

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou



Faculté De Génie Electrique et d'Informatique
Département de Télécommunications



Mémoire de Fin d'Etudes de

MASTER ACADEMIQUE

Filière :

Télécommunications

Spécialité :

Réseaux & Télécommunications

Par

Lamia BENHAMIDAT

Sihem OUBELLIL

Thème

**Techniques avancées de réduction de l'effet des
multi-trajets dans la réception des signaux GNSS**

Soutenu le : 25/06/2024

Devant le jury :

Président :	Mr. Mohammed Chamse Eddine OUADAH	MCA	Université Ummto
Promoteur :	Mr. Salem TITOUNI	MCB	Université Ummto
Examineurs :	Mr. Abdallah HEDIR	MCA	Université Ummto

2023/2024

Remerciements

Louanges à ALLAH, le tout puissant et miséricordieux, de nous avoir donné le courage et la patience pour mener à bien ce modeste travail.

Nous voudrions tout d'abord adresser tous nos remerciements à Monsieur Salem TITOUNI notre promoteur, enseignant à l'université de Tizi-Ouzou, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ces conseils déterminants qu'il a porté pour mener à bien ce travail.

Nous tenons à exprimer nos chaleureuse remerciements à Mr Mohammed Chamse Eddine OUADAH pour nous avoir fait l'honneur de présider le jury ainsi qu'à Mr Abdallah HEDIR pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Nous remercions nos enseignants de faculté de Génie Electrique et Informatique pour leurs efforts voués à nous transmettre le savoir, en particulier ceux de département Télécommunications.

Enfin, nous tenons à témoigner toute notre gratitude à toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce présent travail.

Dédicace 1

Je dédie ce projet :

A mon cher père

Amon cher père, aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime. Je te remercie du fond du cœur pour ta présence constante, ton soutien indéfectible, tes conseils avisés qui ont façonné mon caractère et ma vision du monde et ton amour inconditionnel qui m'ont guidé à chaque étape de ma vie.

Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour, puisse dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.

A ma chère mère

A ma chère mère, honorable, aimable : tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence. la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager. Ta douceur et ton courage sont des étoiles qui guident mes pas. Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte.

A mes chers frères

A mes chers frères **Adel** et **Karim**, en témoignage de l'attachement. De l'amour et de l'affection que je porte pour vous. Vos conseils précieux et votre présence inestimable dans ma vie. Votre soutien et votre amitié sont des trésors que je chérirai toujours. Vous êtes toujours dans mon cœur. Je vous remercie d'être l'épaule sur laquelle je peux toujours compter.

Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.

A mes chers amis

Vous êtes pour moi des sœurs sur qui je peux compter. Je vous remercie pour vos amitiés qui nous unit et des souvenirs de tout moments que nous avons passés ensemble et sont oubliés ma binôme **Sihem** merci pour ton incroyable collaboration tout au long de notre projet. Je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.

Lamia

Dédicace 2

À mon père bien-aimé

Pilier de ma vie, ton amour et ta sagesse ont été le vent sous mes ailes. Ta présence a été mon guide, ton soutien mon refuge. Pour chaque prière, pour ta foi inébranlable en mes rêves, pour chaque leçon de vie et chaque mot d'encouragement, je te dédie ce travail en signe de ma gratitude éternelle. Qu'ALLAH te bénisse avec toute la santé et le bonheur que tu mérites et te garde pour moi « mon **Héros** ».

À ma mère adorée

Symbole de pureté et de sacrifice, tu es la lumière qui éclairé mon chemin. Pour ton amour sans limite, pour chaque sourire et chaque larme, aucune dédicace ne saurait suffire. Je te dédie ce travail en signe de mon appréciation infinie. Que chaque jour te soit aussi lumineux que l'amour que tu as semé dans ma vie, qu'ALLAH te garde pour moi « ma **Reine** ».

