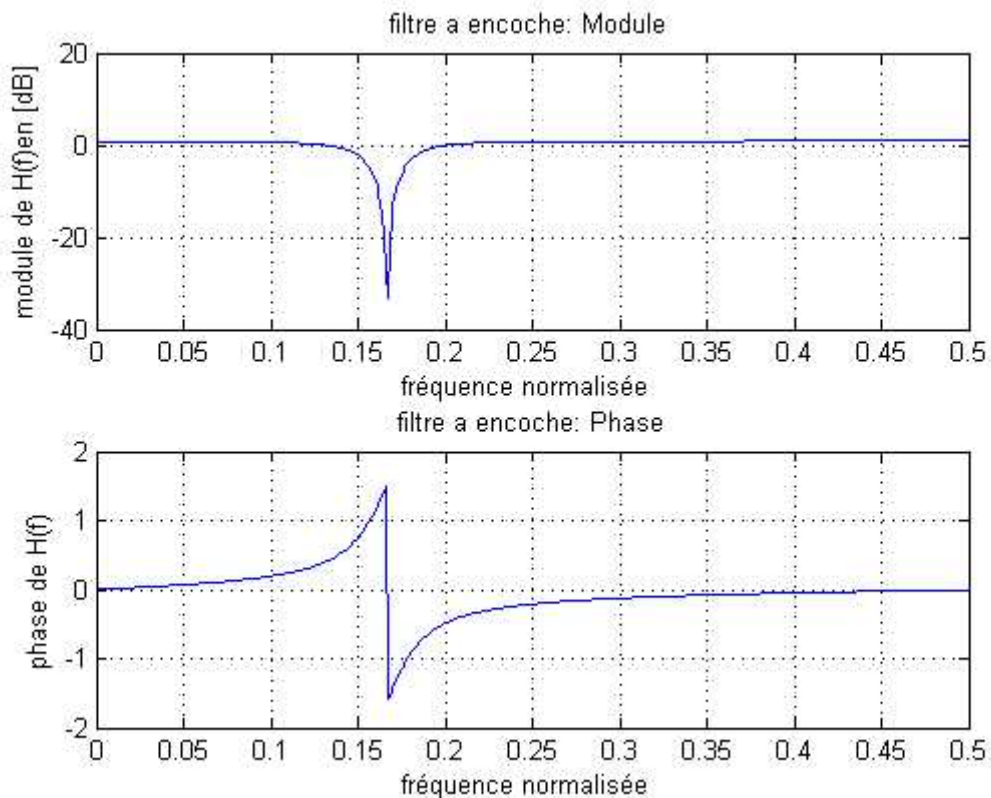
Où  $\theta$  représente l'angle entre l'axe X et le pôle on a :

$$a_1 = -2 \cos(\theta) \quad (4.8)$$

La condition de stabilité de ce filtre étant d'avoir les pôles à l'intérieur du cercle unité, on peut imposer la stabilité du filtre en vérifiant les conditions simples suivantes sur les coefficients :

$$|a_1| < 2 \text{ et } 0 < a_0 < 1 \quad (4.9)$$

On peut tracer le module et la phase du filtre comme dans la figure (4.10) :



**Figure 4.10** : Module et phase d'un filtre à encoche

Sachant que le paramètre  $\alpha$  détermine la largeur de bande de l'encoche, On constate que pour des  $\alpha$  proches de 1, un tel filtre élimine une bande de fréquence très étroite du spectre. La figure (4.11) illustre la variation de l'ouverture de l'encoche du filtre pour différentes valeurs de  $\alpha$  :

