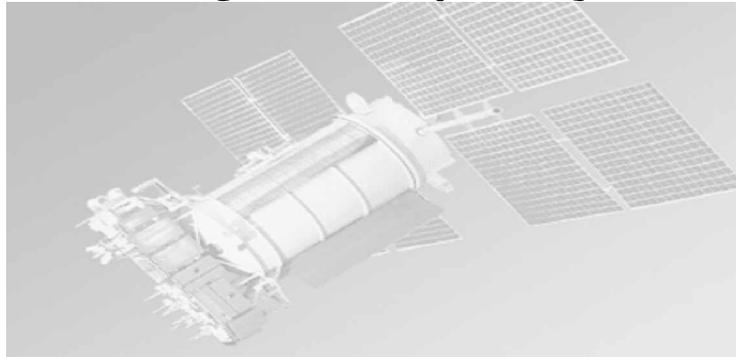


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE SAAD DAHLEB
BLIDA
FACULTE DES SCIENCES DE
L'INGENIEUR

DEPARTEMENT D'AERONAUTIQUE
MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur
d'état en Aéronautique

Spécialité: Navigation Aérienne
Option : Installation

Acquisition Du Signal BOC(Binary Offset Carrier)



Présenté par :
BELHAFFAF Farid
DJEZZAR Salim

Promoteur :
BENACHENHOU Kamel

Année 2006-2007

SOMMAIRE

RESUME

REMERCIEMENTS

DEDICACE

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUE ET TABLEAUX

INTRODUCTION GENERALE

Chapitre I: SYSTEME DE NAVIGATION PAR SATILLITE

I-1/ GENERALITES SUR LA NAVIGATION

PAR SATELLITES..... 05

I-2/ LE SYSTEME GPS..... 06

2-1/ POTENTIEL D'UTILISATION..... 08

2-2/ DESCRIPTION DU SYSTEME..... 08

a- Le segment spatial 09

b-Segment de contrôle..... 12

c- Segment utilisateur..... 13

2-3/ LE SIGNAL GPS 13

I-3/ GLONASS..... 15

3-1/ LE SIGNAL GLONASS..... 17

I-4/ LE SYSTEME GALILEO..... 18

4-1/ DETERMINATION DE LA POSITION 20

4-2/ LES SERVICES OFFERTS PAR LE SYSTEME GALILEO..... 21

Le service ouvert..... 21

Le service de sûreté de la vie..... 21

Le service commercial..... 21

Le service public réglementé..... 21

Le service de recherche et sauvetage..... 21

4-3/ UTILISATION DE GALILEO EN MODE DIFFERENTIEL..... 22

4-4/ LE SIGNAL GALILEO..... 23

I-5/ EGNOS 25

I-6/ BANDE DE FREQUENCE DES SYSTEMES DE NAVIGATION PAR SATELLITES	27
--	-----------

Chapitre II: ACQUISITION DU SIGNAL GPS

II-1 INTRODUCTION :.....	31
II-2/ STRUCTURE DU SIGNAL GPS	32
II-3/ CRÉATION DU SIGNAL	33
II-3.1/ CONSTRUCTION DES CODES DE GOLD.....	33
II- 3-2/ LA GENERATION DU CODE C/A.....	34
II-4/ PROPRIETES DE CORRELATION DES CODES GOLD.....	36
II-5/ DENSITE SPECTRALE DE PUISSANCS.....	42
II-6/ ACQUISITION	46
II-6-1/ Acquisition série.....	47
II-6-2/ Acquisition parallèle sur la fréquence	49
II-6-3/ Acquisition parallèle sur le code phase	49
II-7/ SIMULATION DE L'ACQUISITION CIRCULAIRE.....	52

Chapitre III: ACQUISITION DU SIGNAL BOC

III-1/ INTRODUCTION :.....	54
III-2/ LE SIGNAL BOC :.....	54
III-3/ GENERATEUR DE SIGNAUX BOC :.....	56
III-4/ DENSITE SPECTRALE DE PUISSANCE :.....	56
IV/ SIMULATION :.....	59
4-1/ L'AUTO CORRELATION DU SIGNAL BOC :.....	60
4-2/ LA DENSITE SPECTRALE DE PUISSANCE	60
IIV/ ACQUISITION DES SIGNAUX BOC :.....	63
VI/ INTERFACE.....	72

CONCLUSION GENERALE

BIBLIOGRAPHIES

LISTE DES FIGURES

Chapitre I: Généralités sur la navigation par satellites

Figure (I-1) : principe de triangulation	07
Figure(I-2) : Le segment spatial.....	09
Figure (I-3) : Le bloc IIA	11
Figure (I-4) : Le bloc IIR.....	11
Figure (I-5) : Le segment de contrôle	12
Figure (I-6) : Le segment utilisateur	13
Figure (I-7) : Spectre du signal GPS.....	14
Figure (I-8) Le segment spatial associé à GLONASS	16
Figure (I-9) : Le segment spatial associé à GALIEO.....	18
Figure (I-10):Le satellite GALIEO.....	19
Figure (I-11): spectre du signal GALILEO.....	24
Figure (I-12): le systeme EGNOS.....	26
Figure (I-13):allocatioins de fréquences et les dénomination des bandes Correspondantes.....	28

Chapitre II: Acquisition du signal GPS

Figure (II-1) Construction d'un signal GPS	32
Figure (II-2) La génération du code C/A	34
Figure (II-3) : Autocorrélation PRN1.....	37
Figure (II-4) Autocorrelation PRN1 Décalé	38
Figure (II-5) Intercorrelation PRN1 &PRN2.....	38
Figure (II-6) Matérialisation du signal.....	39
Figure (II-7) Matérialisation du signal	39
Figure (II-8) la fonction de corrélation du code PRN	40
Figure (II-9) transformée de Fourier de s(t).....	41

Figure (II-10) Densité Spectrale De Puissance	43
Figure (II-11) Densité Spectrale De Puissance PRN1	43
Figure (II-12) Densité Spectrale De Puissance PRN1 avec porteuse.....	43
Figure (II-13) Densité Spectrale De Puissance PRN1.....	45
Figure (II-14) Schéma de l'acquisition série.....	46
Figure (II-15) Schéma de l'acquisition parallèle.....	48
Figure (II-16) Extraction de la porteuse du signal GPS.....	48
Figure (II-17) : Schéma de l'acquisition parallèle sur le code.....	50
Figure (II-18) : Acquisition PRN2 Présent	52
Figure (II-19) : Acquisition PRN3 n'est pas présent.....	52
Figure (II-20) : Acquisition PRN4 présent.....	53

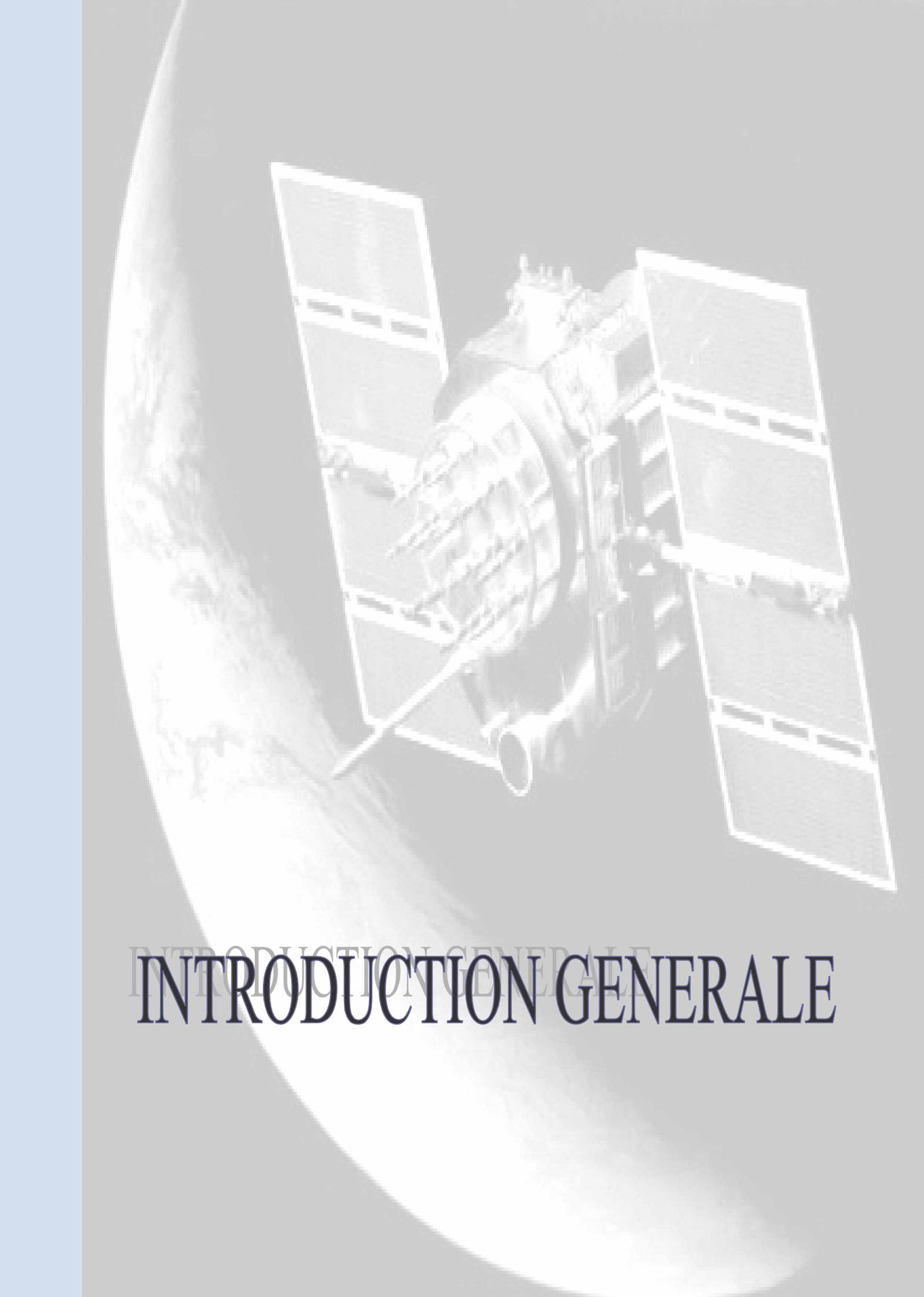
Chapitre III: Etude des signaux BOC :

Figure (III-1) signal rectangulaire de la modulation BOC avec n pair	55
Figure (III-2) signal rectangulaire de la modulation BOC avec n impair.....	55
Figure (III-3) : Génération du signal BOC.....	56
Figure (III-4) Représentation de la fonction $S_{sc}(f)$ pour n pair	58
Figure (III-5) : représentation de la fonction $S_{sc}(f)$ pour n impair.....	58
Figure (III-6) : Fonction d'autocorrélation pour BOC(1,1).....	60
Figure (III-7) : Densité Spectrale de Puissance BOC (1 ,1).....	61
Figure (III-8) : Densité Spectrale de Puissance BOC et C/A.....	61
Figure (III-9) : Densité spectrale de puissance BOC(10,5)	62
Figure (III-10) : Acquisition circulaire BOC.....	63
Figure (III-11) : Acquisition lobe gauche.....	64
Figure (III-12) : Acquisition lobe droit	65
Figure (III-13a) : Acquisition du lobe gauche.....	66

Figure (III-13b) :Acquisition du lobe droit.....	67
Figure (III-14) : Acquisition finale.....	67
Figure (III-15a) :Acquisition lobe gauche avec bruit.....	68
Figure (III-15b) :Acquisition lobe droit avec bruit.....	68
Figure (III-16) :Acquisition finale avec bruit.....	69
Figures (III-17a) : Acquisition du lobe gauche.....	70
Figures (III-17b) : Acquisition du lobe droit.....	70
Figures (III-18) : Acquisition finale.....	71
Figure III-19 : Interface.....	73

Tableau I-1: Le paramètre Z

Tableau II-1 : Les différentes combinaisons spécifiques pour chaque PRN

A grayscale image of a satellite in orbit above the Earth. The satellite has two large solar panel arrays extended from its central body. The Earth's curved horizon is visible on the left side of the frame. The text 'INTRODUCTION GENERALE' is overlaid in a dark blue, serif font across the lower portion of the image.

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La bande de fréquence couramment utilisée par les systèmes de navigation par satellite est la bande L entre 1164 et 1610 MHz. Les négociations menées à la Conférence Mondiale des Radiocommunications (CMR) en 2000 ont permis de trouver des solutions pour le partage de cette bande entre les systèmes existants GPS et GLONASS et le nouveau système GALILEO. La figure suivante montre les allocations de fréquences et les dénominations des bandes correspondantes.

Les techniques de mesure de distance classiquement utilisées dans les systèmes de radionavigation par satellite font appel à une modulation de la porteuse, d'une part par des codes pseudo-aléatoires (PRN : pseudo random noise) servant à la mesure de distance, d'autre part par des données à faible débit correspondant à des informations nécessaires au récepteur pour le calcul de la position (identification et éphémérides du satellite, référence temporelle...) ainsi qu'à des informations de service. Le débit du code est significativement plus élevé que celui des données ce qui se traduit par un étalement spectral du signal de données après multiplication par le code PRN d'étalement. Le rythme du code PRN conditionne la largeur de bande occupée par la porteuse. Dans le cas du signal GPS C/A émis sur la bande appelée L1, le rythme du code d'étalement, noté C/A, est de 1,023MHz. Cette valeur sert de référence dans la définition des signaux GALILEO.

La cohabitation des systèmes GPS et GALILEO dans la bande dite E2-L1-E2 où les seules bandes disponibles pour GALILEO consistent en deux bandes de 4 MHz de part et d'autre de la bande L1 déjà occupée par GPS, a conduit à définir une modulation particulière dite Porteuse à Double Décalage (PDD) ou BOC (*Binary Offset Carrier*) qui a la propriété de présenter un spectre composé de deux lobes principaux décalés symétriquement par rapport à la fréquence centrale de la porteuse (1575 MHz). Cette

fréquence centrale reste la même que celle de GPS ce qui permet de faciliter la réalisation de récepteurs bi-modes GPS et GALILEO.

Les signaux BOC, caractérisés par ce double décalage spectral, utilisent outre le code d'étalement non filtré de rythme C/A, une sous-porteuse carrée non filtrée de fréquence f_{sc} . Ils se définissent par deux paramètres n et m et sont notés BOC(n , m). Ces paramètres permettent de comparer le signal BOC au signal GPS C/A émis sur L1.

Le paramètre n représente le rapport entre la fréquence f_{sc} de la sous-porteuse et le rythme C/A du code GPS ($n = f_{sc}/f_{C/A}$). Il détermine l'écart de fréquence entre la fréquence de la porteuse et la fréquence centrale des lobes principaux du signal BOC.

Le paramètre m est le rapport entre les rythmes du code du signal BOC et du code C/A ($m = f_c/f_{c/a}$). Il conditionne la largeur des lobes du signal BOC.

Par ailleurs l'utilisation de signaux en quadrature permet de diversifier les signaux de données et de service, ainsi que de transmettre éventuellement des signaux pilotes (codes d'étalement non modulés par des données) facilitant la synchronisation du récepteur.

Enfin il est envisageable d'utiliser des codes différents pour l'obtention de chacun des lobes (modulation dite ALTBOC) ce qui permet encore d'augmenter le nombre de services différents sur une même porteuse. La figure suivante illustre les spectres obtenus pour une proposition de configuration des signaux GALILEO :

Plusieurs services sont prévus pour le système de navigation GALILEO. Le tableau ci-dessous présente une proposition de répartition des différents services GALILEO dans les bandes allouées :

Service de navigation GALILEO	Bande de fréquence
Open services (OS)	E5a, E5b, E2-L1-E1
Commercial Services (CS)	E6
Safty of life services (SOL)	
Public Related Services (PRS)	E5a, E5b, E2-L1-E1

Services GALILEO en fonction des bandes de fréquences

Suivant les services et les bandes de fréquence les porteuses sont modulées selon des schémas du type GPS actuel (modulation BPSK) ou de type BOC, aussi prévu pour le GPS modernisé. On notera enfin, que différents signaux seront émis sur chaque fréquence porteuse avec un schéma de multiplexage encore à définir.

Le but de notre travail est d'analyser les caractéristiques innovatrices du code BOC, ceci en examinant sa fonction de corrélation, sa génération, sa densité spectrale de puissance ainsi que son acquisition tout en comparant les résultats trouvés avec ceux du code GPS classique. Pour ce faire, ce travail sera organisé autour de trois chapitres comme suit :

- ∅ Le premier chapitre introduit le sujet en présentant le système GPS, puis le système GALILEO.
- ∅ Le deuxième chapitre présente une étude détaillée des codes PRN existants au niveau du système GPS, un simulateur de code ainsi que celui du signal GPS seront réalisés, suivi d'une analyse mathématique complète de la fonction de corrélation et de la fonction densité spectrale de puissance, vers la fin nous étudions l'acquisition du signal. L'ensemble des simulations sera réalisé sous Matlab.
- ∅ Le troisième chapitre est consacré à l'étude du signal BOC, de même nous procédons à la simulation du signal, l'analyse de sa fonction de corrélation et sa fonction densité spectrale de puissance ainsi que son acquisition.
- ∅ Enfin, une conclusion générale...

A grayscale illustration of a satellite in orbit above the Earth. The satellite has a central body and two large rectangular solar panels extended outwards. The Earth's curved horizon is visible in the background.

CHAPITRE I:

SYSTEME DE NAVIGATION PAR SATELLITES

I-1/ Généralités sur la navigation par satellites :

Le principe d'un système de navigation par satellites à couverture permanente et mondiale est simple : l'utilisateur reçoit des signaux d'un certain nombre de satellites dont la position est connue avec une grande précision, les compare et en déduit sa position géographique. Dans les systèmes américains GPS (Global Positioning System) et russe Glonass, comme bientôt dans le système européen Galileo, ce principe simple se décline de la manière suivante. Chaque satellite émet en permanence un signal comprenant une information sur sa position et sur l'heure précise de l'émission. L'utilisateur équipé d'un récepteur (parfois appelé « terminal ») reçoit ces signaux, en déduit les distances le séparant des satellites par une simple mesure du temps de propagation, et par un calcul mathématique relativement aisé, qui s'apparente à la trilatération, en déduit sa position avec une précision meilleure que dix mètres.

Ce principe de navigation présente l'immense avantage que l'utilisateur n'a pas besoin d'émettre un signal : l'utilisation est donc très discrète (l'opérateur du système ne sait pas qui l'utilise, ni même combien il y a d'utilisateurs) et le système n'est pas saturable puisqu'il ne fonctionne que dans le sens satellites vers l'utilisateur et que ce dernier se contente de recevoir les signaux. Au passage, on remarquera que ce principe de détermination de la position fournit aussi un remarquable service de distribution du temps puisque chaque terminal reçoit des signaux synchronisés entre eux avec un très haut niveau de précision (quelques dizaines de nanosecondes). Cette caractéristique est à l'origine de très nombreuses applications, comme on le verra dans le chapitre 3. De surcroît, pour les terminaux montés sur des mobiles, les positions successives du terminal permettent d'en déduire facilement la vitesse et la direction du déplacement. Le système de navigation fournit donc un service de détermination de la position, de la vitesse et du temps (service PVT).

Bien entendu, pour que ce principe s'applique partout sur le globe et sans interruption de service, il faut qu'un nombre suffisant de satellites soit en orbite, bien répartis tout autour de la planète, de manière que, quel que soit l'endroit où est situé l'utilisateur, il reçoive les signaux d'un nombre suffisant de satellites pour que le calcul de la position soit possible. Pour satisfaire cette condition, il y a plusieurs solutions mais la

plus élégante et la plus efficace consiste à mettre en place une constellation de vingt-quatre à trente satellites placés sur des orbites circulaires de l'ordre de 20 000 km d'altitude, placés par groupe de huit à dix sur trois plans inclinés d'au moins cinquante degrés par rapport à l'équateur et décalés entre eux de 120 degrés. Avec cette configuration, un utilisateur, quelle que soit sa position sur la Terre, 'voit' en permanence au moins quatre satellites, ce qui est suffisant pour permettre la détermination de la position. C'est la solution qui a été retenue pour les systèmes GPS, Glonass et Galileo, systèmes qui seront présentés dans ce qui suit ainsi que le système EGNOS.

I-2/ LE SYSTEME GPS :

Le système de Positionnement Global (GPS) est un système de navigation par satellites 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 différé. 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 (U.S. Department of Defense).

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, ceci est illustré par la figure I-1. Un quatrième satellite est nécessaire pour tenir compte de la non-synchronisation de l'horloge du récepteur et des horloges des satellites.

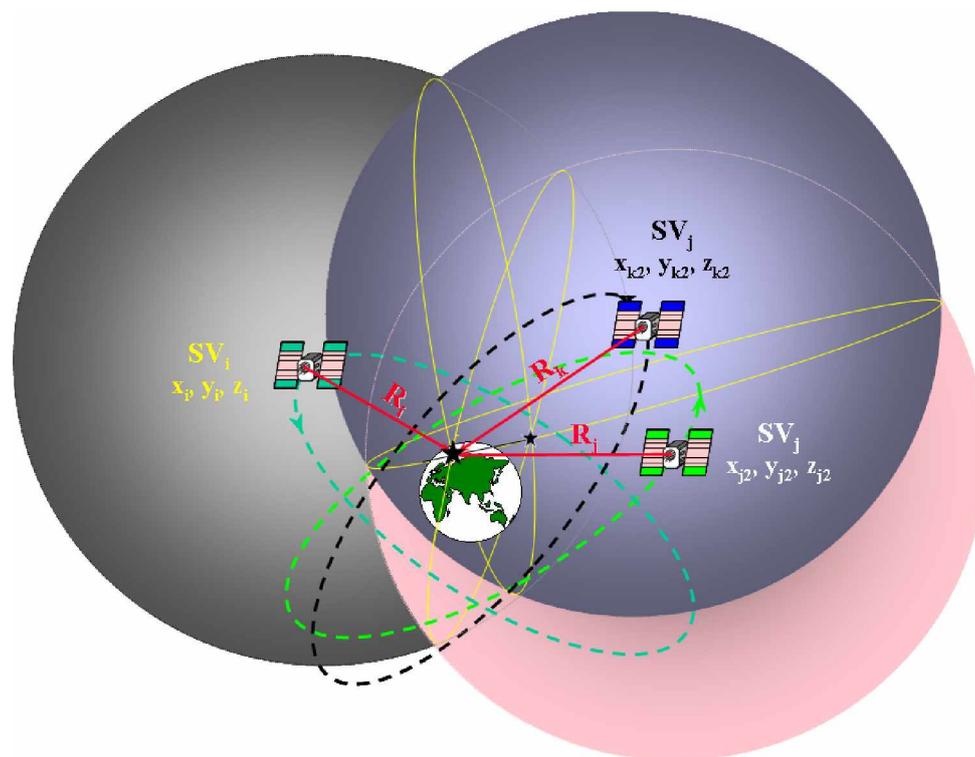


Figure I-1 : principe de triangulation

2-1/ POTENTIEL D'UTILISATION :

Le système GPS permet de calculer la position tridimensionnelle (latitude, longitude et altitude) d'un utilisateur, de manière continue et instantanée, en tout endroit sur Terre, aussi il permet de déterminer sa vitesse et sa direction. De plus, le système GPS fournit une *information temporelle*, c'est le temps GPS.

Conçu à l'origine pour des fins de navigation militaire, le système GPS a vite été utilisé pour des fins de localisation et de positionnement tant pour les civils que les militaires.

Le système GPS est une solution potentielle à presque toutes les applications nécessitant une référence spatiale (coordonnées géoréférencées) telles que la *navigation*, la *gestion de transport*, la *circulation aérienne*, la *géodésie*, l'*hydrographie*, la *foresterie*, et bien d'autres encore.

2-2/ DESCRIPTION DU SYSTEME :

Le GPS se compose d'une constellation de satellites de radionavigation, d'un segment de contrôle au sol qui gère le fonctionnement des satellites et, enfin, des utilisateurs avec récepteurs spécialisés qui utilisent les données des satellites pour répondre à une vaste gamme de besoins en positionnement. Le système a été mis en place par le ministère américain de la Défense (DoD) afin de répondre à des besoins de positionnement pour la défense et à titre de sous-produit, pour servir la communauté civile.

La constellation de satellites, qui est pleinement opérationnelle depuis juillet 1995, comprend 21 satellites, en plus de 3 satellites actifs de rechange, positionnés à 20 000 km (environ trois fois le rayon terrestre) au-dessus de la surface de la Terre. Les satellites sont répartis de telle manière qu'au moins quatre d'entre eux soient visibles presque n'importe où dans le monde à tout moment.

Chaque satellite reçoit et stocke des données en provenance du segment de contrôle, tient le temps avec grande précision grâce à ses horloges atomiques précises et transmet des signaux à la Terre.

Chaque satellite GPS émet continuellement des signaux qui renferment une multitude de renseignements. Compte tenu du type de positionnement effectué et de l'exactitude souhaitée, un utilisateur peut n'être intéressé qu'à une partie des renseignements compris dans le signal GPS. De même, un récepteur GPS donné peut

utiliser qu'une partie seulement des informations disponibles. Il importe donc de comprendre le contenu et l'utilisation des signaux GPS. Les signaux GPS consistent en des ondes porteuses sur lesquelles sont transmis le code C/A d'accès libre, le code P ainsi que le message du satellite.

L'ensemble du système GPS est composé de trois segments qui sont :

a- Le segment spatial:

Le segment spatial est composé d'un réseau de 28 satellites en orbite quasi-circulaire autour de la Terre ils se meuvent sur **6 plans orbitaux**, à environ **20000 km** d'altitude 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. La constellation GPS a été conçue de telle manière que, partout sur Terre et à tout moment, un minimum de quatre satellites soient visibles au dessus de 15° d'élévation.