À ma sœur chérie, son mari exceptionnel et leurs enfants merveilleux

Vous êtes le cœur battant de ma vie, la symphonie douce qui joue en arrière-plan de mes jours. Mon âme « **Roza** », ton amour et ta force m'ont inspiré à poursuivre l'excellence. À toi et ton mari « **Kader** », qui avez créé un havre de paix et d'amour pour vos enfants, et pour tous les moments partagés, je dédie ce travail. Vos enfants « mes Trésors **Fouzia, Kenza, Idris et Zakaria** », sont la promesse d'un avenir radieux. Que ce projet soit le miroir de votre bonheur familial et de l'affection profonde qui vous unit.

À mes frères, mes compagnons de toujours, et à leurs merveilleuses épouses,

Vous êtes les gardiens de mes souvenirs les plus précieux. Votre force et votre intégrité sont les boussoles qui me guident. L'amour de vos femmes, qui est aussi vaste que l'océan, apporte paix et sérénité à nos cœurs. Pour « **Mohand&Nadjema** », « **Cherif&Karima** » j'offre cette dédicace en gage de mon admiration éternelle. Sans oublier mon petit frère « **Saïd** », le compagnon inséparable de mes rires et de mes soucis. Et mes adorables neveux, votre innocence et votre joie de vivre sont les sources d'inspiration qui nous rappellent la pureté de l'enfance. À travers cette dédicace, je vous transmets toute la fierté et l'amour que j'ai pour vous « **Aylane et Ayeman** ».

À mes précieux amis

Votre amitié est un cadeau précieux que je chéris chaque jour. Merci d'être vous-mêmes, d'être vrais, et d'être toujours là. Ensemble, nous avons partagé des souvenirs inoubliables, et j'attends avec impatience tous ceux qui nous attendent encore « Lynda, Lisa, Malha, Kenza TKR, Lydia AM, Sarah, Melissa, Kenza IMR, Yasmina, Cherifa ZS et Lydia KDR » sans oublier ma fabuleuse binôme « Lamia », Dieu Merci pour ces belles rencontres.

Sihem

Sommaire

Remerciements	
Dédicace 1	
Dédicace 2	
Liste des figures	9
LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES	11
Résumé	13
Introduction Générale	14
Chapitre I : Généralités sur les systèmes GNSS	16
1 Introduction	17
2 Principe de positionnement par satellites	18
3 Architecture du système Galileo	19
4 Les services offerts par le système Galileo	22
5 Les signaux Galileo OS	24
5.1 Technique d'étalement de spectre	24
5.2 Modulation BOC	25
5.3 Fonction d'Autocorrélation et Densité Spectrale de puissance du signal BOC	26
5.4 Modulation MBOC (Multiplexed BOC)	28
6 Récepteur GNSS	30
6.1 Acquisition	30
6.2 Poursuite	30
7 DLL	31
7.1 DLL Cohérente	31
7.2 DLL non Cohérente	31

Sommaire

8	La courbe S	32
9	Performances et sources d'erreur	32
9.1	Les performances	32
9.2	Les sources d'erreurs.....	33
10	Conclusion.....	34
Chapitre II : Méthodes de réduction des erreurs de multi-trajets.....		35
1	Introduction.....	36
2	Multi trajets.....	36
2.1	Réflexion spéculaire.....	37
2.2	Réflexion diffusée.....	38
2.3	Diagramme de phase.....	39
3	Caractéristique des MTs Galileo	40
3.1	FAC en présence de MT.....	40
3.2	Tension d'erreur (courbe S) en présence de MT	41
3.3	Retard de Propagation	43
3.4	Atténuation due aux MTs	43
3.5	Changement de polarisation	44
4	Techniques d'amélioration des performances	44
4.1	Corrélateurs étroits.....	45
4.2	Corrélateur Double-delta.....	45
4.3	Corrélateur HRC.....	46
4.4	Un corrélateur stroboscopique.....	46
4.5	Filtresdifférentiateurs	47
5	Critères d'évaluation de performance	48
5.1	Critère de l'enveloppe d'erreur de MT	48
5.2	Critère de la moyenne courante	49