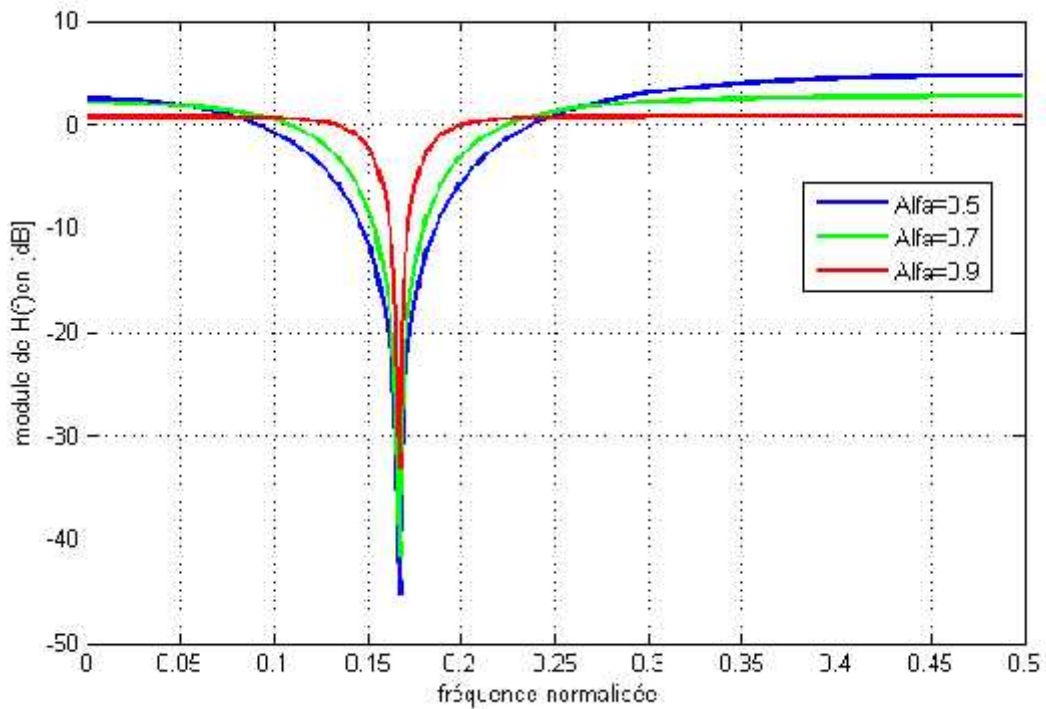


Figure 4.11 : Module d'un filtre à encoche pour différentes valeurs de

#### **4-2-Application du filtre à encoche sur le signal GPS :**

Après la présentation du filtre à encoche on a pu vérifier que pour avoir une bande du filtre (ouverture de l'encoche) très faible il suffit que  $\alpha$  soit de plus en plus proche de 1; cette propriété est nécessaire pour un comportement satisfaisant du filtre, on voit ici l'application du filtrage et aux effets sur la signal GPS.

Une encoche est capable de filtrer de façon idéale une raie spectrale si sa position est connue exactement comme montre la figure (4.12) :