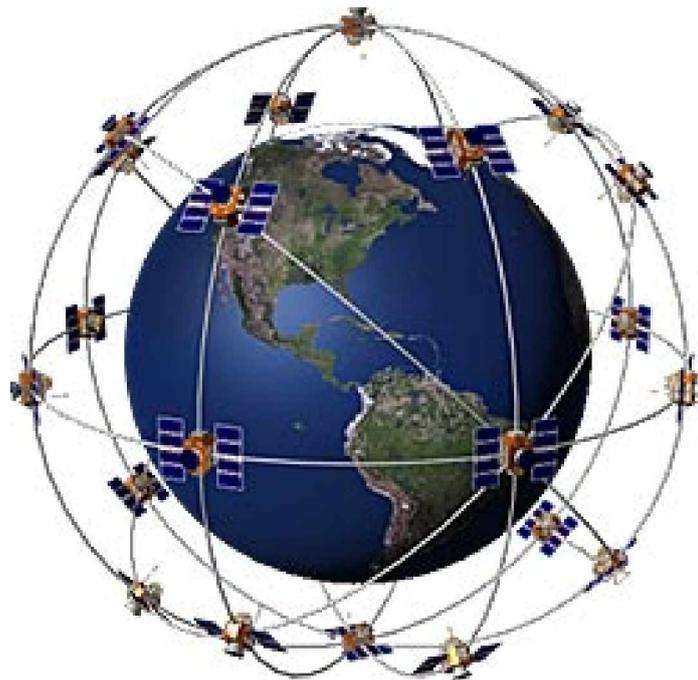


Figure I-2 : Le segment spatial

Il existe trois catégories de satellites GPS:

Bloc I : 11 satellites mis en orbite entre [1978](#) et [1985](#). Fabriqués par Rockwell International, ils étaient prévus pour une mission moyenne de 4,5 ans et une durée de vie de 5 ans, mais leur durée de vie moyenne s'éleva à 8,76 années ; l'un d'entre eux est même resté pendant 10 ans en activité. Leur mission principale était de valider les différents concepts du système GPS. Aujourd'hui, plus aucun satellite du Block I n'est encore en service.

Bloc II : Ce sont les premiers satellites opérationnels du système GPS. De nombreuses améliorations ont été apportées à ces satellites par rapport à la version précédente, notamment en ce qui concerne leur autonomie. Ils sont capables de rester 14 jours sans contact avec le segment sol tout en gardant une précision suffisante. Neuf satellites furent lancés en [1989](#) et [1990](#). Bien qu'on ait estimé leur durée de vie à 7,5 ans, la plupart d'entre eux sont restés en fonction pendant plus de dix ans. Il reste aujourd'hui trois satellites du Bloc II.

Bloc IIA : Lancés à partir de [1990](#), ils correspondent à une version perfectionnée des satellites du Block II Initial : ils ont été équipés pour fonctionner en mode dégradé pour les civils. Ils ont marqué à partir de [1993](#) le début de la phase opérationnelle du GPS. Il s'agit d'une flotte de 28 satellites, 24 en orbite dont trois de réserve et 4 en stock pour remplacement.

Bloc IIR : En plus d'une horloge atomique plus précise et d'une meilleure autonomie, ces satellites mis en orbite à partir de [1996](#) peuvent se transmettre mutuellement des messages sans aucun contact au sol, permettant ainsi aux opérateurs du système de pouvoir communiquer avec des engins qui leur sont inaccessibles dans une communication directe.

Bloc IIF : Les satellites Block IIF (Follow-On) construits par [Boeing](#) seront lancés dès 2007. Le programme vise à atteindre ainsi une constellation de 33 satellites.

Bloc III : Les satellites du Block III sont encore en phase de développement et ont pour but de faire perdurer le GPS jusqu'en 2030 et plus.



Figure I-3 : Le bloc IIA



Figure I-4 : Le bloc IIR

b- Segment de contrôle :

Le segment de contrôle comprend cinq stations de poursuite situées à Colorado Springs, Hawaii, Ascension Island, Diego Garcia et Kwajalein. Ces stations sont les yeux et les oreilles du système GPS, elles vérifient l'état des satellites lors de leur passage au dessus d'elles. Ces stations transmettent ensuite leurs données à la station principale de Colorado Springs. C'est là que les paramètres décrivant l'orbite des satellites et la qualité des horloges embarquées sont estimés, la vérification de la santé des satellites et la détermination d'un repositionnement éventuel sont également contrôlés. Cette information est alors renvoyée à trois stations de chargement qui transmettent l'information aux satellites. Grâce à la répartition uniforme des stations de contrôle, tous les satellites GPS sont captés à 92% du temps.

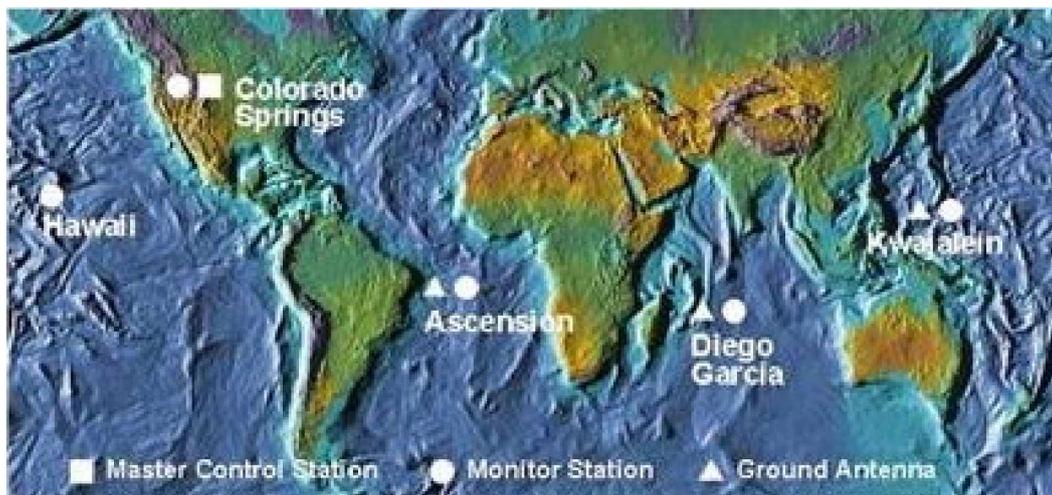


Figure I-5 : Le segment de contrôle

c- Segment utilisateur :

Le segment utilisateur est constitué de récepteurs qui ont été conçus afin de décoder le signal transmis par les satellites pour déterminer la position, la vitesse et le temps de l'utilisateur.

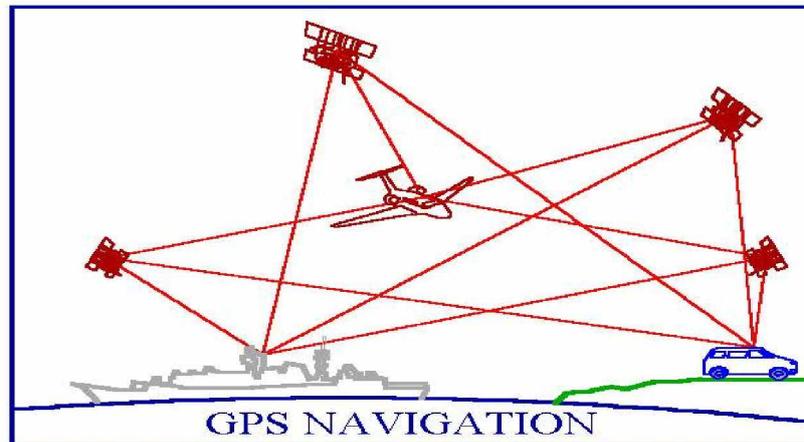


Figure I-6 : Le segment utilisateur

2-3/ LE SIGNAL GPS :

Les satellites transmettent sur deux fréquences porteuses. La première, L1, de fréquence 1575,42 MHz, est utilisée pour le message de navigation et les signaux du code SPS, alors que la deuxième, L2, de fréquence 1227,60 MHz, est utilisée pour mesurer le temps de retard dû à la ionosphère pour les récepteurs travaillant en PPS.

Le signal est modulé en modulation de phase. Trois codes binaires modulent la phase de la porteuse :

- ✚ Le code C/A (Coarse Acquisition) module la porteuse L1. Ce code est un code pseudo aléatoire répétitif de 1 MHz (Pseudo Random Noise Code) . Chaque satellite possède un code pseudo aléatoire différent. Il sert de base pour le système de mesure SPS.
- ✚ Le P-Code (Precise Code) module les deux porteuses L1 et L2. C'est un long code pseudo aléatoire de 10 MHz. Il sert de base pour le système PPS. Le cryptage de ce code dépend du département de la défense et nécessite une clef.
- ✚ Le message de navigation module également le code C/A sur la porteuse L1. Ce message est un signal de 50 Hz constitué de bits de données décrivant les orbites

du satellite GPS, les corrections de son horloge, ainsi que d'autres paramètres système.

La densité spectrale de puissance correspondante à ce signal est représentée par la figure I-7 suivante :

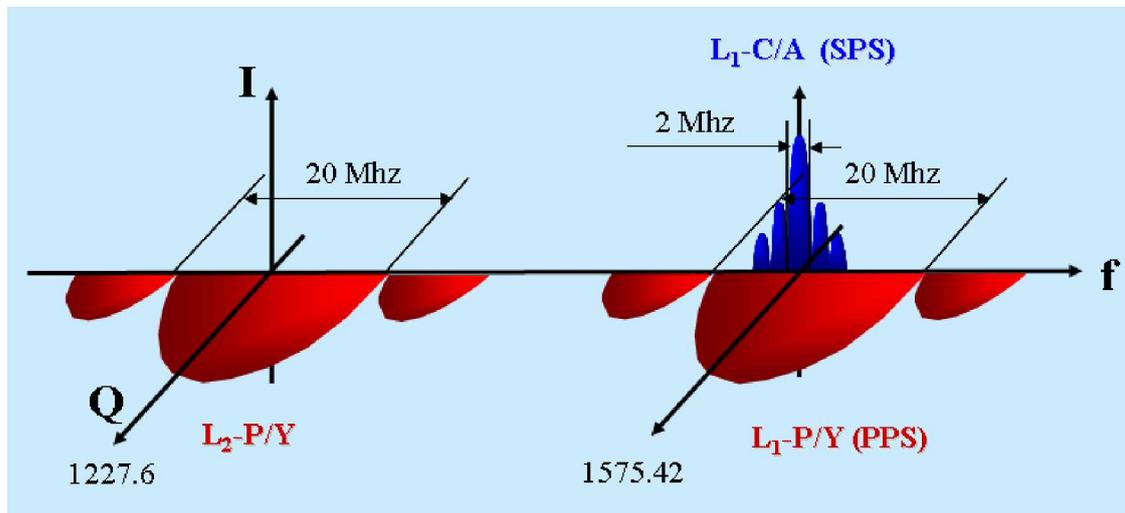


Figure I-7 : Spectre du signal GPS

On note que le système GPS présente quelques défauts, dont on note sont :

- * une précision faible (environ 20 mètres) et surtout variable en fonction du lieu et de l'heure,
- * une fiabilité parfois défaillante,
- * une couverture aléatoire des régions situées à des latitudes élevées et des milieux urbains denses,
- * enfin le risque principal et récurrent d'inaccessibilité aux données en cas de crise.

D'où la nécessité de la création de d'autres systèmes de navigation, tel que le système Russe, nommé Glonass et le système Européen Galiléo.

I-3/ GLONASS :

Le programme GLONASS est né dans les années 1980, durant la Guerre froide. Les satellites qui le composent reçoivent le nom Ouragan '11F654' et leur réalisation est confiée au K.B.P.M. de Zhelenogorsk. D'une masse de 1413 kg, ils sont mis en orbite par groupe de trois sur des orbites à 19 130 km, contenues dans trois plans orbitaux inclinés de 65 degrés environ.

Le 24 septembre 1995, les 24 satellites de la constellation furent placés en orbite. Les derniers satellites sont opérationnels à partir de janvier 1996. Mais depuis la chute de l'Union soviétique, les crédits alloués au système GLONASS n'ont cessé de baisser et en octobre 2000, seuls six satellites sont en état de fonctionner. Devant l'urgence de la situation, les autorités russes lancent le démarrage de deux nouvelles générations de satellites : Ouragan-M et Ouragan-K à durée de vie augmentée.

Les satellites Ouragan-M lancés en 2003, ont une précision de 20 m dans le plan horizontal, de 30 m dans le plan vertical et 5 cm/s en vitesse. Leur durée de vie est de sept ans. Actuellement (en 2007) 16 satellites sont en orbite. Un lancement le 25 décembre 2006 a placé trois nouveaux satellites en orbite mais n'ont pas encore été activés.

Les études concernant une quatrième génération de satellites Ouragan-KM ont débutées en 2002, leur mise en service est prévue pour 2015.

Depuis peu, le signal GLONASS est utilisé dans le domaine civil par les géomètres et les topographes qui se servent de récepteurs satellites compatibles avec les signaux GPS et les signaux GLONASS. Le système EGNOS utilise conjointement les signaux GPS et GLONASS.

A la différence du système GPS, GLONASS utilise le système géodésique russe PZ-90 qui est sensiblement différent du système WGS 84 et les paramètres de transformation entre les deux systèmes géodésiques ne sont pas connus précisément.

Comme tous les systèmes de positionnement par satellites, GLONASS est composé de deux parties :

- la partie spatiale est constituée de 24 satellites, répartis sur 3 plans orbitaux à une altitude de 19 100 km. Contrairement aux satellites du système américain chaque

satellite répète la même orbite après 8 jours. Chaque plan orbital comprend 8 satellites. Actuellement, 2 plans sont complets. La figure I-8 présente cette constellation tout en notant les satellites en état de panne.

- la partie au sol est composée de 5 stations, la principale se trouve à Krasnoznamensk dans la région de Moscou.

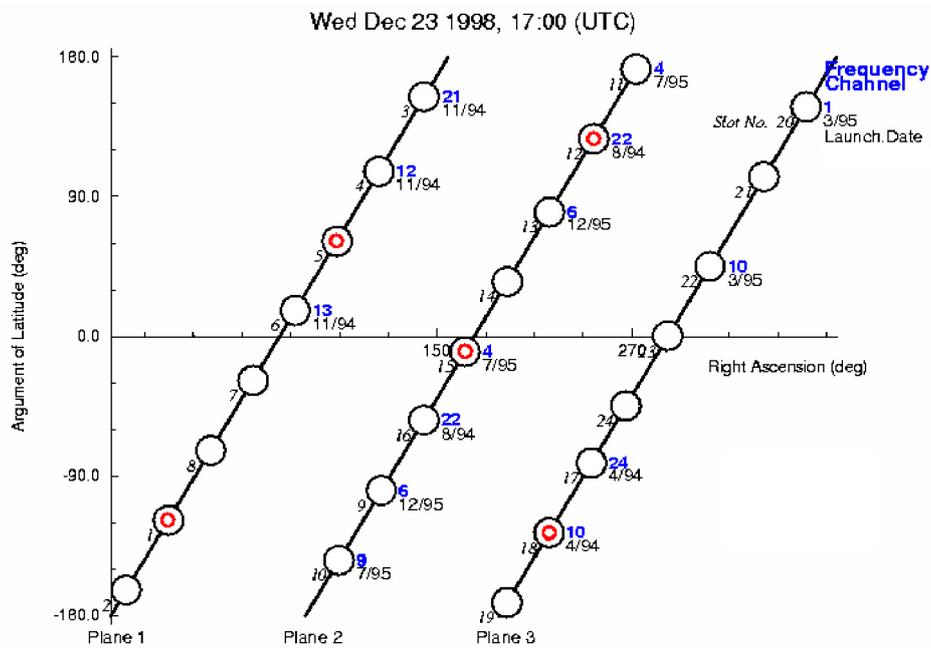


Figure I-8: Le segment spatial associé à GLONASS

3-1/ LE SIGNAL GLONASS :

Les satellites GLONASS émettent deux signaux, l'un pour le positionnement standard 'SP', l'autre pour le positionnement précis, selon la technique FDMA, en exploitant 25 canaux allant de la fréquence 1602.5625 MHz à la fréquence 1615.5 MHz pour la porteuse G_1 et 25 canaux allant de la fréquence 1246 MHz à la fréquence 1256.5 MHz pour la porteuse G_2 . Les deux fréquences G_1 et G_2 associées à un satellite donné sont choisies selon la formule suivante :

$$f = (178.0 + K/16) . Z \quad (\text{Mhz}) \quad -7 < k < 4$$

Tandis que la valeur de Z est choisie selon le tableau suivant:

	Z	F₀	Espacement
G₁	9	1602	0.5625
G₂	7	1246	0.4375

Tableau I-1: Le paramètre Z

La Russie a fait savoir qu'elle était intéressée pour coopérer au futur système de positionnement de l'Union européenne, Galileo. Le système GLONASS ne serait cependant pas abandonné, mais Galileo serait son complément à partir de son véritable entrée en service en 2008.

I-4/ LE SYSTEME GALILEO :

Le système européen Galileo dont la mise en place a été décidée par l'Union européenne en mars 2002 sera constitué d'une constellation de trente satellites placés sur des orbites circulaires à 23 616 km d'altitude, inclinées à 56 degrés sur l'équateur, permettant ainsi une couverture correcte des régions de haute latitude. Sur chacun des trois plans d'orbite, neuf satellites sont régulièrement répartis, plus un en réserve, prêt à prendre la place d'un satellite défaillant, la figure (I-7) représente cette constellation. À cette altitude, la période de révolution des satellites sur leur orbite est de 14 heures et 21 minutes.

Le contrôle de la constellation sera assuré par deux centres de contrôle redondants situés en Europe, s'appuyant sur un réseau de cinq stations de contrôle réparties sur la surface terrestre, sur un réseau de 12 stations d'orbitographie et de synchronisation équipées d'horloges atomiques de haute précision et sur un réseau de communications sécurisé.

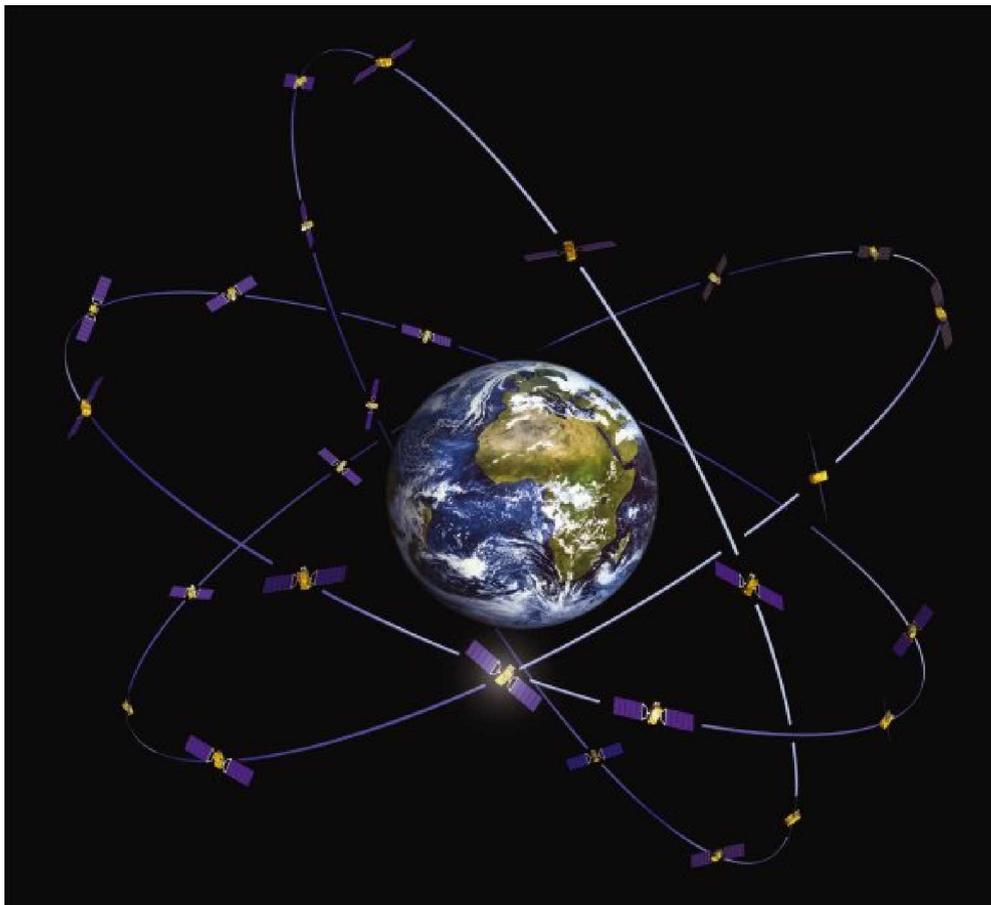


Figure I-9: Le segment spatial associé à Galileo

Chaque satellite aura une masse d'environ 700 kg et sera stabilisé suivant les trois axes grâce à un ensemble classique de gyromètres, roues à inertie et magnéto-coupleurs. Leur dimension est de 2,7 par 1,2 par 1,1 m. La puissance embarquée prévue est de 1600 watts. Ils seront équipés d'un système de contrôle d'orbite par propulsion à hydrazine qui permet de les maintenir sur leur position orbitale nominale.

La charge utile de chaque satellite comprendra un ensemble de quatre horloges atomiques, l'électronique de génération des signaux transmis par les émetteurs (codes pseudoaléatoires orthogonaux de modulation des porteuses, signaux de navigation proprement dits), ainsi que les émetteurs radio fréquence en bande L et les antennes correspondantes.



Figure I-10: Le satellite Galileo

Le lancement initial des satellites est prévu par grappes de quatre à dix unités pour chaque plan d'orbite de manière à assurer un déploiement rapide de la constellation. Par la suite, au fur et à mesure du vieillissement des satellites, de nouveaux satellites seront lancés en remplacement.

De manière externe au système de contrôle de la constellation, un ensemble de stations et un centre opérationnel spécialisé, formant ce qu'on appelle « le segment d'intégrité », surveillera en permanence les performances du système et aura la capacité d'informer en temps réel les utilisateurs du système de son état et de ses performances. Cette information sera fournie via les satellites de la constellation Galileo, qui remplissent là une fonction de relais de l'information d'intégrité. Cette fonction d'intégrité est essentielle pour beaucoup d'applications où la connaissance instantanée du bon état de fonctionnement du système est indispensable (navigation aérienne par exemple). Il est important de savoir qu'elle n'est pas fournie dans le système GPS actuellement en service.

4-1/ DETERMINATION DE LA POSITION ET PRECISION ATTENDUE :

Comme pour le GPS, la position du terminal utilisateur est calculée à partir des mesures de distance (pseudo-distances) entre le terminal et au moins quatre satellites de la constellation dont les signaux sont reçus simultanément. Plus précisément, la différence des distances entre le terminal et deux satellites permet de placer celui-ci sur un lieu géométrique qui est une surface dans l'espace appelée hyperboloïde, et la simultanéité de mesures de ce type avec quatre satellites permet de calculer la position géographique par intersection géométrique entre ces surfaces, ainsi que l'écart entre l'échelle de temps du terminal et celle du système Galileo.

Cette méthode suppose, bien sûr, que soit connue avec une précision suffisante la position des satellites dans l'espace rapportée à un référentiel géodésique mondial commun à tous les utilisateurs. Celle-ci est calculée à partir des éphémérides contenues dans les signaux de navigation transmis par les satellites, calculées au sol et injectées périodiquement en mémoire par le réseau de stations de contrôle de la constellation.

Les éphémérides des satellites sont élaborées à partir d'un ensemble de stations d'orbitographie dont les positions sont précisément connues dans le Repère international de référence terrestre, l'ITRF ou ce qui est équivalent au mètre près, dans le repère VVGS84 déjà établi pour le GPS et très utilisé aujourd'hui.

4-2/ LES SERVICES OFFERTS PAR LE SYSTEME GALILEO :

Le système Galileo prévoit de fournir cinq catégories de services.

- **Le service ouvert**, « Open Access », est le service de base permettant la localisation et la datation comparable au service de base fourni par le GPS américain (Service SPS). Il est gratuit et ne comprend aucune restriction d'accès. C'est le service « grand public » qui concernera la majorité des utilisateurs.

- **Le service de sûreté de la vie** est plus connu sous son sigle anglais « Safety of Life » (SoL). Il s'agit du service ouvert complété par un signal d'intégrité indispensable pour toutes les applications où l'absence de cette information d'intégrité pourrait mettre en danger des vies humaines (transport aérien, ferroviaire et maritime).

- **Le service commercial**, ou « Commercial Service » (CS), est destiné aux applications commerciales exigeant une précision supérieure à celle que fournit le service ouvert.

Il utilise deux signaux supplémentaires, protégés par un chiffrement commercial décryptable par les terminaux équipés et disposant de la clef d'accès. Ce service sera géré par les fournisseurs d'accès au service commercial Galileo. Il se prête particulièrement bien aux services à valeur ajoutée qui seront proposés en complément de la navigation.

- **Le service public réglementé** ou « Public Regulated Service » est réservé aux applications gouvernementales (sécurité civile, transports, militaires) pour lesquelles la continuité du service doit être garantie quelles que soient les circonstances, donc particulièrement robuste vis-à-vis de brouillages éventuels ou d'interférences électromagnétiques accidentelles. Ce service PRS utilise deux signaux dédiés et chiffrés, dont un sur la même fréquence que le futur code militaire (code M) du GPS. Son accès sera contrôlé par les autorités en charge des questions de sécurité.

- **Le service de recherche et sauvetage**, « Search and Rescue » en anglais (SAR), poursuivra à l'ère de Galileo le service rendu par le système actuel. SARSAT/COSPAS mis en place par le Canada, la France, les États-Unis et la Russie depuis 1982. Il permet de recueillir et de localiser les émissions des balises de détresse opérant à 406 MHz, en service sur les avions, les bateaux et pour les expéditions terrestres.

Il comprendra en particulier un signal de retour vers la balise de détresse pour informer l'auteur de l'émission que son message a bien été reçu.