Sommaire

5.3	Critère de la variance	49
6	Conclusion	50
Chapitre III : Résultats de Simulation		51
1	Introduction.....	52
2	Implémentation numérique	52
2.1	Méthode du NC.....	52
2.1.1	Présenter le schéma bloc.....	52
2.1.1	La fonction ou discrimination avec et sans MT	53
2.2	Méthode du HRC	54
2.2.1	Présenter le schéma bloc.....	54
2.2.2	La fonction ou discrimination avec et sans MT	54
2.1	Méthode du SC	55
2.3.1	Présenter le schéma bloc.....	55
2.3.2	La fonction ou discrimination avec et sans MT	56
3	Discriminateur du NC, HEC et SC.....	57
3.1	Comparaison entre les trois Méthodes	57
4	Effet des MTs.....	58
4.1	Critère de la moyenne courante	58
4.1.1	Signal BOC	58
4.1.2	Signal MBOC.....	59
4.1.2.1	Signal CMBOC	59
4.1.2.2	Signal TMBOC.....	60
4.2	Critère de l'enveloppe d'erreur.....	61
4.3	Critère de la variance	62
5	Conclusion	63
Conclusion Générale		64

Sommaire

Références.....65

Liste des figures

Figure I.1 Les systèmes GNSS [1].	17
Figure I.2 Méthode de triangulation [10].	18
Figure I.3 Principe de positionnement par satellites [20].	19
Figure I.4 Architecture du système Galileo [12].	20
Figure I.5 Le segment spatial [10].	20
Figure I.6 Le segment de sol [10].	21
Figure I.7 Le segment utilisateur [10].	22
Figure I.8 Schéma global du principe d'étalement spectral [8].	25
Figure I.9 Code PRN, sous porteuse et signal modulé [4].	26
Figure 10 FACs des signaux BOC (kn, n) [4].	27
Figure I.11 DSPs des signaux BOC (kn, n) leurs caractéristique [4].	27
Figure I.12 Fac du signal CBOC.	28
Figure I.13 FAC du signal TMBOC.	29
Figure I.14 Densité spectrale de puissance du signal MBOC [17].	29
Figure I.15 Principe de fonctionnement de la DLL [13].	31
Figure I.16 Tension d'erreur « DLL Cohérente » et « DLL non-Cohérente » [17].	32
Figure I.17 Représentation des différentes erreurs de propagation [7].	33
Figure II.18 Exemplification des Multi-Trajet [24].	36
Figure II.19 Illustration du phénomène du Multi-trajet [6].	37
Figure II.20 Fonction d'autocorrélation avec MT.	37
Figure II.21 Première zone de Fresnel sur le plan réfléchissant [24].	38
Figure II.22 Réflexion spéculaire et réflexion diffusée [7].	39

Liste des figures

Figure II.23 Diagramme de phase [3].....	39
Figure II.24 LOSFAC, MFAC et FACC du signal BOC (1,1).	41
Figure II.25 Tension d'erreur avec et sans MTs.	42
Figure II.26 Réflexion sur un plan quelconque [4].	43
Figure II.27 Signal réfléchi atténué par rapport au trajet direct [4].	44
Figure II.28 Concept de corrélateur double delta [4].	46
Figure III.29 Superposition de la corrélation du MT sur la corrélation directe.	52
Figure III.30 Diagramme bloc de la NC.	53
Figure III.31 Les fonctions de discrimination avec et sans MT du NC.....	53
Figure III.32 Diagramme bloc de la HRC.	54
Figure III.33 Les fonctions de discrimination avec et sans MT du HRC.	55
Figure III.34 Diagramme bloc de la SC.....	56
Figure III.35 Les fonctions de discrimination avec et sans MT du SC.	56
Figure III.36 Discrimination des trois Méthodes avec MT et classique sans MT.	57
Figure III.37 La moyenne courante de l'erreur pour la modulation BOC.....	59
Figure III.38 La moyenne courante de l'erreur pour la modulation CBOC.	60
Figure III.39 La moyenne courante de l'erreur pour la modulation TMBOC.	61
Figure III.40 l'enveloppe d'erreur de modulation BOC.....	61
Figure III.41 Comparaison des Variances de l'estimation d'amplitude du signal direct en fonction du SNR pour le signal BOC avec les méthodes NC, SC, HRC.	62

