REPUBLIC ALGERIEN DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR.YAHIA FARES MEDEA



FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT GENIE ELECRTIQUE

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme de Master

SPECIALITE : SYSTEMES DES TELECOMMUNICATIONS

Thème :

Étude et amélioration des performances de signaux GNSS

Réalisé par :

- *FATOUMI Mohamed Anes*
- *KALACHE Mohamed Ismail*

Proposé et encadré par :

Dr.KROBBA Ahmed

Année universitaire : 2021/2022

Remerciements

Avant tout nous tenons tout d'abord à remercier notre dieu tout puissant de nous avoir donné, la force et le courage, la santé, les moyens afin de pouvoir accomplir ce modeste travail.

Nous tenons à remercier chaleureusement notre encadreur Monsieur le Professeur 'KROBBA Ahmed', Maître de Conférences à l'université de l'USTHB, pour l'orientation, la confiance, la patience, qui ont constitué un apport considérable sans lesquels ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements et respects à tous les professeurs qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études.

D'autre part, nos vifs remerciements s'adressent à toute personne nous ayons aidé de près ou de loin durant notre travail.

Dédicace

Merci au Noble « Allah» Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail.

C'est avec profonde gratitude et sincères mots, Nous dédions ce modeste travail à Nos chers parents qui ont sacrifié leur vie pour nos réussite.

À Nos frères et sœurs

À Nos amis

A Nos oncles et nos tantes, à nos cousins, à toute la famille.

Et à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin au cours de la réalisation de ce mémoire de fin d'études.

Résumé

Les systèmes de positionnement par satellite sont indispensables dans nos jours, ils sont utilisés dans divers domaines tels que militaire et civil. La problématique du calcul de positionnement par satellite GPS est de déterminer la position le plus rapidement possible avec une précision, Plusieurs sources d'erreurs affectent sur la précision de positionnement par satellite. Dans ce travail nous avons utilisé la méthode de moindre carrées pondéré (WLS) pour estimer et corriger le signal satellite GPS et d'améliorer la précision du positionnement du récepteur GPS.

Mots clés : Systèmes de positionnement par satellite GNSS, système de positionnement GPS, modulation employées pour les signaux, pseudo-distance, méthode de moindre carrées pondéré (WLS).

abstract

Satellite positioning systems are indispensable nowadays, they are used in various fields such as military and civilian. The problem of GPS satellite positioning calculation is to determine the position as quickly as possible with precision. Several sources of error affect the precision of satellite positioning. In this work we used weighted least squares (WLS) method to estimate and correct the GPS satellite signal and improve the positioning accuracy of the GPS receiver.

Keywords: GNSS satellite positioning systems, GPS positioning system, modulation used for signals, pseudorange, weighted least squares (WLS) method.

ملخص

لا غنى عن أنظمة تحديد المواقع عبر الأقمار الصناعية في الوقت الحاضر، فهي تستخدم في مختلف المجالات مثل العسكرية والمدنية. تكمن مشكلة حساب تحديد المواقع عبر الأقمار الصناعية في تحديد الموقع في أسرع وقت ممكن وبدقة، حيث تؤثر عدة مصادر للخطأ على دقة تحديد موقع القمر الصناعي. في هذا العمل استخدمنا طريقة المربعات الصغرى الموزونة لتقدير وتصحيح إشارة الأقمار الصناعية لنظام تحديد المواقع العالمي وتحسين دقة تحديد المواقع لمستقبل GPS.

كلمات مفتاحية : أنظمة تحديد المواقع عبر الأقمار الصناعية، نظام تحديد المواقع، التعديل المستخدم للإشارات، المسافة الزائفة، طريقة المربعات الصغرى الموزونة.

Table des matières

Remerciements **..... I**

Dédicace **..... II**

Résumé III

Table des matières IV

Liste des figures VI

Liste des tableaux VII

Liste des abréviations VIII

Introduction générale 1

Chapitre I : **Introduction aux systèmes GNSS**

I.1.Introduction 3

I.2. Historique des systèmes de localisation satellitaires 3

I.3. Principe de fonctionnement des systèmes GNSS 5

I.3.1. Positionnement par trilatération 5

I.3.2. Fonctionnement d'un récepteur GNSS 7

I.4. Système de positionnement GPS 7

I.4.1. Architecture du système GPS 8

I.4.2. Services fournis par le GPS 9

I.4.3. Modernisation du système GPS 9

I.5. Les différents systèmes mondiaux de navigation par satellite 10

I.5.1. Système russe GLONASS 10

I.5.2. Système satellitaire GALILEO 11

I.5.3. Système BeiDou chinois 12

I.5.4. Le système QZSS (Quasi-Zenith Satellite System) 13

I.5.5. Système de navigation NavIC 14

I.5.6. Les systèmes d'augmentation spatiale SBAS 15

I.6. Interopérabilité entre les systèmes 15

I.7. Conclusion 18

Chapitre II : **Signaux GNSS**

II.1. Introduction 19

II.2. Caractéristiques des signaux GNSS 19

II.3. Structure des signaux GNSS 20

II.3.1. Puissance des signaux 20

II.3.2. Fréquence centrales des signaux 21

II.3.3 Les codes pseudo-aléatoires 22
II.4. Modulation employées pour les signaux GNSS 24
II.4.1 Modulation BPSK (Binary Phase-Shift Keying) 24
II.4.2. Modulation BOC (Binary Offset Carrier) 26
II.5. Réception du signal GPS 27
II.5.1. Acquisition du signal GNSS 28
II.5.2. Poursuite du signal GNSS 29
II.6. Les messages de navigation 30
II.7. L'effet Doppler 30
II.8. Définition des rapports signal à bruit pour un récepteur GNSS 33
II.8.1 Le rapport SNR 33
II.8.2 Le rapport C/N0 33
II.9. Les sources d'erreurs du GNSS 34
II.9.1. Les horloges 34
II.9.2. L'ionosphère 34
II.9.3. La troposphère 35
II.9.4. Les multi trajets 35
II.9.5. Erreurs orbitales des satellites 35
II.9.6. Bruit du récepteur 36
II.10. Mesure de pseudo-distance 36
II.11. Positionnement des Points à l'aide de la pseudo-distance 37
II.11.1 La méthode des moindres carrés pondérés (WLS) 37
II.12. Conclusion 40
Chapitre III : **Simulation et résultats basé sur la méthode WLS**
III.1. Introduction 41
III.2. Logiciel utilisé 41
III.3. Architecturé de système GPS basé sur la méthode WLS 42
III.4. Description des bases de données utilisées 42
III.5. Simulation et résultats 43
III.5.1. Estimation la position du récepteur par la méthode de covariance 43
III.5.2. Estimation la position du récepteur par la méthode de WLS 47
III.6. Conclusion 49
Conclusion générale 50
Bibliographies 51

Liste des figures

Figure 1.1. Constellation satellitaire GPS. 4
Figure 1.2. Constellation satellitaire de Galileo. 4
Figure 1.3. Principe du positionnement par trilatération. 6
Figure 1.4. Positionnement par trilatération avec des mesures erronnées. 7
Figure 1.5. Principe de fonctionnement pour le secteur contrôle. 8
Figure 1.6. Satellite QZSS 14
Figure 1.7. Satellite NavIC 15
Figure 1.8. Distribution des canaux GNSS. 17
Figure.2.1. Générateur des codes d'étalements C/A code. 23
Figure.2.2. Auto-corrélation et corrélation-croisé des codes des satellites (C/A). 23
Figure 2.3. La forme du signal L1. 25
Figure 2.4. Génération de signaux de diffusion GPS. 25
Figure 2.5. Forme du code BOC (1,1). 27
Figure 2.6. signal BOC. 27
Figure 2.7. Schéma bloc des opérations réalisées par le récepteur. 28
Figure 2.8. Exemples de résultats d'acquisition 29
Figure 2.9. Schéma bloc de l'étape de poursuite. 30
Figure 2.10. Principe de l'effet Doppler. 31
Figure 2.11. Géométrie de la dynamique satellite/utilisateur. 31
Figure 2.12. Effet Doppler sur la fréquence porteuse et les codes PRN. 32
Figure 2.13. Mesure de pseudo-distance. 36
Figure 3.1. Architecture de positionnement par WLS. 42
Figure 3.2. Organigramme de la méthode de covariance. 43
Figure 3.3. Satellite GPS et position du récepteur. 44
Figure 3.4. Érreur d'horloge du récepteur GPS. 45
Figure 3.5. Érreur d'horloge relative au satellite. 45
Figure 3.6. Position du récepteur GPS. 46
Figure 3.7. Affichage de l'intensité du signal. 47
Figure 3.8. États de position décalés par rapport aux médianes. 48
Figure 3.9. Solution des moindres carrés pondérés (WLS). 49

Liste des tableaux

Tableau 1.1. Comparaison entre les systèmes GNSS 17

Tableau 2.1. Puissances minimales de réception des signaux GPS et Galileo. 21

Tableau 2.2. Signaux et puissance minimum des systèmes GPS, GLONASS et GALILEO. 22

Tableau 3.1. Position des satellites. 44

Tableau 3.2. Résolution itérative pour delta x, delta y et delta z. 45

Tableau 3.3. Les différents erreurs. 47

Liste des abréviations

Abréviation	Désignation
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Navigation System
Glonass	Globalnaya Navigatsionnaya sputnikovaya sistema
Qzss	Quazi-zenith satellite system
GPS-NAVSTAR	Global Positioning System– NAVigation Satellite Timing And Ranging.
URSS	Union des républiques socialistes soviétique
DOD	Depaartement of Defence
PRN	Pseudo Random Noise
UGSN	Unité de Génération du Signal de Navigation
HPA	Amplification Haute Puissance
LNA	LOW Noise Amplifier (Amplificateur Faible bruit)
ADC	Analog-to Digital Converter (Convertisseur Analogique Numérique).
PPS	Precise Positionning Service
SPS	Standard Positionning Service
PRS	Public Regulated Service
GTSB	Galilio System Test Bed
GIOVE	Galilio In-Orbit Validation Element
IOV	In Orbit Validation
CNSS	Compass/Beidou Navigation Satellite System
DS-CDMA	Direct Sequence Code Division Multiple Access
BPSK	Binary Phase Shift Keeying
(C/A)	(Coarse/Acquisition) code (Acquisition Rapide)
P(y)	Pecise code (code précise)
CDM	Code Devision Multiplexing
BOC	Binary Offset Carrier

FLL	Frequency Lock Loop
PLL	Phase Lock Loop
DLL	Delay Lock Loop
SA	Selective Availability (accès sélective)
AS	Anti-Spoofing (Antibrouillage)
WLS	Weighted least square

Introduction générale

Introduction générale

Chacun de nous mène une certaine forme de navigation dans notre vie quotidienne. Aller au travail marcher vers un magasin exige que nous utilisions les compétences fondamentales de navigation. Pour la plupart de nous, ces compétences nécessitent l'utilisation de nos yeux, le sens commun, et les repères. Cependant dans certains cas où une connaissance plus précise de notre position, du chemin de destination, ou du temps de transit vers une destination souhaitée est nécessaire, les aides à la navigation autres que les repères sont utilisés.

Le Global Navigation Satellite System (GNSS) est un système de radionavigation basé sur des satellites qui propose aux usagers civils et militaire avec des services de géolocalisation, de navigation, 24 heures sur 24 et dans le monde entier. Il suffit d'être équipé d'un récepteur de positionnement par satellite pour connaître la position d'un objet. GPS fournit des informations précises en matière de positionnement à un nombre illimité de personnes, sous toutes les conditions météorologiques, de jour comme de nuit, partout dans le monde.

Depuis la mise en place du système GPS au cours des années 1980-1990, les applications de navigation par satellite se développent et s'étendent dans de multiples domaines. Conçus principalement pour des applications militaires, les signaux GPS sont maintenant couramment utilisés dans des applications civiles telles que les transports maritimes, aériens et terrestres, la géologie, les travaux publics, la prospection pétrolière, l'agriculture, et de nouvelles applications ne cessent de voir le jour.

Plusieurs sources d'erreurs influent sur la précision de positionnement d'un récepteur tel que le décalage d'horloge entre le satellite qui a une horloge atomique avec une grande précision et l'horloge du quartz du récepteur qui est moins précise, les couches ionosphère et troposphère qui créent un retard de propagation des signaux des satellites arrivant aux erreurs induites par les signaux multi trajets et le bruit généré par les récepteurs GPS.

Dans la littérature, plusieurs techniques utilisées ont été développées pour réduire ces erreurs au niveau de transmission et d'améliorer la précision de positionnement des

récepteurs GPS. Dans ce travail on a utilisé la méthode d'estimation moindre carrée pondérées (WLS) pour estimer et corriger les signaux GPS.

Ce mémoire est organisé de la manière suivante :

Le premier chapitre, sera consacré aux généralités sur les systèmes de navigation global par satellites, le principe de fonctionnement, le système de positionnement GPS et les différents systèmes de navigation par satellite.

Dans le second chapitre, nous présenterons les caractéristiques et la structure des signaux GNSS, les modulations utilisées pour transmettre un signal du satellite vers le récepteur ainsi que le message de navigation et les différentes sources d'erreurs qui influent sur la transmission, aussi nous présenterons la pseudo-distance et la méthode WLS.

Le dernier chapitre est dédié à une simulation et résultats, avec différentes méthodes d'estimation de position du récepteur GPS. Le manuscrit se termine par une conclusion générale.

Chapitre I

Introduction aux systèmes GNSS

I.1.Introduction

La navigation par satellite est une technologie largement utilisée et indispensable dans notre vie quotidienne. Les systèmes qui offrent ce service sont connus sous le nom de GNSS systèmes globaux de navigation par satellite. Il s'agit de la radionavigation basée sur des satellites qui proposent aux usagers civils des services de géolocalisations, Le système GPS fournit des informations précises en matière de positionnement sous toutes les conditions météorologiques, partout dans le monde. Dans ce chapitre, nous introduisons le GNSS. Nous commencerons par présenter un historique sur les systèmes de localisations après on parle sur le principe de fonctionnement en suite le système de positionnement GPS et on terminera par présenter les principales constellations : GPS pour les Américains, Glonass pour les Russes, Galileo pour les Européens, Beidou pour les Chinois, Qzss pour les Japonais et NavIC pour les Indiens.

I.2. Historique des systèmes de localisation satellitaires

L'évolution des technologies spatiales depuis le milieu du siècle dernier a abouti, aujourd'hui, vers de véritables systèmes de positionnement et de navigation par satellites, opérationnels à l'échelle du globe terrestre. La date du 4 octobre 1957, correspondant au lancement du premier satellite artificiel (Spoutnik) par l'URSS, est souvent considérée comme capitale vis-à-vis de l'ère de la technologie spatiale. A partir de cette date, les observations réalisées sur des satellites artificiels en orbite autour de la terre ont progressivement supplanté l'astronomie de position engendrant le développement de nombreux systèmes de positionnement et de navigation toujours plus performants. Ces innovations trouvèrent rapidement des finalités, tant dans le domaine militaire que civil ou scientifique.[1]

En décembre 1973, le Département de la Défense des Etats-Unis (DoD ou US Department of Defense) lance son programme GPS-NAVSTAR (Global Positioning System– NAVigation Satellite Timing And Ranging). Développé initialement à des fins militaires, ce système révolutionnaire de positionnement par satellites allait offrir des possibilités inégalées jusqu'alors par les systèmes antérieurs. En effet, la couverture satellitaire actuelle du GPS est telle qu'à tout moment, depuis n'importe quel endroit du globe et quelles que soient les conditions atmosphériques, un utilisateur peut observer un minimum de quatre satellites simultanément, lui permettant ainsi de

connaître sa position et sa vitesse de manière instantanée. La constellation GPS est présentée sur la Figure 1.1.

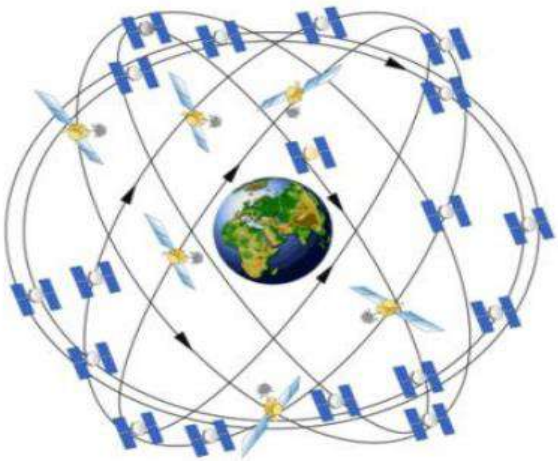


Figure 1.1. Constellation satellitaire GPS.

Le potentiel du GPS ne tarda pas à être exploité pleinement dans bon nombre d'applications civiles. Cependant, les Etats-Unis possèdent la faculté de liliter l'usage du GPS aux seules personnes autorisées au moyen de deux mécanismes spécifiques : l'Antispoofing (AS) et la selective Availability (SA).

A l'instar des Etats-Unis, la Russie a également développé son propre système de positionnement et de navigation par satellites nommé GLONASS (Globalnaya Navigatsionnaya sputnikovaya sistema). Ce système fut également mis sur pied pour répondre à des exigences militaires.

Contrairement aux systèmes GPS et GLONNAS, Galileo a été développé dans le but premier d'être exploité pour des applications civiles.