4-3/ UTILISATION DE GALILEO EN MODE DIFFERENTIEL :

On peut compléter un système de navigation par satellites tel que Galileo, comme on le fait déjà avec le GPS, avec des moyens de communication pour déterminer et diffuser des corrections différentielles qui permettent d'améliorer la précision de manière tout à fait remarquable et la porter au niveau de 1 mètre, voire beaucoup mieux. Pour cela on utilise une station dont les coordonnées sont connues dans le système de référence avec une précision excellente, au moins meilleure que le mètre, quelle que soit la technique géodésique avec laquelle ses coordonnées ont été obtenues. Pour chaque satellite, on compare les mesures réelles effectuées par la station de référence aux mesures théoriques calculées à partir des coordonnées de référence et de la position des satellites. On en déduit des corrections de mesures que pourront adopter des utilisateurs proches (quelques centaines de kilomètres) pour améliorer la précision de leur localisation. Selon le mode de communication, ceci peut être fait localement, ou régionalement comme dans EGNOS ou encore même, mondialement. Un système mondial de ce type fonctionnant avec le GPS a été mis en place par la société Thaïes sous le nom de Skyfix. Il comporte les éléments suivants :

- Un réseau mondial de stations de référence (il en existait 85 en 2002). Dans ces stations, il reçoit les signaux GPS. Les coordonnées de ces stations sont connues dans le système géodésique WGS 84. Par comparaison des positions déterminées par GPS et des positions connues on en déduit des corrections différentielles valables régionalement autour de chaque station.
- Un réseau de communications. Ce réseau permet la transmission des mesures GPS faites vers deux centres de contrôle (au Royaume-Uni et à Singapour). Ce réseau utilise différents moyens de communication. Ce sont les mesures brutes de pseudo-distances qui sont transmises.
- Deux centres de contrôle. Dans ces centres on calcule les corrections différentielles au niveau mondial, puis on prépare les messages de corrections différentielles qui seront diffusés par des satellites INMARSAT en bande L. Des corrections ionosphériques sont également déterminées en temps réel.
- Des terminaux spéciaux permettant de recevoir les signaux diffusés par les satellites INMARSAT et les signaux GPS.
- Des logiciels spécifiques de traitement.

La précision est d'environ 2 mètres lorsque l'on se trouve à moins de 500 km d'une station de référence. Cette précision se dégrade ensuite en fonction de la distance croissante. Ce système permet d'éliminer les mauvaises mesures et d'assurer une meilleure qualité du service. Celui-ci est utilisé notamment pour les applications off-shore : plates-formes pétrolières, navires particuliers demandant une grande précision de navigation. D'autres systèmes de ce type ont été mis en place, comme la chaîne du littoral français établie par le Ministère de l'équipement ; ils fonctionnent de manière tout à fait satisfaisante. Il est prévu que Galileo, une fois en service, soit utilisé de la même manière que GPS en mode différentiel et que les nombreux systèmes actuellement en service de type DGPS deviennent dans l'avenir des systèmes bistandard.

4-4/ LE SIGNAL GALILEO :

Les fréquences des porteuses émises par les satellites Galileo sont situées dans la bande L (autour de 1,2 à 1,5 GHz) avec la possibilité d'utiliser aussi la bande C (autour de 5 GHz). Ces fréquences qui ont été attribuées par les instances internationales de télécommunication sont partagées avec les systèmes de navigation par satellite GPS et GLONASS. Les puissances émises sont réglées de manière à éviter d'interférer avec certaines émissions utilisées par des moyens terrestres consacrés à la navigation aérienne.

Galileo utilisera plusieurs porteuses dans le sens 'Espace vers Sol', qui peuvent être associées entre elles :

- Bande E6 bande étroite libre dans la bande dite L1 : 1559 à 1563 MHz.
- Bande E2, bande étroite libre dans la bande L1 : 1587 à 1591 MHz.
- Bande E6 en exclusivité : 1260 à 1300 MHz.
- Bande E5 dans la bande 1164 à 1215 MHz avec partage de la première moitié de cette bande avec le GPS.

Certaines porteuses transmettent les codes pseudo aléatoires qui permettent la mesure du temps de propagation et les signaux de navigation, tandis que d'autres ne portent que les codes. Les densités spectrales de puissance associées à ces bandes de fréquence sont représentées par la figure I-11 suivante :

I-5/ EGNOS :

Afin d'assurer la sécurité d'utilisation du GPS avant qu'un autre système civil tel que Galileo complète le GPS, il a été décidé à la suite des recommandations de l'OACI de développer des systèmes régionaux complétant le GPS pour pouvoir utiliser ce dernier en toute sécurité, avec une surveillance permanente de son intégrité et une détermination de corrections pour accroître la précision. Aux États-Unis, la FAA fait réaliser le WAAS, le Japon développe avec le concours de l'industrie européenne le MSAS, et l'Europe construit EGNOS.

Le système EGNOS a trois objectifs, visant à garantir la précision de positionnement réclamée par les utilisateurs pour utiliser le GPS, et même Glonass, sur une zone centrée sur l'Europe :

- Û contrôler l'état du système GPS ;
- Û diffuser son état aux utilisateurs en temps réel, comme par exemple un pilote d'avion en phase finale d'atterrissage avec le GPS.
- Û améliorer la précision du système.

Pour réaliser ces objectifs un réseau d'une trentaine de stations collecte des données du GPS, ce qui permet d'élaborer des corrections différentielles pour un utilisateur proche de telle ou telle station. Ces stations appelées RIMS ont deux chaînes de réception indépendantes, d'autres peuvent en avoir trois, elles serviront à détecter des pannes du GPS. Les informations sont transmises à des centres de traitement qui ont pour objectif de traiter les informations pour élaborer des messages de correction et d'état du GPS.

En outre, un signal de navigation EGNOS synchronisé sur le GPS est élaboré. Il sera transmis par des stations (deux par satellites pour assurer la redondance) aux trois satellites géostationnaires INMARSAT 3 et ARTEMIS qui diffuseront vers les utilisateurs le signal de navigation et les informations de correction et d'intégrité. L'ensemble du système comprend également :

- un réseau de télécommunication entre toutes les composantes sol ;
- des sites chargés en temps différé d'assurer le support technique, la maintenance ;
- un site de qualification et certification pour l'aviation civile.

Ceci est résumé par la figure I-12 suivante :

L'utilisateur disposera de signaux GPS avec corrections différentielles, de signaux de navigation type GPS venant des trois satellites géostationnaires. De ce fait :

- La précision sera améliorée ;
- La connaissance de l'état permettra d'utiliser le système en toute sécurité.

Le système sera opérationnel sur la zone européenne en 2004. Les premiers tests ont commencé avec des essais en vol et en approche d'aéroport. Une précision d'environ 5 mètres en horizontal et vertical a déjà été obtenue.

On notera que certaines des fonctions d'EGNOS seront réalisées par Galileo avec une couverture mondiale. Il est prévu d'utiliser les infrastructures mises en place pour EGNOS pour réaliser le segment d'intégrité de Galileo. Aussi, le système GPS augmenté de EGNOS ou de systèmes équivalents dans les autres régions du monde, a été appelé en anglais 'Global Navigation Satellite System -1'. Plus généralement aujourd'hui l'ensemble des systèmes, GPS, GLONASS, Galileo, avec leur augmentation comme EGNOS et leurs systèmes différentiels, s'appellent GNSS-2 - ou plus simplement GNSS.

I-6/ BANDE DE FREQUENCE DES SYSTEMES DE NAVIGATION PAR SATELLITES :

La bande de fréquence couramment utilisée par les systèmes de navigation par satellite est la bande L entre 1164 et 1610 MHz. Les négociations menées à la Conférence Mondiale des Radiocommunications (CMR) en 2000 ont permis de trouver des solutions pour le partage de cette bande entre les systèmes existants GPS et GLONASS et le nouveau système GALILEO. La figure I-13 montre les allocations de fréquences et les dénominations des bandes correspondantes.

On remarque la cohabitation des systèmes GPS et GALILEO dans la bande dite E2-L1-E2 où les seules bandes disponibles pour GALILEO consistent en deux bandes de 4 MHz de part et d'autre de la bande L1 déjà occupée par GPS, cette cohabitation a conduit à définir une modulation particulière dite Porteuse à Double Décalage ou BOC (*Binary Offset Carrier*) qui a la propriété de présenter un spectre composé de deux lobes principaux décalés symétriquement par rapport à la fréquence centrale de la porteuse 1575 MHz comme montré sur la figure I-11. Cette fréquence centrale reste la même que celle de GPS ce qui permet de faciliter la réalisation de récepteurs bi-modes GPS et GALILEO.

Toute fois cette bande de fréquence est soumise à plusieurs types de brouillages non intentionnels dont trois classes principales peuvent être identifiées lors de la réception de porteuse à spectre étalé de type GPS ou GALILEO :

- ✚ La première concerne le brouillage dit ‘co-canal’ causé par les systèmes continus ou pulsés fonctionnant dans les mêmes bandes que les signaux de navigation;
- ✚ Le second groupe concerne les brouillages dits ‘de canal adjacent’ causés par les systèmes continus ou pulsés fonctionnant dans les bandes adjacentes à celles des signaux de navigation. Ces interférences peuvent être dues à un découplage et une réjection insuffisants du spectre émis par rapport à la bande des signaux de navigation, ou à des produits d’intermodulation résultant notamment des caractéristiques non-linéaires des amplificateurs de forte puissance lorsqu’ils servent à amplifier plusieurs porteuses de fréquences voisines.
- ✚ La troisième classe concerne les brouillages hors bande correspondant à des rayonnements de systèmes éloignés des bandes de navigation et peuvent être dus aux harmoniques et aux produits d’intermodulation générés par des systèmes radioélectriques dans l’environnement plus ou moins proche du récepteur, et à des bruits large bande.

Il est également possible de classer les brouillages en fonction de leur type pour les effets différents qu’ils auront sur un récepteur de navigation.

Les sources de brouillages non intentionnels potentiels sur les récepteurs de navigation des signaux GALILEO sont indiquées dans la liste ci-dessous en les distinguant selon les trois groupes précédents :

- ✚ Les systèmes fonctionnant dans les mêmes bandes que GALILEO : systèmes de radionavigation aéronautique DME/TACAN, système de communications militaires JTIDS/MIDS, radars primaires de contrôle aérien (ATC)...
- ✚ Les systèmes fonctionnant dans les bandes adjacentes: radars primaires de la surveillance du trafic aérien (ATC), radars de Défense, services mobiles par satellite, autres systèmes de radionavigation aéronautique (SSR, TCAS, ADS-B)...
- ✚ Les systèmes fonctionnant dans des bandes éloignées (interférences par harmoniques principalement): émetteurs TV et FM, systèmes de radionavigation

aéronautique VOR et ILS, systèmes de communications VHFCOM, service radio-amateurs...

On retrouve également la plupart de ces systèmes comme brouillages potentiels pour les bandes GPS, en particulier la nouvelle bande L5 partagée avec GALILEO.

Pour ce qui concerne les signaux GALILEO en bande E5 et pour les signaux GPS en bande L5, les principales les interférences entre ces systèmes de radionavigation par satellite et les systèmes DME/TACAN.

Dans la bande E6 (comme sur la bande L2), ce sont les interférences potentielles avec les systèmes de radiolocalisation (radars ATC notamment). Les bandes E5 et E1-L1-E2 pour GALILEO ou GPS sont sensibles à des harmoniques des émetteurs TV ou de communications VHF.

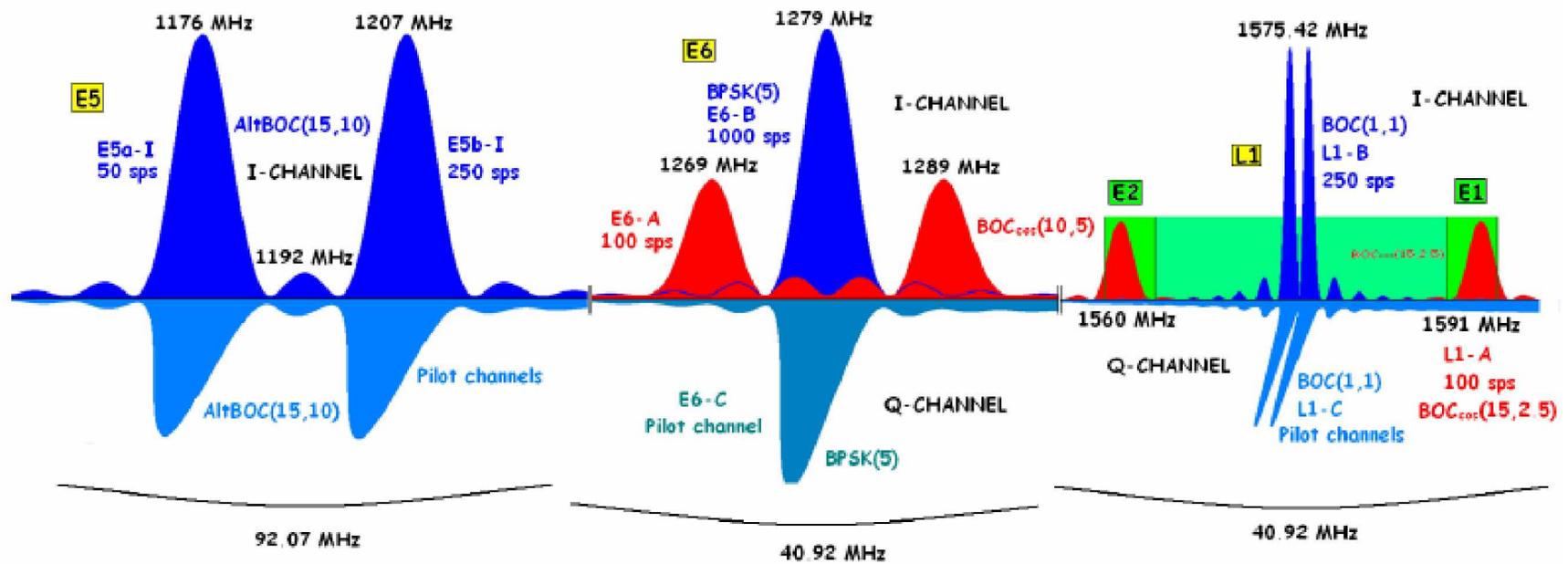


Figure I-11 : Spectre du signal Galileo

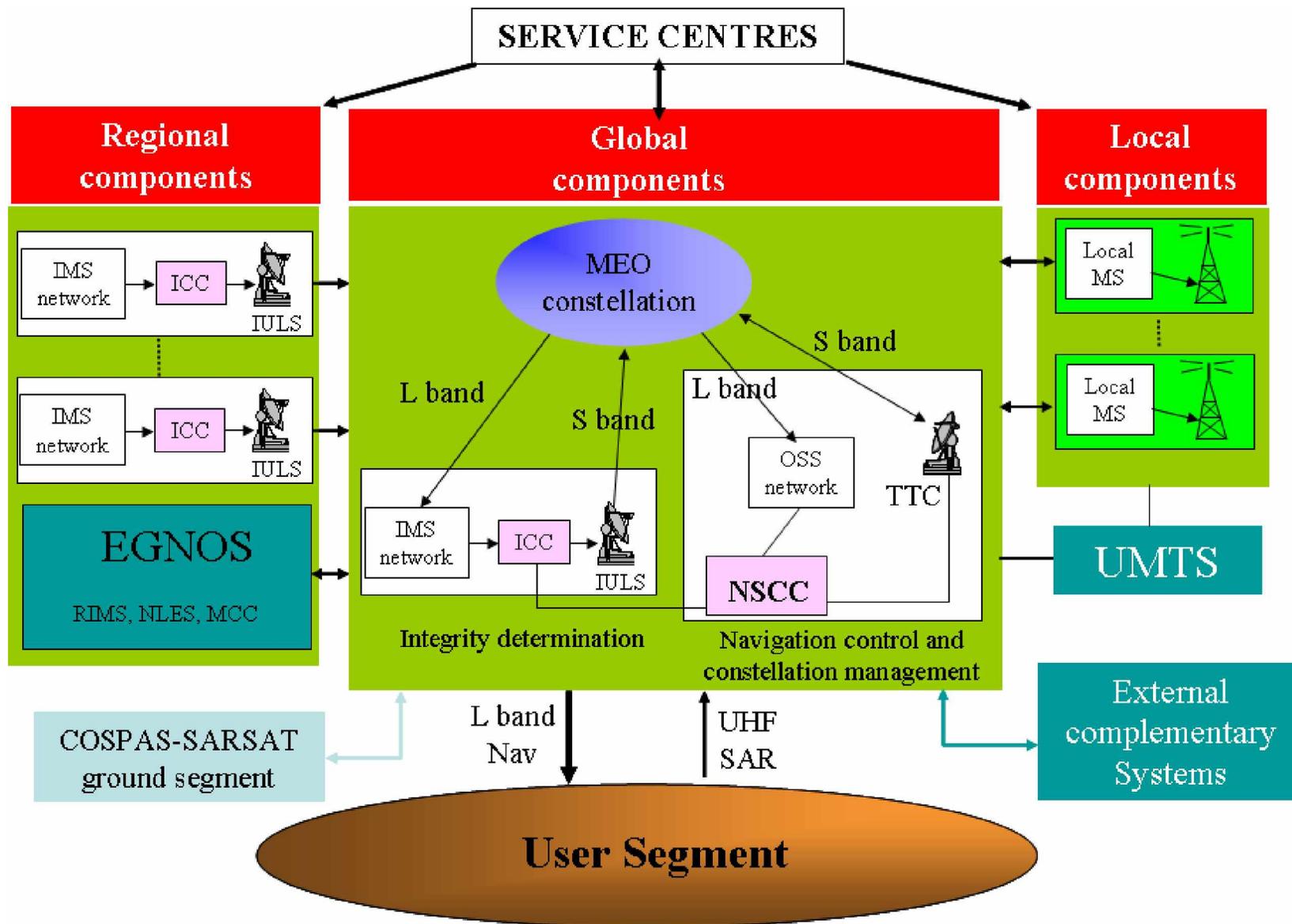


Figure I-12 : Système EGNOS

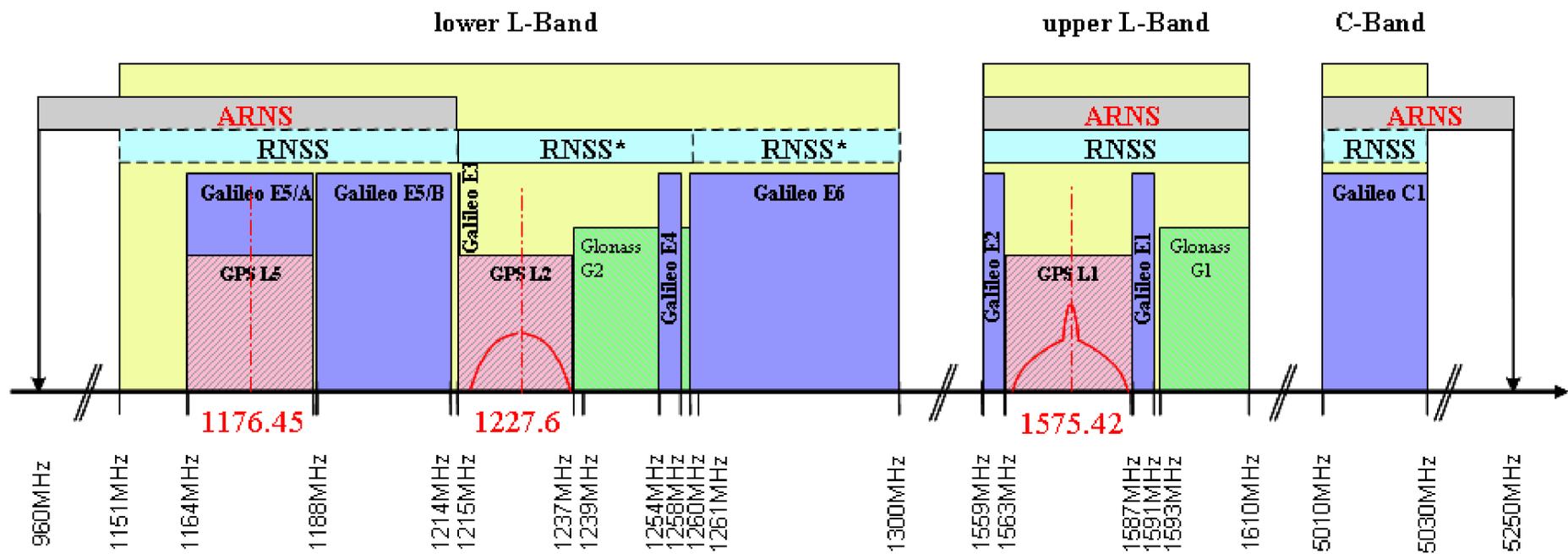


Figure I-13: Allocations de fréquences et les dénominations des bandes correspondantes

A grayscale illustration of a satellite in orbit above the Earth. The satellite has two large solar panel arrays extended from its central body. The Earth's curved horizon is visible in the background. The text 'CHAPITRE II: ACQUISITION DU SIGNAL GPS' is overlaid on the lower half of the image in a blue, serif font.

CHAPITRE II:

ACQUISITION DU SIGNAL GPS

II-1/ INTRODUCTION :

Le positionnement GPS est basé sur la détermination des paramètres du signal reçu : retard, fréquence Doppler, ...en vue du calcul des distance et vitesse relatives du récepteur par rapport au satellite émetteur. Sa disponibilité spatiale et temporelle en ont fait le système de positionnement par excellence.

Les satellites GPS utilisent la technique CDMA (Code Division Multiple Access) pour transmettre leurs messages de navigations et leurs codes. Chaque satellite est caractérisé par deux codes ; le P(Y) (precision code) n'est utilisé que par les utilisateurs PPS et le C/A (Coarse/Acquisition) utilisé par les utilisateurs PPS et SPS. Deux fréquences porteuses sont utilisées L_1 (1575.42 MHz) et L_2 (1227.6 MHz). La porteuse L_1 est modulée par les deux codes P(Y) et C/A alors que L_2 ne l'est que par P(Y).

Les codes C/A sont de la famille des pseudo random noise (PRN). Constitués de 1023 chips de fréquence 1.023 MHz, les codes C/A ont une période de 1ms. Ils se caractérisent par une fonction d'autocorrélation triangulaire sur un intervalle de deux chips centre sur zéro et presque nulle ailleurs sur le reste de la période. Quant à l'intercorrélacion de deux codes de satellites différents elle est quasi-nulle sur toute la période. Grâce à ces caractéristiques, ces codes peuvent être utilisés pour déterminer le délai de transmission du signal des satellites à l'utilisateur. Le message de navigation formé par des bits de données de fréquence 50 Hz contient des informations sur l'état du satellite sa position, le temps, etc, qu'il convient de lire conjointement au positionnement.

Dans ce chapitre nous allons présenter l'essentiel sur le signal GPS, sa génération, ainsi que ces propriétés de corrélation, puis sa densité spectrale de puissance seront analysés, on s'intéresse plus particulièrement à son acquisition. Cette dernière est une recherche tridimensionnelle dans le temps (retard du code), la fréquence et le code d'accès du satellite.

II-2/ STRUCTURE DU SIGNAL GPS :

Le système GPS a une fréquence de base $f_0 = 10,23$ MHz, qui définit toutes les autres fréquences utilisées par le système. Les satellites émettent ainsi sur deux fréquences porteuses L1 et L2 :

$$L1 = 1575,42 \text{ MHz} = 154 \cdot f_0.$$

$$L2 = 1227,60 \text{ MHz} = 120 \cdot f_0.$$

La fréquence de base est générée dans les satellites par des horloges atomiques, celle-ci étant légèrement décalée pour compenser les effets relativistes. Le système utilise de plus deux codes pour transmettre les données de navigation :

Le code P (*precision*), cadencé à 10,23 MHz, est un code militaire dont l'encodage n'a pas été rendu public. Il a une période libre de 266 jours (soit 38 semaines).

Le code C/A (*coarse/acquisition*) est quant à lui cadencé à 1,023 MHz ; c'est un code de Gold (nous reviendrons plus loin sur ses propriétés). Chaque satellite a un code unique, distinct des autres codes. Le code C/A permet une localisation plus rapide, mais moins précise; il est de plus accessible à tous.

Les données de navigation sont transmises par un signal D prenant les valeurs 0 ou 1, dont la fréquence est de 50 Hz (ce qui signifie que l'on transmet 50 bits par secondes).

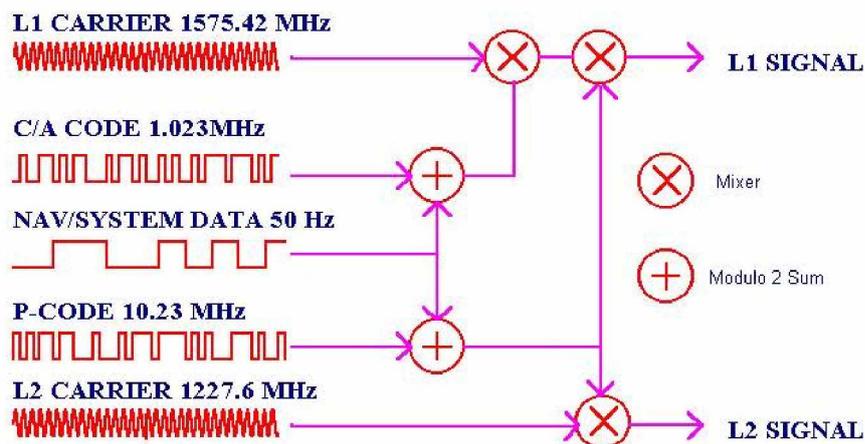


Figure II-1: Construction d'un signal GPS

II-3/ CRÉATION DU SIGNAL :

Afin de créer le signal GPS, on réalise en premier lieu une addition modulo 2 entre le message de navigation et le code choisi (P ou C/A), le signal résultant sera numérisé puis multiplié par la porteuse L1, par conséquent cette dernière 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 $P \oplus D$. Le synoptique (II-1) illustre le processus de génération du signal GPS. Si on examine ce synoptique de gauche vers la droite, on constate que l'horloge de base ($f_0 = 10,23$) est multiplié par 154 et 120 afin de générer les deux porteuses L1 et L2. Le générateur de données génère le message de navigation tandis que le générateur de code génère le code associé au satellite. C'est deux codes sont combinés à travers une addition modulo 2 et le signal résultant sera numérisé puis multiplié par la porteuse L1, sur cette porteuse modulée en BPSK on note que le code C/A est en quadrature par rapport au code P, au contraire sur la porteuse L2 on ne trouve que le code P. En résumé, le signal ainsi réalisé est donné sous la forme suivante:

$$S_1 = A_p(P \oplus D)(t) \cdot \cos(2\pi \cdot L_1 \cdot t + \Phi) + A_c(C/A \oplus D)(t) \cdot \sin(2\pi \cdot L_1 \cdot t + \Phi) \quad (\text{II-1})$$

$$S_2 = B_p(P \oplus D)(t) \cdot \cos(2\pi \cdot L_2 \cdot t + \Phi) \quad (\text{II-2})$$

Où A_p , A_c , et B_p correspondent aux niveaux de sortie des signaux, Φ représente les imperfections de l'oscillateur, et où $(P \oplus D)(t)$ et $(C/A \oplus D)(t)$ prennent les valeurs 1 ou -1.