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

BEIDOU	<i>Navigation Satellite System ou BDS.</i>
BOC	<i>Binary Offset Carrier.</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying.</i>
CBOC	<i>Composite Binary Offset Carrier.</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access.</i>
CF	<i>Correlation Function « Fonction de corrélation ».</i>
CNES	<i>Centre national d'études spatiales.</i>
Code C/A	<i>Coarse/Acquisition.</i>
Code P	<i>Precision « Précision ».</i>
Code PRN	<i>Pseudo Random Noise.</i>
CS	<i>Commercial Service.</i>
DLL	<i>Delay Locked Loop « Boucle à verrouillage de code ».</i>
DSP	<i>Densité Spectrale de Puissance.</i>
E1	<i>Signal centré à 1575,420 MHz (L1).</i>
E2	<i>Signal centré à 1561,100 MHz.</i>
E5	<i>Signal centré à 1191,795 MHz.</i>
E5a	<i>Signal centré à 1176,450 MHz (L5).</i>
E6	<i>Signal centré à 1268,520 MHz.</i>
ESA	<i>European Space Agency.</i>
FAC	<i>Fonction d'autocorrélation.</i>
FACC	<i>Fonction d'autocorrélation composite.</i>
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array.</i>
GLONASS	<i>GLobalNAVigationnayaSputnikovaya Sistema.</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System.</i>
GPS	<i>Global Positioning System.</i>

Liste des abréviations, sigles et acronymes

GSMC	<i>Galileo Security Monitoring Center.</i>
HRC	<i>High Resolution Correlator « Corrélateur à haute résolution ».</i>
IRNSS	<i>Indian Regional Navigation Satellite System.</i>
L1	<i>Signal centré à 1575,420 MHz.</i>
L1C	<i>Signal civil centré à 1575,420 MHz (L1).</i>
L5	<i>Signal centré à 1176,450 MHz.</i>
LOS	<i>Line Of Sight « Ligne de visibilité directe ».</i>
MBOC	<i>Multiplexed Binary Offset Carrier.</i>
MEO	<i>Medium Earth Orbit.</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output.</i>
MT(s)	<i>Multi-trajets.</i>
NavIC	<i>Navigation with Indian Constellation.</i>
NC	<i>Narrow Correlator « Corrélateur étroit ».</i>
NRZ	<i>Non-Return to Zero.</i>
OACI	<i>Organisation de l'aviation Civile Internationale.</i>
OMI	<i>L'Organisation Maritime Internationale.</i>
OS	<i>Opens Service.</i>
PLL	<i>Phase locked loop.</i>
PN	<i>Pseudo Noise « Pseudo aléatoire ».</i>
PNT	<i>Positioning, Navigation, Timing.</i>
PRS	<i>Public Regulated Service.</i>
QZSS	<i>Qausi-Zenith Satellite System.</i>
RTK	<i>Real-Time Kinematic.</i>
SAR	<i>Search and Rescue Service.</i>
SC	<i>Corrélateur stroboscopique « Strobe Correlator ».</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio.</i>
SoL	<i>Safety of Life.</i>
SPS	<i>Standard positioning service.</i>
SS	<i>Spread Spectrum.</i>
TMBOC	<i>Time-Multiplexed Binary Offset Carrier).</i>
UE	<i>Unio Européenne.</i>
VCO	<i>Voltage Controlled Oscillator.</i>