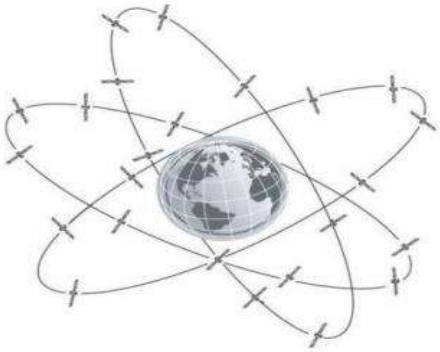


Figure 1.2. Constellation satellitaire de Galileo.

I.3. Principe de fonctionnement des systèmes GNSS

Le but du système mondial de positionnement par satellite est de fournir un position du récepteur, sa vitesse et temps de déplacement et détermination de la position. Le système de radionavigation des utilisateurs situés près de la terre se compose de les satellites utilisent le principe du positionnement multilatération, où la distance géométrique entre un satellite récepteur au sol et l'émetteur proche du satellite sont obtenus en mesurant le temps de propagation d'un signal spécifique émis par un satellite.

Quatre grands systèmes de positionnement par satellite (GPS, Glonass, Galileo et Beidou) utiliser le même principe de fonctionnement : chaque satellite en lance un à la suite. Les signaux transportent des informations sur les positions des satellites et l'heure exacte émis (par intégré dans satellite), l'utilisateur est équipé d'un récepteur qui mesure l'instant de réception les signaux des satellites dans sa ligne de mire.

Déterminer l'emplacement du récepteur implique de résoudre les équations quatre inconnues : la position géographique du récepteur (latitude, longitude), l'altitude et l'horloge est mesurée par le récepteur. D'où la nécessité de quatre satellites "visibles" identifier un poste (en prime, un sous-produit utilisable : mesure précise la météo). Faites courir le récepteur sur toute la surface de la Terre (ou à proximité) : avions, satellites), il doit pouvoir "voir" en permanence au moins 4 satellites, et la distribution géométrique des satellites au-dessus est la plus uniforme possible. Ceci explique le grand nombre de satellites à mettre en orbite : vingt-quatre satellites représentent le minimum requis pour le GPS et le GLONASS actuels, et cela la valeur minimale pour les 4 systèmes futurs suivants est de trente.

I.3.1. Positionnement par trilatération

Les systèmes de positionnement par satellites se fondent sur le principe de trilatération. Celui-ci consiste à calculer notre position en connaissant la distance qui nous s’épare de plusieurs points de repère ainsi que la position de ces points de repère. Il ne doit pas être confondu avec le principe de triangulation qui utilise aussi des points de repère, mais calcule la position en fonction des angles mesurés, et non des distances.

La Figure 1.3 présente le principe du positionnement par trilatération. Il y a ici trois émetteurs, représentés par les satellites. Leurs positions sont considérées comme étant connues. Le récepteur, représenté par la voiture, connait les distances d_b , d_r et d_v qui le séparent de chacun des émetteurs. Grâce à cette connaissance, les principes géométriques lui permettent de savoir qu'il se situe quelque part sur les cercles bleu, rouge et vert. Le croisement des trois cercles indique alors au récepteur sa position. Pour un positionnement en 2D, trois mesures suffisent à établir la position. Pour un positionnement en 3D, les cercles deviennent des sphères, et il faut alors au minimum quatre mesures.

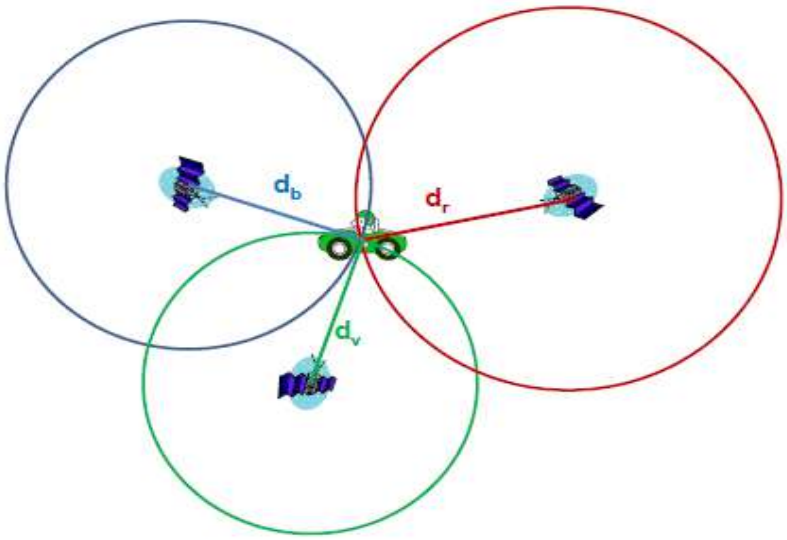


Figure 1.3. Principe du positionnement par trilatération.

Si les mesures de distance sont parfaitement exactes, il n'y a pas de souci pour établir la position à l'intersection des cercles. Si par contre il y a un biais sur les mesures, les cercles ne se croisent plus en un point unique. La Figure 1.4 illustre ce problème. Sur ce schéma, chacune des mesures d_b, d_r et d_v, est un peu plus grande que la distance réelle entre le satellite et le récepteur. Les cercles définissent en conséquence une zone d'incertitude, indiquée en gris.[2]

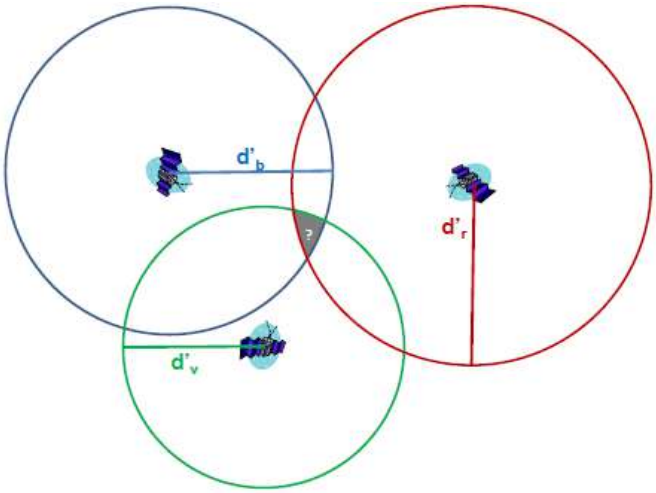


Figure 1.4. Positionnement par trilatération avec des mesures erronnées.

I.3.2. Fonctionnement d'un récepteur GNSS

Le principe de positionnement par trilatération est très simple a priori, mais la difficulté réside dans la mesure des distances séparant le récepteur des satellites visibles. Pour que cette mesure puisse être réalisée, les signaux GNSS ont été conçus avec des propriétés particulières permettant au récepteur d'estimer leur temps de vol, c'est à dire le temps qu'ils auront mis à parcourir la distance satellite/récepteur.

Le récepteur lui-même se décompose en plusieurs "étages" aux missions spécifiques permettant d'aboutir au calcul de la position.[2]

I.4. Système de positionnement GPS

Le système NAVSTAR (NAVigation System by Timing And Ranging), plus connu sous le nom de GPS (Global Positioning System) est un système de positionnement par satellites développé et géré par le département de la défense (USDoD) des Etats-Unis. Il a été constitué à partir de 1978 avec le lancement des premiers satellites et a été déclaré officiellement opérationnel en février 1994. Depuis, ce système est bien entretenu et est utilisé actuellement dans de nombreuses applications civiles. Après sa description, nous évoquerons ses évolutions. Les satellites de ce système émettent en continu des signaux qui peuvent être reçus par un récepteur adapté se trouvant partout sur la terre ou dans les couches basses de l'atmosphère. Ce récepteur utilise les informations contenues dans les signaux pour calculer sa position (longitude, latitude et altitude) et le temps. Ces informations contiennent des paramètres du système, des

données du satellite reçu et des données communes à tous les satellites.[3] Le système GPS est composé de trois segments.

I.4.1. Architecture du système GPS

a- Le segment spatial

Ce segment comporte un minimum de 24 satellites répartis sur six orbites planes quasi-circulaires à raison de quatre satellites par orbite. Ces orbites ont toutes une inclinaison de 55° par rapport au plan de l'équateur. L'altitude est d'environ 20200 km et la période d'à peu près 11 heures 58 minutes. Depuis les premiers lancements, trois classes de satellites ont été développées (Figure 1.1).

b- Le segment de contrôle

Ce segment est composé d'un centre de calcul (MCS : Master Control Station) situé dans une base américaine à Colorado Springs (Etats-Unis), de trois émetteurs et de cinq stations de contrôle réparties à travers le monde (Hawaii, Kwajalein, Ascension Island, Diego Garcia, Colorado Springs). Les stations de contrôle suivent tous les satellites en vue, en enregistrant leurs données de navigation. Ces informations sont traitées au centre de calcul MCS pour déterminer les orbites des satellites et mettre à jour le message de navigation de chaque satellite. L'information mise à jour est transmise à chaque satellite par l'intermédiaire des antennes émettrices.

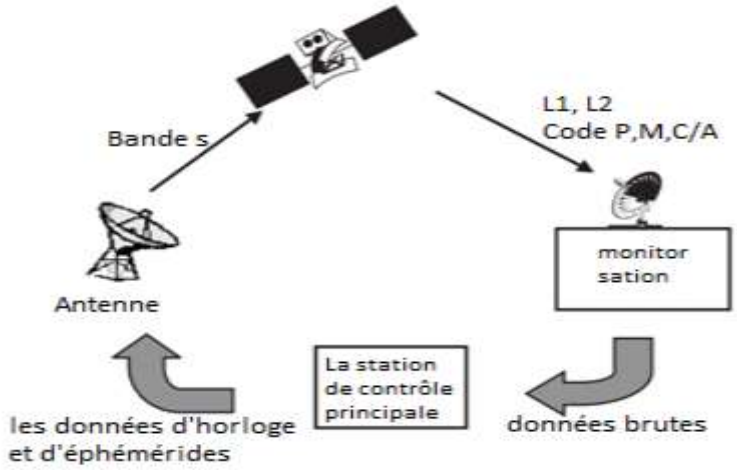


Figure 1.5. Principe de fonctionnement pour le secteur contrôle.

c- Le segment utilisateur

Ce segment est composé des récepteurs pouvant recevoir les signaux des satellites du système. Ces récepteurs fournissent la position, la vitesse et le temps précis à

l'utilisateur à tout instant et à tout endroit du globe terrestre. Ils sont très variés dans leur conception et leur fonction selon leur utilisation, leur précision ou la durée d'acquisition des signaux au début de chaque utilisation. Ils disposent dans leur mémoire des répliques de codes PRN des satellites du système GPS. Trois types de récepteurs ont été développés selon les architectures des canaux de réception suivantes (les 2 premières sont désormais obsolètes) : les récepteurs séquentiels, les récepteurs multiplex et les récepteurs multicanaux. [4]

I.4.2. Services fournis par le GPS

Le GPS fournit deux types de positionnement le positionnement précis (PPS) et le positionnement standard (SPS), seulement le positionnement standard est librement disponible le positionnement précis est réservé à l'armée américaine.

a- Le PPS

Le PPS (précise positioning service) est un système de positionnement précis. L'erreur de positionnement maximale dans 95 % des cas est inférieure à 21 mètres en horizontale et à 27.7 mètre en vertical. L'heure peut être obtenue avec une précision de 100 nanosecondes. Les signaux du PPS sont transmis sur deux fréquences différentes, appelées L1, L2 et qui contiennent le code de précision ou p-code. Le p-code est généralement crypté, le mode A-S (anti-spofing) est activé. Le signal L2 est également utilisé pour déterminer le retard introduit par les couches de l'ionosphère. Le PPS n'étant normalement pas accessible aux civils, nous ne décrirons pas ce système.

b- LE SPS

LE SPS (standard positioning service) est la version civile du GPS communiqué sur une seule fréquence L1, et qui contient le code d'acquisition dit "grossier" (C/A, coarse acquisition code), ainsi que les différents messages de navigation. En cas de conflit, l'armée américaine peut supprimer totalement toute utilisation du GPS dans la zone de conflit, son fonctionnement restant inchangé en dehors de la zone de conflit.

I.4.3. Modernisation du système GPS

Le gouvernement des États-Unis améliore constamment la performance des services GPS pour conserver son leadership dans la navigation par satellite face à la concurrence d'autres systèmes de navigation par satellite. Dans le cadre du programme de modernisation du GPS, les segments spatiaux et de contrôle sont mis à niveau pour apporter de nouvelles fonctionnalités afin d'améliorer les performances du système.

Une partie importante de ce programme consiste à ajouter de nouveaux signaux pour les utilisateurs civils et militaires. Ces nouveaux signaux sont introduits progressivement au fur et à mesure que de nouvelles générations de satellites sont lancées pour remplacer les précédentes. Actuellement, trois nouveaux signaux appelés L2C, L5 et L1C sont introduits pour un usage civil. [5]

a- Bande GPS L1C

L1C est un signal à usage civil, qui est diffusé à partir de satellites GPS III. Le signal militaire modernisé (M-Code) est conçu pour un usage militaire et est destiné à remplacer le code P(Y). Le M-Code offre une acquisition de signal plus robuste avec une meilleure sécurité en termes, d'authentification et de confidentialité.

b- Bande GPS L2C

Le GPS transmet dans la bande L2 (1227,60 MHz) un signal civil modernisé connu sous le nom de L2C. Dans les blocs IIR-M, IIF deux codes PRN (Pseudo Random Noise) supplémentaires sont transmis. Il s'agit du code L2 Civil Modéré (L2 CM) et du code L2 Civil Long (L2 CL) avec des longueurs de 10230 bits et 767250 bits respectivement. Les signaux L2C permettent aussi de se localiser plus rapidement, d'améliorer la fiabilité et d'avoir un signal satellite à des endroits difficiles. Les signaux L2C sont émis avec une puissance supérieure aux signaux L1C.

c- Bande GPS L5

Le signal GPS L5 (1176,45 MHz) est un nouveau signal dans le plan de modernisation du GPS, il génère deux codes PRN, qui sont appelées XA et XB avec des longueurs de 8190 bits et 8191 bits respectivement. Le signal L5 est émis dans une fréquence réservée au service de sécurité de l'aéronautique. Ces signaux donnent une meilleure sécurité dans les avions, ainsi que la circulation d'un plus grand nombre d'avions, de trains et de navires.

I.5. Les différents systèmes mondiaux de navigation par satellite

I.5.1. Système russe GLONASS

Le système de navigation par satellite russe GLONASS a été développé par l'exURSS depuis 1976 mais est actuellement géré par l'agence spatiale fédérale russe. Les premiers lancements de satellites ont été effectués en 1982 pour finir en 1995. Après cette date, ce système a connu des problèmes de maintenance qui ont limité le système à six satellites en état de fonctionnement en 2000. Le gouvernement russe affiche

cependant une ambition forte de remise en service du système. Au début de l'année 2008, quartorze sur seize satellites en orbites sont opérationnels. Le système est basé sur le même principe de fonctionnement que le GPS avec trois segments : un segment spatial, un segment de contrôle et un utilisateur. Au complet, le segment spatial GLONASS doit être composé de 24 satellites répartis sur trois plans orbitaux à 19100 km d'altitude. Chaque plan est incliné de 64,8° par rapport à l'équateur et chaque satellite à une période de rotation d'environ 11 heures et 15 minutes. Comme le GPS, GLONASS produit deux types de signaux sur deux porteuses dans la bande de fréquence L. L'un des signaux avec une précision standard (sous-bande L1 à 1602 MHz) est accessible pour un usage civil dans le monde entier et l'autre d'une précision élevée est destiné à l'utilisation militaire russe (sous-bande L2 à 1246MHz). [6]

I.5.2. Système satellitaire GALILEO

L'augmentation des applications de la navigation par satellites, le manque de garantie de la disponibilité du service des systèmes GPS et GLONASS gérés par les armées américaines et russes, ainsi que le souci d'indépendance technologique et stratégique vis à vis des Etats-Unis et de la Russie ont poussé l'Union Européenne à créer son propre système de navigation par satellites. Baptisé GALILEO, ce système a été conçu par la Commission Européenne et l'Agence Spatiale Européenne (ESA). Dans un premier temps, cette initiative européenne de participer à la mise en œuvre des systèmes de positionnement s'est d'abord concrétisée par le lancement du programme EGNOS (European Geostationnary Navigation Overlay Service). Ce programme est destiné à l'amélioration de la qualité du service de GPS. Il fait partie des dispositifs complémentaires de navigation existant actuellement. L'avantage significatif de GALILEO, dont la mise en service est prévue pour 2013, est que ce système fournira une précision et une garantie sur la fiabilité de son service et sera interopérable avec le système GPS. Ce système sera capable d'informer l'utilisateur, par un message d'intégrité, d'un disfonctionnement du système [7]. Cela permettra son utilisation dans des domaines où la sécurité est cruciale.

Le système offrira cinq services dont les performances dépendront de l'usage de chacun [8] :

- le service ouvert (OS : Open service), destiné aux applications grand public (position, vitesse et date), il sera gratuit et couvrira toute la terre.