II-3.1/ CONSTRUCTION DES CODES DE GOLD :

Les caractéristiques du code de C/A sont définies ci-dessous en termes de sa structure et la contre réaction employée pour le produire. On note que chaque satellite possède son propre code, il y a 37 codes réservés au système GPS qui est actuellement composé de 27 satellites. Le récepteur à son tour doit générer un nombre de code égal au nombre des canaux disponibles, généralement douze.

II- 3-2/ LA GENERATION DU CODE C/A :

Le code C/A (Coarse/Acquisition) est un code relativement court de 1023 bits et d'une milliseconde de période, il est généré à 1.023 Mhz, on note que c'est un code de Gold qui est retenu grâce à ces propriétés de corrélation, ce qui autorise le multiple accès sur une seule fréquence car chaque satellite émet sur les fréquences L1 et L2 et la sélection se fait uniquement par le code.

La figure (II-2) montre un synoptique simplifié de la génération du code C/A. 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 G2. Ces deux sorties sont additionnées modulo 2 avant d'être à leur tour additionnées à la sortie du registre G1. On note que le vecteur d'initialisation des registres G1 et G2 est '111111111'.

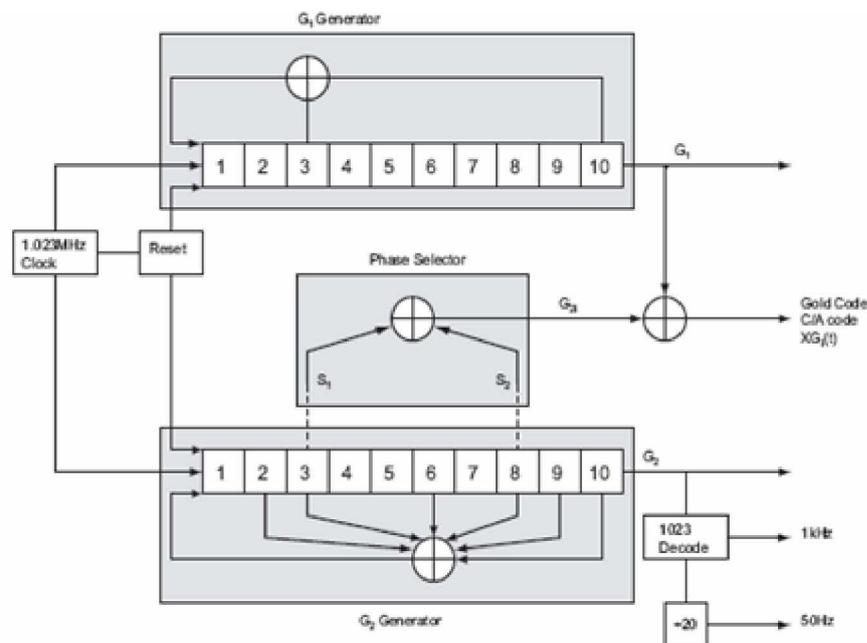


Figure II-2 : La génération du code C/A

N° ID du satellite	N° PRN en GPS	Sélection du code phase	10 1 ^{er} chips octal
1	1	2 ⊕ 6	1440
2	2	3 ⊕ 7	1620
3	3	4 ⊕ 8	1710
4	4	5 ⊕ 9	1744
5	5	1 ⊕ 9	1133
6	6	2 ⊕ 10	1455
7	7	1 ⊕ 8	1131
8	8	2 ⊕ 9	1454
9	9	3 ⊕ 10	1626
10	10	2 ⊕ 3	1504
11	11	3 ⊕ 4	1642
12	12	5 ⊕ 6	1750
13	13	6 ⊕ 7	1764
14	14	7 ⊕ 8	1772
15	15	8 ⊕ 9	1775
16	16	9 ⊕ 10	1776
17	17	1 ⊕ 4	1156
18	18	2 ⊕ 5	1467
19	19	3 ⊕ 6	1633
20	20	4 ⊕ 7	1715
21	21	5 ⊕ 8	1746
22	22	6 ⊕ 9	1763
23	23	1 ⊕ 3	1063
24	24	4 ⊕ 6	1706
25	25	5 ⊕ 7	1743
26	26	6 ⊕ 8	1761
27	27	7 ⊕ 9	1770
28	28	8 ⊕ 10	1774
29	29	1 ⊕ 6	1127
30	30	2 ⊕ 7	1453
31	31	3 ⊕ 8	1625
32	32	4 ⊕ 9	1712
***	33	5 ⊕ 10	1745
***	34**	4 ⊕ 10	1713
***	35	1 ⊕ 7	1134
***	36	2 ⊕ 8	1456
***	37**	4 ⊕ 10	1713

Tableau II-1 : Les différentes combinaisons spécifiques pour chaque PRN.

II-4/ PROPRIETES DE CORRELATION DES CODES GOLD :

L'accès au signal du satellite se fait par la sélection de son code (CDMA), par conséquent les codes C/A ont été choisis en fonction de leurs propriétés de corrélation. La technique CDMA permet au récepteur GPS d'effectuer des mesures sur le signal reçu d'un satellite donné sans qu'il soit perturbé par la présence simultanée des autres signaux provenant des satellites visibles.

Pour que le récepteur s'accroche à un satellite visible, il doit générer un code identique au code reçu dans un canal de traitement, puis il réalise une opération de corrélation entre ce code généré localement et le signal reçu. Le résultat de cette opération présente un pic important si le code local correspond au code associé au satellite traité. La fonction de corrélation réalisée s'exprime de la manière suivante :

$$K_{c_i,c_j}(m) = \frac{1}{L} \sum_{k=0}^{L-1} c_i(k)c_j(k+m) \tag{II-5}$$

Par décalage successif de sa réplique locale, le récepteur cherche un maximum obtenu lorsque les deux codes sont en phase. Une fois le maximum est localisé, un verrouillage sur le signal doit être réalisé par des boucles de poursuite de code et de la fréquence. Celles-ci effectueront les mesures nécessaires afin d'élaborer les pseudo distances et les fréquences Doppler des satellites.

Les codes C/A sont des codes de Gold élaborés de telles manières que la fonction d'autocorrélation donnée par l'équation (I-5) prenne les valeurs suivantes :

$$K_{c_i,c_j}(m) = \begin{cases} 1 \\ -\frac{1}{L} \text{ or} \\ -\frac{1}{L}t(n) \text{ or} \\ \frac{1}{L}[t(n)-2] \end{cases} \text{ où } t(n) = \begin{cases} 1 + 2^{\frac{n+1}{2}} & n \text{ impair} \\ 1 + 2^{\frac{n+2}{2}} & n \text{ pair et non divisible par 4} \end{cases}$$

Ou n=10 dans le
cas du GPS, par conséquent L=1023 et la fonction de corrélation est:

$$K_{c_i,c_j}(m) = \begin{cases} 1 \\ -\frac{1}{L} = \frac{-1}{1023} = -0.001 \\ -\frac{1}{L}t(n) = \frac{-65}{1023} = -0.0635 \\ \frac{1}{L}[t(n)-2] = \frac{63}{1023} = 0.0616 \end{cases}$$

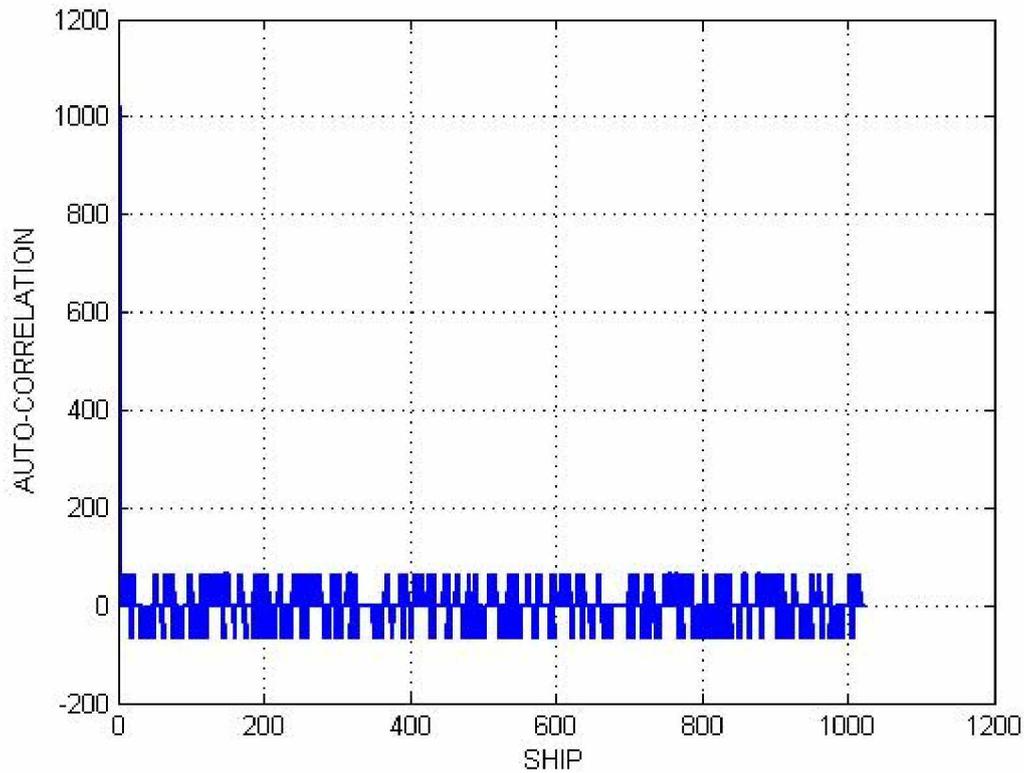


Figure II-3: Autocorrélation PRN1

On peut alors en déduire l'allure de la fonction d'autocorrélation de ces codes qui est donnée par la figure (II-3). Les valeurs citées sont bien illustrées sur la figure (II-4).

L'autre propriété importante des codes Gold et la fonction d'intercorrélation, cette dernière s'exprime par :

$$K_{c_i c_j}(m) = \frac{1}{L} \sum_{k=0}^{L-1} c_i(k) c_j(k+m) \quad (\text{I-7})$$

Les valeurs de cette fonction sont les suivantes :

$$-1/1023 = -0.001$$

$$-65/1023 = 0.0635$$

$$63/1023 = 0.0616$$

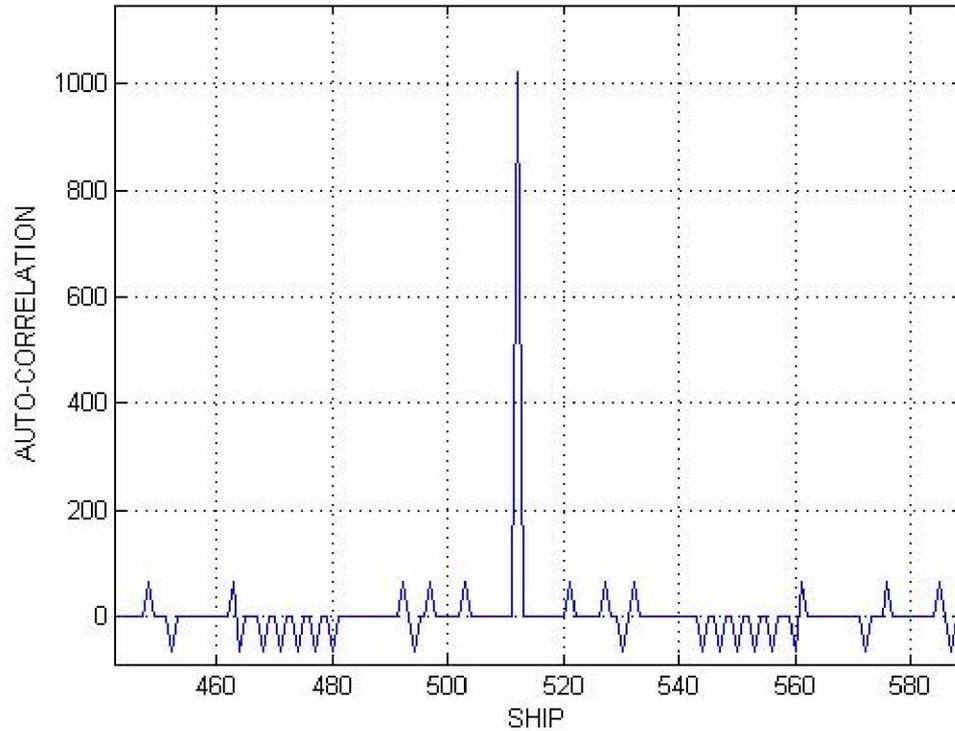


Figure II-4: Autocorrelation PRN1 Décalé

On constate que la valeur maximale est 65 seulement au lieu de 1023 (ou $65/1023$) ce qui signifie qu'on peut considérer qu'il n'y a aucune corrélation entre deux codes différents. Cette propriété très importante clarifiée par la figure (II-5) suivante :

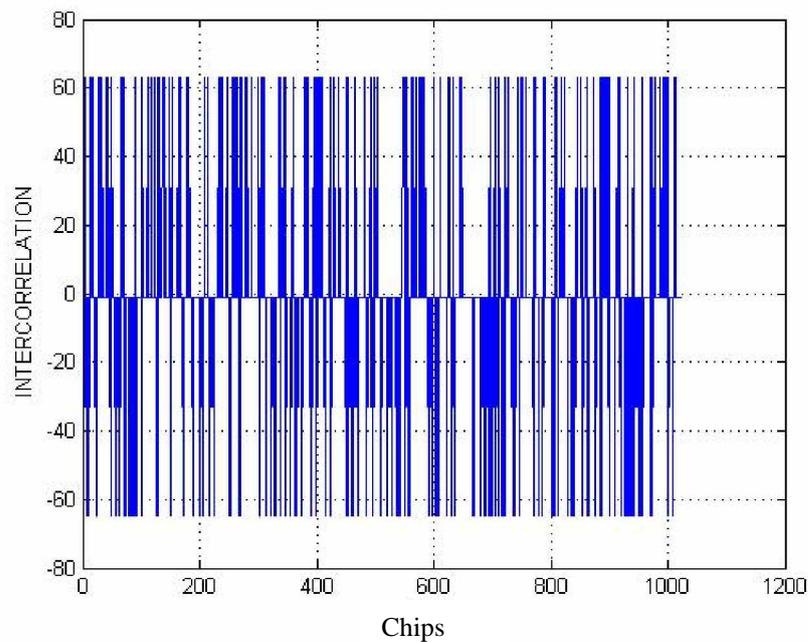


Figure II-5: Intercorrelation PRN1 & PRN2

II-5/ DENSITE SPECTRALE DE PUISSANCE :

Nous allons nous intéresser au spectre fréquentiel du signal GPS, pour cela on calculera sa densité spectrale de puissance, cette dernière est composée de plusieurs termes, dont nous allons identifier en ce qui suit.

Comme le code PRN est les bits de données sont des séquences numériques, on doit les matérialiser afin de développer la densité spectrale.

La matérialisation physique d'une séquence pseudo-aléatoire est réalisée par l'association de formes d'ondes spécifiques pour la matérialisation du 'zéro' et du 'un'. On note par exemple $m_0(t)$ et $m_1(t)$ les matérialisations respectives du zéro et du un. On considère ici le cas où les signaux de matérialisation sont antipodaux : $m_0(t)=m(t)$, $m_1(t)=-m(t)$ comme présenté sur la figure (II-6). On suppose que les signaux s'étendent de $-\infty$ à $+\infty$.

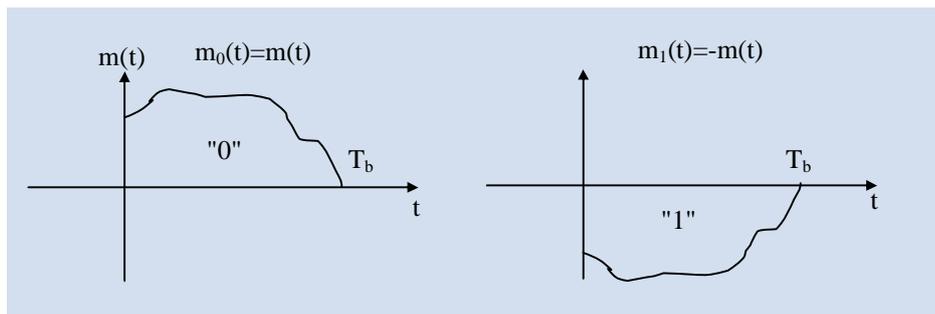


Figure II-6: Matérialisation du signal

La forme physique de l'onde est:

$$s(t) = \left[\sum_{k=0}^{\infty} (c(k) \cdot \delta(t - kT_c)) \right] * m(t), \quad c(k) \in \{-1,1\}.$$

Dont la matérialisation physique est représenté par la figure (II-7) suivante :

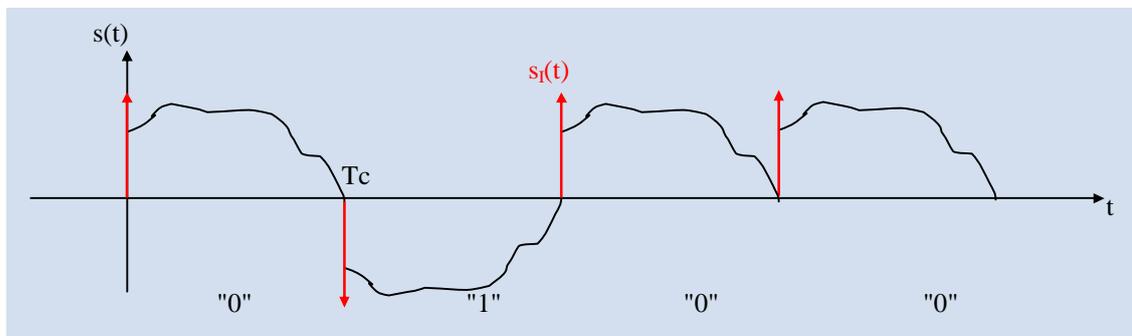


Figure II-7 : Matérialisation du signal

La fonction d'autocorrélation de la matérialisation du code périodique du PRN :

$$K_s(\tau) = \frac{1}{T_R} \int_{t=0}^{T_R} s(t)s(t-\tau)dt, \quad T_R = N \cdot T_c$$

On peut voir que :

$$K_s(\tau) = K_{s_I}(\tau) * K_m(\tau):$$

K_{s_I} est la fonction d'autocorrélation de $s_I(t)$:

$$K_{s_I}(\tau) = \frac{1}{T_R} \int_0^{T_R} s_I(t) \cdot s_I(t-\tau) dt$$

D'où :

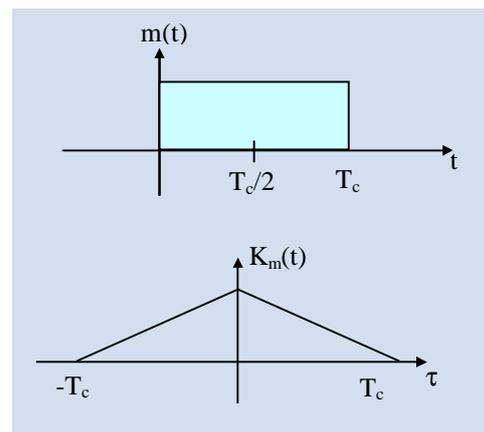
$$K_{s_I}(\tau) = \frac{1}{T_c} \left[\sum_{m=0}^{N-1} K_c(m) \delta(\tau - mT_c) \right] * \sum_{j=-\infty}^{\infty} \delta(\tau - jT_R)$$

K_m est la fonction d'autocorrélation de $m(t)$:

$$K_m(\tau) = m(\tau) * m^*(-\tau)$$

Si nous considérons le cas où :

$$\begin{cases} m(t) = \text{rect}\left(\frac{t - \frac{T_c}{2}}{T_c}\right) \\ K_m(\tau) = \text{tri}\left(\frac{\tau}{T_c}\right) \end{cases}$$



Ce qui correspond au code PRN du GPS, on obtient la fonction de corrélation suivante :

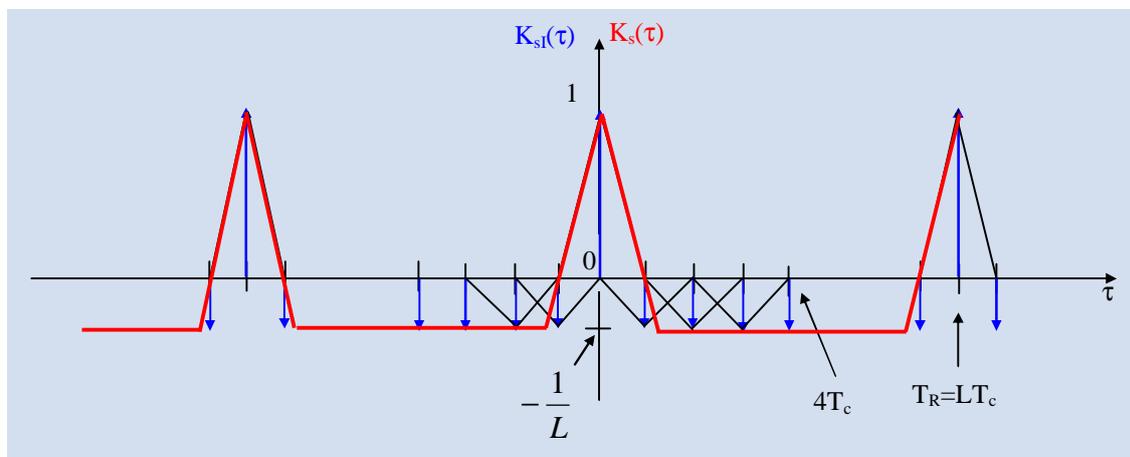


Figure II-8 : la fonction de corrélation du code PRN

La densité spectrale de puissance de la séquence PRN est la transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation :

$$S_s(f) = S_{s_j}(f) \cdot S_m(f).$$

Dans ce cas, on a :

$$M(f) = T_c e^{-i\pi f T_c} \frac{\sin(\pi f T_c)}{\pi f T_c}$$

Donc le spectre du signal $s(t)$ est un spectre de raies espacées de :

$$f_R = \frac{1}{NT_c}$$

Pour lequel le poids de chacune des raies est le produit de la transformée de Fourier discrète du signal numérique associé à la séquence PN par le spectre de la matérialisation de chaque bit. La densité spectrale est donnée par la figure II-9:

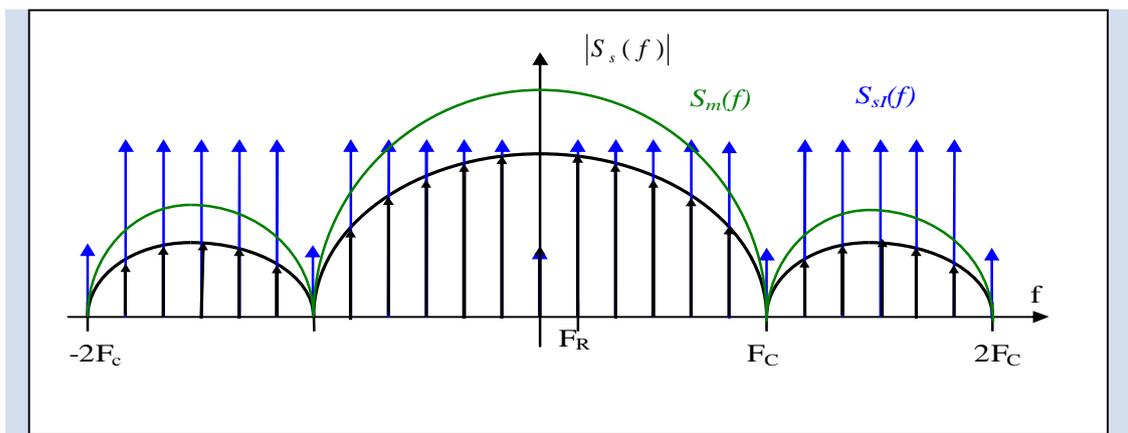


Figure II-9: transformée de Fourier de $s(t)$

2-5-2/ SPECTRE DU SIGNAL GPS TRANSMIS :

Le principe de l'étalement de spectre par séquence directe est de transmettre sur le canal un signal numérique qui est le produit du message de navigation $d(k)$ par le code PRN $c(k)$ de rythme beaucoup plus rapide que $d(k)$. Le signal émis s'écrit donc :

$$s(t) = A.d(t).c(t).\cos(2\pi f_o t)$$

Avec:

$$d(t) = \left[\sum_{k=-\infty}^{\infty} d(k)\delta(t - kT_D) \right] * \text{rect}\left(\frac{t - \frac{T_D}{2}}{T_D}\right) \text{ et } c(t) = \left[\sum_{k=-\infty}^{\infty} c(k)\delta(t - kT_c) \right] * m(t)$$

Où :

- ü $d(k)$: est le signal numérique transportant l'information à transmettre ($d(k)=\pm 1$)
- ü T_D : est la durée d'un bit de $d(k)$
- ü $c(k)$: est le signal numérique associé à la séquence PN utilisée pour l'étalement ($d(k)=\pm 1$).
- ü T_c : est la durée d'un bit du code $c(k)$
- ü $m(t)$: est une forme d'onde de matérialisation, on prendra dans notre cas :

$$m(t) = \text{rect}\left(\frac{t - \frac{T_c}{2}}{T_c}\right)$$

La densité spectrale de puissance du signal $s(t)$ sera donc obtenue par convolution du spectre de raies du code avec la densité spectrale de puissance de $d(t)$ qui correspond à un sinus cardinal. La fonction d'autocorrélation associée au produit entre le code et les données est:

$$K_{dc}(\tau) = E[d(t) \cdot c(t) \cdot d(t-\tau) \cdot c(t-\tau)]$$

Puisque d et c sont indépendants, on peut écrire :

$$K_{dc}(\tau) = E[d(t) \cdot d(t-\tau)] \cdot E[c(t) \cdot c(t-\tau)]$$

Ainsi :

$$K_{dc}(\tau) = K_d(\tau) \cdot K_c(\tau)$$

Par conséquent :

$$S_{dc}(f) = S_d(f) * S_c(\tau) \quad \text{où :} \quad S_d(f) = T_D \left(\frac{\sin(\pi f T_D)}{\pi f T_D} \right)^2$$