Résumé

Les applications des systèmes de navigation par satellites se sont beaucoup diversifiées, et les systèmes Galileo doit tenir compte de ce grand nombre d'applications. Parmi toutes ces applications, l'une des plus importants est la navigation en milieu urbain. En effet, l'environnement urbain est caractérisé par la présence d'un grand nombre d'obstacles qui produisent des trajets multiples. Les phénomènes de multi trajets est l'une des causes importantes de la dégradation de la précision sur la position. Le travail présenté a pour objectif de déterminer les capacités de réduction de l'effet de multi-trajets dans la réception du signal BOC avec différentes architectures de discriminateur par l'analyse théorique et simulation afin de donner un aperçu de leur performance dans des environnements différents. À la fin du notre travail nous avons fait une étude comparative entre les méthodes de réduction MT : SC, NC et HRC selon trois critères de performance qui sont l'enveloppe d'erreur, la moyenne courante et la variance.

Mots clés : GNSS, Multi-trajets, Corrélations, Galileo, BOC, DLL, Courbe-S.

Abstract

The applications of satellite navigation systems have become much more diverse, and the Galileo system must take into account this large number of applications. Among all these applications, one of the most important is urban navigation. Indeed, the urban environment is characterized by the presence of a large number of obstacles that produce multiple paths. The phenomena of multiple paths are one of the important causes of the degradation of the precision on the position. The presented work aims to determine the capabilities of reducing the multipath effect in the reception of the BOC signal with different discriminator architectures by theoretical analysis and simulation in order to give an overview of their performance in different environments. At the end of our work, we made a comparative study between the MT reduction methods: SC, NC and HRC according to three performance criteria which are the error envelope, the current mean and the variance.

Key words: GNSS, Multipaths, Correlations, Galileo, BOC, DLL, S-Curve.

Introduction Générale

L'augmentation des applications de la navigation par satellites, le manque de garantie de la disponibilité du service des systèmes GPS (Global Positioning System) et GLONASS (Global Navigation Satellite System, système russe) 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 [1]. Baptisé Galileo, ce système a été conçu par la Commission Européenne et l'Agence Spatiale Européenne (ESA) [1].

Dans son architecture, et en plus de l'utilisation de la technique d'étalement de spectre, Galileo utilise une nouvelle structure des signaux et une modulation BOC (Binary Offset Carrier) supplémentaire qui est la modulation à double décalage fréquentiel ou modulation de porteuse à offset binaire [2]. Ce système sera sous contrôle civil et sera inter-opérable avec les systèmes existants GPS et GLONASS [3]. Sa constellation sera composée de 30 satellites, positionnés selon trois orbites MEO (Medium Earth Orbit) planes circulaires, à 23222 km d'altitude et avec inclinaison de 56 degrés [4].

Galileo est conçu pour offrir six services aux usagers dotés de récepteurs. Ces services sont fournis par l'intermédiaire des signaux diffusés par l'ensemble des satellites de la constellation [5]. Chaque satellite transmettra six signaux de navigation désignés comme E1 OS (Open Service), E1 PRS (Public Regulated Service), E6 CS (Commercial Service), E6 PRS, E5a et E5b. La structure du signal et des données diffusées est adaptée aux spécificités de chaque service [5].

Le positionnement par satellite possède beaucoup d'avantages par rapport aux instruments long temps utilisés et offre aujourd'hui une précision inégalée par rapport aux autres systèmes. Néanmoins, il se heurte à des problèmes liés à la propagation. L'effet des obstacles du milieu de réception reste l'un des problèmes majeurs et une question délicate à résoudre du fait de son caractère local et temporel [6]. Les objets de l'environnement de navigation (immeubles, arbres...) peuvent en effet bloquer le signal issu du satellite ou modifier sa trajectoire par réflexion ou diffraction [7].

Dans le cadre des systèmes GNSS, les MTs doivent être traités comme des interférences. En effet, le composant MT (n'étant pas filtrée par les étages RF (Radio Fréquence) en raison de la forte corrélation des MTs avec le signal direct) va venir s'ajouter à la composante directe, ce qui va avoir pour effet de biaiser l'estimation du temps de propagation [8].