- le service commercial (CS : Commercial Service), de même performance que le service ouvert auquel sera ajouté des données de correction et une information sur l'intégrité. Son accès est restreint par cryptage aux services d'exploitation commerciale.
- le service de sûreté de la vie (SOL : Safety Of Life), de même performance que le service de base avec une information additionnelle de son intégrité élevée. Il sera restreint aux groupes d'utilisateurs spécifiques tels que les hôpitaux, les pompiers, les transports....
- le service public régulé (PRS : Public Regulated Service). Ce service offrira une garantie sur la continuité des applications de sécurité et de défense des Etats européens et leur alliés. Il sera contrôlé par l'Union Européenne et les gouvernements des Etats membres. Crypté par des codes spécifiques, son accès sera autorisé par les Etats membres de l'Union Européenne.
- le service d'aide à la recherche et au sauvetage (SAR : Search And Rescue) : Ce service permettra la diffusion et la localisation de messages de détresse.

I.5.3. Système BeiDou chinois

Le BDS est un système de navigation par satellite multifonction qui intègre de nombreux services. À son achèvement prévu pour 2020, BDS fournira aux utilisateurs mondiaux des services PVT. Il fournira une forme d'UTC traçable au National Time Service Center (NTSC) de l'Académie chinoise des sciences notée UTC (NTSC). En outre, il sera également fournir aux utilisateurs en Chine et dans les régions avoisinantes un service différentiel étendu avec une précision de positionnement supérieure à 1 m, ainsi qu'un service de messages courts (SMS). [9] Ces services peuvent être classés dans les trois types suivants :

a. **Service de radionavigation par satellite (RNSS) :** le RNSS comprend les services de navigation de base offerts par toutes les constellations GNSS, à savoir le PVT. Comme pour les autres constellations GNSS, utilisant des signaux provenant de plusieurs fréquences, BDS fournit aux utilisateurs deux types de services. Les services ouverts sont disponibles gratuitement pour les utilisateurs du monde entier. Les services autorisés ne sont disponibles que pour les utilisateurs autorisés.

b. **RDSS :** Le RDSS est unique au BDS parmi les constellations GNSS. Ces services comprennent des services de positionnement rapide, de messagerie courte et de synchronisation de précision via des satellites GEO pour les utilisateurs en Chine et dans les régions avoisinantes. Il s'agissait du seul type de service fourni par la phase 1 du déploiement du BDS, BD-1. Cette fonctionnalité a été intégrée au BDS au fur et à mesure que le système évolue vers le FOC. Avec davantage de satellites GEO en orbite, les performances du service RDSS ont été encore améliorées par rapport aux deux satellites GEO de la phase 1.

   Étant donné que le RNSS BDS offre de meilleures performances de positionnement passif et de synchronisation, le SMS est la fonctionnalité la plus utile de la famille de services RDSS et est largement utilisé pour les communications des utilisateurs et les rapports de position. Du point de vue des services RDSS, BDS est en fait un système de communication par satellite avec des services SMS. Un numéro d'identification d'utilisateur est requis pour qu'un utilisateur puisse utiliser les services RDSS ; par conséquent, les services RDSS appartiennent à la catégorie de service autorisée.

c. **Services différentiels étendus :** les systèmes d'augmentation des autres systèmes GNSS sont construits indépendamment de leurs systèmes nominaux. Par exemple, après le déploiement du GPS, les États-Unis ont développé un système d'augmentation indépendant, le Wide Area Augmentation System (WAAS), pour répondre aux demandes de l'industrie de l'aviation civile. Les multiples satellites GEO de la constellation BDS permettent d'avoir une conception intégrée pour combiner les services nominaux avec les services d'augmentation. En tant que l'un des services BDS importants, le système de renforcement spatial a été conçu et développé en parallèle avec le système nominal dans le processus de développement BDS. [10]

I.5.4. Le système QZSS (Quasi-Zenith Satellite System)

QZSS est un système SATNAV civil régional exploité par l'Agence japonaise d'exploration aérospatiale (JAXA) pour le compte du gouvernement japonais. La constellation QZSS se compose actuellement d'un satellite sur une orbite inclinée-elliptique-géosynchrone (appelée orbite quasi-zénithale (QZ)), offrant une couverture

à haute altitude pour compléter et augmenter le GPS américain (et potentiellement d'autres constellations GNSS) au-dessus du Japon. Ce satellite QZSS fournit des services expérimentaux de navigation et de messagerie. D'ici 2018, les plans prévoient que la constellation QZSS s'étendra à quatre satellites (un satellite en orbite géostationnaire et trois en orbite QZ), et d'ici 2023, la constellation devrait se composer de sept satellites (un en orbite géostationnaire, les autres en orbites QZ) qui fournira une capacité régionale indépendante en plus de compléter ou d'augmenter d'autres constellations GNSS. La Figure 1.6 est une représentation d'un satellite QZSS. [11]

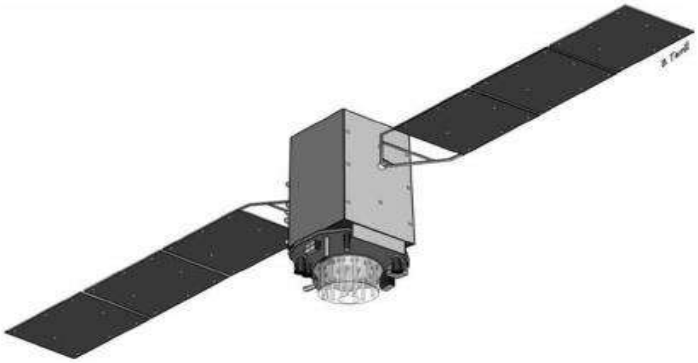


Figure 1.6. Satellite QZSS. [12]

I.5.5. Système de navigation NavIC

NavIC est un système SATNAV militaire et civil régional exploité par l'Organisation indienne de recherche spatiale (ISRO) en coopération avec l'Organisation indienne de recherche et de développement pour la défense (DRDO), a été lancé avec succès le 12 avril 2018. Alors que d'autres systèmes SATNAV fonctionnent principalement dans la bande L, NavIC transmet des signaux de navigation à la fois dans la bande L5 et dans la bande S. [13] [14]

Au moment d'écrire ces lignes, NavIC se composait de 3 satellites géostationnaires et de 4 satellites géosynchrones inclinés, d'un segment de support au sol et d'équipements utilisateur. Le système fournit un PVT pour une région de 30° de latitude sud à 50° de latitude nord et de 30° de longitude est à 130° de longitude est, qui est une région s'étendant sur environ 1500 km autour de l'Inde [15]. Un satellite NavIC est représenté sur la Figure 1.7.

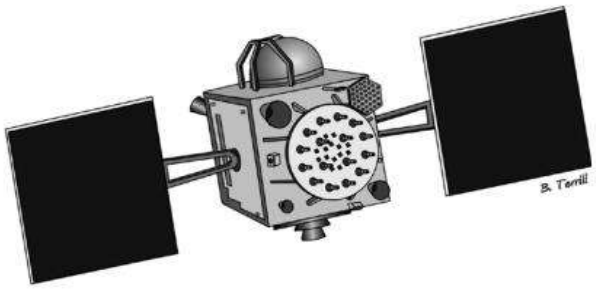


Figure 1.7. Satellite NavIC. [12]

I.5.6. Les systèmes d'augmentation spatiale SBAS

Les performances des systèmes mondiaux de navigation par satellites (GNSS) peuvent être améliorées par des systèmes régionaux d'augmentation par satellite (SBAS). Le SBAS améliore la précision et la fiabilité des informations GNSS en corrigeant les erreurs de mesure des signaux et en fournissant des informations sur la précision, l'intégrité, la continuité et la disponibilité de ses signaux.

Le SBAS utilise des mesures GNSS prises par des stations de référence localisées avec précision déployées sur un continent entier. Toutes les erreurs GNSS mesurées sont transférées vers un centre de calcul central, où les corrections différentielles et les messages d'intégrité sont calculés. Ces calculs sont ensuite diffusés sur la zone couverte à l'aide de satellites géostationnaires qui sont considérés comme une superposition au message GNSS d'origine. [16]

Les systèmes SBAS, actuellement, en fonctionnement sont :

- **EGNOS** (European Geostationary Navigation Overlay Service) pour l'Europe.
- **WAAS** (Wide Area Augmentation System) pour les Etats-Unis.
- **GAGAN** (GPS Aided GEO Augmented Navigation) pour l'Inde.
- **SDCM** (System for Differential Corrections and Monitoring), assure la surveillance de l'intégrité du GPS ainsi que de GLONASS.
- **SNAS** (Satellite Navigation Augmentation System) pour le système chinois Beidou.

I.6. Interopérabilité entre les systèmes

Jusqu'à maintenant il existe quatre systèmes de localisation par satellites GNSS dans le monde, deux entre eux sont opérationnels, le système Américain GPS et le système

Russe GLONASS. Deux autres systèmes sont en état de développement, le système chinois Beidou qui est actuellement utilisé comme un système régional est programmé pour atteindre sa capacité finale pour devenir un système de navigation mondiale en 2020, ainsi que le système de navigation par satellites Européen Galileo qui est aussi en état de développement et qui sera opérationnel en 2018. D'autre pays commencent à développer leurs propres systèmes de navigation par satellite, à l'image de l'Inde et le Japon. Tous ces systèmes utilisent le même principe pour localiser un récepteur, chaque utilisateur doit calculer la distance qui le sépare avec plusieurs satellites et à l'aide de la position de chaque satellite il peut estimer sa position. La différence entre les systèmes de navigation concerne le nombre des satellites utilisés pour couvrir toute la surface de la terre pour que le service fourni soit accessible à tout moment.

Le système GPS utilise 24 satellites situés dans 6 plans séparés entre eux par 60°, par contre la constellation du système Galileo sera composée de 30 satellites 27 opérationnels et 3 de réserve, situés dans trois plans séparés entre eux par 120°. Beidou utilise 30 satellites et le système GLONASS se compose de 24 satellites dans trois plans orbitaux. Une autre différence entre les systèmes vient de la méthode utilisée par chacun pour distinguer entre les satellites. Les trois systèmes GPS, Galileo et Beidou utilisent la méthode CDMA donc chaque satellite sera défini par un code unique ou bien plusieurs codes si le satellite transmet plusieurs signaux pour plusieurs services. Le système GLONASS utilise la méthode FDMA pour la majorité de ses services donc chaque satellite transmet chaque signal avec une fréquence différente des autres signaux et autres satellites. Le Tableau 1.1 suivant donne une comparaison entre les systèmes [17][18][19]:

Système	GPS	GLONASS	Beidou	Galileo
Nombre des satellites	24	24	27	27
Nombre des orbites	6	3	3	3
Inclinaison des orbites	55°	64.8°	56°	55°
Séparation entre les orbites	60°	120°	120°	120°

Altitude des satellites (Km)	20200	19100	21528	23222
Méthode d'accès	CDMA	FDMA/CDMA	CDMA	CDMA
Fréquences utilisé(MHz)	L1:1575,42	L1:1602	B1:1561.098	E5a:1176.45
	L2:1227,60	L2:1246	B2:1207.14	E5b:1207.14
	L5:1176,45	L3:1201	B3:1268.52	E6 :1278.75
				E1 :1575.42

Tableau 1.1. Comparaison entre les systèmes GNSS

Les satellites GNSS transmettent en continu des signaux qui contiennent les données de navigation sur plusieurs fréquences dans la bande L, la Figure 1.8 montre la distribution des bandes de fréquences pour le système radio de navigation par satellite RNSS (Radio Navigation Satellite System). [20]

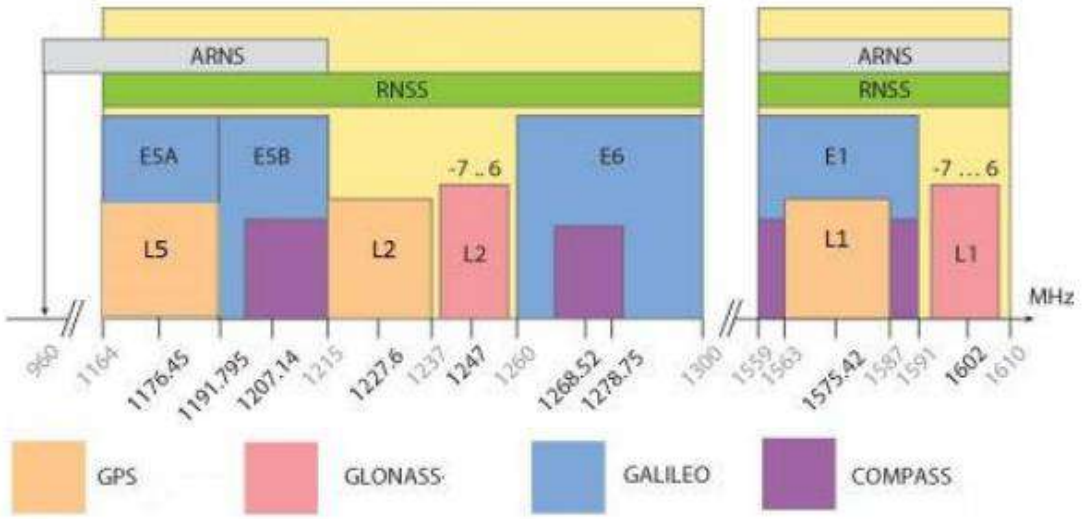


Figure 1.8. Distribution des canaux GNSS.

La bande réservée au service de radionavigation aéronautique ARNS est divisée en deux parties. La première correspond à la bande L supérieure entre 1559 et 1610 MHz, qui contient les signaux L1 du GPS, E1 pour Galileo et le G1 du GLONASS. La deuxième bande réservée au service ARNS c'est la bande entre 1151 et 1214 MHz, cette deuxième bande contient les signaux E5a, E5b pour Galileo et le L5 pour le GPS. Ces bandes sont particulièrement réservées aux applications de

sécurité-de-vie et aucun utilisateur n'est autorisé à interférer avec ces signaux. Les autres signaux GPS L2, GLONASS G2 et Galileo E6 qui se trouvent dans les bandes 1215,6 - 1350 MHz sont utilisés pour la radio navigation et sont accessibles par tous les utilisateurs. [20]

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait une description générale des systèmes de positionnement par satellites GNSS est on a présenté brièvement les différents systèmes du GNSS commençant par le GPS des américain, Glonass pour les Russes, Galileo pour les Européens, Beidou pour les Chinois, Qzss pour les Japonais et NavIC pour les Indiens, et on a terminé par l'interopérabilité entre ces systèmes.

Chapitre II

Signaux GNSS

II.1. Introduction

Les satellites GNSS transmettent en continu des signaux de navigation à deux fréquences ou plus dans la bande L (gamme de fréquences de 1 à 2 gigahertz). Ces signaux contiennent des codes de télémétrie et des données de navigation pour permettre aux utilisateurs de calculer la pseudo-distance et la position du satellite à n'importe quelle époque. Le signal est principalement composé de trois éléments, la porteuse, le code de télémétrie (PRN) et les données de navigation. La pseudo-distance est une approximation de la distance entre un satellite et un récepteur GNSS.

Un récepteur GNSS tentera de mesurer les portées de (au moins) quatre satellites ainsi que leurs positions lorsque leurs données de position ont été transmises. Avec les paramètres orbitaux des satellites fournis dans l'almanach du message, chaque position peut être calculée à n'importe quel moment.

Les pseudo-distances de chaque satellite sont obtenues en multipliant le temps mis par chaque signal pour atteindre le récepteur par la vitesse de la lumière. Mais parce qu'il y aura inévitablement des erreurs de précision dans le temps mesuré, le terme pseudo-distance est utilisé.

II.2. Caractéristiques des signaux GNSS

Il existe plusieurs manières de distinguer des signaux électromagnétiques les uns des autres. La plus simple est d'attribuer à chacun une fréquence différente (Frequency Division Multiple Access : FDMA).Il y a un nombre limité de fréquences utilisables avec l'augmentation du nombre de technologie utilisant les signaux électromagnétiques pour communiquer, les fréquences inutilisées deviennent très rares [2].

Une autre manière de procéder est d'utiliser une seule fréquence, mais d'allouer de petits temps de communication à chacun des utilisateurs, en alternance (Time Division Multiple Access : TDMA), C'est la technique traditionnellement employée dans les télécommunications. Cette technique est applicable lorsqu'il y a un seul émetteur pour les différentes informations, qui peut gérer leur envoi reparti dans le temps c’est pour cela qu’elle n'est pas applicable à un système comme le GNSS qui nécessite un envoi de l'information par chacun des satellites en continu. Une dernière méthode consiste à utiliser une seule fréquence, sur laquelle tous les signaux seront émis en permanence,

et à distinguer ceux-ci grâce à l'application sur leur signal d'un code qui leur sera propre (Code Division Multiple Access : CDMA). Il s'agit de la technique employée par la majorité des systèmes GNSS.

Dans le CDMA, chaque satellite se voit attribuer un code particulier, qu'il utilise pour moduler son signal. Ces codes ne sont en fait que des séquences de bits, 0 et 1, qui peuvent être générées de façon prédéterminée et indépendante par les satellites GPS et Galileo et par chaque récepteur. Les récepteurs, qui connaissent également ces codes, peuvent les identifier et séparer les différents signaux arrivant sur la même bande de fréquences. [2]

II.3. Structure des signaux GNSS

II.3.1. Puissance des signaux

A la réception, les puissances des signaux de navigation vont être atténuées à cause de leur propagation en espace libre et de la traversée de l'atmosphère. Au niveau du récepteur, et on peut écrire : $P = P_e - P_{prop} - P_{atm}(db)$ (2.1)

Avec : P La puissance du signal à la réception ; P_e La puissance du signal à l'émission ;

P_{prop} Les pertes liées à la propagation du signal dans l'espace libre ;

P_{atm} Les pertes atmosphériques.