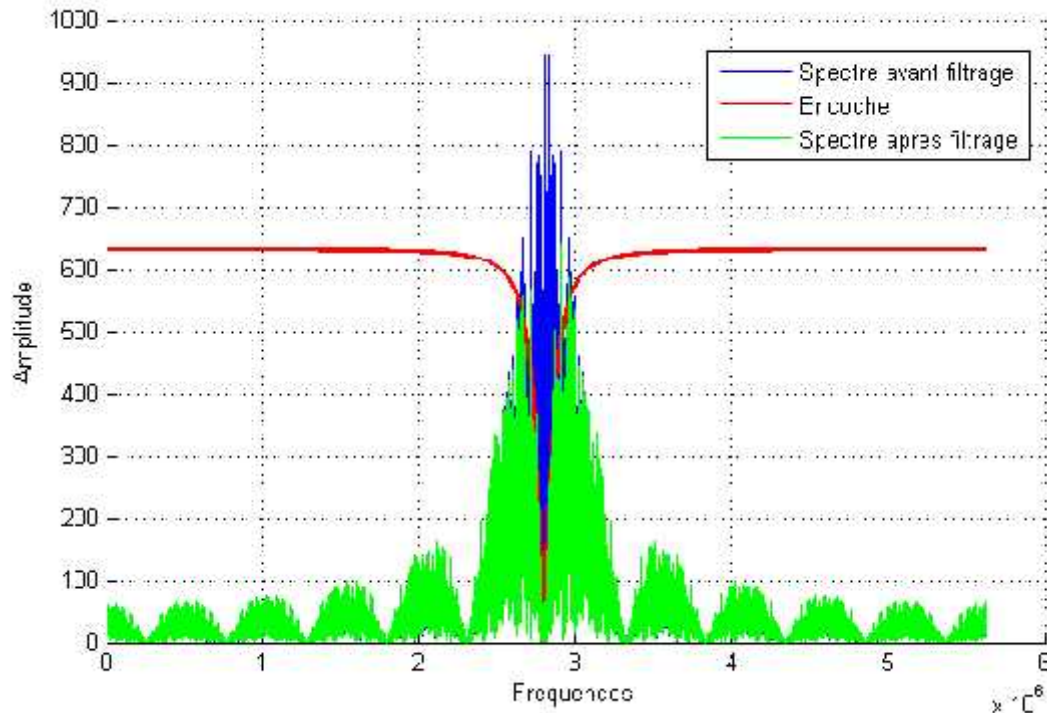


Figure 4.12 : Application d'une encoche sur spectre GPS

#### 4-3-Cascade de filtre à encoche :

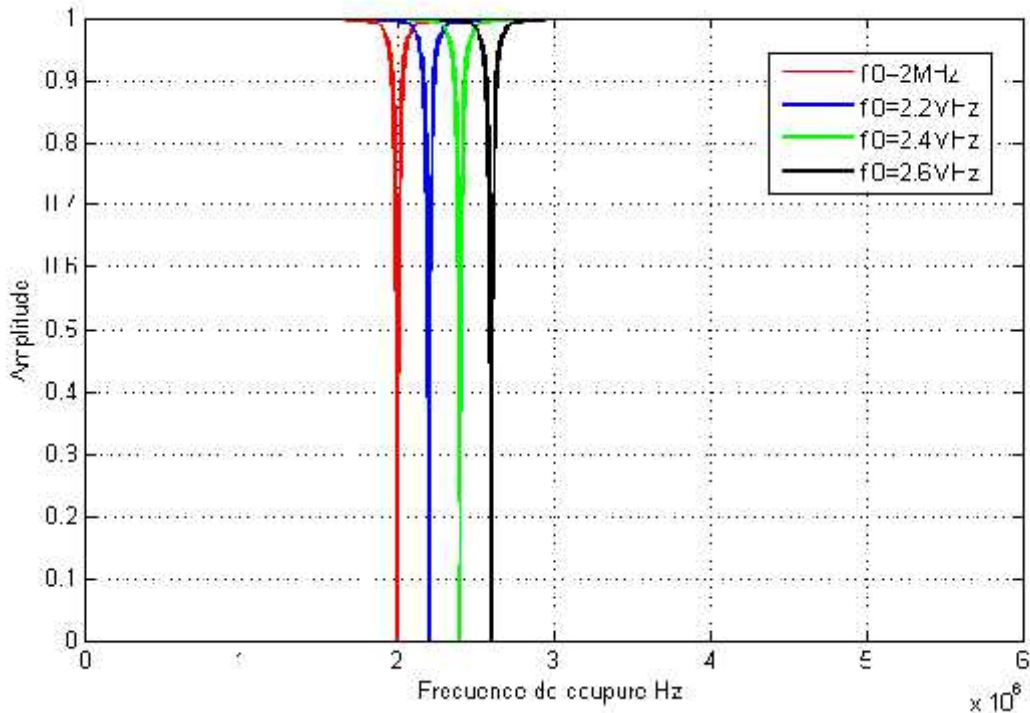
Si le signal GPS est affecté par plusieurs brouilleurs de fréquences centrales différentes, pour cela on propose d'utiliser une cascade de filtre à encoches qui s'adaptent successivement aux fréquences des brouilleurs détectés.

La fonction de transfert global résultant du produit d'une cascade d'encoches utilisée pour éliminer plusieurs brouilleurs, elle est donnée par :

$$\begin{aligned}
 H(Z^{-1}) &= \prod_{i=1}^n \frac{1+a_i Z^{-1}+Z^{-2}}{1+a_i a_i Z^{-1}+a_i^2 Z^{-2}} \\
 &= \frac{1+Z^{-n}+\sum_i [a_i (Z^{-i}+Z^{2n-i})]}{1+\alpha^n Z^{-n}+\sum_i [a_i (\alpha^i Z^{-i}+\alpha^{-(2n-i)} Z^{2n-i})]} \quad (4.10)
 \end{aligned}$$

Où  $i$  représente l'indice de l'encoche.