L'objectif de ce travail de fin d'étude Master est de déterminer les capacités de réduction de l'effet de MT dans la réception de signal avec différentes architectures de discriminateurs par l'analyse théorique et simulation afin de donner un aperçu de leur performance dans des environnements différents.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres :

Le chapitre initial traite du concept de positionnement par satellites et de leur structure dans le système Galileo. Ce chapitre présente une partie des signaux Galileo OS et explique le principe des mesures des récepteurs Galileo. Il aborde aussi les performances, qui sont l'une des principales causes d'erreurs qui impactent les signaux satellitaires.

Le deuxième chapitre, il porte sur la notion des multi trajets. A pour objectif de présenter les techniques les plus couramment utilisées pour réduire les effets des MTs, qui sont déjà présentes dans la littérature et qui visent à résoudre l'ambiguïté causée par les faux points de verrouillage dans la fonction d'autocorrélation du signal BOC. Dans notre mémoire, nous nous concentrons principalement sur les techniques les plus pratiques, les plus populaires et les plus efficaces, telles que les structures précédentes (NC, Corrélateur Double-delta, HRC, SC et Filtres différentiateurs).

Finalement, dans le troisième chapitre, nous allons examiner et mettre en œuvre les méthodes de traitement de signal mentionnées dans la littérature afin d'améliorer les performances. Nous allons tracer la fonction de corrélation, ainsi que l'enveloppe d'erreur des MTs corrélateurs étroits, HRC et SC. Ensuite, nous allons comparer ces critères pour déterminer la méthode la plus efficace pour réduire les MTs.

Nous terminerons ce mémoire en présentant les résultats de la simulation, puis en concluant de manière générale et en proposant des perspectives.

Chapitre I : Généralités sur les systèmes GNSS

1 Introduction

Les satellites sont des objets qui orbitent autour d'une planète ou d'une étoile. Ils peuvent être naturels, comme les lunes, ou artificiels, comme les satellites construits par l'homme. Les systèmes GNSS, tels que le GPS, GLONASS, Galileo, BEIDOU, QZSS et NAVIC, forment un réseau de constellations de satellites qui diffusent des données de positionnement, de navigation et de synchronisation à l'échelle mondiale [9]. Ces satellites émettent des signaux radiofréquences utilisés par une multitude d'applications, allant de la localisation à la navigation, en passant par le suivi, la cartographie et la synchronisation précise, la surveillance de la Terre, la recherche scientifique [10]. Le segment spatial des systèmes GNSS désigne les constellations de satellites, le segment sol suit les satellites et transmet des informations, tandis que le segment utilisateur concerne les récepteurs utilisant les signaux des satellites pour déterminer leur position, leur vitesse et l'heure précise [10]. La localisation par GNSS repose sur le principe de triangulation, où la position est estimée en mesurant la distance à plusieurs satellites [10].

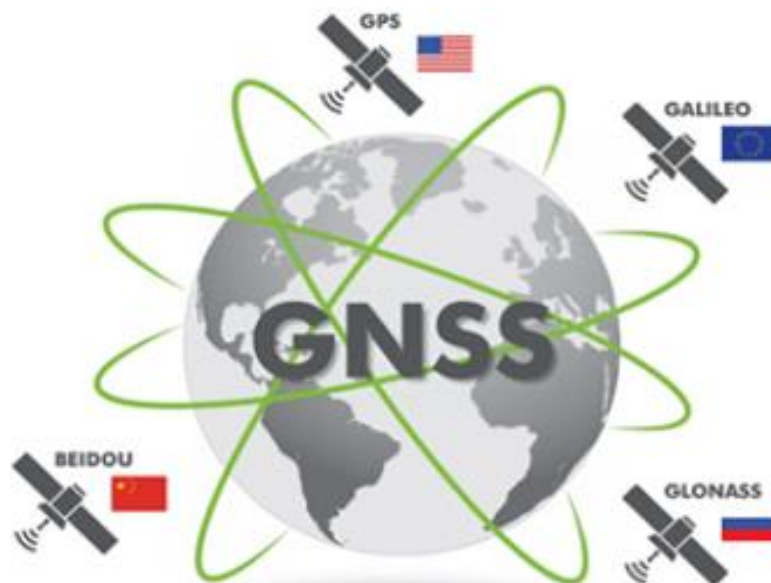


Figure I.1 Les systèmes GNSS [1].