Les pertes associées à la propagation du signal en espace libre s'expriment par [21]:

$$P_{prop} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 \quad (2.2)$$

Avec λ la longueur d'onde du signal et R la distance satellite/récepteur.

Dans le cas d'un signal GPS C/A, on a R = 20200 km et f = 1575.42 MHz ce qui donne P_{prop} = 182.5 dB. La puissance à l'émission des signaux C/A étant de P_e = 24.6 dBW et les pertes atmosphériques de P_{atm} = 2 dB [22].

On a finalement P = 24.6 dBW−182.5 dB−2 dB= −157.7 dBW.

De manière générale, les satellites de navigation sont dimensionnés pour fournir des puissances de réception supérieures à des seuils prédéfinis. Les différentes spécifications en termes de puissance minimale à la réception pour les signaux GPS et Galileo sont données au Tableau 2.1 suivant : [23] [24]

Signal	Puissance à la réception
C/A	- 160 dBW
P	-163 dBW
E1	-157 dBW
E5	-155 dBW
E6	-155 dBW

Tableau 2.1. Puissances minimales de réception des signaux GPS et Galileo.

II.3.2. Fréquence centrales des signaux

GNSS Le GPS, les GLONASS, et le GALILEO Chaque satellite GPS transmet trois signaux différents utilisant trois bandes de fréquences centrées sur les valeurs suivantes :

- L1 : 1 575,42 MHz
- L2 : 1 227,60 MHz
- L5 : 1 176,45 MHz

Chaque satellite Galileo transmet également trois signaux différents utilisant trois bandes de fréquences centrées sur les valeurs suivantes : [25]

- L1 : 1 575,42 MHz
- E6 : 1 278,75 MHz
- E5 : 1 191,795 MHz

Système	Signal	Puissance minimum (dBW)
	L1 C/A	-158.5
	L2 C (type de satellite II/IIA/II R)	-164.5

GPS	L2 C (type de satellite IIRM/IIF)	-160
GLONASS	L5 I and Q	-157.9
	L1 et L2 (tous les types de satellite s)	-161
GALILEO	E1(L1)	-157
	Toutes autres fréquences E1 (L1)	-155

Tableau 2.2. Signaux et puissance minimum des systèmes GPS, GLONASS et GALILEO.

II.3.3 Les codes pseudo-aléatoires

Les systèmes GNSS sont des systèmes à étalement de spectre, qui consiste à transmettre un signal d'information avec un spectre beaucoup plus large que nécessaire. Cela peut être accompli en multipliant le signal d'information par une séquence spécifique, dite code d'étalement, qui possède un débit plusieurs fois supérieur au débit du signal original. Cette technique s'appelle étalement de spectre par séquence directe (DS-SS) [26] [27]. Les codes utilises sont des codes PRN (Pseudo Random Noise) composés d'éléments binaires appelés "chip". Chaque satellite est associé à son propre code PRN.

Le code C/A (code Gold), généré à partir des registres à décalage linéaire avec un retour LFSR (figure.2.1), le nombre maximum des états binaires utilisables produit dans chaque période est $N = 2^n - 1$ Où n est le nombre des bits de registre à décalage, alors, le code C/A ayant une longueur de 1023 chips, sa période est donc de $T_{c/a} = 1$ms avec un débit binaire $f_c = 1.023\ MH$.

Les caractéristiques d'auto corrélation des codes PRN de GPS sont fondamentales au procédé de démodulation du signal, fonction de corrélation donnée par :

$$R(\tau) = \begin{pmatrix} 1-\frac{\tau}{T_c} & pour\ |\tau|<T_c \\ 0 & ailleur \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

Une des propriétés les plus importantes des codes C/A est le résultat de leur corrélation, un fort pic d'auto-corrélation (pour un déphasage nul), et un faible pic de corrélation croisé entre deux codes différents. Peuvent donner une forte dynamique pour

l'acquisition du signal. Si les codes sont orthogonaux, les corrélations croisées seront égale à zéro (Figure 2.1).

Pour l'auto-corrélation la maxime de pic est 1023 qui correspond à la longueur maximale de séquencé d'étalement $N = 2^n - 1 = 1023$, donc le code ne corrélé que avec lui-même (Figure 2.2).

Les signaux GPS modernisé et Galileo utilisent des codes PRN appelé système à plusieurs niveaux « tiered PRN codes ». La construction du code à plusieurs niveaux permet la génération de codes d'étalement longue à partir de codes primaires et un code secondaires plus courts. Le code secondaire permet de modifier les répétitions successives du code primaire [28].

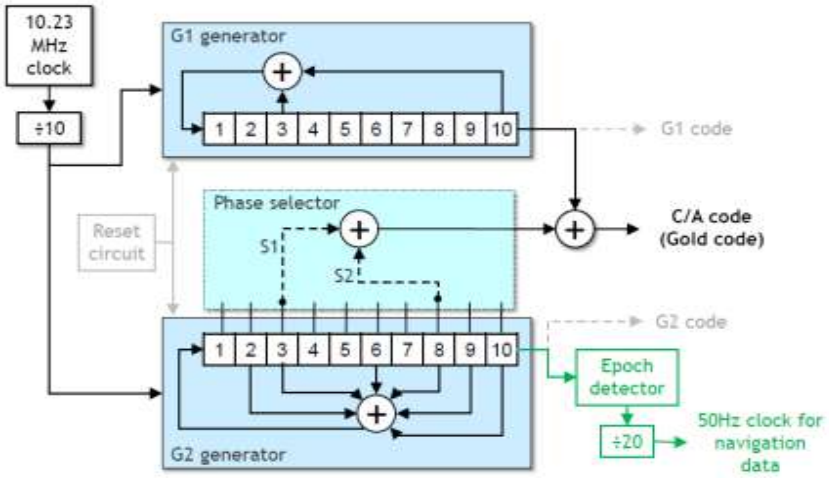


Figure.2.1. Générateur des codes d'étalements C/A code. [29]

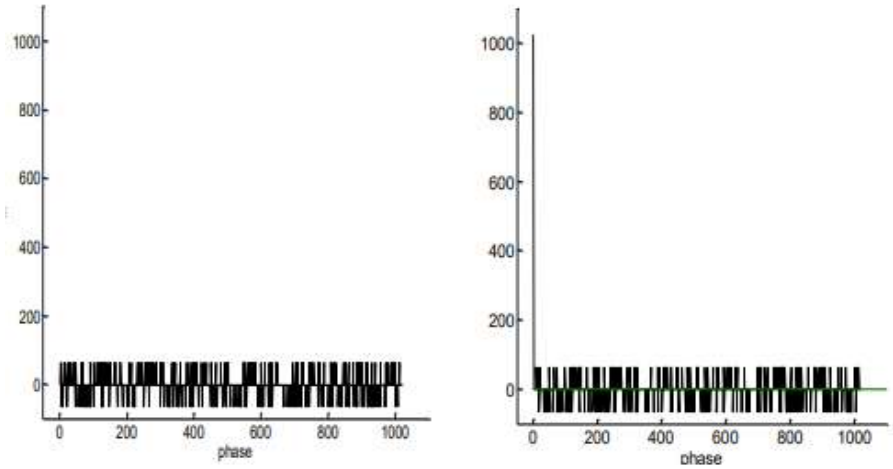


Figure.2.2. Auto-corrélation et corrélation-croisé des codes des satellites (C/A). [29]

II.4. Modulation employées pour les signaux GNSS

En transportant habituellement les données numériques par modulation de porteuse. Cette modulation peut se faire en fréquence (FSK), en amplitude seulement (ASK), en phase seulement (PSK) ou en phase et amplitude (QAM). Pour les systèmes de navigation par satellite on utilise deux types de modulation :

II.4.1 Modulation BPSK (Binary Phase-Shift Keying)

La modulation de phase sert à désigner une famille de formes de modulations numériques qui ont toutes pour principe de véhiculer de l'information binaire via la phase d'un signal porteuse. BPSK est la forme la plus simple du PSK, elle utilise deux phases qui sont scindées de 180° on l'appelle aussi 2-PSK. Cette modulation est la plus robuste de l'ensemble des PSK (Figure 2.3). La modulation (BPSK) se caractérise par le fait de n'avoir que deux niveaux (binaire) de symboles {+1,-1} pour le bit 0 et le bit 1 respectivement. Son expression générale en bande passante peut s'écrire comme suit : [30]

$$s(t) = A_C \sum_{k=-\infty}^{+\infty} cos(2\pi ft + \emptyset_C + \theta_{i,k}).p(t - kT) \quad (2.4)$$

Où : A_C est l'amplitude ;

$\emptyset_C$ est la phase ;

$\theta_{i,k}$ est les symboles binaires {± 1} ;

$p(t)$ est l'impulsion de mise en forme de durée T ;

K est un indice qui numérote les symboles dans le temps. Il est pris de moins l'infini a plus l'infini car il s'agit d'une forme théorique.

L'indice (i) numérote quel symbole est extrait de l'alphabet binaire {± 1} en fonction de i = 0,1. Le GPS utilise la modulation par déplacement de phase binaire (BPSK) pour moduler les codes sur la porteuse. Changement d'état du code provoque un déphasage de 180 degrés dans la porteuse.

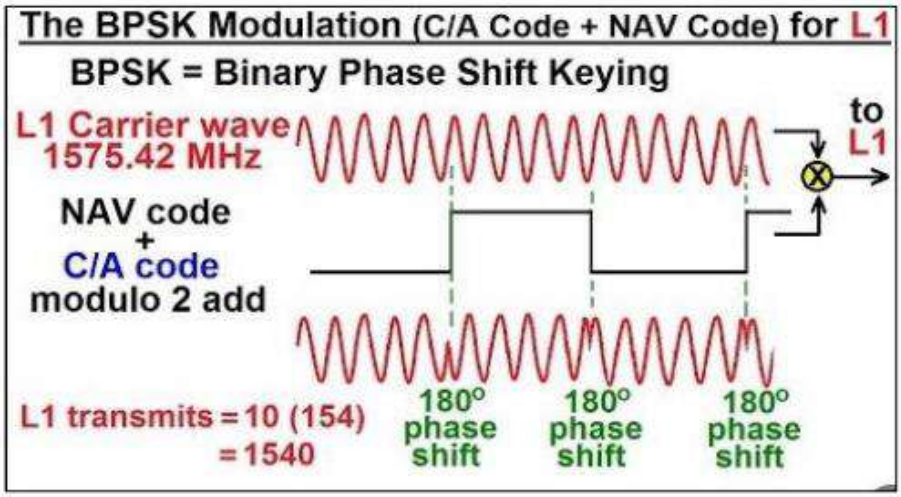


Figure 2.3. La forme du signal L1.

Le signal de porteuse GPS est un signal sinusoïdal de fréquence 1575,42 MHz (L1) et 1227,60 MHz (L2). Chaque satellite émet les mêmes fréquences porteuses à ces deux fréquences. Ces signaux sont désignés comme L1 et L2.

Le GPS utilise le multiplexage par répartition en code CDM (Code Division Multiplexing) pour permettre à différents satellites d'utiliser simultanément la même fréquence porteuse. Chaque fréquence porteuse est modulée en BPSK par des « codes de télémétrie ». Ces codes de télémétrie sont différents pour différents satellites et sont orthogonaux les uns aux autres. Cela permet à l'utilisateur d'accéder aux signaux de différents satellites à la même fréquence sans interférence. Le signal transmis est obtenu en multipliant la porteuse sinusoïdale par une séquence PRN pilote éventuellement combinée avec un message de navigation comme il est présenté dans la (Figure 2.4).

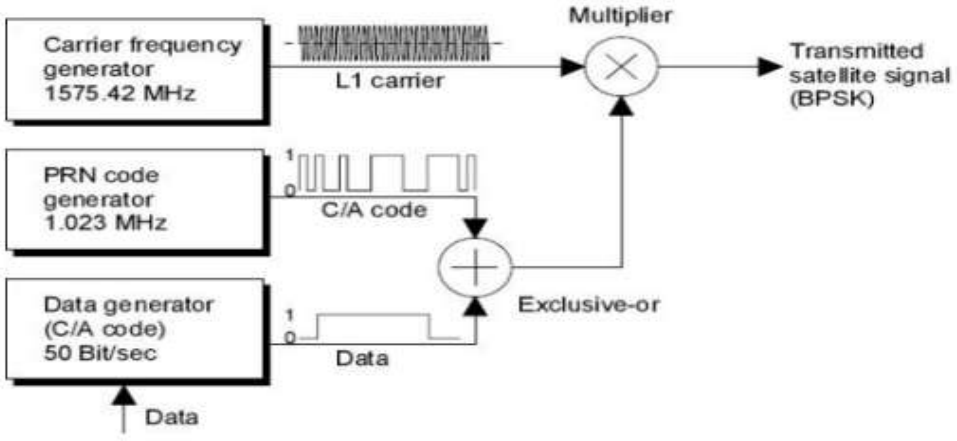


Figure 2.4. Génération de signaux de diffusion GPS.

II.4.2. Modulation BOC (Binary Offset Carrier)

Au fur et à mesure que le temps augmente, la demande d'amélioration de la précision des systèmes GNSS augmente. La signalisation actuelle pour le GPS utilise une modulation par déplacement de phase (PSK) en utilisant des symboles d'étalement rectangulaires conventionnels (sans retour à zéro). La modulation BOC est destinée à améliorer le partage spectral de la bande passante allouée avec les signaux existants (GPS à porteuse unique) et à améliorer les propriétés des signaux GNSS traditionnels pour une meilleure résistance aux interférences multi-trajets de toutes sortes et au bruit du récepteur. [30]

La modulation « OC » (Offset Carrier) permet de déplacer le spectre du signal modulé loin de la fréquence de la porteuse. Cette propriété permet en particulier l'utilisation d'une même bande passante sur les signaux des systèmes GPS et Galileo. Mieux séparés d'un point de vue spectral, les signaux sont aussi moins sujets aux phénomènes d'interférence.

La modulation BOC est obtenue en multipliant la séquence PRN par un signal dit NRZ (No Return to Zero) égal au signe d'une sous-porteuse en sinus ou cosinus (Figure 2.5). Généralement, les signaux BOC sont communément appelés BOC (p, q) (Figure 2.6 pour BOC) où p et q sont deux entiers qui permettent de définir la fréquence f_s de la sous-porteuse et la fréquence f_s du code PRN par :

$$s = p \times 1.023\ MHz\ et\ f_c = q \times 1.023\ MHz$$

Soit $C(t)$ la séquence du code PRN, alors les expressions $x_{sin}(t)$ et $x_{cos}(t)$ du signal BOC sont données par les relations :

$$x_{sin}(t) = C(t) \times sign(\sin(2\pi f_s t)) \quad (2.5)$$

$$x_{cos}(t) = C(t) \times sign(cos(2\pi f_s t)) \quad (2.6)$$

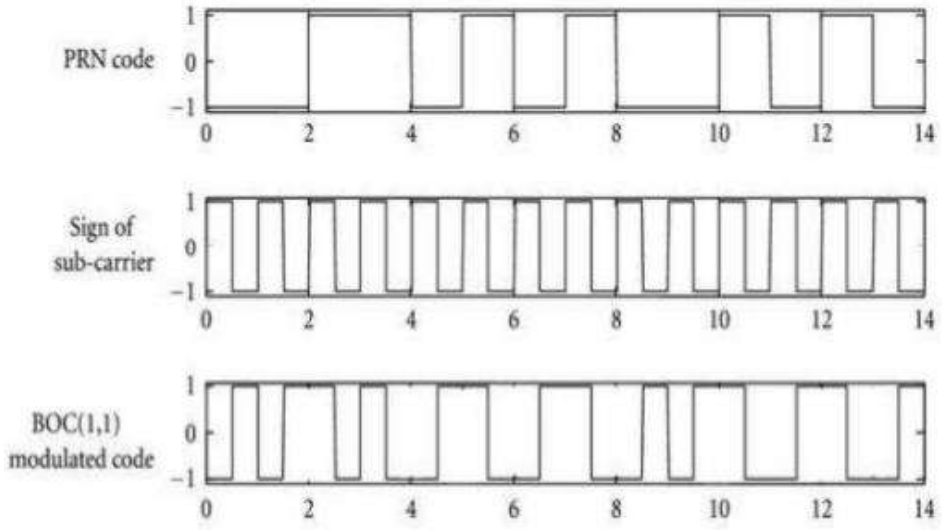


Figure 2.5. Forme du code BOC (1,1).

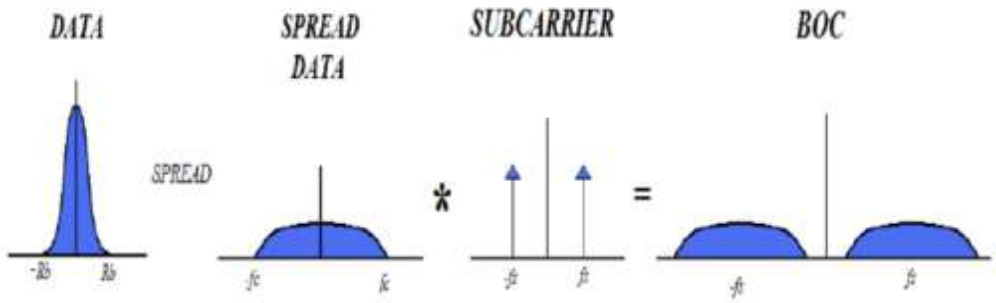


Figure 2.6. Signal BOC.