Dans notre présentation, on a utilisé quatre brouilleurs en cascade dont les fréquences centrales sont respectivement  $f_0= 2.6$  MHz, 2.4 MHz et 2.2 MHz, 2 MHz.



**Figure 4.13** : Module d'une cascade de filtres à encoche avec  $\epsilon = 0.99$ .

La figure 4.13 montre une cascade de filtres à encoche chacun centré sur sa propre fréquence.

### Conclusion :

Une encoche est capable de filtrer de façon idéale une raie spectrale si sa position est connue exactement, si la position de la raie n'est pas connue de façon exacte ou si le brouilleur à une (faible) largeur de bande, on peut penser à diminuer la valeur de  $\epsilon$  pour élargir la bande coupée.

# Conclusion

## Conclusion Générale

Ce rapport à présente le travail réalisé au cours de notre projet de fin d'études. Nous nous sommes intéressés à l'analyse des brouillages non-intentionnelle sur les récepteurs GPS et les techniques permettant d'en réduire les effets, afin de mieux gérer les brouilleurs au niveau du récepteur GPS. Nous rappelons que les objectifs de ce travail étaient :

- Présentation de système GPS.
- Mieux comprendre l'influence des brouilleurs ou des perturbations RF sur les phases de réception, d'acquisition et de poursuite des signaux GPS.
- Etudier les techniques de robustesse aux brouilleurs utilisées dans les récepteurs GPS.
- Modélisation développée à l'aide du logiciel MATLAB :
  - les équations fondamentales de brouillage afin d'exprimer les seuils du rapport  $C/N_0$  en fonction du rapport  $J/S$  au delà desquels le fonctionnement du récepteur est dégradé
  - l'équation de la fonction de transfert du filtre à encoche utilisé dans le récepteur GPS.

En guise de conclusion, nous pouvons dire que nous avons acquis des notions de base sur le système et récepteur GPS en faisant une analyse l'impact des brouilleurs sur la réception des signaux GPS tout d'abord en caractérisant des problème de brouillage et en indiquant leurs effets sur un récepteur.

Ce travail peut être amélioré en considérant un réseau d'antenne linéaire 1D, ou circulaire par exemple pour une estimation en 2D, au niveau de récepteur SPS. Aussi la technique de la rejection des brouilleurs peut être améliorée par les méthodes telles que l'algorithme SLC (Side Lobe Cancellor) ou GSC (Generalized Side Cancellor) ou d'autres techniques connues dans la littérature scientifique pour un brouilleur.

# BIBLIOGRAPHIE

[1] **Technique d'antennes adaptatives pour récepteurs de radionavigation par satellite résistants aux interférences**, GUILLAUMME CARRIE, thèse de doctorat SUAPAERO, 7décember 2006.

[2] **Le système GPS**, Jeremy Lainé, Laurent Leconte, Ecole polytechnique.

[3] **Techniques d'adoucissement de spectre pour récepteur à spectre étalé**, V. CALMETTES, F. PRADEILLES, M. BOUSQUET, (Septembre 2001).

[4] **Techniques de Robustesse aux Brouilleurs pour les Récepteurs GPS**, Ph.D Thesis, René Jr. Landry, Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, Décembre 1997.

[5] **Understanding GPS**, Gregory T. French, 1996.

[6] **GPS Jamming in a Laboratory Environment**, GREGORY D. RASH.

[7] **Interference Rejection Techniques**, V. CALMETTES, F. PRADEILLES, M. BOUSQUET.7th International conference on Integrated Navigation Systems, Saint Petersburg, Russia, (May 2000).

[8] **Analysis of Potential Interference Sources and Assessment of Present Solutions for GPS/GNSS Receivers**, R. LANDRY, A. RENARD.4th International Conference on Integrated Navigation Systems, St-Petersburg, Russia, (May97).

[9] **Mise en Œuvre d'un Filtre à Encoche Adaptatif dans un XILINX pour un Récepteur GPS**, R. LANDRY, V. CALMETTES, M. BOUSQUET, Revue Scientifique et Technique de la Défense, (Novembre 1997).