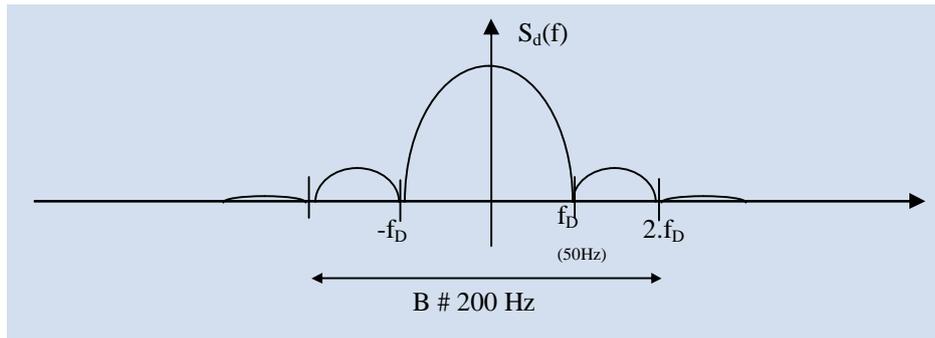


Figure II-10 : Densité Spectrale De Puissance

Et :

$$S_c(f) = \frac{1}{L^2} \delta(f) + \frac{L+1}{L^2} \cdot \left(\frac{\sin(\pi f T_c)}{\pi f T_c} \right)^2 \sum_{\substack{j=-\infty \\ j \neq 0}}^{\infty} \delta(f - j f_R)$$

par conséquent, la densité spectrale de puissance associée à la combinaison PRN et données de navigation S_{dc} correspond à un produit de convolution, on conclut que la densité spectrale de puissance sera décrite par la figure II-11 suivante :

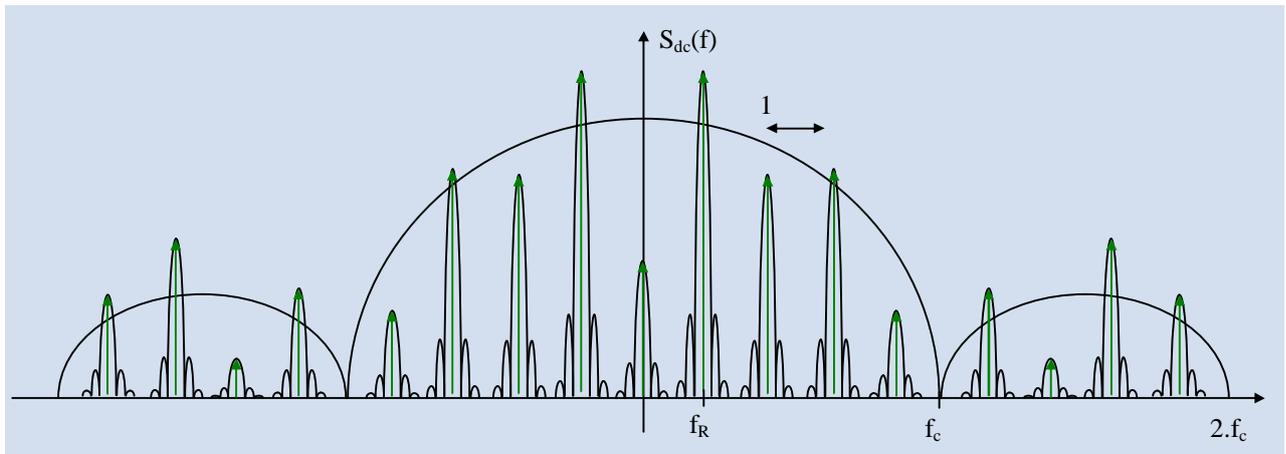


Figure II-11: Densité Spectrale De Puissance PRN1

Considérons maintenant le terme associé à la porteuse, tout en notant que son influence sur la densité spectrale n'est autre qu'un décalage fréquentiel f_0 . Par conséquent la forme finale de la densité spectrale de puissance est donnée par la figure II-12 suivante :

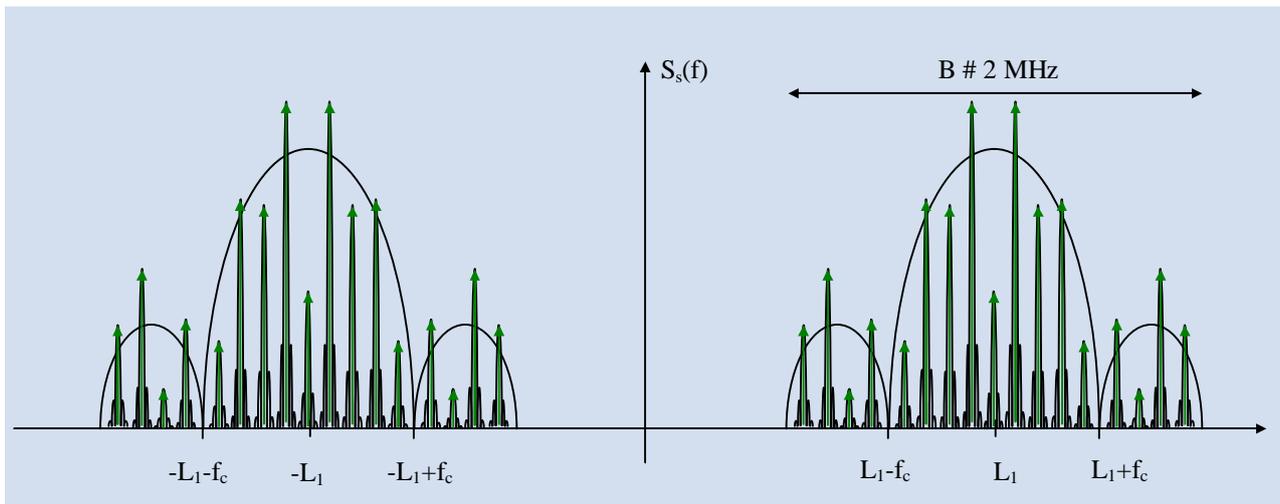


Figure II-12 : Densité Spectrale De Puissance PRN1 avec porteuse

Selon ces deux dernières figures, on constate que le signal GPS est réalisé à partir d'une opération d'étalement de spectre, qui possède plusieurs avantages, tels que :

- Ø Résistance au brouillage : le spectre du signal portant l'information étant dupliqué sur une large bande, l'interférence d'un signal brouilleur n'affectera qu'une partie des répliques, les autres restant exploitables pour récupérer les données.
- Ø Confidentialité : pour une puissance du signal d'information donnée, l'étalement de spectre permet de répartir cette puissance sur les différentes répliques ce qui abaisse le niveau global du spectre. Ainsi, celui-ci peut passer en dessous du niveau du bruit.
- Ø Cryptage : l'étalement de spectre constitue un moyen de cryptage : en effet, le signal étant déjà codé et en dessous du bruit, le seul moyen de le retrouver est de trouver le bon code utilisé à l'émission.
- Ø Capacité de mesure du retard de propagation : les fonctions d'autocorrélation permettent la synchronisation entre le code local et le code entrant et donc de déterminer le retard et la pseudo-distance. Pour une transmission n'utilisant pas l'étalement de spectre, seule la boucle à verrouillage de phase fonctionne ce qui ne permet pas une telle mesure.
- Ø Partage du canal d'émission : les signaux des différents satellites sont émis simultanément dans une même bande de fréquence. Chaque signal ayant son propre code, il n'y a pas d'interférences avec les autres.

A partir de la figure (II-12), on constate que la partie la plus importante de la densité spectrale de puissance du signal GPS est concentrée dans une bande de largeur de 2.046 MHz, car la fréquence f_c est de 1.023 MHz. Afin de vérifier ce résultat on a simulé la densité spectrale de puissance correspondante au code C/A sous Matlab. On a obtenu la figure II-13, cette dernière confirme la démonstration théorique donnée ci-dessus.

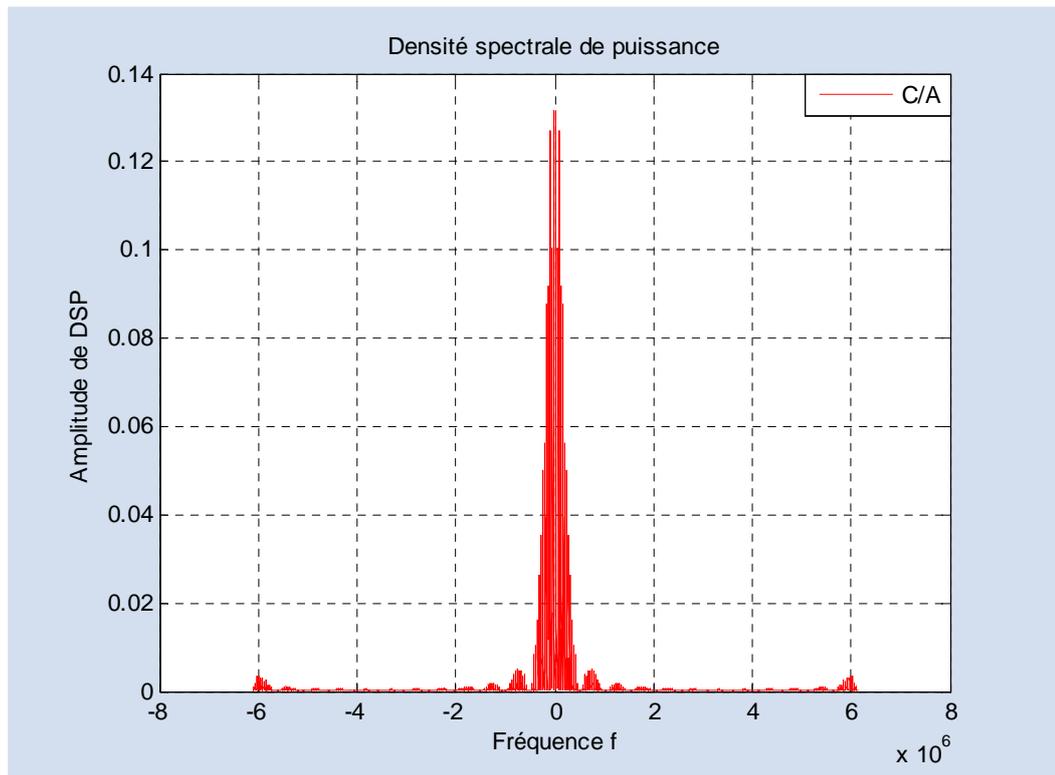


Figure II-13 : Densité Spectrale De Puissance PRN1

II-6/ ACQUISITION :

Après démodulation le traitement du signal GPS peut être divisé en trois étapes l'acquisition, la poursuite et la récupération du message de navigation. On s'intéresse à ce niveau à l'opération d'acquisition.

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, les résultats acquis a ce niveau seront exploités afin d'initialiser la phase de poursuite.

Dans ce qui suit on présentera trois méthodes d'acquisition :

- Û L'acquisition série ;
- Û L'acquisition parallèle sur la fréquence ;
- Û L'acquisition 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.

II-6-1/ Acquisition série :

C'est la première méthode que nous proposons dans notre travail dont le synoptique correspondant est représenté par le schéma (II-14) suivant :

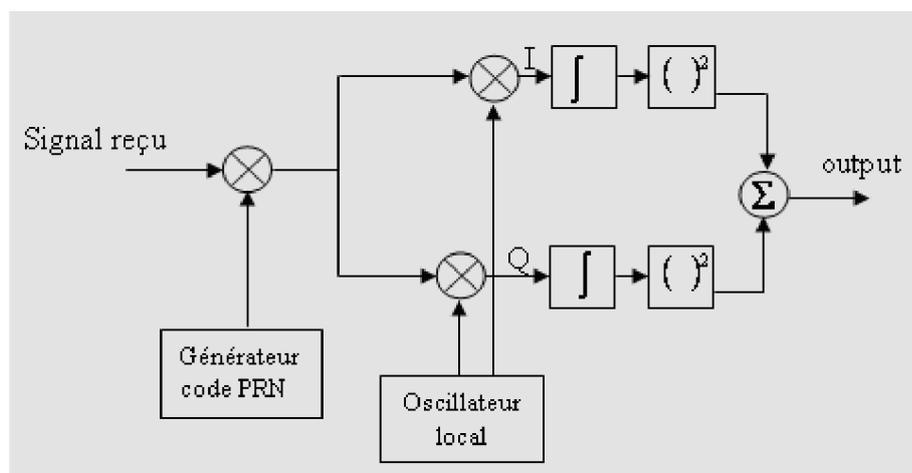


Figure II- 14 : Schéma de l'acquisition série

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. Idéalement la puissance du signal doit être sur la voie I ce qui signifie que la démodulation doit être sur cette voie seulement, mais à cause du déphasage il est nécessaire d'examiner les deux voix I et Q.

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 être glissée sur toutes les valeurs possibles entre FI-5 KHz et FI+5 KHz avec un pas de 500Hz.
- Un code qui glisse sur les 1023 code phases différentes.

Par conséquent, le nombre d'opération total est :

$$1023 * (2 * (5000 / 500) + 1) = 1023 * 21 = 21483 \text{ combinaisons.}$$

Qui est un nombre très important.

II-6-2/Acquisition parallèle sur la fréquence : (parallel frequency space search acquisition)

La méthode précédente est très coûteuse en nombre d'opérations par conséquent en temps de calcul, mais si on a la possibilité d'éliminer la recherche sur l'un des deux paramètres, la performance de l'algorithme s'améliora sûrement.

Comme son nom l'indique 'acquisition parallèle sur la fréquence' on parallélise la recherche sur la fréquence, pour cela on utilise la transformée de Fourier selon le synoptique (II-15) :

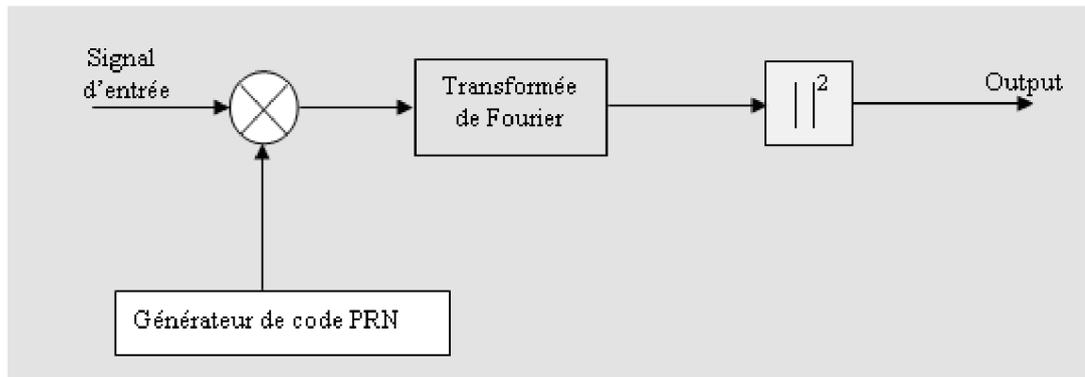


Figure II-15 : Schéma de l'acquisition parallèle

En examinant ce synoptique, on constate que le signal reçu est multiplié par le code généré localement correspondant à chaque satellite et avec un code phase variant entre 0 et 1023 chips, le signal résultant est transformé en domaine fréquentiel par la transformée de Fourier. La figure (II-16) illustre le résultat de multiplication avec un code parfaitement aligné avec le code généré localement :



Figure II-16: Extraction de la porteuse du signal GPS

La figure (II-16) montre que dans ce cas le résultat de multiplication est un signal

sinusoïdale continu et ceci seulement dans la cas ou le code est parfaitement aligné avec celui reçu. La TF présente un pic localisé sur la fréquence porteuse du signal reçu.

L'exactitude de la fréquence déterminée dépend de la longueur de la DFT qui correspond au nombre d'échantillons analysés, si 1ms de données est analysé, le nombre d'échantillons peut être calculé comme 1/1000 de la fréquence d'échantillonnage, alors si :

$$f_s = 10\text{MHz}, \text{ le nombre d'échantillon sera : } N = 10000$$

Avec une DFT de longueur 10000, les 1^{er} N/2 échantillons représentent les fréquences de 0 Hz à $f_s/2$ par conséquent la résolution en fréquence est de :

$$\Delta f = \frac{f_s/2}{N/2} = \frac{f_s}{N}$$

Dans le cas où $f_s = 10\text{MHz}$ la résolution en fréquence sera :

$$\Delta f = \frac{10\text{MHz}}{10000} = 1\text{KHz}$$

La résolution dans ce cas est de 1KHz qui est plus large en comparant avec la 1^{ere} méthode dont la résolution est de 500Hz.

L'avantage de cette méthode par rapport à la précédente est la réalisation de 1023 pas de recherche sur le code phase seulement, par conséquent un nombre d'opérations de 1023 au lieu de 21483.

II-6-3/ Acquisition parallèle sur le code phase: (parallèle code phase search acquisition)

Cette méthode est basée sur le même principe précédent mais cette fois le code C/A subit un décalage circulaire ce qui ramène la corrélation à une convolution circulaire pouvant être calculée sous forme d'un simple produit dans le domaine fréquentiel.

Afin de démontrer la relation entre convolution et corrélation, considérons les manipulations mathématiques suivantes. En premier lieu on donne la TFD d'une séquence $X(n)$ de longueur N est calculée par :

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi kn/N} \quad (\text{II-1})$$

Aussi l'intercorrélation entre deux séquences $X(n)$ et $Y(n)$ de longueur N est:

$$z(n) = \sum_{m=0}^{N-1} x(m) y(n-m) \quad (\text{II-2})$$

Aussi la convolution entre $X(n)$ et $Y(n)$ peut être écrite sous la forme suivante :

$$z(n) = x(n) * y(n) = \sum_{n=0}^{N-1} x(m) y(n-m) \quad (\text{II-3})$$

Les équations (II-1) et (II-2) montrent que la différence entre corrélation et convolution est seulement le signe dans $y(n+m)$. La convolution peut être exprimée dans le domaine fréquentiel par la TF selon :

$$\begin{aligned} z(k) &= \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} x(m) y(n-m) e^{-2j\pi kn/N} \\ &= \sum_{m=0}^{N-1} x(m) e^{-2j\pi km/N} \sum_{n=0}^{N-1} y(n-m) e^{-2j\pi k(n-m)/N} \end{aligned}$$

Mais la combinaison entre (II-1) et (II-2) donne :

$$\begin{aligned} z(k) &= \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} x(m) y(n+m) e^{-2j\pi kn/N} \\ &= \sum_{m=0}^{N-1} x(m) e^{+2j\pi km/N} \sum_{n=0}^{N-1} y(n+m) e^{-2j\pi k(n+m)/N} \\ &= x^*(k) y(k) \end{aligned} \quad (\text{II-5})$$

Donc la connexion entre la corrélation en domaine temporel et fréquentiel est similaire à la connexion entre la convolution en domaine temporel et fréquentiel, la différence réside seulement dans le fait que l'une des deux entrées soit conjuguée avant la multiplication.

Quand la représentation fréquentielle de la corrélation est évaluée, la représentation en domaine temporel se fera à travers la transformée de Fourier inverse. Le synoptique (II-17) suivant représente le diagramme de cette méthode :

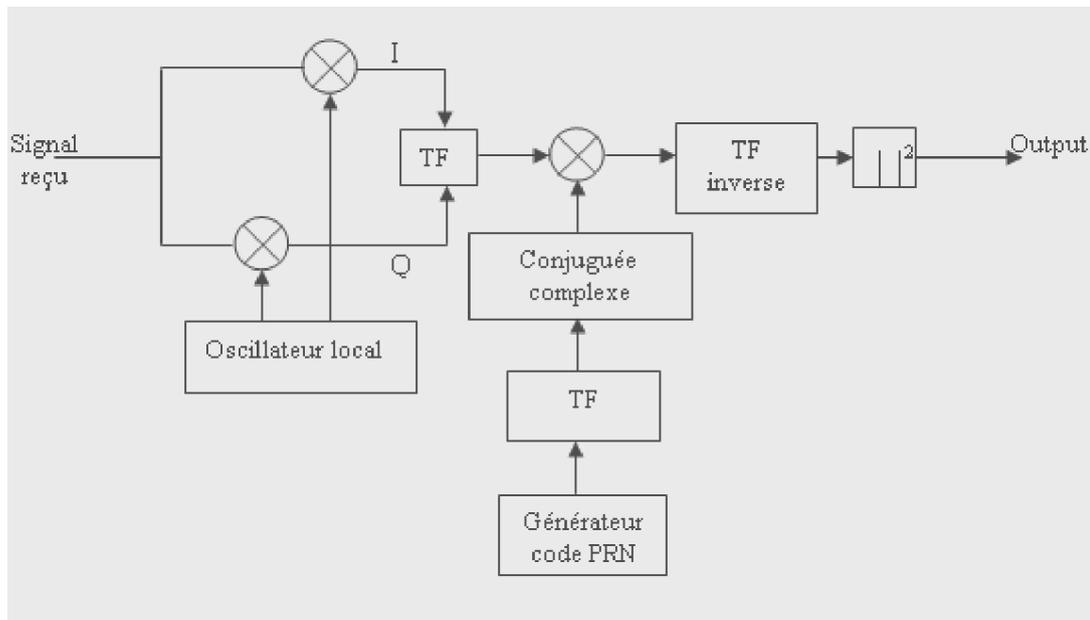


Figure II-17 : Schéma de l'acquisition parallèle sur le code phase

Dans ce cas le signal reçu est multiplié par une porteuse générée localement ; la multiplication directe donne le signal **I** et la multiplication par la porteuse déphasée de 90^0 donne le signal **Q** puis les deux signaux **I** et **Q** sont combinés à fin de fournir un signal complexe :

$$X(n) = I(n) + j * Q(n)$$

Ce dernier sera l'entrée de la DFT.

Le code PRN généré est transformé en domaine fréquentiel (à travers la TF) puis on prend son complexe conjugué, par la suite on réalise le produit entre ce complexe conjugué du PRN et le signal d'entrée déjà réalisé. Le résultat de cette multiplication est transformé en espace temporel à travers la transformée de Fourier inverse. Le module de cette dernière correspond à la corrélation entre le signal d'entrée et le code PRN.

Si on constate la présence d'un pic de corrélation alors son index correspond au code phase du PRN reçu.

Comparant avec les deux méthodes précédentes, cette méthode réalise la recherche seulement sur 21 fréquences différentes. Pour chaque fréquence on performe une transformée de Fourier et une transformée de Fourier inverse, donc cette méthode dépend de la réalisation de ces deux fonctions. L'exactitude des paramètres estimés concernant la fréquence est la même que la 1^{ère} méthode tandis que pour le code phase on a plus de précision par rapport au deux méthodes précédentes, car on réalise l'opération de

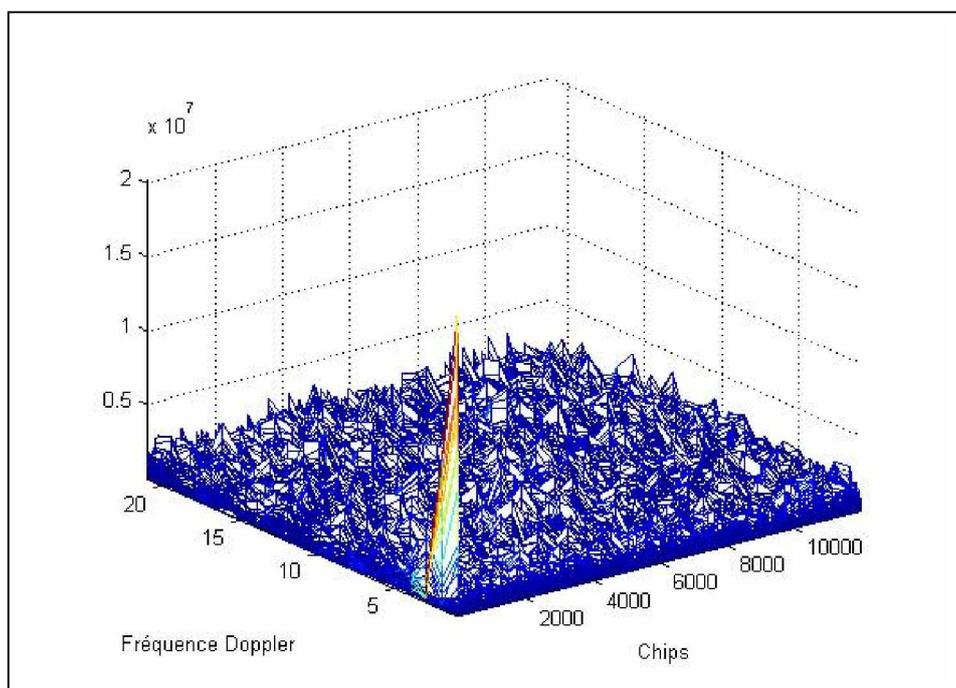
corrélation avec les PRN échantillonnés sur 11.253MHz, par conséquent il y aura 11253 échantillons pour un code PRN donné, donc l'exactitude de ce code phase peut avoir 11253 valeurs différentes au lieu de 1023.

II-7/ SIMULATION DE L'ACQUISITION CIRCULAIRE:

Le résultat associé à l'acquisition du signal GPS associé au PRN2 est présenté sur la figure (II-18). Dans ce cas nous avons considéré que ce satellite est présent, ce qui est confirmé par notre simulation.

Dans une deuxième étape, nous avons considéré l'acquisition d'un signal correspondant à un satellite absent c'est le PRN3, nous constatons l'absence du pic.