L'idée principale derrière la modulation BOC est de réduire les interférences avec le signal modulé BPSK, qui a un spectre en forme de fonction sinc. Par conséquent, les signaux modulés BPSK tels que les codes GPS C/A ont la majeure partie de leur énergie spectrale concentrée autour de la fréquence porteuse, tandis que les signaux modulés BOC ont une faible énergie autour de la fréquence porteuse et deux lobes spectraux principaux plus éloignés de la porteuse (ainsi, le nom de split-spectre).

II.5. Réception du signal GPS

La première caractéristique du signal GNSS parvenu au récepteur est sa faible puissance qui résulte de l'atténuation a la traversée de l'atmosphère de la terre, le signal émis est affecté par l'effet Doppler. En effet, tout mouvement relatif entre l'émetteur et

le récepteur d'un signal provoque une modification de la fréquence du signal reçu. Suite eu déplacement relatif entre le satellite et le récepteur à la vitesse de 7km/s, la porteuse et les séquences de codes PRN subissent des décalages de fréquence qu'il faut compenser.

Un convertisseur analogique/numérique permet de numériser le signal d'entrée, en respectant le théorème d'échantillonnage de Shannoun-Nyquist. Un oscillateur local crée un signal sinusoïdal de fréquence proche de celle du signal réceptionné qui sera multiplié au signal d'entrée. Cette opération se fait après la numérisation du signal d'entrée. Après la conversion du signal et la détermination des valeurs de message de navigation, le retard du signal est nécessaire pour estimer le temps de vol en vue de déterminer la distance satellite/récepteur. La multiplication du signal d'entée par le signal de l'oscillateur local permet de réaliser la démodulation pour en retrouver les constituants. La démodulation requiert de séparer les signaux des différents satellites observés, d'estimer la fréquence de la porteuse décalée par effet Doppler, de déterminer le retard de la fréquence du code PRN et le déphasage du signal. Ces opérations sont réalisées par deux chaines de traitement dites d'acquisition et de poursuite. [31]

II.5.1. Acquisition du signal GNSS

Afin de lancer le processus de poursuite du signal de navigation, le récepteur effectue une étape d'acquisition. Cette opération primordiale a pour but de détecter la présence du signal d'un satellite dans l'ensemble des signaux reçus par l'antenne du récepteur. L'acquisition permet également de déterminer le décalage du code et l'écart de fréquence provoqués par la propagation du signal et l'effet Doppler. Ces informations serviront par la suite d'initialisation pour les boucles de poursuite.

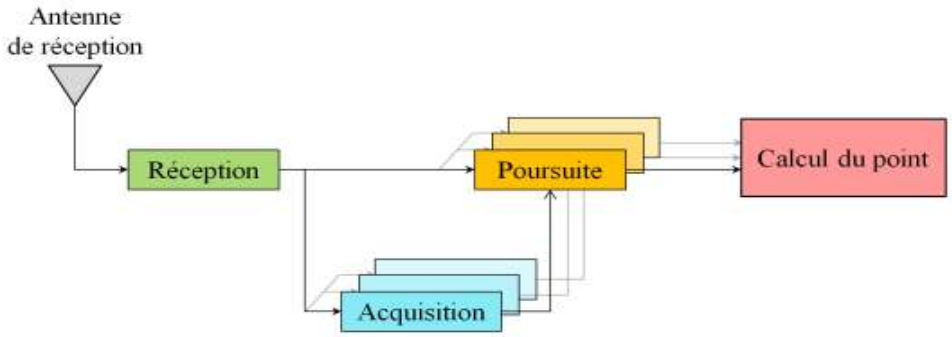


Figure 2.7. Schéma bloc des opérations réalisées par le récepteur.

De manière générale, l'acquisition est une recherche temps-fréquence qui consiste à calculer, sur un ensemble de délais temps/fréquence, les différentes corrélations entre le signal reçu et une réplique locale affectée par un délai et un Doppler fixé [32]. Le but de cette opération est double :

- Détecter la présence d'un satellite dans l'ensemble des signaux captés par l'antenne du récepteur ;
- Déterminer, pour un satellite dont la présence a été détectée, le retard sur le code et la fréquence Doppler à la réception du signal associé afin d'initialiser les boucles de poursuite.

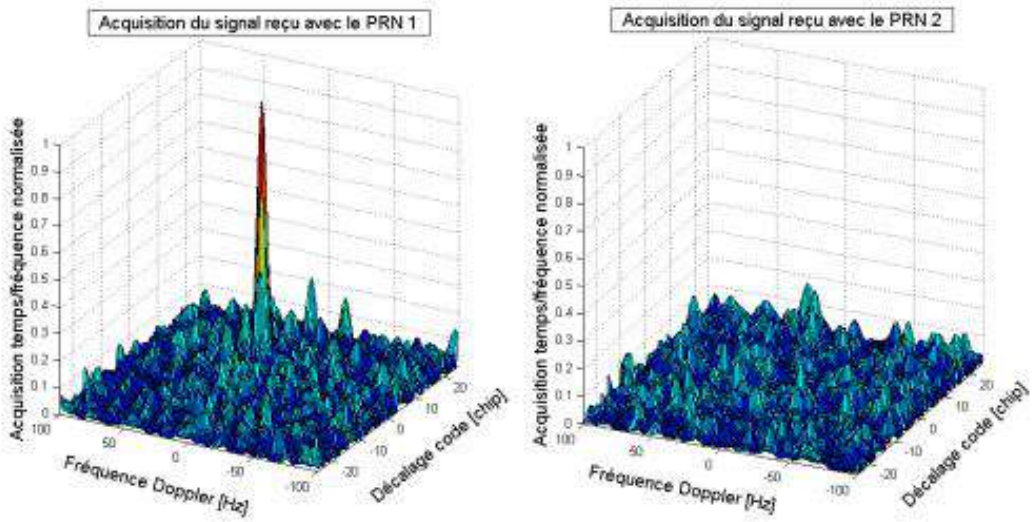


Figure 2.8. Exemples de résultats d'acquisition

II.5.2. Poursuite du signal GNSS

Après l'étape d'acquisition qui a pour but de détecter la présence d'un satellite et d'estimer le retard et la fréquence Doppler initiaux du signal à la réception, le récepteur bascule en mode poursuite. L'étape de poursuite permet de suivre l'évolution du retard sur le code, de la fréquence et de la phase porteuse engendrée par les mouvements relatifs entre le satellite et l'utilisateur et ainsi de mettre à jour le calcul du point. Cette étape est réalisée grâce à des structures qui vont suivre les variations des paramètres nécessaires au calcul de la position grâce à la corrélation du signal reçu par des répliques locales générées par le récepteur [33]. Le schéma bloc de l'étape de poursuite est donné à la Figure 2.9.

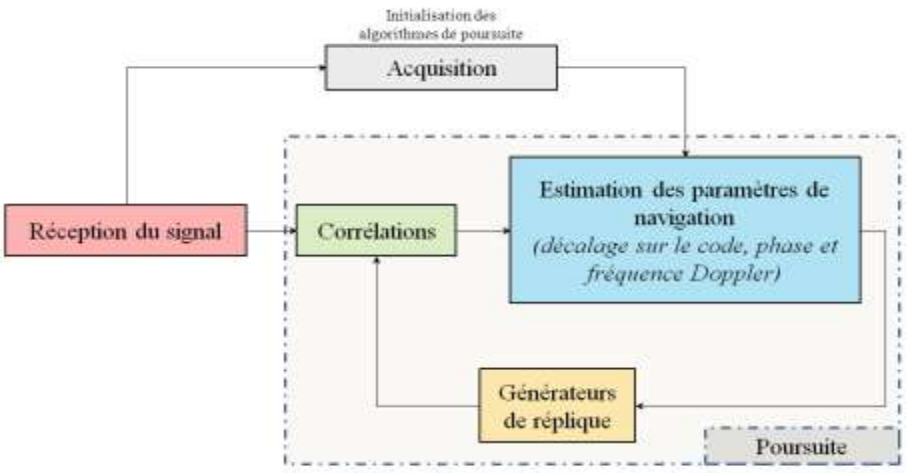


Figure 2.9. Schéma bloc de l'étape de poursuite.

II.6. Les messages de navigation

Les messages de navigation contiennent des données bien définies, qui sont nécessaires aux récepteurs pour effectuer leur calcul de position. Ces données sont calculées dans les centres de contrôle au sol de GPS et de Galileo puis sont transmises au moins quotidiennement aux satellites lorsque ceux-ci sont en communication avec une station sol de transmission. Chaque satellite enregistre ces données à bord et les intègre dans les signaux qu'il transmet aux récepteurs. Ces données comportent notamment les almanachs, les éphémérides, les paramètres de correction ionosphérique et les corrections d'horloge. La diffusion de ces informations est réalisée à un débit extrêmement faible, de l'ordre de 50 bits/s pour GPS C/A et jusqu'à 250 bits/s pour Galileo. [29] [34]

II.7. L'effet Doppler

Lors de l'émission d'un signal, tout mouvement relatif entre l'émetteur et le récepteur provoque une modification de la fréquence du signal reçu : c'est le phénomène Doppler. La Figure 2.10 illustre ce phénomène. Dans le cadre du GNSS, les signaux de navigation sont affectés par l'effet Doppler résultant des mouvements relatifs entre le satellite et l'utilisateur. En effet, considérons le modèle simplifié du signal émis au niveau du satellite suivant :

$$S_e(t) = C(t).\, e^{i2\pi f_p t} \tag{2.7}$$

Avec $C(t)$ le code pseudo-aléatoire du signal et f_p la fréquence porteuse.

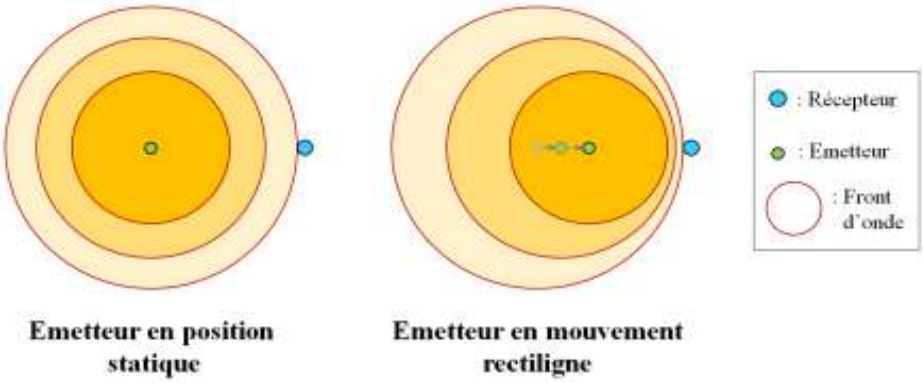


Figure 2.10. Principe de l'effet Doppler.

Si on suppose que le signal émis ne subit aucune perturbation lors de sa propagation, le récepteur reçoit alors le signal suivant : $S_r(t) = S_e\big(t - \tau(t)\big)$

$$S_r(t) = C(t - \tau(t))\, e^{i2\pi f_p t} \qquad (2.8)$$

Avec $\tau(t)$ le retard exprimé en seconde associé au temps de propagation du signal.

D'après les notations de la Figure 2.11, le temps de propagation τ s'exprime par :

$$\tau(t) = \tau_0 + \frac{\int_0^t v_{rad}(t).dt}{c} \qquad (2.9)$$

Avec c la vitesse de la lumière dans le mileu et v_{rad} la vitesse radiale satellite/récepteur.

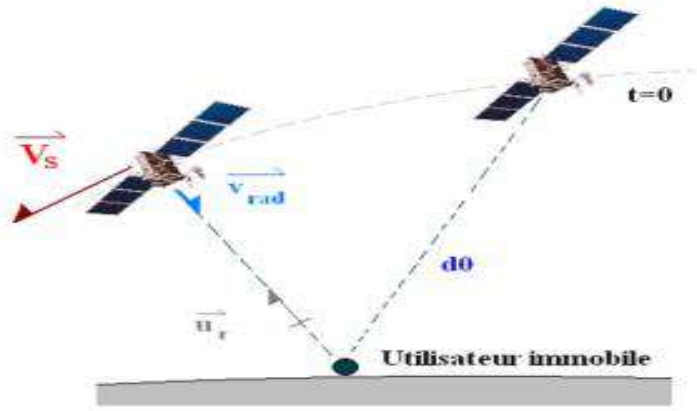


Figure 2.11. Géométrie de la dynamique satellite/utilisateur.

En supposant que la vitesse radiale est constante, on obtient l'expression du retard suivant : $\tau(t) = \tau_0 + \frac{v_{rad}}{c}\, t$ (2.10)

En combinant l'équation (2.8) et l'équation (2.10), on obtient l'expression du signal reçu suivant : $$S_r(t) = C\left(\left(1 - \frac{v_{rad}}{c}\right)t - \tau_0\right) e^{i2\pi f_p\left(1-\frac{v_{rad}}{c}\right)t + i\phi_0} \quad (2.11)$$

Avec $\phi_0 = -2\pi f_p \tau_0$.

On voit ainsi que la fréquence porteuse du signal reçu est modifiée de la fréquence Doppler f_d définie par [35] : $$f_d = -f_p \frac{v_{rad}}{c} \quad (2.12)$$

L'expression (2.12) n'est que l'approximation au premier ordre de l'effet Doppler sur la porteuse du signal de navigation. De manière générale, la fréquence Doppler sur la fréquence porteuse s'exprime par [35] : $$f_d = -f_p \frac{(v_s - v_u)^T u_r}{c} \quad (2.13)$$

Avec v_s la vitesse satellite, v_u la vitesse utilisateur et u_r le vecteur unitaire radial de l'utilisateur vers le satellite.

L'effet Doppler va également affecter le rythme binaire des codes pseudo-aléatoires (et plus généralement l'ensemble des signaux binaires véhiculé par la porteuse) qui va subir la dérive Doppler f code d suivante : $$f_d^{code} = f_d^{porteuse} \frac{R_c}{f_p} \quad (2.14)$$

avec R_c le rythme chip du code pseudo-aléatoire.

Le phénomène de compression/dilatation des codes pseudo-aléatoires et de la porteuse est illustré à la Figure 2.12 (la fréquence porteuse et le rythme chip ne sont pas à l'échelle sur la figure).

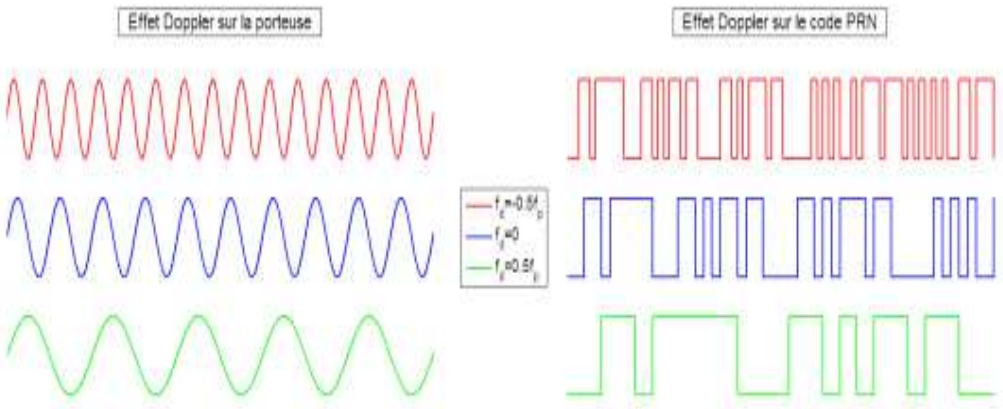


Figure 2.12. Effet Doppler sur la fréquence porteuse et les codes PRN.

II.8. Définition des rapports signal à bruit pour un récepteur GNSS

II.8.1 Le rapport SNR

En général, le rapport signal sur-bruit (SNR ou S/N) est une mesure relative, permettant la comparaison entre le niveau du signal utile et celui du bruit. Le SNR désigne le rapport de la puissance du signal en bande de base, sur le bruit mesuré avant modulation ou après démodulation. Dans le cas des signaux GNSS le SNR est mesuré après démodulation.

Le SNR est généralement exprimé en décibels : $SNR(dB) = S - N$ (2.15)

Où : S : la puissance du signal exprimée en [dB m]

N : la puissance de bruit, dans la bande passante de travail, en [dBm].[36]

II.8.2 Le rapport C/N0

Le rapport de la puissance de la porteuse sur la densité de puissance du bruit, C/N0, s'exprime en décibels Hertz [dB/Hz] et se réfère au rapport de la puissance de la porteuse sur la puissance du bruit ramené à sa bande passante. Soit la puissance du bruit, divisée par la bande passante de sa densité spectrale de puissance. En relation avec le SNR, le C/N0 peut être formulé comme suit :

$$SNR = \frac{\frac{C}{N_0}}{BW} \quad (2.16)$$

Avec : $N_0 = [W.s] = \left[\frac{W}{s^{-1}}\right] = \left[\frac{W}{Hz}\right]$

Soit en décibels : $\frac{C}{N_0}\ (dB\ Hz) = C - N_0 = C - (N - BW) = SNR + BW$ (2.17)

Où : C : la puissance de la porteuse en [dBm].

N : la puissance du bruit en [dBm].

N0 : la densité de puissance de bruit en [dBm/Hz].

BW : la largeur de la bande équivalente du bruit du dernier étage du frontal RF du récepteur [dB Hz]. [37]

En effet, la qualité du signal reçu dans un récepteur GNSS est profondément liée aux valeurs présentées de C/N0. Pour un récepteur du GPS C/A sur L1, les valeurs typiques

tolérables de C/N0 varient entre 37 dB Hz et 45 dB Hz. Pour une bande passante de l'étage RF de 4 MHz, la bande passante BW est de 66 dB. Le SNR varie alors de -29 dB à -21dB. [38]

Lors de leur transmission, les signaux GNSS subissent un certain nombre de dégradation parmi lesquelles on peut citer :

- L'atténuation due à la propagation en espace libre : les puissances des signaux de navigation vont être atténuées à cause de leur propagation en espace libre.
- L'effet Doppler dû au mouvement relatif satellite-récepteur.
- Les perturbations lors de la propagation et de la réception telles que les interférences, les multi trajets, le bruit thermique du récepteur et les effets atmosphériques.

II.9. Les sources d'erreurs du GNSS

Un récepteur GPS utilise pour calculer sa position en mesurant la distance d'au moins quatre satellites. Ces allants les mesures sont entachées d'erreurs provenant de diverses sources. Pour obtenir une position précise, l'effet de ces erreurs doit être atténué. Les prochaines rubriques donner une brève description des erreurs qui sont généralement rencontrées par un récepteur dans calculer sa position. [31]

II.9.1. Les horloges

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

II.9.2. L'ionosphère

L'ionosphère est la couche de l'atmosphère qui contient des gaz ionisés (électrons libres et ions) et occupe la région de l'espace d'environ 60 à 1 000 km au-dessus de la surface de la Terre. Le niveau d'ionisation de cette couche change avec l'activité solaire,

affectant les indices de réfraction des différentes couches de l'ionosphère et, par conséquent, modifiant le temps de transit d'un signal GPS

II.9.3. La troposphère

La troposphère est la partie inférieure de l'atmosphère s'étendant de 8 à 40 km au-dessus de la surface de la Terre et elle est principalement composée de gaz secs (N2 et O2) et de vapeur d'eau. Contrairement à l'ionosphère, la troposphère, étant électriquement neutre, est non dispersive pour les fréquences GPS mais comme elle est réfringente elle provoque une diminution de la vitesse par rapport à l'espace libre. Par conséquent, les portées apparentes semblent plus longues de 2,5 à 25 m selon l'angle d'élévation du satellite (Parkinson et al. 1996). Les erreurs troposphériques sont cohérentes entre les porteuses L1 et L2. Le retard troposphérique a une composante sèche et une composante humide. La composante humide est responsable de 10 % de retard troposphérique et est difficile à modéliser car la teneur en vapeur d'eau varie à l'échelle locale. La composante sèche est mieux modélisée et représente 90 % du retard troposphérique. Plusieurs modèles ont été développés pour le retard troposphérique, y compris le modèle de Saastamoinen, le modèle de Hopfield et le modèle de Chao (Parkinson et al. 1996).

II.9.4. Les multi trajets

Les trajets multiples sont une source d'erreur majeure dans les environnements urbains où le signal GPS peut atteindre le récepteur par plusieurs chemins différents. Ces trajets incluent la ligne de visée directe et les signaux réfléchis par d'autres objets autour de l'antenne de réception. Le signal qui arrive indirectement est retardé et a un rapport signal sur bruit plus faible. Les trajets multiples déforment le signal d'origine en raison des interférences avec les signaux réfléchis au niveau de l'antenne de réception. Cela peut entraîner une erreur de position supérieure à 10 m. [18]

II.9.5. Erreurs orbitales des satellites

Les erreurs orbitales des satellites sont la différence entre la position réelle d'un satellite dans l'espace et la position du satellite calculée par le récepteur à l'aide des données d'éphémérides. En fonction du mouvement précédent du satellite et de la connaissance de la gravité terrestre, les erreurs orbitales sont prédites par le segment de contrôle et téléchargées sur les satellites pour être diffusées aux utilisateurs sous forme de données

éphémérides. Étant donné que le modèle d'éphémérides est une courbe ajustée à l'orbite mesurée, il inclura des erreurs résiduelles variant dans le temps par rapport à l'orbite réelle. Typiquement, cette erreur est comprise entre 2 et 5 m. [18]

II.9.6. Bruit du récepteur

Il s'agit d'un bruit de mesure aléatoire intrinsèque à l'électronique d'un récepteur GPS. Elle est causée par les effets cumulatifs des circuits d'antenne, des câbles, du bruit thermique, des interférences du signal RF, de la quantification et de l'échantillonnage du signal. Puisqu'il est fonction du rapport signal sur bruit, il varie avec l'angle d'élévation d'un satellite. Elle engendre une mesure erronée du temps de transit du signal GPS. Comme dans le cas de l'effet de trajets multiples, le bruit du récepteur est inférieur de deux ordres de grandeur pour les mesures de phase de porteuse que pour les mesures de pseudo-distance.

II.10. Mesure de pseudo-distance

La **mesure de pseudo-distance** est définie comme la différence entre l'instant de réception (exprimé dans la trame temporelle du récepteur) et l'instant d'émission (exprimé dans la trame temporelle du satellite) d'un signal satellite distinct. Cela correspond à la distance entre l'antenne du récepteur et l'antenne du satellite, y compris les décalages d'horloge du récepteur et du satellite et d'autres biais, tels que les retards atmosphériques. Pour un signal de satellites dans la *i*-ème bande, la pseudo-distance $P_{r,i}^{(s)}$ peut être exprimé en utilisant le temps de réception du signal $\overline{t_r}$(s) mesuré par l'horloge du récepteur et le temps de transmission du signal $\overline{t^{(s)}}$(s) mesuré par l'horloge satellite comme :

$$P_{r,i}^{(s)} = c(\overline{t_r} - \overline{t^{(s)}}) \qquad (2.18)$$

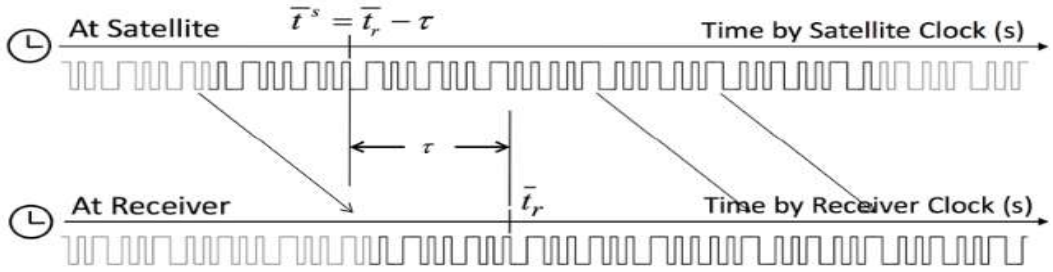


Figure 2.13. Mesure de pseudo-distance.

L'équation peut être écrite en utilisant la plage géométrique $\rho_r^{(s)}$ entre les antennes du satellite et du récepteur, les polarisations d'horloge du récepteur et du satellite dt_r et $dT^{(s)}$, les retards ionosphérique et troposphérique $I_{r,i}^{(s)}$ et $T_r^{(s)}$et l'erreur de mesure ϵ_P comme:

$$P_{r,i}^{(s)} = c\left(t_r + dt_r\,(t_r)\right) - \left(t^{(s)} + dT^{(s)}(t^{(s)})\right) + \epsilon_P$$

$$= c\left(t_r - t^{(s)}\right) + c(dt_r\,(t_r) - dT^{(s)}(t^{(s)})) + \epsilon_P$$

$$= \rho_r^{(s)} + c(\,dt_r\,(t_r) - dT^{(s)}(t^{(s)})) + I_{r,i}^{(s)} + T_r^{(s)} + \epsilon_P \qquad (2.19)$$

Où :

- $\boldsymbol{P_{r,i}^{(s)}}$ est la mesure de la pseudo-distance (en mètres).
- $\boldsymbol{\rho_r^{(s)}}$ est la distance réelle entre l'antenne du satellite et l'antenne du récepteur (en mètres).
- $\boldsymbol{c}$ est la vitesse de la lumière (en m/s).
- $\boldsymbol{dt_r}$ est le décalage de l'horloge du récepteur par rapport à l'heure GNSS (en secondes).
- $\boldsymbol{dT^{(s)}}$ est le décalage de l'horloge satellite par rapport à l'heure GNSS (en secondes).
- $\boldsymbol{I_{r,i}^{(s)}}$ est le retard ionosphérique (en mètres).
- $\boldsymbol{T_r^{(s)}}$ est le retard troposphérique (en mètres).
- $\boldsymbol{\epsilon_P}$ modélise le bruit de mesure, y compris les erreurs orbitales du satellite, les retards instrumentaux du récepteur et du satellite, les effets de la propagation par trajets multiples et le bruit thermique (en mètres). [39]

II.11. Positionnement des points à l'aide de la pseudo-distance

II.11.1 La méthode des moindres carrés pondérés (WLS)

Un cas particulier des moindres carrés généralisés appelés moindres carrés pondérés (W LS) se produit lorsque toutes les entrées hors de la diagonale de $A^T A$ (la matrice de corrélation des résidus) sont 0.

Les expressions données ci-dessous sont basées sur l'hypothèse que (1) les erreurs ne sont pas corrélées l'un avec l'autre et avec les variables indépendantes, (2) les erreurs

disposent une variance égale. Le théorème de Gauss-Markov [40] a montré quand les erreurs respectent les deux conditions nommées au-dessus, $\hat{x}$ est un meilleur estimateur lin´eaire sans biais. Si, toutefois, les mesures ne sont pas corrélées, mais elles ont des incertitudes, une approche modifiée pourrait être adoptée.

Aitken a montré que lorsque la somme pondérée des carrés des résidus est minimisée, $\hat{x}$ est le meilleur estimateur linéaire sans biais si chaque poids est égal à l'inverse de la variance de la mesure [41]. Une approche plus générale utilise la variable pondérée pour différentes mesures, comme cela se fait par Gauss. Autrement dit, la fonction d'objective dans l'équation : $J = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{m}(b_i - a_i x)^2 = \frac{1}{2}(b - Ax)^T(b - Ax)$ (2.20)

est modifée pour : $J = \frac{1}{2}(b - Ax)^T W(b - Ax)$ (2.21)

Où W est une matrice symétrique définie positive.

Le choix le plus judicieux pour W est la matrice inverse de covariance du bruit de mesure ; c'est-à-dire $W = \Sigma^{-1}$ et $\Sigma = E[ee^T]$. Ensuite, les mesures sont pondérées à l'inverse en raison que les erreurs peuvent être apparues dans les mesures. La méthode de Gauss également fonctionne lorsque les erreurs de mesure sont corrélées entre eux (Σ est non diagonal), avec la condition Σ à un rang plein et peut être inversé. Dans la pratique Σ est généralement supposé pour être en diagonale, mais cette hypothèse n'est pas une restriction générale. Cependant, l'utilisation de Σ non diagonal augmente considérablement les calculs de la solution, et il est rarement utilisé.

Cette approche des moindres carrés pondérée est une forme d'un problème des moindres carrés généralisée, en utilisant l'équation de la fonction d'objective (2.21) et $W = \Sigma^{-1}$, la solution des moindres carrés pondérée est calculé en mettant $\frac{\partial J}{\partial x}$=0 pour obtenir : $\hat{x} = (A^T W A)^{-1} A^T W b$ (2.22)

Comme on a dit précédemment, la solution est sans biais c'est-à-dire $E[\hat{x}] = x$. Le $n \times m$ matrice de $(A^T W A)^{-1} A^T W$ est une forme d'un pseudo-inverse, on multiplie le pseudo-inverse par le vecteur de mesure b pour calculer les valeurs x qui répondant à notre mesure b dans un sens "norme minimale". Les estimations qui sont sans biais, obtenus comme une fonction linéaire des observables bruyants $Ax = b + e$, et de minimiser la covariance de toute fonction linéaire des estimations $\hat{x}$ sont parfois appelées le BLEU (Best Linear Unbiased Estimator) [41]. Gauss et Markov ont montré

que les estimations des moindres carrés, l'équation (2.22) est BLEU. L'erreur d'estimation d'état est définie comme :

$$\begin{aligned} \tilde{x} &= x - \hat{x} \\ &= x - (A^T W A)^{-1} A^T W(Ax + e) \\ &= -(A^T W A)^{-1} A^T W e \end{aligned} \tag{2.23}$$

Et l'a posteriori covariance d'erreur d'état est :

$$\begin{aligned} P &= E[\tilde{x}\tilde{x}^T] \\ &= (A^T W A)^{-1} A^T W E[ee^T] W A(A^T W A)^{-1} \\ &= (A^T W A)^{-1} \end{aligned} \tag{2.24}$$

Où P est une matrice symétrique définie positive.

Notez que pour P égale à $(A^T W A)^{-1}$, la matrice de pondération W doit être égale à $\Sigma^{-1} = E[ee^T]^{-1}$. La matrice $P^{-1} = (A^T W A)$ est appelée la matrice d'information [42]. Depuis son apparition, elle représente l'information théorique disponible dans les mesures.

Notez que l'inverse de la même matrice P est nécessaire pour calculer l'estimation d'état pour l'interprétation de la précision de la solution. En particulier, les racines carrées des diagonales de P sont la norme, une erreur d'estimation d'écart-type est : $\sigma_i = \sqrt{P_i}$ de i = 1 à m.

Dans notre cas, l'estimation de la position d'un récepteur GPS, les erreurs dans les observations sont supposées indépendantes et normalement sphériquement distribués avec une variance $(\sigma_1, \ldots, \sigma_m)$. Ensuite, la matrice de poids est :

$$W = \Sigma^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_1^2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \frac{1}{\sigma_m^2} \end{bmatrix} \tag{2.25}$$

Où σ_m est égal à $\sigma_m = \frac{1}{\sin(El)}$.

Plus l'angle d'élévation proche de 90° la valeur de σ_m proche de 1 (nous donnons beaucoup l'importance à ces données). Au contraire, plus l'angle d'élévation proche de 10° la valeur de σ_m proche de ∞ (nous donnons moins l'importance à ces données).

Donc la solution de l'équation linéaire Ax ≈ b pour la méthode des moindres carrés pondérés est bien l'équation (2.22).

II.12. Conclusion

Dans ce chapitre on a parlé sur les signaux GNSS commençant par les caractéristiques des signaux GNSS passant après au Structure des signaux GNSS après au diffèrent modulations utilisées pour l'envoie du signal du satellite vers le récepteur, ensuite on a parlé sur la réception du signal GPS après on a présenté le message de navigation, comment est construit et quel est son contenu. Aussi on a parlé sur l'effet Doppler et on a donne une Définition des rapports signal à bruit pour un récepteur GNSS .en fin on a présenté la mesure de pseudo-distance et le positionnement des points à l'aide de cette mesure par La méthode des moindres carrés pondérés (WLS).

Chapitre III

Simulation et résultats basé sur la méthode WLS

III.1. Introduction

Afin de surmonter le problème de la fiabilité de la mesure d'observation de pseudo-distance dans le système de navigation par satellite, la méthode des moindres carrés utilisée par les récepteurs de navigation courants ne peut pas résoudre le problème de la fiabilité de l'observation de pseudo-distance. Le concept de poids donne une plus grande crédibilité aux observations de pseudo-distance, permettant à des observations de pseudo-distance plus fiables de participer à l'algorithme de solution de positionnement, résolvant efficacement la crédibilité des observations de pseudo-distance. Dans ce chapitre, Les résultats de la simulation expérimentale prouvent que l'algorithme de positionnement proposé dans ce chapitre est supérieur à l'algorithme de positionnement traditionnel des moindres carrés en termes de précision de positionnement, répond aux exigences normales de positionnement par satellite et améliore la précision de positionnement.

III.2. Logiciel utilisé

MATLAB est un système interactif de programmation scientifique, pour le calcul numérique et la visualisation graphique, basé sur la représentation matricielle des données, dont le nom est dérivé de Matrix Laboratory. C'est un outil multi-plates-formes qui est disponible pour les environnements Windows, Unix (et dérivés BSD, Linux, Solaris, MacOS...). MATLAB est un environnement complet, ouvert et extensible pour le calcul et la visualisation. Il dispose de plusieurs centaines (voire milliers, selon les versions et les modules optionnels autour du noyeau Matlab) de fonctions mathématiques, scientifiques et techniques. L'approche matricielle de MATLAB permet de traiter les données sans aucune limitation de taille et de réaliser des calculs numériques et symboliques de façon fiable et rapide. Grâce aux fonctions graphiques de MATLAB, il devient très facile de modifier interactivement les différents paramètres des graphiques pour les adapter selon nos souhaits. MATLAB peut être complété par des outils « tool boxes » spécifiques à certains domaines comme le traitement du signal, l'image, l'automatique, les statistiques, la mécanique, le calcul symbolique, les réseaux de neurones... Il est possible de lui adjoindre un environnement supplémentaire Simulink permettant d'effectuer de la programmation par schémas blocs. MATLAB est un environnement puissant, complet et facile à utiliser destiné au calcul scientifique.

III.3. Architecture de système GPS basé sur la méthode WLS

Architecture globale. Tout d'abord, nous utilisons les mesures de pseudo-distance du GPS et les positions des satellites pour calculer la position d'un récepteur supposée une position initiale Ensuite, nous formons un WLS pour estimer les corrections de position par rapport à cette estimation initiale. Enfin, la correction de position de notre WLS est utilisée pour améliorer l'estimation de la position initiale et obtenir notre estimation de position finale qui est considéré la plus proche de la position vraie du récepteurs GPS. Comme représenté sur la Figure 3.1.