Finalement, nous avons simulé le cas du satellite 4 qui est considéré comme présent, mais cette fois son signal il est décalé en temps de 6144 et en fréquence de 3.557Mhz Le résultat de la simulation est donné par la figure (II-20), on remarque que le pic est présent et il est situé exactement à l'endroit attendu.



FigureII-18 : Acquisition du PRN2 Présent

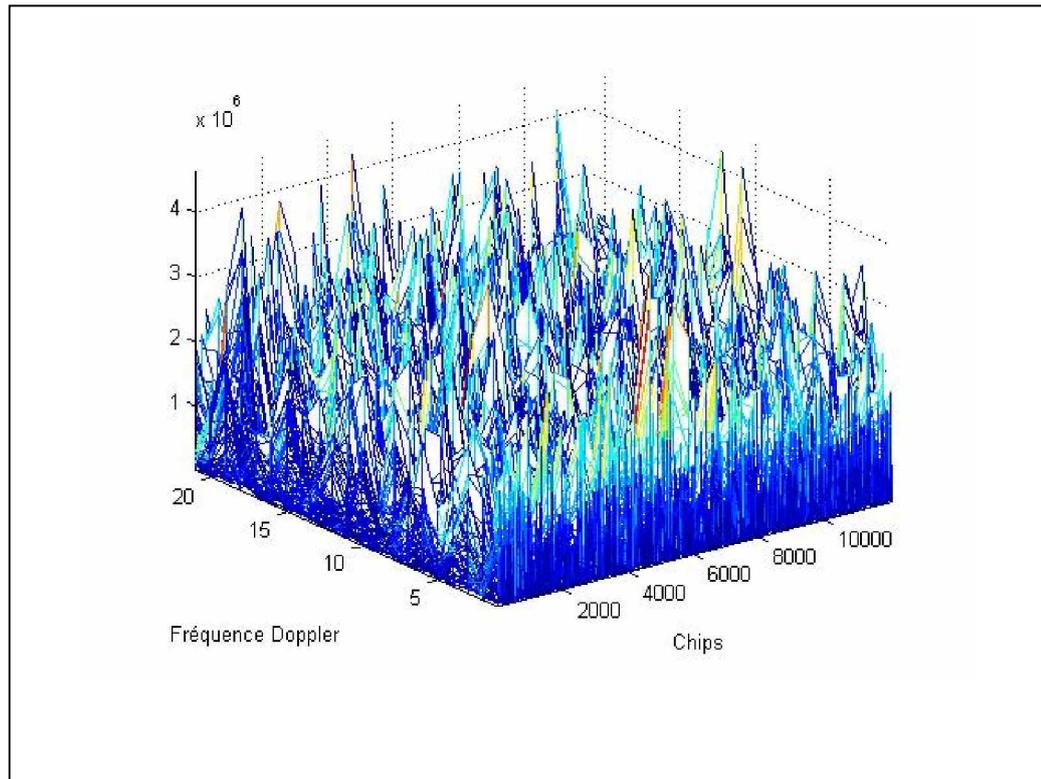


Figure II-19 : Acquisition PRN3 absent

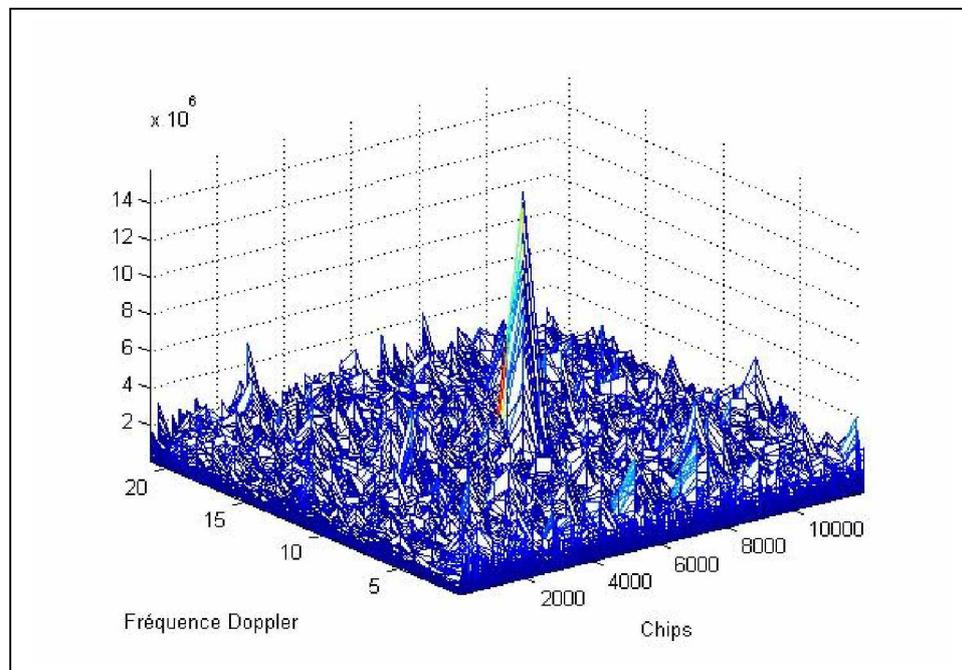
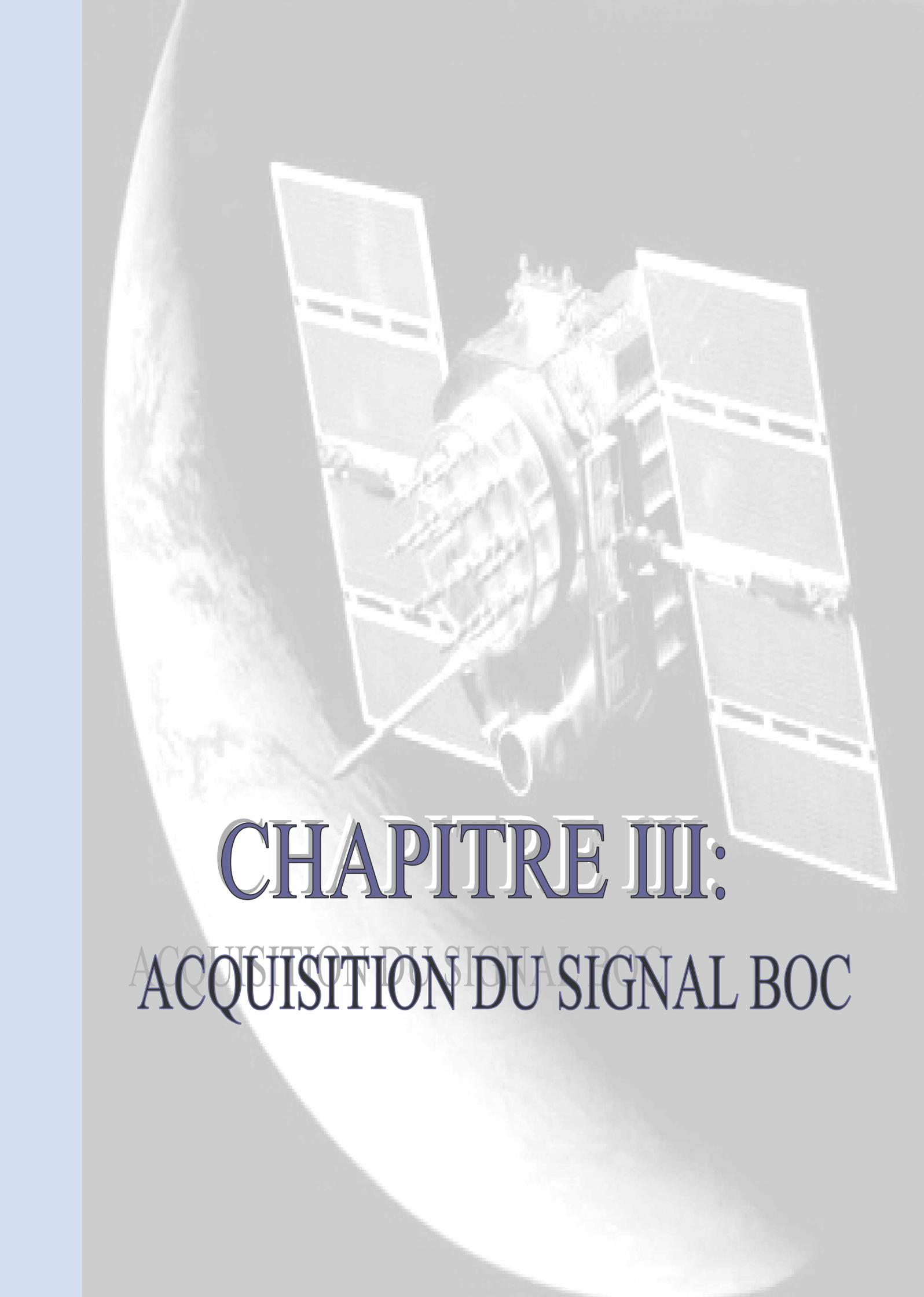


Figure II-20 : Acquisition PRN4 présent

A grayscale image of a satellite in orbit above the Earth. The satellite has two large solar panel arrays extended outwards. The Earth's surface is visible in the background, showing continents and oceans. The text 'CHAPITRE III: ACQUISITION DU SIGNAL BOC' is overlaid on the image in a blue, serif font.

CHAPITRE III:

ACQUISITION DU SIGNAL BOC

III-1/ INTRODUCTION :

Afin d'exploiter d'une façon optimale la bande de fréquence réservée aux systèmes de navigation par satellites, une nouvelle modulation a été proposée, c'est la modulation de Porteuse à Double Décalage, repérée selon son acronyme anglo-saxon BOC (*Binary Offset Carrier*). La particularité des signaux BOC est leur définition comme étant la combinaison de deux signaux décalés en fréquence à droite et à gauche de la fréquence centrale de la porteuse. Les décalages à droite et à gauche sont obtenus en modulant la porteuse par des sous-porteuses, le signal en bande de base étant obtenu par combinaison d'un code d'étalement de rythme R_c , et d'une sous-porteuse carrée de fréquence R_{sc} .

Nous allons, dans un premier temps réaliser l'étude théorique des signaux GPS BOC afin de comprendre leurs propriétés novatrices. Pour ce faire, nous ne travaillerons que sur la première partie du signal GPS classique, qui correspond au code d'étalement C/A, c'est à dire la partie civile du signal à laquelle on applique une modulation supplémentaire. Nous présentons les propriétés essentielles de ces signaux, on s'intéresse à leur génération, leur fonction de corrélation ainsi que la densité spectrale de puissance, puis on étudie leur acquisition afin de les comparer avec les signaux GPS.

III-2/ LE SIGNAL BOC :

Les signaux BOC correspondent à l'apport d'une modulation supplémentaire par une sous porteuse de type rectangulaire et de fréquence F_s , en vue d'une meilleure utilisation de la bande allouée. L'expression générale du signal GPS BOC étudié est :

$$s(t) = A d(t) c(t) s_{boc}(t) \cos(2\pi L_1 t)$$

avec :

$$S_{boc}(t) = \text{sign} [\sin (2\pi F_s t)]$$

$S_{boc}(t)$ représente la sous porteuse supplémentaire, qui sera prise de type rectangulaire, mais on notera que l'on aurait pu travailler sur d'autres sous porteuses de type sinusoïdal, appelées M-LOC.

Deux paramètres sont utilisés pour définir les signaux de modulation BOC. Ces paramètres sont :

- La valeur de la fréquence du signal $s_c(t)$, déterminée à travers un paramètre q :

$$F_s = q \cdot F_0$$

- La valeur de la fréquence des bits du code d'étalement F_c , déterminée à travers un paramètre p :

$$F_c = p * F_0$$

Ainsi, on définit $n=2*(q/p)$ de paramètres caractéristiques des signaux BOC. Le rapport de ces deux paramètres à travers n a une l'importance sur la forme du spectre du signal BOC. En effet, suivant que n est pair ou impair, notre signal BOC n'aura pas les mêmes propriétés :

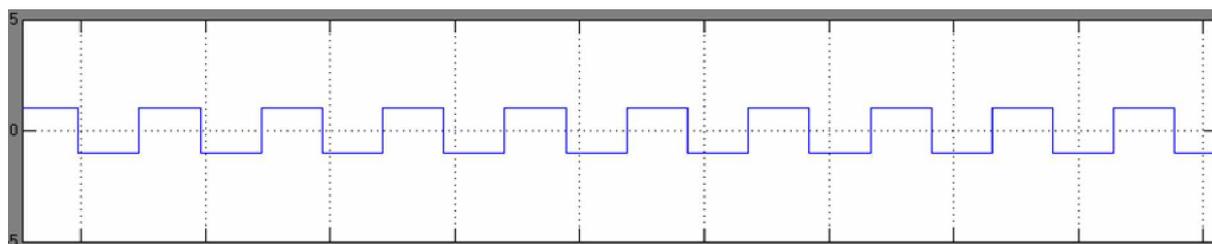


Figure (III-1): signal rectangulaire de la modulation BOC avec n pair :

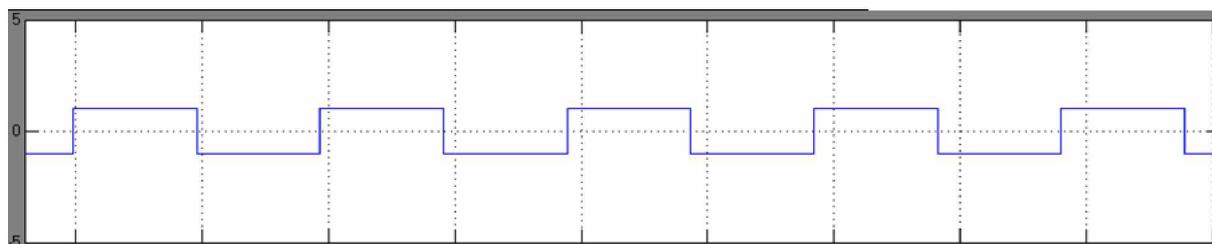


Figure (III -2): signal rectangulaire de la modulation BOC avec n impair :

La fréquence F_0 est caractéristique du récepteur, elle correspond à sa puissance de traitement numérique et sera fixée pour notre étude à :

$$F_0 = 1.023 \text{ MHz}$$

Les autres caractéristiques des signaux ne varient pas par rapport à l'étude des signaux GPS classiques, soit :

- $d(t)$ la matérialisation du message de navigation (50 Hz) par un P/NRZ/L ;
- $c(t)$ la matérialisation du code C/A (cadence de 1,023 MHz) par un P/NRZ/L;
- La fréquence L_1 est la fréquence classique de la porteuse GPS à 1575,42 MHz.

III-3/ GENERATEUR DE SIGNAUX BOC :

On peut générer des signaux BOC selon le synoptique suivant III-3:

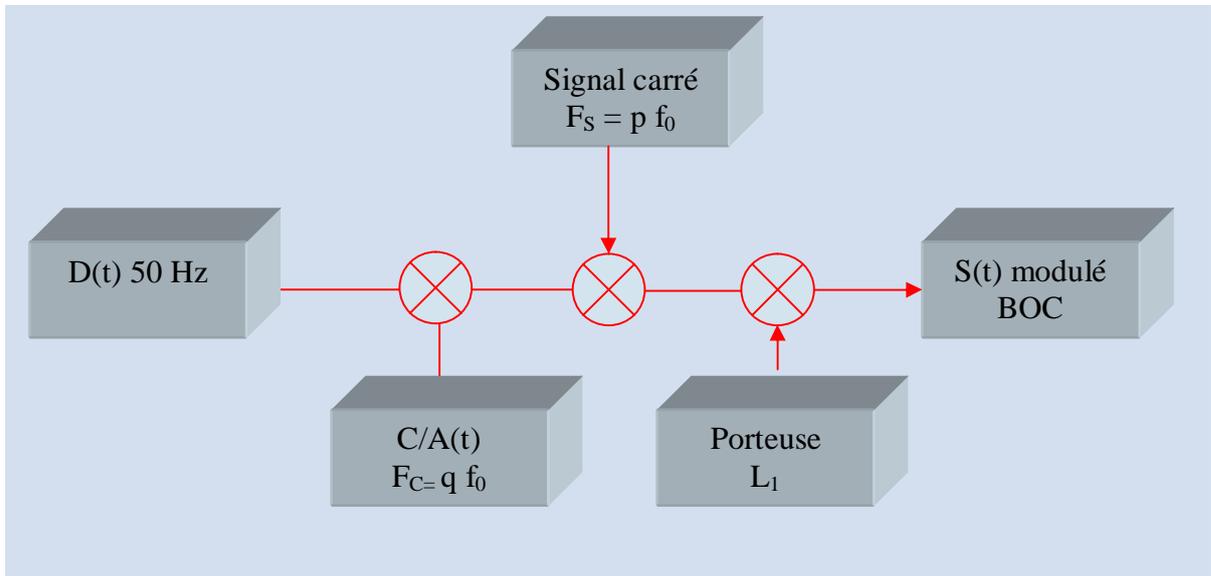


Figure III-3 : générateur du signal BOC

On note que le générateur PRN est le même utilisé en GPS, sauf qu'ici sa fréquence peut être multiple de 1.023 MHz, aussi nous avons la possibilité de changer la fréquence du signal carré car le signal BOC est défini par les deux paramètres p et q.

III-4/ DENSITE SPECTRALE DE PUISSANCE :

On s'intéresse à la détermination de la forme du spectre des signaux BOC. Pour cela on calcule la DSP du signal BOC final s(t) :

$$s(t) = A d(t) c(t) s_c(t) \cos(2\pi L_1 t)$$

avec :

$$d(t) = \left[\sum_{k=-\infty}^{\infty} d(k) \delta(t - kT_D) \right] * \text{rect} \left(\frac{t - \frac{T_D}{2}}{T_D} \right)$$

$$c(t) = \left[\sum_{k=-\infty}^{\infty} c(k) \delta(t - kT_c) \right] * m(t)$$

$$s_{\text{boc}}(t) = \text{sign} [\sin(2\pi F_s t)]$$

Sachant que la densité spectrale de puissance est la transformée de Fourier de la fonction de corrélation, par conséquent on doit calculer la fonction de corrélation donnée par :

$$\begin{aligned} R_s(\tau) &= E [s(t) \cdot s(t - \tau)] \\ &= A^2 \cdot E [d(t) \cdot d(t - \tau)] \cdot E [c(t) \cdot c(t - \tau)] \cdot \\ &\quad E [s_{\text{boc}}(t) \cdot s_{\text{boc}}(t - \tau)] \cdot E [\frac{1}{2} \cdot \cos(4\pi L_1 t - 2\pi L_1 \tau) + \frac{1}{2} \cos(2\pi L_1 \tau)] \\ &= A^2/2 \cdot R_d(\tau) \cdot R_c(\tau) \cdot R_{\text{boc}}(\tau) \cdot \cos(2\pi L_1 \tau) \end{aligned}$$

D'où la DSP,

$$S_s(f) = S_d(f) * S_c(f) * S_{\text{boc}}(f) * [A^4/2 * (\delta(f - L_1) + \delta(f + L_1))]$$

Ce calcul se révèle être complexe. Cependant, on peut utiliser l'expression du produit de convolution $S_c(f) * S_{\text{boc}}(f)$ que l'on notera $S_{sc}(f)$. Cette dernière expression dépend de la parité de n . par conséquent on démontre que:

- Avec n pair, on a $S_{sc}(f)$:

$$S_{sc}(f) = \left| \frac{1}{\pi f \sqrt{T_c}} \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi f}{2f_{sc}}\right) \sin\left(\frac{\pi f}{f_c}\right)}{\cos\left(\frac{\pi f}{2f_{sc}}\right)} \right|^2 = f_c \left(\frac{\sin\left(\frac{\pi f}{2f_{sc}}\right) \sin\left(\frac{\pi f}{f_c}\right)}{\pi f \cdot \cos\left(\frac{\pi f}{2f_{sc}}\right)} \right)^2$$

qui correspond à titre d'exemple au signal BOC(10,5), dont la densité spectrale de puissance est donnée par la figure III-2.

- Avec n impair, on a $S_{sc}(f)$:

$$S_{sc}(f) = \left| \frac{1}{\pi f \sqrt{T_c}} \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi f}{2f_{sc}}\right) \cos\left(\frac{\pi f}{f_c}\right)}{\cos\left(\frac{\pi f}{2f_{sc}}\right)} \right|^2 = f_c \left(\frac{\sin\left(\frac{\pi f}{2f_{sc}}\right) \cos\left(\frac{\pi f}{f_c}\right)}{\pi f \cdot \cos\left(\frac{\pi f}{2f_{sc}}\right)} \right)^2$$

qui correspond à titre d'exemple au signal BOC(10,5), dont la densité spectrale de puissance est donnée par la figure III-3.

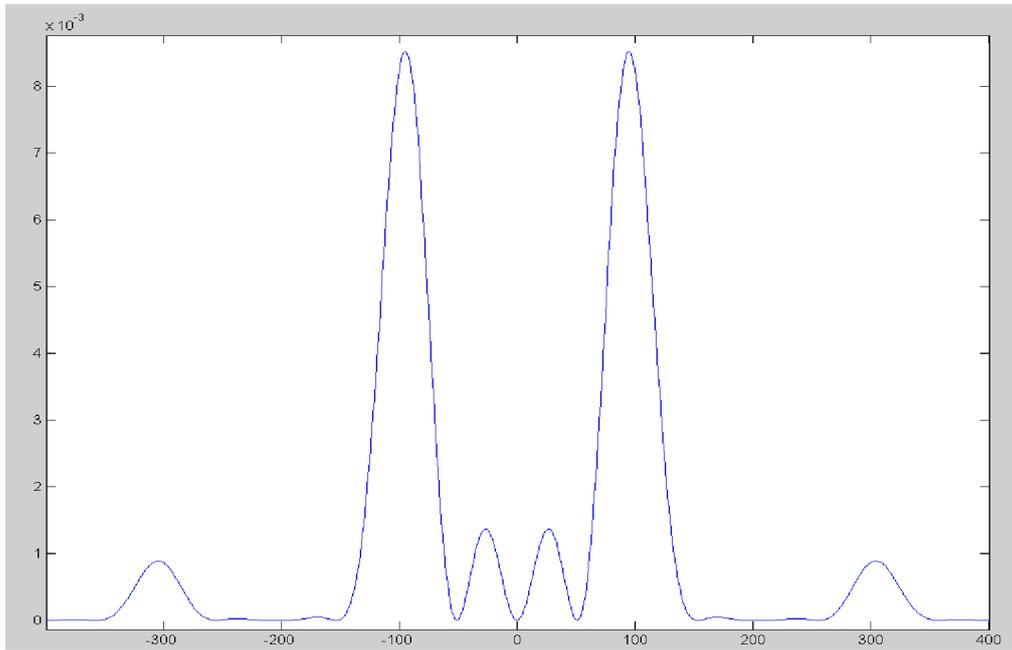


Figure (III -4): Représentation de la fonction $S_{sc}(f)$ pour n pair

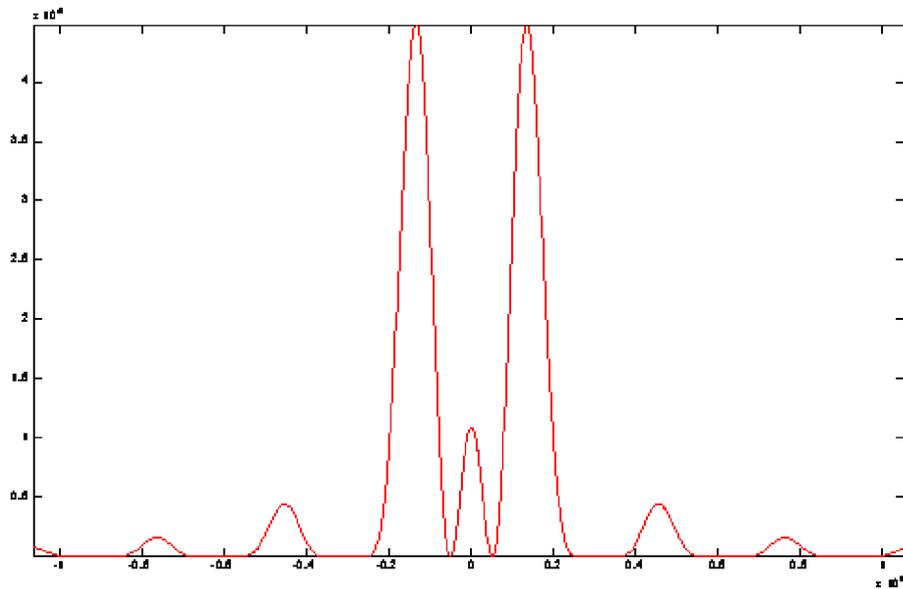


Figure III-5: représentation de la fonction $S_{sc}(f)$ pour n impair

La densité spectrale de puissance du signal $d(t)$:

$$S_d(f) = T_D \left(\frac{\sin(\pi f T_D)}{\pi f T_D} \right)^2$$

Par conséquent on travaille donc sur une expression de DSP dont toutes les composantes sont connues:

$$S_s(f) = S_d(f) * S_{sc}(f) * [A^4/2 * (\delta(f - L1) + \delta(f + L1))]$$

On note que la fréquence $L1$ sera convertie à l'entrée du récepteur vers la fréquence intermédiaire FI . On aura ainsi une DSP d'enveloppe $S_{sc}(f)$ décalée de $+F_s$ et $-F_s$ autour de FI , avec le spectre des données toutes les F_r (fréquence du code d'étalement) à l'intérieur. On vérifiera par la simulation la théorie sur la DSP du signal BOC.

IV- SIMULATION :

On passe maintenant à la phase de simulation des signaux BOC sous matlab afin de vérifier les propriétés théoriques; on s'intéressera au signal BOC(1,1), car sa génération ne nécessite pas une fréquence très élevée, par conséquent on a choisi un couple de paramètres $p = 1, q = 1$ d'où:

$$F_c = 1 * F_0 = 1.023 * 10^6$$

$$F_s = 1 * F_0 = 1.023 * 10^6$$

La fréquence d'échantillonnage F_e a été simplement choisie de manière à respecter le théorème de Shannon :

$$F_e > 2 * F_{max}.$$

Elle est prise à 12MHz dans notre simulation.

On va d'abord vérifier par la simulation les différentes propriétés des fonctions d'autocorrélation des diverses composantes du signal BOC, puis on simulera la DSP du signal BOC final, sachant que la fonction de corrélation:

$$R_s(\tau) = (A^2/2) * R_c/a(\tau) * R_d(\tau) * R_{boc}(\tau) * \cos(2\pi FI t)$$

La simulation du signal de données donne, en tant qu'autocorrélation d'un rectangle de période T_d , un triangle de sommet 1 en 0 et de base $2*T_d$. La simulation n'est pas présentée ici car elle est tout à fait classique :

$$R_d(\tau) = 1 - |\tau|/T_d \quad \text{pour } \tau \text{ appartenant à } [-T_d, +T_d]$$

4-1/ L'AUTO CORRELATION DU SIGNAL BOC :

L'évaluation de la fonction d'autocorrélation du signal BOC nous fournit la figure (III- 6), on constate qu'elle possède une forme particulière différente de celle associée à la fonction de corrélation du code C/A. On a examiné les deux cas, d'un code BOC avec 'n' impair et 'n' pair, on a remarqué que la fonction de corrélation est différente, elle présente plus de pics secondaires dans le cas où 'n' est pair.

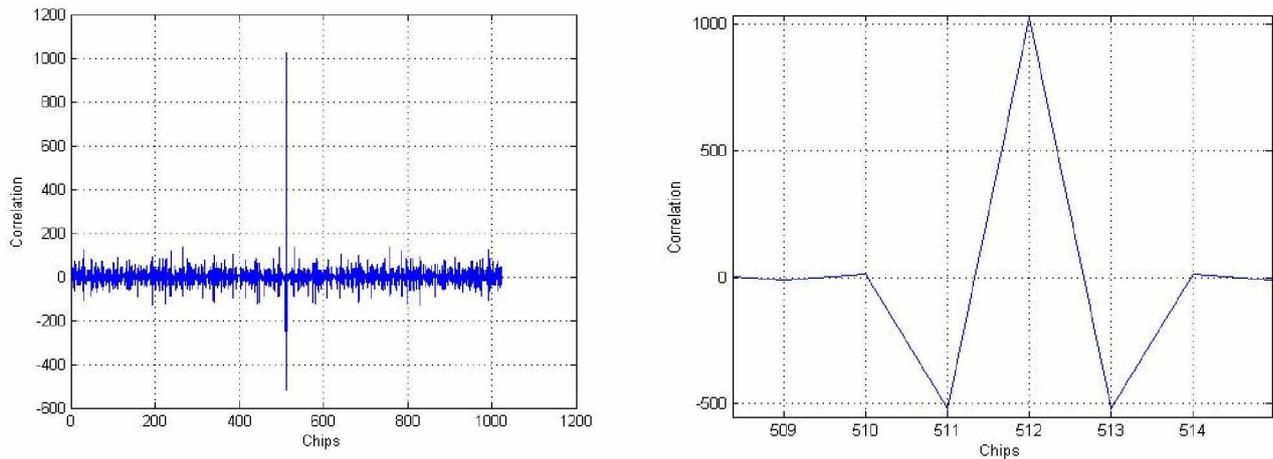


Figure (III -6) : Fonction d'autocorrélation pour BOC(1,1)

4-2/ LA DENSITE SPECTRALE DE PUISSANCE :

La densité spectrale de puissance du signal BOC(1,1) est représentée par la figure (III-7), on constate que cette densité spectrale de puissance présente une nouveauté importante, le spectre est composé de deux lobes principaux décalés symétriquement par rapport à la fréquence centrale. Cette fréquence centrale reste la même que celle de GPS ce qui permet de faciliter la réalisation de récepteurs bi-modes GPS et GALILEO, afin de clarifier cette idée, on a présenté sur la même figure les deux densités associées au signal GPS C/A et au BOC(1,1).

Aussi, afin de vérifier l'influence des deux paramètres p et q sur la forme de la densité spectrale, on a simulé le cas où $p=10$, $q=5$, cette densité est donnée par la figure (III-9), encore une autre fois on remarque une propriété importante, les deux lobes toujours présents mais ils sont plus large par rapport au cas précédent et plus éloignés, ce qui permet encore d'augmenter le nombre de services différents sur une même porteuse.

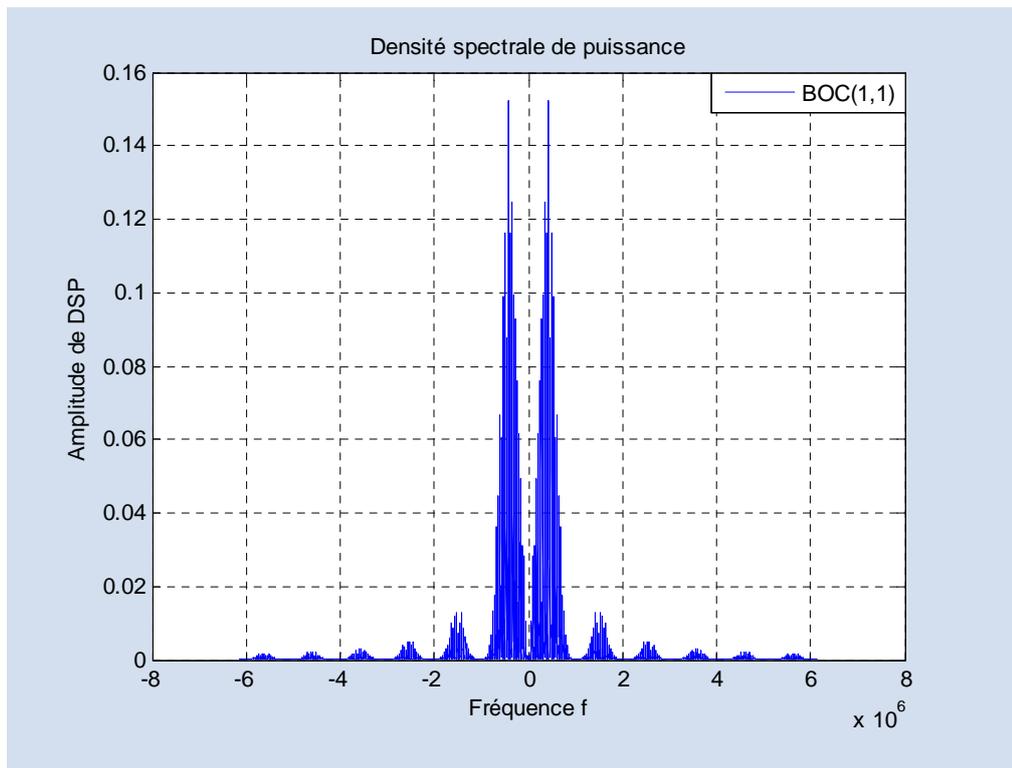


Figure (III-7) : Densité Spectrale de Puissance BOC (1 ,1)

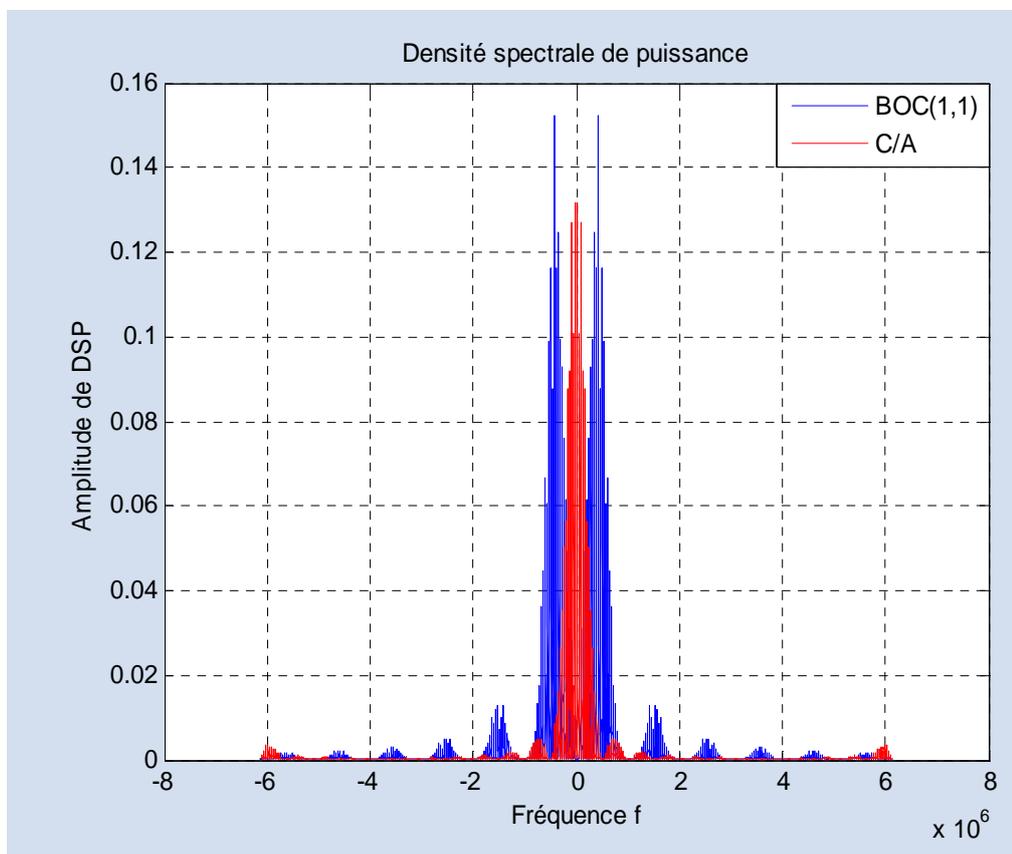


Figure (III-8) : Densité Spectrale de Puissance BOC et C/A

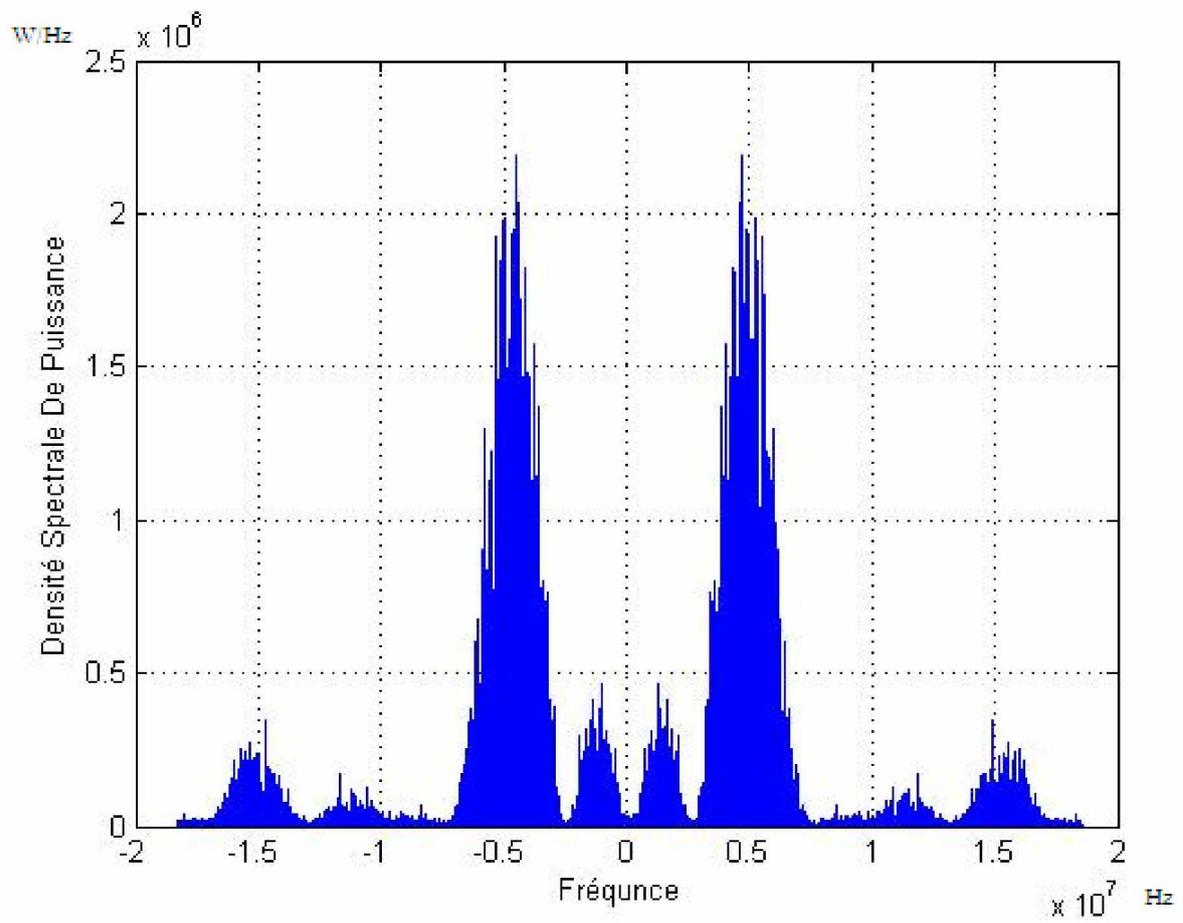


Figure III-9 : Densité spectrale de puissance BOC(10,5)

II- ACQUISITION DES SIGNAUX BOC :

Nous allons réaliser l'acquisition du signal BOC selon le synoptique (III-10) ci-dessous, une acquisition circulaire sera simulée mais cette fois sur les deux lobes, à gauche et à droite indépendamment. Pour ce faire nous avons réalisé deux filtre passe bas idéaux de même largeur, le premier filtre est réalisé afin d'extraire le lobe gauche, il doit être centré sur la fréquence $F_I - F_c$, on a considéré une largeur de bande égale à 2.046 MHz, de même pour le deuxième filtre qui permettra de récupérer le lobe droit, il est centré sur la fréquence $F_I + F_c$.

Une fois le signal est filtré par ces deux filtres, on appliquera l'acquisition de la même manière que celle appliquée sur le signal GPS. Comme cette fois nous aurons deux voies, on les analysera en vérifiant le décalage temporel et fréquentiel puis on réalisera la combinaison.

Les figures (III-11) et (III-12), présentent notre simulation du filtrage réalisé à gauche et droite par rapport à la fréquence F_I , on a récupéré les deux lobes séparément.

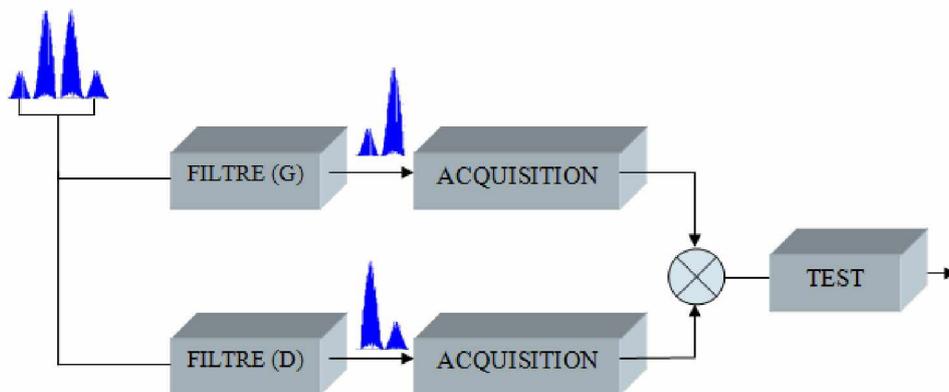


Figure (III-10) : Acquisition circulaire BOC

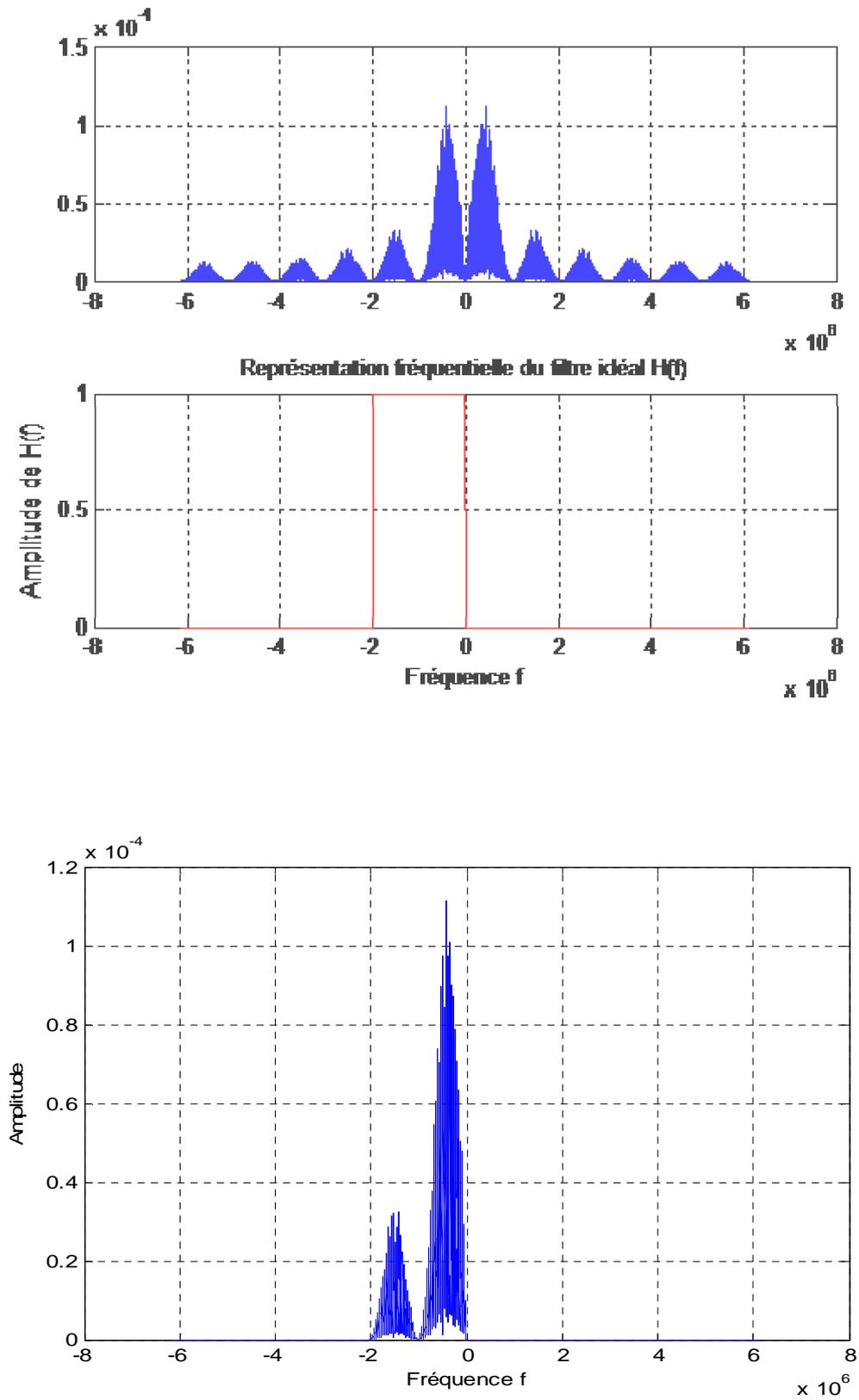


Figure (III-11) : Acquisition lobe gauche

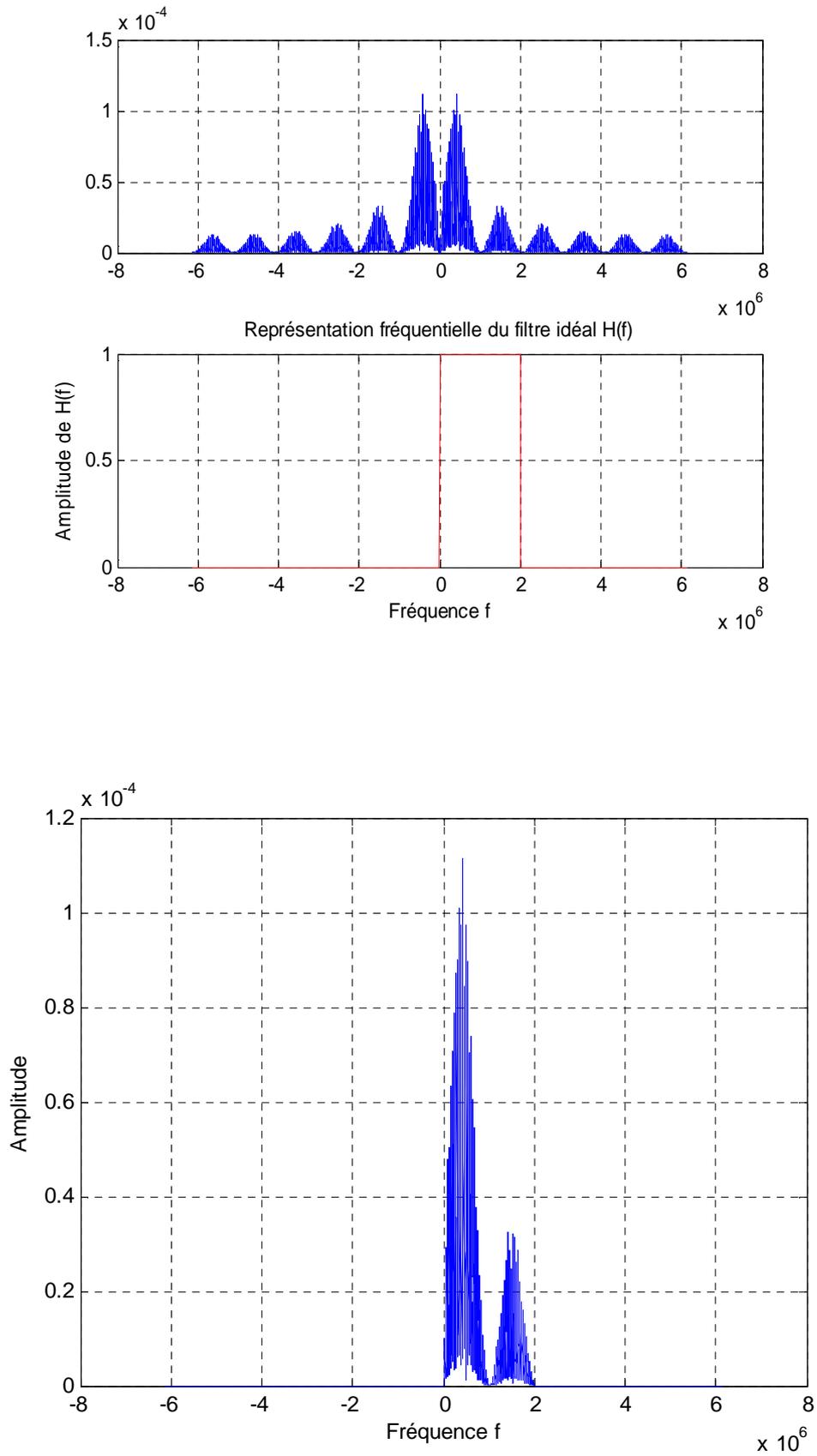


Figure (III-12) : Acquisition lobe droit

Lors de l'acquisition des signaux, on cherchera à déterminer le code correspondant à celui utilisé par le satellite qu'on cherche à poursuivre. Le résultat associé à l'acquisition du lobe gauche est présenté sur la figure (III-13a) tandis que celui associé au lobe droit est donné par la figure (III-13b). Dans ce cas on a considéré un décalage temporel égal à 611 chips et une fréquence Doppler égale à 3563500 Hz, On a examiné les deux figures, nous avons constaté que notre programme d'acquisition fourni des résultats précis, un pic important signalant ces deux décalages apparaît à la bonne position. A ce niveau on a combiné les deux voies, ceci en calculant le module, notre résultat final de l'acquisition est présenté par la figure (III-14), de même nous avons constaté que la position du pic résultant correspond aux données simulées.

Dans une deuxième étape, nous avons considéré l'acquisition d'un signal bruité par un bruit blanc Gaussien, ce qui s'approche de la réalité du signal GPS. Encore une fois nous constatons d'après les figures (III-15a), (III-15b) et (III-16) la présence d'un pic important permettant de déceler la présence du satellite et de tirer le code phase et le décalage Doppler aisément.