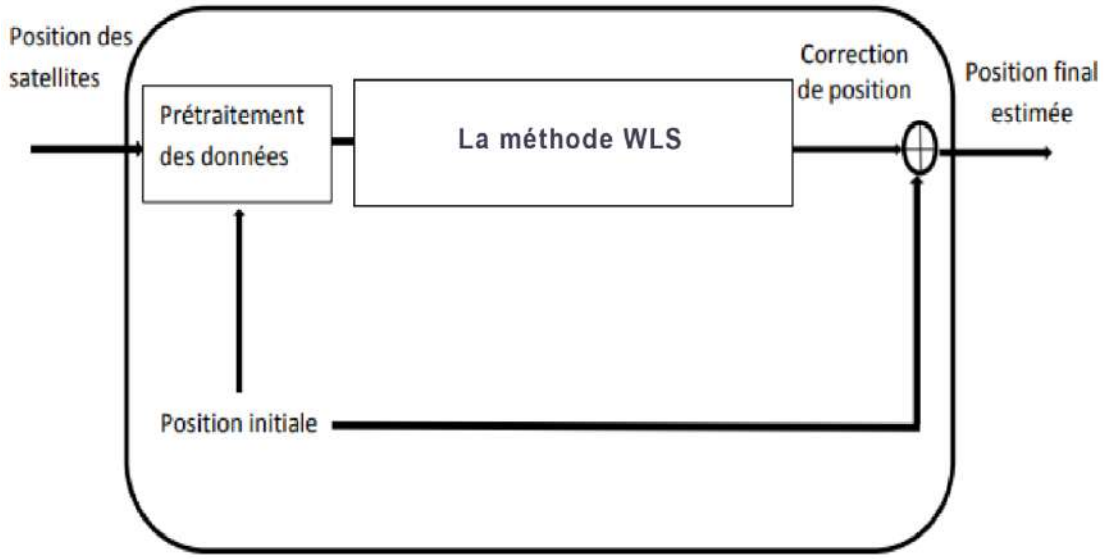


Figure 3.1. Architecture de positionnement par WLS.

III.4. Description des bases de données utilisées

Dans cette simulation, nous avons utilisé une base de données des ensembles des positions (x,y,z) basé sur le système de coordonnées Earth-Centered, Earth-Fixed (ECEF) est également connu sous le nom de système de coordonnées "terrestre conventionnel". Ces ensembles de données sont collectées sur différents scénarios de conduite, tels qu'autoroute, urbain et semiurbain, et dans différentes conditions de fonctionnement. Ainsi, ces ensembles de données fournissent une variété de paires d'entrée-sortie pour l'apprentissage du WLS.

III.5. Simulation et résultats

III.5.1. Estimation la position du récepteur par la méthode de covariance

L'organigramme suivant montre la relation entre les données et l'algorithme d'estimation de la position du récepteur GPS. La première étape de la navigation GPS consiste à utiliser les données des éphémérides pour estimer la position du satellite, (Figure 3.2).

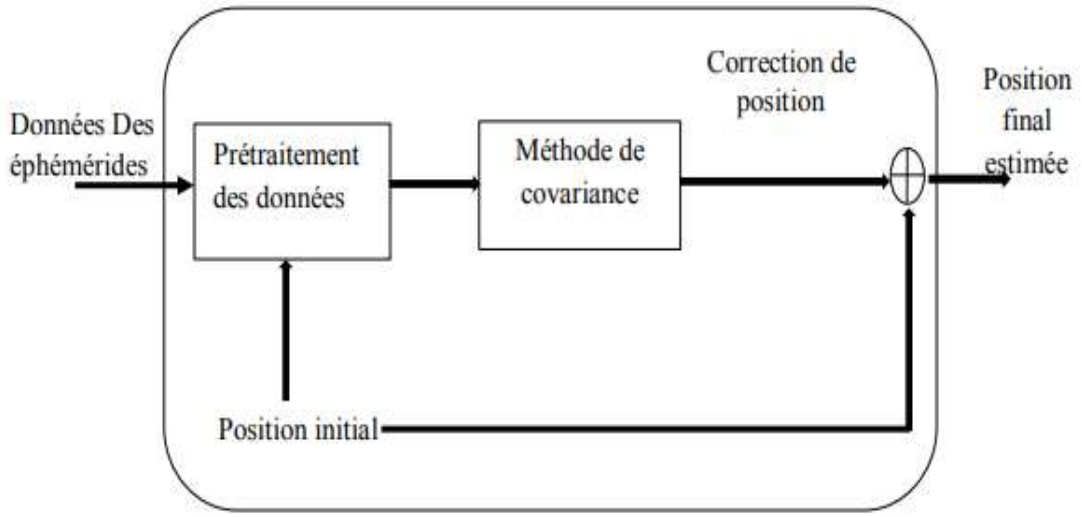


Figure 3.2. Organigramme de la méthode de covariance.

La première étape de notre simulation a été consacrée pour le calcul et la visualisation de la position des satellites et le récepteur GPS ainsi que les différentes sources d'erreurs qui influent sur la position réelle de ce récepteur. Les résultats de la simulation de la position de six satellites GPS sont présentés dans le Tableau 3.1 et la Figure 3.3.

	Satellite 1	**Satellite 2**	**Satellite 3**	**Satellite 4**	**Satellite 5**	**Satellite 6**
X(m)	1.5396 e+007	-1.1877 e+007	0.4875 e+007	-1.5951 e+007	-2.0880 e+007	0.4828 e+007
Y(m)	1.6166 e+007	1.2640 e+007	2.5641 e+007	2.0866 e+007	1.0359 e+007	1.6106 e+007
Z(m)	-1.4274 e+007	-2.0074 e+007	-0.3912 e+007	-0.2613 e+007	-1.2387 e+007	2.0722 e+007

Tableau 3.1. Position des satellites.

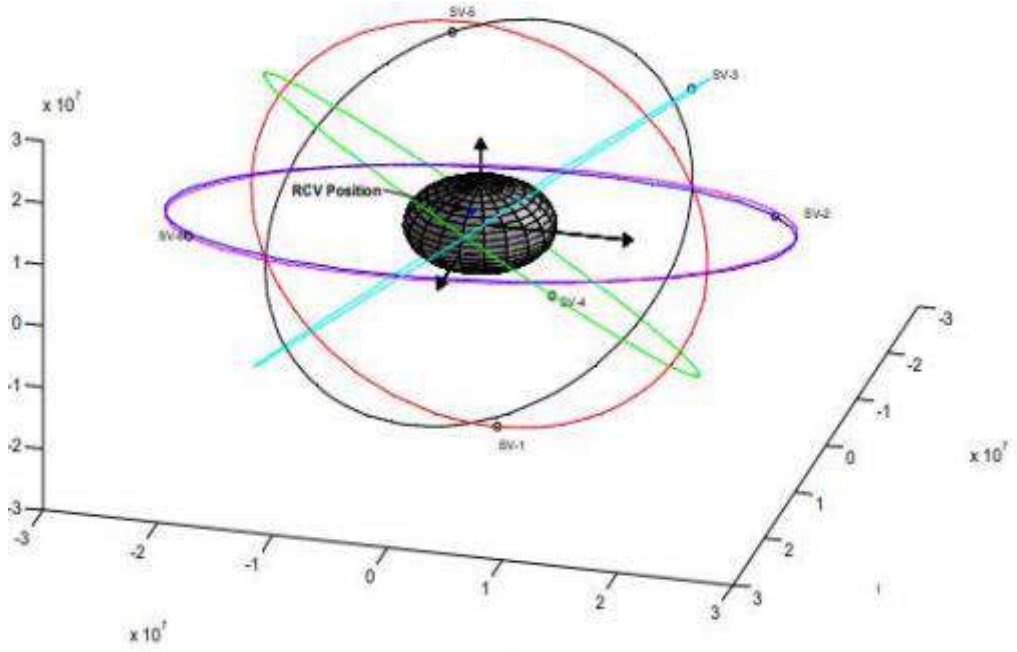


Figure 3.3. Satellite GPS et position du récepteur.

Pour l'algorithme itératif, la condition de convergence est définie comme la norme de Δx, Δy et Δz pour la simulation la condition de convergence est fixée à 1 mètre. La condition de convergence s'est produite après 4 itérations et les résultats sont présentés dans le Tableau 3.2.

Itération	$\boldsymbol{\Delta x}$	$\boldsymbol{\Delta y}$	$\boldsymbol{\Delta z}$
1	0.1111e+006	0.1067e+006	0.0001 e+006
2	1.1078 e+006	0.7490 e+006	0.0050 e+006
3	1.3946 e+006	0.8141 e+006	0.0040 e+006
4	0.7848 e+006	0.6809 e+006	0.0560 e+006

Tableau 3.2. Résolution itérative pour delta x, delta y et delta z.

Après avoir présenté les six satellites GPS qui tournent dans leur orbite autour de la terre ainsi que la position du récepteur GPS qui est localisé sur terre dans la figure précédente, la Figure 3.4 et la Figure 3.5 présentent l'erreur d'horloges du récepteur GPS qui a une grande influence sur le Positionnement des récepteurs GPS et l'erreur d'horloge du satellite, et la Figure 3.6 représente les positions du récepteur GPS.

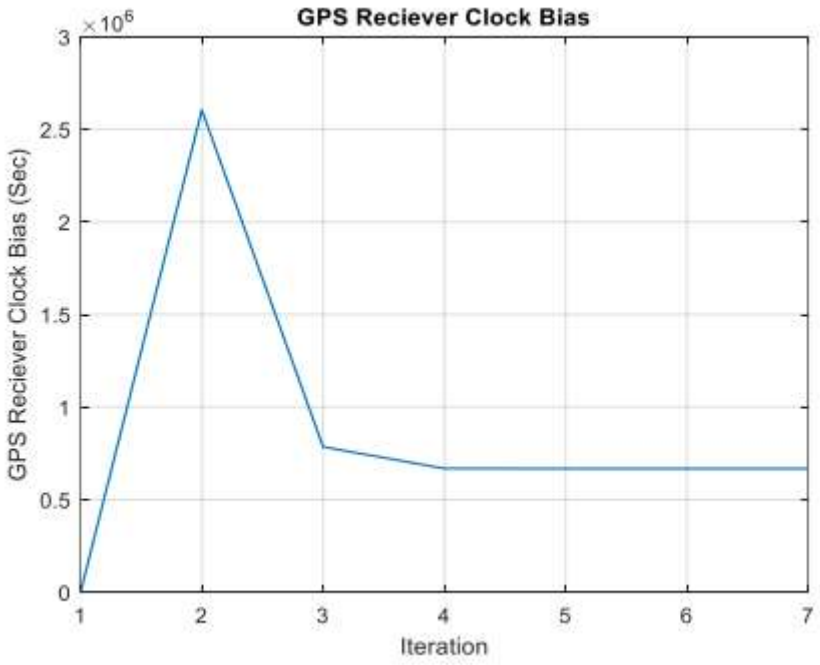


Figure 3.4. Erreur d'horloge du récepteur GPS.

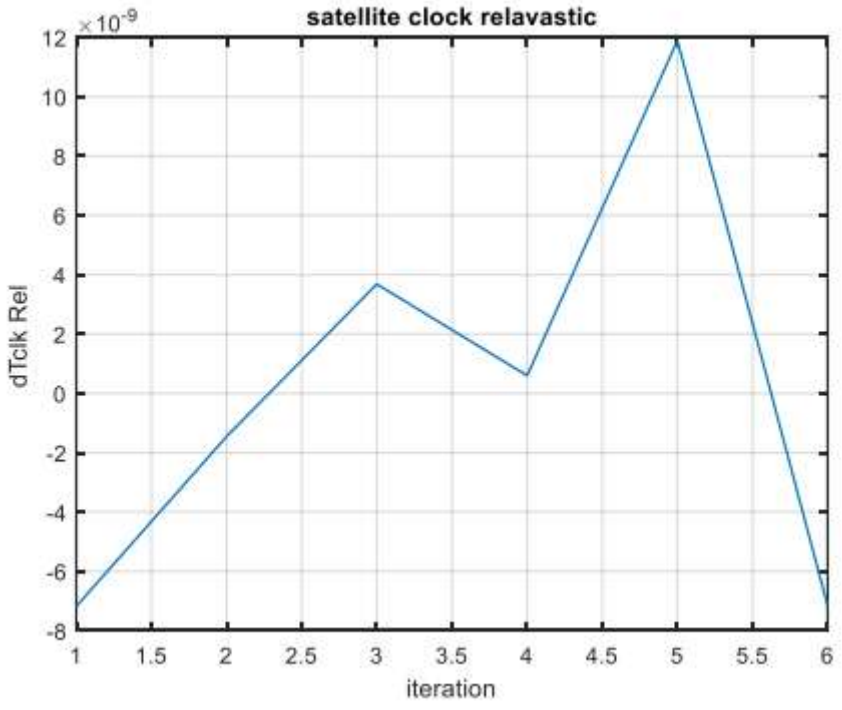


Figure 3.5. Erreur d'horloge relative au satellite.

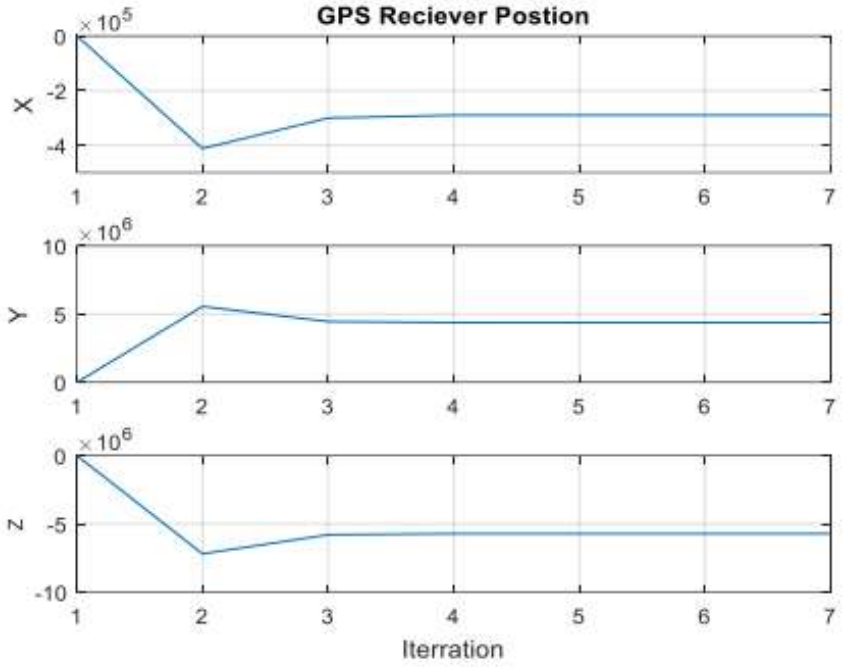


Figure 3.6. Position du récepteur GPS.

L'erreur d'horloge satellite du GPS comprend deux types d'erreur : les erreurs dans l'horloge du récepteur appelée décalage de l'horloge du récepteur, et les erreurs dans le signal inexact de réception du satellite, Voici le Tableau 3.3 suivant qui illustre les différentes erreurs calculées de six satellites :

Erreur	**Satellite 1**	**Satellite 2**	**Satellite 3**	**Satellite 4**	**Satellite 5**	**Satellite 6**
Erreur décalage(s)	3.1532 e-05	1.2003 e-4	-2.7334 e-7	-1.6363 e-5	7.8390 e-4	-6.8825 e-6
Erreur relativité(s)	6.2697 e-9	-3.1723 e-9	-7.2228 e-9	-1.0670 e-8	-9.7982 e-9	6.0348 e-10
Erreur ionosphère (m)	13.9764	13.4639	14.0905	14.1733	14.1401	12.6333
Erreur troposphère(m)	3.8331	2.8575	4.6552	6.6872	5.4757	2.5008

Tableau 3.3. Les différents erreurs.

III.5.2. Estimation la position du récepteur par la méthode de WLS

Dans cette partie, on a utilisé l'architecture de système GPS basé sur la méthode WLS (Figure 3.1), l'algorithme de mesure GNSS est fourni pour :

- Calculer et visualiser des pseudo-distances,
- Calculer la position et la vitesse des moindres carrés pondérés,
- Visualiser et analyser la phase porteuse.

La Figure 3.7 montre le rapport temps réel porteuse/densité de bruit GNSS en fonction du temps pour tous les satellites et constellations visibles avec rapport cyclique et sans phase de porteuse. L'écran affiche également le rapport moyen de densité de porteuse sur bruit des 6 satellites les plus puissants et d'autres résumés de porteuse sur bruit.