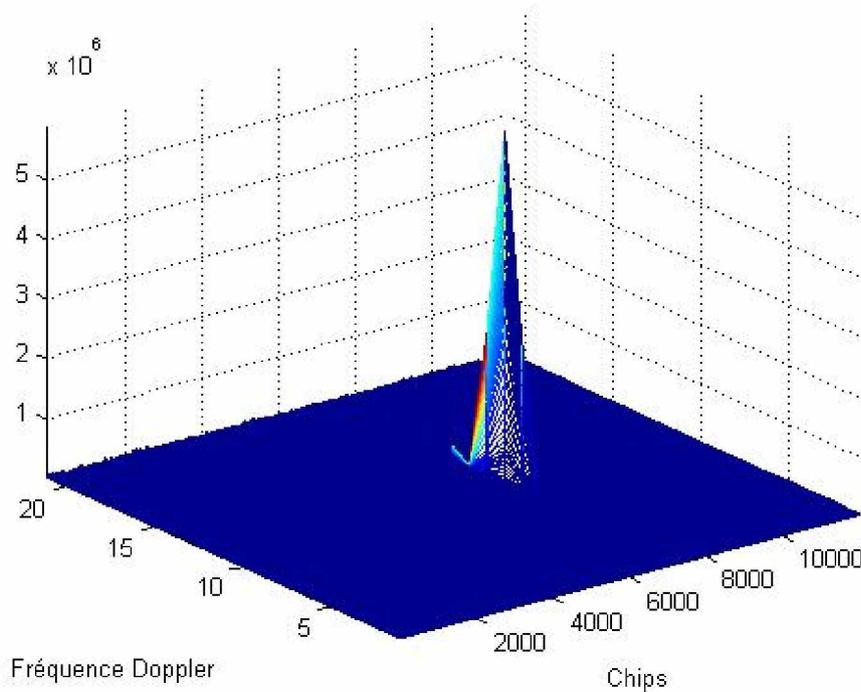


Figure (III-13a) :Acquisition du lobe gauche

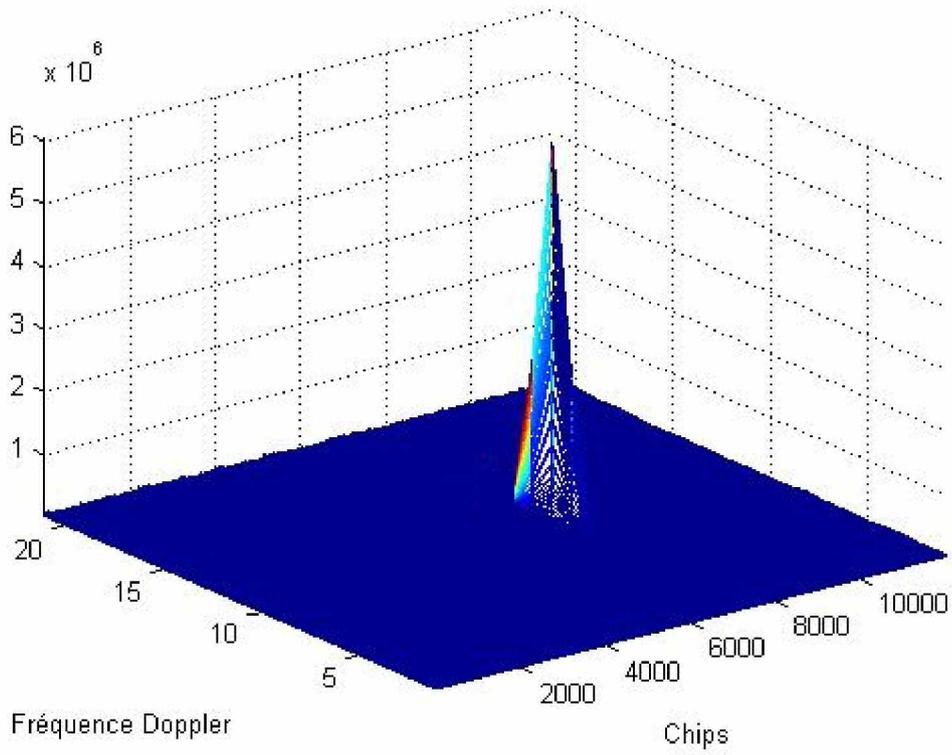


Figure (III-13b) : Acquisition du lobe droit

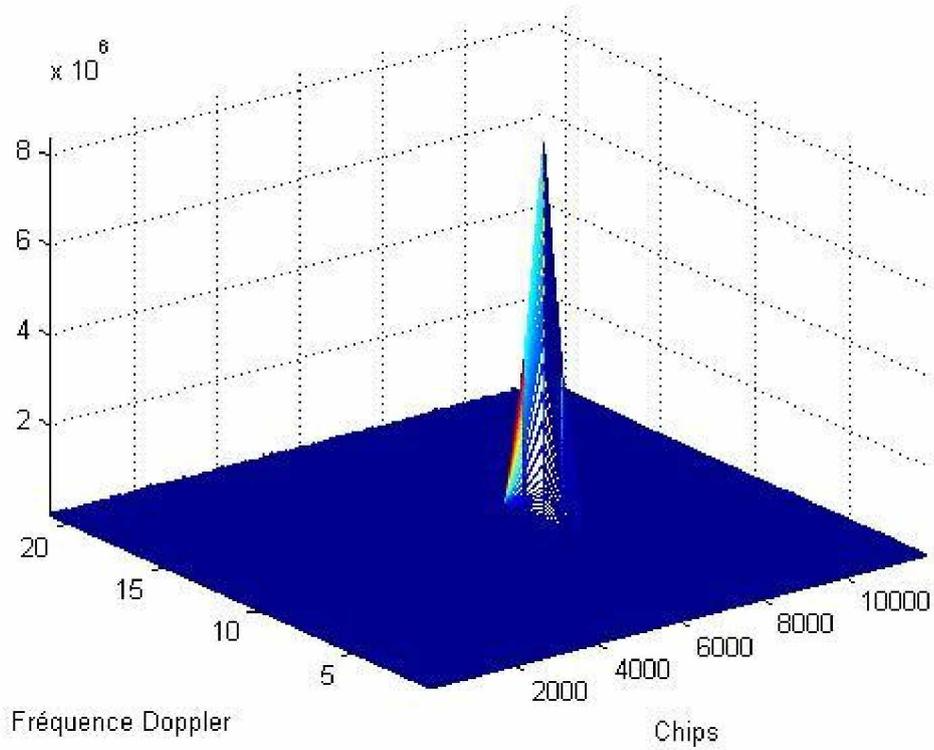


Figure (III-14) : Acquisition finale

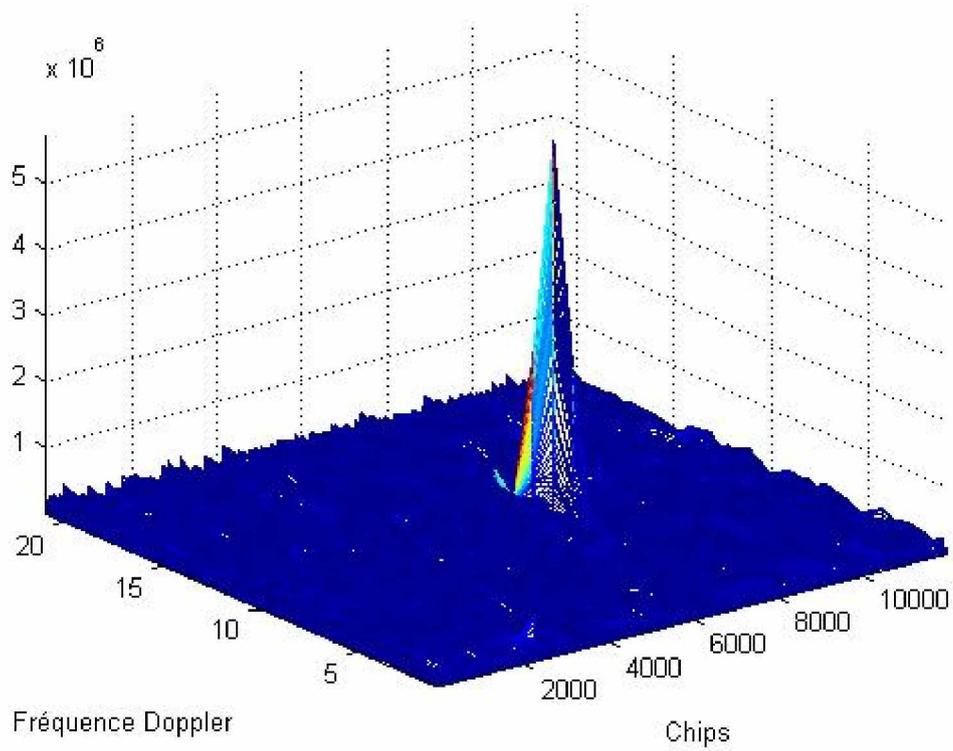


Figure (III-15a) :Acquisition lobe gauche avec bruit

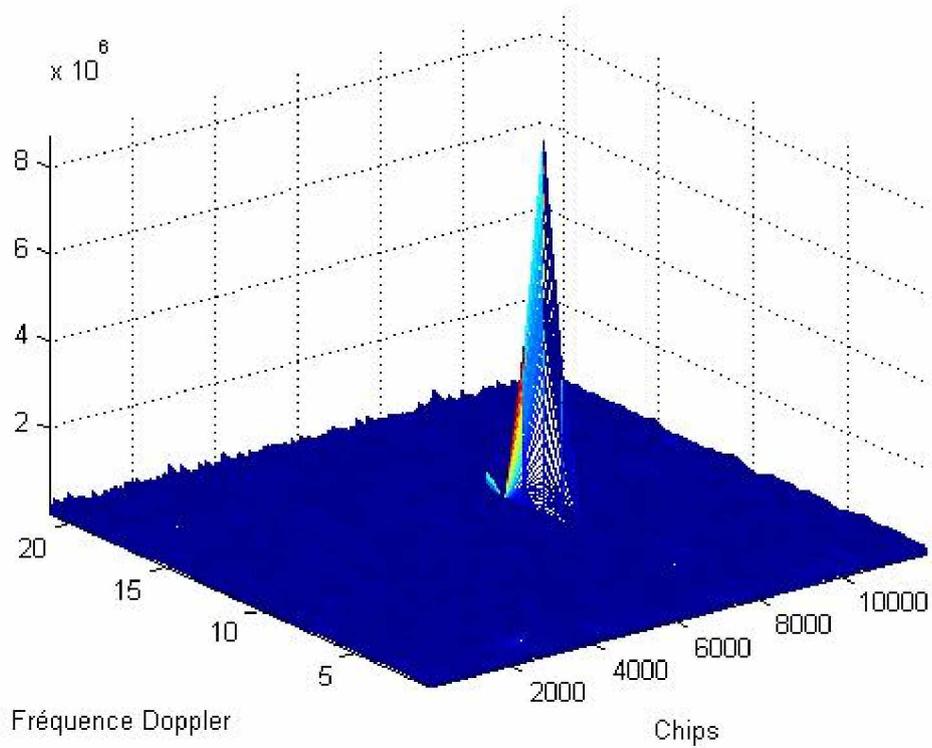


Figure (III-15b) :Acquisition lobe droit avec bruit

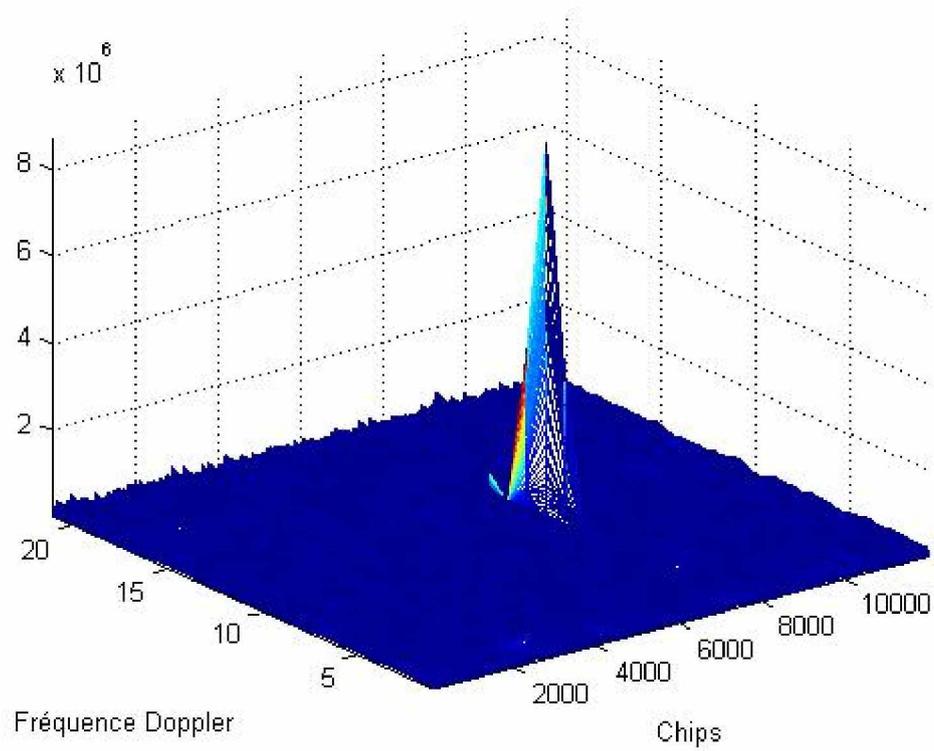
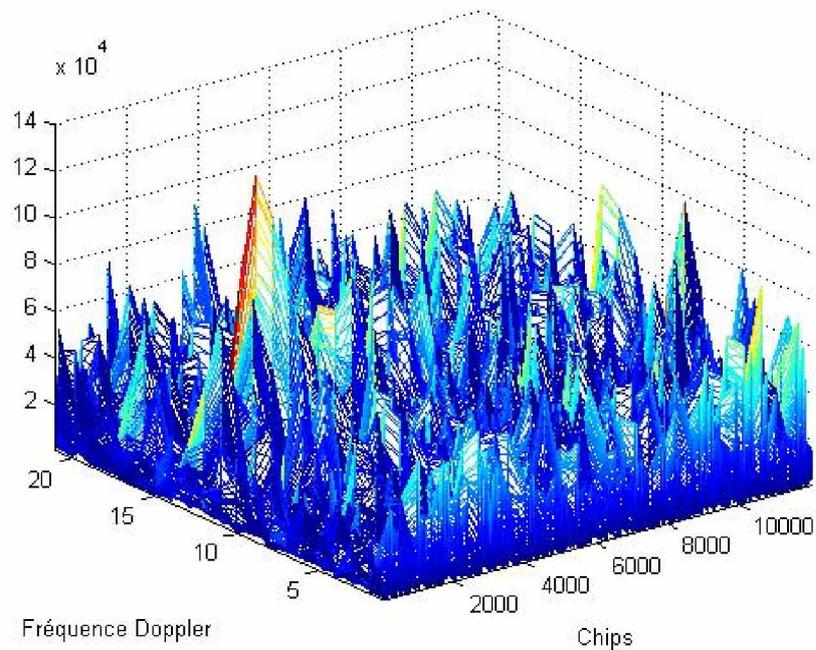
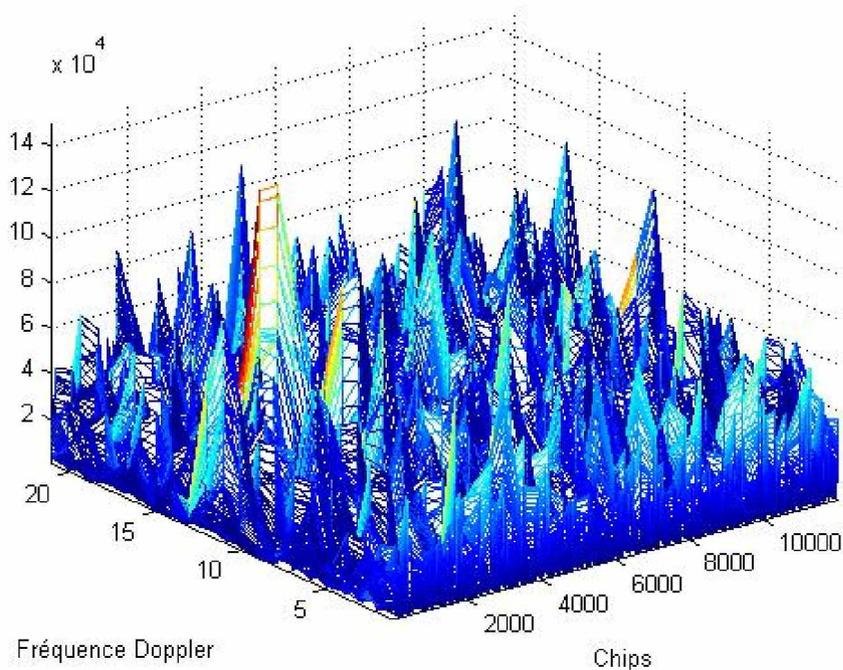


Figure (III-16) :Acquisition finale avec bruit

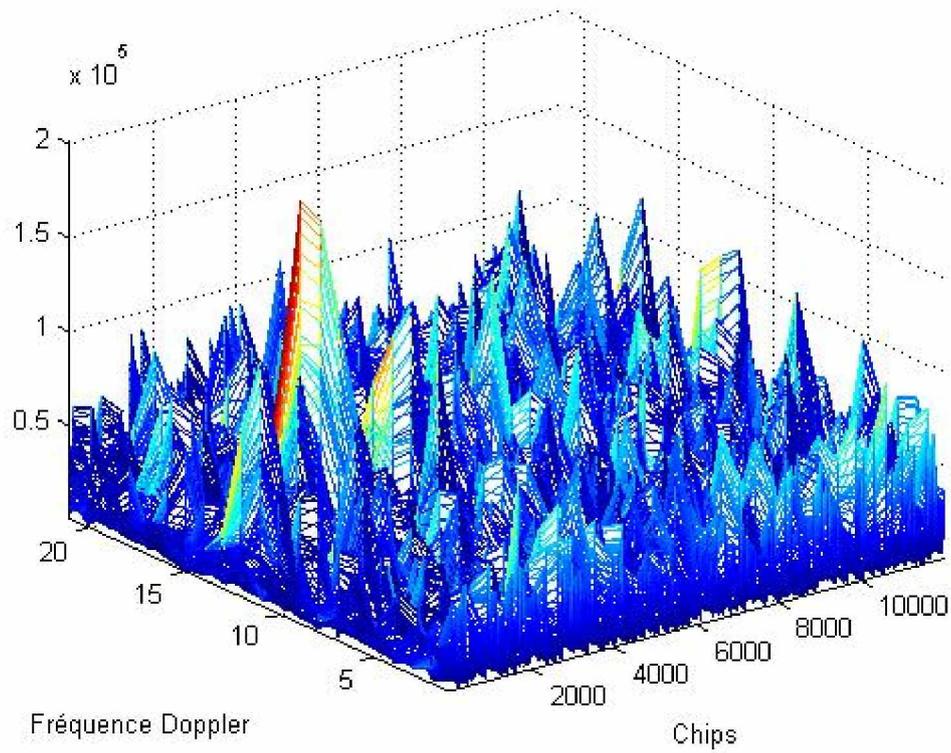
Finalement on s'intéresse à la simulation de l'acquisition dans le cas où le satellite considéré est non visible, les deux figures (III-17a) et (III-17b) correspondent à l'acquisition du lobe gauche et droit respectivement, tandis que la figure (III-18) représente la combinaison des deux voies. Nous constatons l'absence du pic précédent ce qui confirme le bon fonctionnement de notre programme.



Figures (III-17a) : Acquisition du lobe gauche



Figures (III-17b) : Acquisition du lobe droit



Figures (III-18) : Acquisition finale

CONCLUSION GENERALE

Nous avons, au cours de ce travail, cherché à décrire les principales caractéristiques du signal BOC afin d'identifier ces propriétés innovatrices.

Nous nous sommes plus particulièrement intéressés à l'évaluation de sa densité spectrale de puissance, puis à son acquisition. Une des différences principales avec le signal GPS actuellement utilisé est qu'en plus du signal modulé par le code et les données, le nouveau signal associé à GALILEO sera modulé par une sous porteuse supplémentaire, ce qui est intéressant quand on considère la phase d'acquisition du signal.

Ce projet nous a permis de comprendre les caractéristiques des signaux BOC, leur génération sous MATLAB et de développer un algorithme adapté à la détermination du retard et du déphasage des signaux. Nous avons pu réaliser un programme permettant de réaliser l'acquisition du signal, il fonctionne correctement et permet de bien accrocher le retard ainsi que la fréquence Doppler.

Finalement, Il reste donc de nombreux sujets à approfondir dans la connaissance du traitement des signaux modulé en modulation BOC pour pouvoir l'utiliser pleinement, notamment dans la phase de poursuite.

VI / INTERFACE :

Finalement, nous allons implémenter une interface finale permettant de visualiser les simulations réalisées, elle représentée par la figure (III-19) n note que les boutons situés à gauche permettent d'afficher les résultats liés à la corrélation, à travers ces boutons, on peut afficher la fonction de corrélation des codes PRN, particulièrement le PRN1, aussi la fonction de corrélation BOC(1,1) et BOC(10,5), aussi on peut afficher la fonction d'intercorrélation entre le code PRN et le code BOC.

Les boutons situés en bas de l'interface ont pour but d'analyser la densité spectrale de puissance, ainsi on peut afficher la densité spectrale de puissance liée au code C/A puis à travers le bouton 'Galileo' on trace la densité spectrale du code BOC, dans notre cas on a considéré BOC(1,1).

Les boutons situés à droite sont réservés à l'acquisition. En premier lieu c'est l'acquisition du code C/A qui sera analysée, nous considérons deux cas, l'un correspond à l'acquisition d'un satellite présent, l'autre pour un satellite absent. Puis nous passons à l'affichage des résultats de l'acquisition d'un signal BOC, l'acquisition sera appliquée sur le spectre gauche puis sur le spectre droit à travers les deux boutons 'AcquiG' et 'AcquiD', finalement la combinaison des deux acquisitions sera réalisée par le bouton 'combine'.

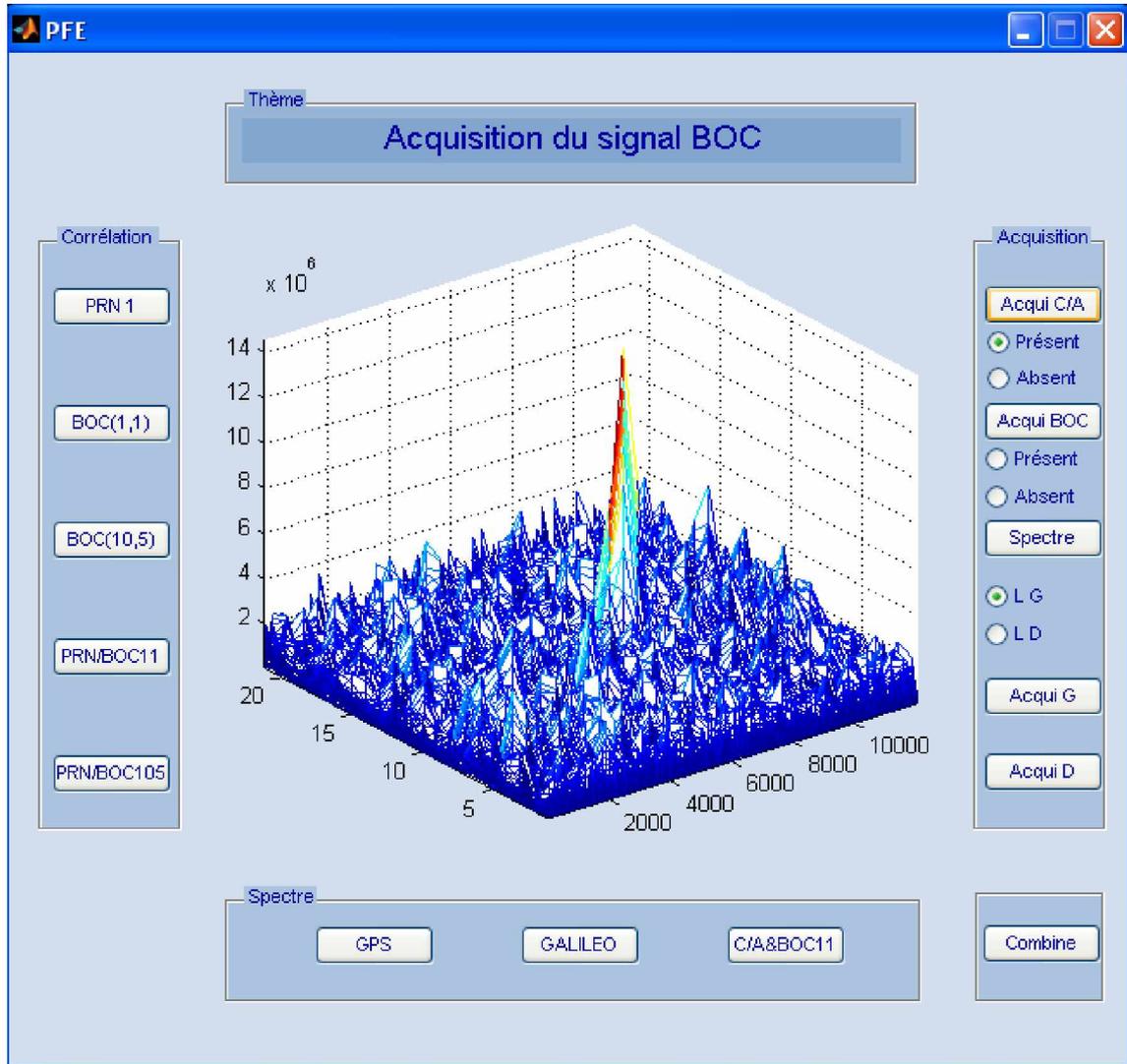


Figure III-19 : Interface

CONCLUSION GENERALE

Nous avons, au cours de ce travail, cherché à décrire les principales caractéristiques du signal BOC afin d'identifier ces propriétés innovatrices.

Nous nous sommes plus particulièrement intéressés à l'évaluation de sa densité spectrale de puissance, puis à son acquisition. Une des différences principales avec le signal GPS actuellement utilisé est qu'en plus du signal modulé par le code et les données, le nouveau signal associé à GALILEO sera modulé par une sous porteuse supplémentaire, ce qui est intéressant quand on considère la phase d'acquisition du signal.

Ce projet nous a permis de comprendre les caractéristiques des signaux BOC, leur génération sous MATLAB et de développer un algorithme adapté à la détermination du retard et du déphasage des signaux. Nous avons pu réaliser un programme permettant de réaliser l'acquisition du signal, il fonctionne correctement et permet de bien accrocher le retard ainsi que la fréquence Doppler.

Finalement, Il reste donc de nombreux sujets à approfondir dans la connaissance du traitement des signaux modulé en modulation BOC pour pouvoir l'utiliser pleinement, notamment dans la phase de poursuite.

BIBLIOGRAPHIE

Livres

**[1] -Global Positioning system Standard Positioning Service Signal Spécification
Edité par : NAVSTAR
2nd Edition, june 2 ,1995
Guide pour le positionnement GPS**

**[2]-Troisième impression, avec correction, avril 1998
Ressources naturelles canada*
(Ministre des approvisionnements et services canada 1994)**

[3]-GALILEO un enjeu, stratégique, technique (juin 2003)

Site Internet :

[4]-www.mitre.org/work/tech_papers/tech_papers_03/fante_tracker/fante.pdf

[5]-www.freepatentsonline.com/EP1315308.html

[6]-http://www.cs.tut.fi/~simona/Adina_FWCW04.pdf

[7]-forschung.unibw-muenchen.de/papers/3y08zxyfsmroclm0axcrf4jaulhdor.pdf

[8]-orschung.unibw-muenchen.de/papers/9crd6zl4wok9cbiouzsjeqldaezdvn.pdf

**[9]-[www.galileoju.com/doc/
Galileo%20standardisation%20document%20for%203GPP.pdf](http://www.galileoju.com/doc/Galileo%20standardisation%20document%20for%203GPP.pdf)**