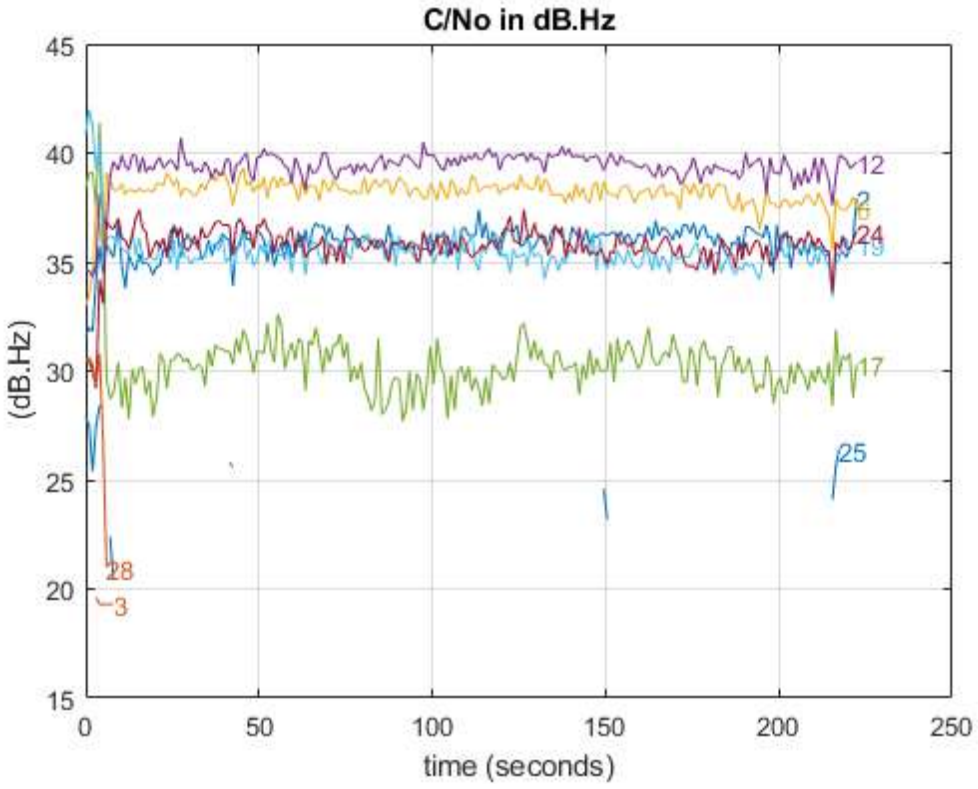


Figure 3.7. Affichage de l'intensité du signal.

Les erreurs dans la détermination des coordonnées de latitude et la longitude, et les statistiques de la solution de navigation sont illustré dans la figure 3.8. On peut voir dans la figure que la pire précision et instabilité de la solution est l'altitude. Longitude est stable et plus précis.

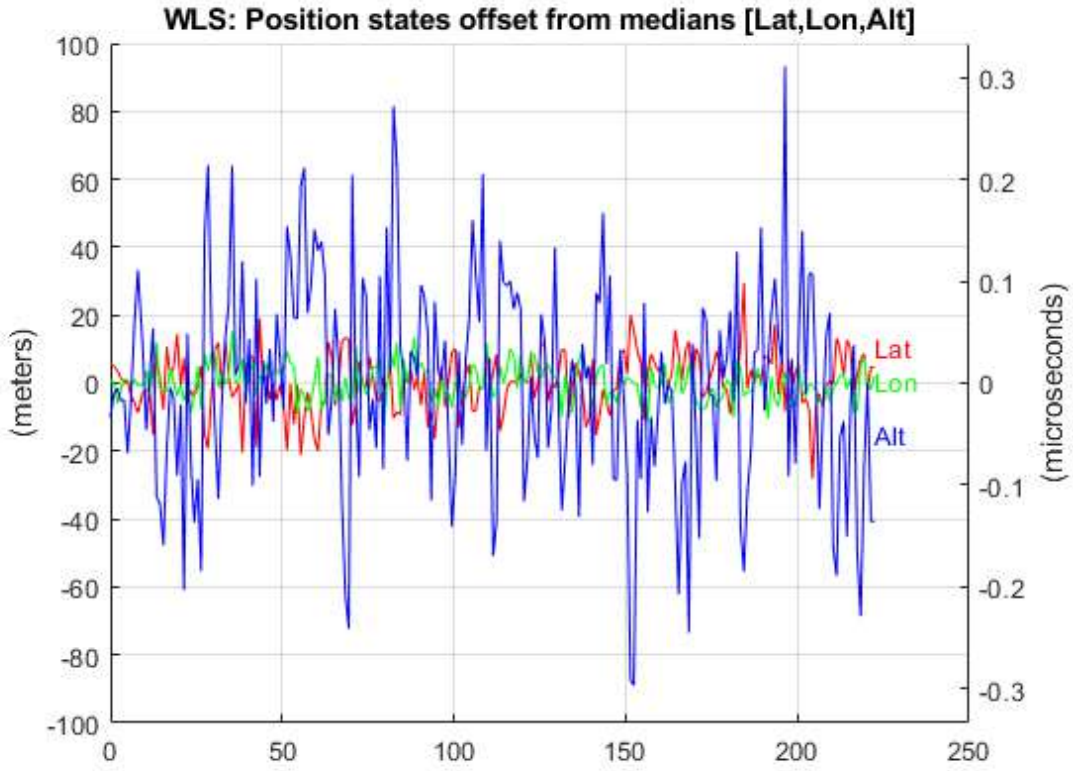


Figure 3.8. États de position décalés par rapport aux médianes.

La solution calculée sur la base de la méthode des moindres carrés pondérés (WLS) est présentée dans la Figure 3.9 ci-dessous. Ce chiffre, contrairement aux autres obtenus dans Matlab, l'algorithme des moindres carrés pondérés mis en œuvre par nous. La vraie valeur est obtenue avec une précision de 1 cm. l'erreur de position calculée sur la base des mesures brutes est de 0.9 m.

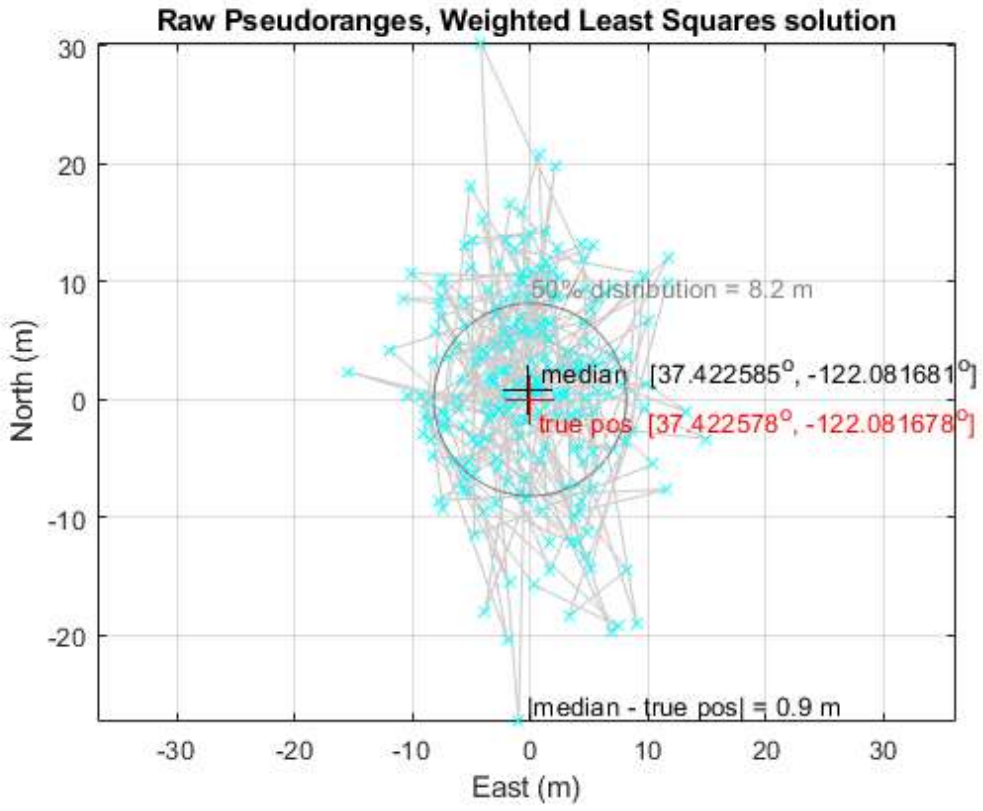


Figure 3.9. Solution des moindres carrés pondérés (WLS).

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, on a fait une simulation de système de positionnement GPS. On a commencé à présenter l'architecturé de système GPS basé sur la méthode de covariance et la méthode des moindres carrés pondérés (WLS). Puis, on a fait plusieurs tests, basés sur deux jeux de donnés. Dans la première, on a fait de calculer sur la position du récepteur et résolution itérative pour delta x, delta y et delta z. Ensuite, on a appliqué l'algorithme des moindres carrés pondérés qui a donner L'erreur de position calculée et améliorer le positionnement de GPS.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les systèmes de navigation sont intégrés dans plusieurs applications dans notre vie ; on peut citer la téléphonie mobile, les véhicules, l'aviation …etc. Ces systèmes de mesure de la position, la vitesse et du temps utilisent un traitement du signal très efficace basé sur des caractéristiques de codage, transmission et de réception avancées.

Dans ce travail, on s'est intéressé aux méthodes d'apprentissage profond et moindres carrés pondérés (WLS) pour estimer la position d'un récepteur GPS. L'idée générale de cette approche est d'avoir une méthode plus robuste pour le calcul la position.

Dans ce manuscrit on a parlé sur le système de navigation par satellites GNSS, on a donné le principe de fonctionnement, les différents systèmes de navigation par satellites qui existe, ainsi que le GPS.

Après avoir présenté les signaux GNSS, les caractéristiques, structure et les sources d'erreur qui influent sur la précision de positionnement on a utilisé la méthode des moindres carrés pondérés (WLS) pour améliorer cette précision.

Dans le dernier chapitre on a présenté les résultats obtenues en utilisant la méthode de covariance et de WLS ou on a constaté que l'utilisation de WLS a donné des résultats meilleurs et une amélioration du positionnement du récepteur GPS.

Bibliographie

Bibliographies

[1] Elliott D. Kaplan Christopher J. Hegarty, ‘’Understanding GPS/GNSS Principles and Applications Third Edition”.

[2] P. Misra et P. Enge. Global Positioning System (Signals, Measurements, and Performance). Ganga-Jamuna Press, 2006.

[3] S. Botton, F. Duquenne, Y. Egels, M. Even et P. Willis, GPS, localisation et navigation. Editions Hermès, Paris, Janvier 1997.

[4] Global Positioning System, Standard Positioning Service Performace Standard. Rapport technique, 2008, http://www.navcen.uscg.gov/GPS/geninfo/ 2008SPSPerformanceStandardFINAL.pd

[5] GEORGE GEORGES,‘’ Algorithmes de calcul de positions GNSS bases sur ´ les méthodes des moindres carrées avancée ‘’, thèse de doctorat Université de Technologie de Belfort-Montbéliard,2016.

[6] GLONASS Interface Control Document. Rapport technique, Coordination scientific information cen ter, Mos cou, 2002, ver sion 5.0, http://www. glonass-ianc.rsa.ru.

[7] Galilei Project, Galileo Design Consolidation. Rapport technique, European Commission, 2003, http://www.esa.int/esaNA/galileo.html.

[8] J.-L. Issler, Présentation du système GALILEO. Département RadioNavigation, CNES, 2004.

[9] China Satellite Navigation Office, Development Report of BeiDou Navigation Satellite System, (v. 2.2), December 2013, http://www.beidou.gov.cn

[10] Ran, C., “Status Update on the BeiDou Navigation Satellite System (BDS),” 10th Meeting of the International Committee on Global Navigation Satellite Systems (ICG), Boulder, CO, November 2–6, 2015, http://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/icg/meetings/icg-10/ presentations.html

[11] Status Update on the Quasi-Zenith Satellite System Presentation to ICG-10, Boulder, CO, 2015. http://www.unoosa.org/pdf/icg/2015/icg10/06.pdf. Accessed on January 1, 2015.

[12] Fan, B., Z. Li, and T. Liu, "Application and Development Proposition of Beidou Satellite Navigation System in the Rescue of Wenchuan Earthquake [J]," Spacecraft Engineering, Vol. 4, 2008, pp. 6–13.

[13] Indian Regional Navigational Satellite System, Signal in Space ICD for Standard Positioning Service, Version 1, ISRO-IRNSS-ICD-SPS-1.0, ISRO, June 2014, pp. 2–3. http://irnss. isro.gov.in.

[14] Vithiyapathy, P., "India's Strategic Guardian of the Sky," Occasional Paper 001-2015, August 25, 2015, Chennai Centre for China Studies, http://www.c3sindia.org/strategicissues/5201. Accessed January 1, 2015.

[15] Indian SATNAV Program, "Challenges and Opportunities Presentation by Dr. S. V. Kibe, Program Director, SATNAV," ISRO Headquarters, Bangalore, 1st ICG Meeting, UN OOSA, Vienna, Austria, November 1–2, 2006. www.unoosa.org/pdf/sap/2006. Slide 25. Accessed January 1, 2015.

[16] DJ. Moelker, EV. Pol et BN. Yeheskel, "Adaptive antenna arrays for interference cancellation in GPS and GLONASS receivers," dans *Proceeding of the IEEE position location and navigation symposium,* pp 191–8, 1996.

[17] G S Rao "Globale Navigation Satellite système, With Essential of satellite Communication" ISBN 978-0-07-070029-1.

[18] G. Manoj Someswar, T. P. Surya Chandra Rao Dhanunjaya Rao. Chigurukota "Global Navigation Satellite Systems and Their Applications" International Journal of Software and Web Sciences (IJSWS), IJSWS 12-326; © 2013.

[19] Paul D. Groves "Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems" ISBN 1608070050, 9781608070053.

[20] Bernhard Hofmann-Wellenhof "GNSS – Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo,And more" ISBN 978-3-211-73012-6 springerwiennewyork.

[21] M. Braasch and A. V. Dierendonck, "GPS Receiver Architectures and Measurements," Proceedings of the IEEE, vol. 87, no. 1, pp. 48–64, 1999.

[22] S. Fisher and K. Ghassemi, “GPS IIF-the Next Generation,” Proceedings of the IEEE, vol. 87, no. 1, pp. 24–47, 1999.

[23] B. Parkinson and J. Spilker, Global Positioning System : Theory and Applications. Volume 1. Progress in Astronautics and Aeronautics, 1996.

[24] ESA, Galileo Open Service, Signal In Space Interface Control Document, 2010.

[25] Jean Mark Pieplu : GPS et Galileo systèmes de navigation par satellites Eyrolles. 2009.

[26] P.T. Capozza, .B.J. Holland, T.M. Hopkinson, R.L. Landrau, “A single-chip narrow-band frequency-domain excisor for the global positioning system (GPS) receiver,” IEEE journal of solid-state circuits, vol. 35,no. 3,pp. 401 – 411, 2000.

[27] X. Quyang et M.G Amin, “Short-time fourier transform receiver for nonstationary interference excision in direct sequence spread spectrum communications,” IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 49, no. 4, pp. 851-863, 2001.

[28] R.J Landry, P. Mouyon et D. Lekaim,”Interference mitigation in spread spectrum systems by wavelet coefficients thresholding,” European Transactions on Telecommunications, vol. 9, no. 2, pp. 191-202, 1998.

[29] M. Mosavi, M. Rezaei, M. Pashaian et M. Moghaddasi, “A fast and accurate anti-jamming system based on wavelet packet transform for GPS receivers”. GPS Solutions, vol. 21, no. 2, pp. 415–426, 2018.

[30] Aboelmagd Noureldin, Tashfeen B. Karamat, Jacques Georgy,’’ Fundamentals of Inertial Navigation, Satellite-based Positioning and their Integration’’,2013.

[31] Abderrahim BOURKANE,’’ Estimation du rapport signal `a bruit d’un signal GPS par filtrage non linéaire’’,thèse de doctorat , Université du Littoral Côte d’Opale,2015.

[32] M. Chuang and K. Feng, “Adaptive GPS Acquisition Technique in Weak Signal Environment,” in IEEE 63rd Vehicular Technology Conference, 2006.

[33] G. Seco-Granados, J. Lopez-Salcedo, D. Jimenez-Banos, and G. Lopez-Risueno, “Challenges in Indoor Global Navigation Satellite Systems : Unveiling its core features in signal processing,” IEEE Signal Processing Magazine, vol. 29, no. 2, pp. 108–131, 2012.

[34] D. Borio, L. Camoriano et L.L. Presti, “Two-pole and multi-pole notch filters: a computationally effective solution for GNSS interference detection and mitigation,” IEEE System Journal, vol. 2, no.1, pp.38-47, 2008.

[35] E. Kaplan and J. Hegarty, Understanding GPS : Principles and Applications. Artech house, 2005.

[36] A. Bourkane. Estimation du rapport signal a bruit d’un signal GPS par filtrage non linéaire. Thèse doctorat, Université de Tanger, 2015.

[37] J. Tsui, Fundamentals of Global Positioning System Receivers: A Software Approach. John Wiley & Sons, 2005.

[38] J. Angelo,” What is the difference between SNR and C/N0 ,” Inside GNSS,vol.5 ,pp. 20–25, 2010.

[39] T. Takasu, RTKLIB ver. 2.4.2 Manual. April 29, 2013.

[40] John S Chipman. Gauss-markov theorem. In International Encyclopedia of Statistical Science, pages 577–582. Springer, 2011.

[41] Brian J Aitken and Ann E Harrison. Do domestic firms benefit from direct foreign investment ? evidence from venezuela. American economic review, pages 605–618, 1999.

[42] Alexander Craig Aitken. Vi.—on the graduation of data by the orthogonal polynomials of least squares. Proceedings of the Royal Society of Edinburgh, 53 : 54–78, 1934.