Ce chapitre jettera les bases essentielles pour comprendre le rôle fondamental et le principe de fonctionnement des satellites GNSS dans la réception des signaux et l'importance de réduire l'effet des multi-trajets pour une précision accrue dans les applications de navigation et de localisation. Et pour cela on a choisi le système GALILEO pour l'étudier, il fait partie du système européen de navigation par satellite, développé en collaboration avec

l'Agence spatiale européenne (ESA) et l'Union européenne [11]. Il repose sur une constellation de trente satellites, dont 27 sont opérationnels et 3 en réserve. Ce système offre une précision de localisation en temps réel de l'ordre du mètre, ce qui le rend adapté à un large éventail d'applications, telles que le contrôle du trafic, la régulation de la circulation routière, le suivi des avions en phase d'atterrissage, etc. Galileo vise à offrir une alternative au GPS, avec une plus grande précision et une indépendance par rapport à d'autres systèmes de positionnement par satellite.

2 Principe de positionnement par satellites

Les systèmes de positionnement par satellites sont une technologie essentielle dans notre société moderne car ils incluent une précision élevée dans la détermination de la position, une fiabilité et une couverture continue même dans des endroits reculés. Ces systèmes utilisent une constellation de satellites en orbite autour de la terre pour envoyer des ondes radio au sol. Ces ondes sont prises par un capteur au sol qui reçoit le signal de plusieurs de ces satellites simultanément. Le récepteur procède à la détermination de la position quand il y a suffisamment de satellites visibles pour effectuer une trilatération ou la triangulation [11].

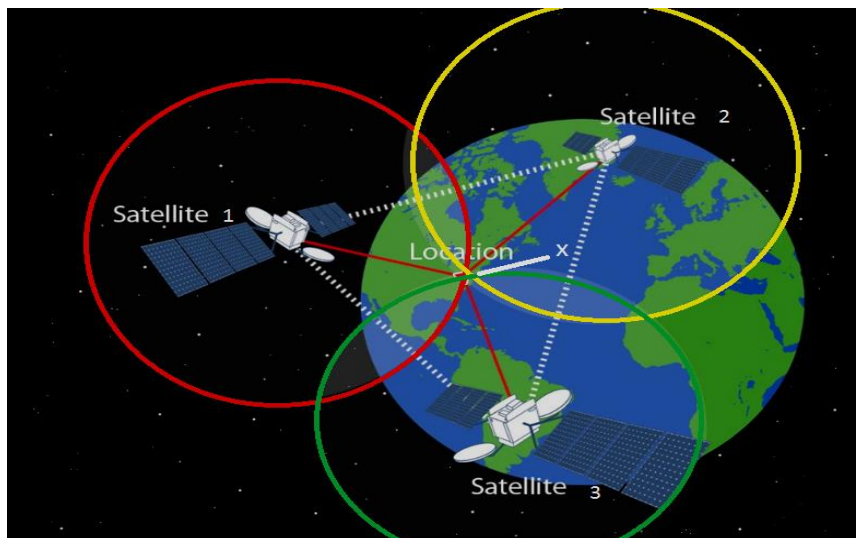


Figure I.2 Méthode de triangulation [10].

Cette Méthode nécessite de connaître la position d'au moins quatre satellites et la mesure de la distance entre la position du récepteur (inconnue) et celle de chaque satellite (connue), il est possible de calculer la position en utilisant le théorème de Pythagore. Parmi les systèmes de positionnement par satellites existant ou en construction, on peut en présenter trois. Il s'agit du système américain GPS, du système russe GLONASS et du système européen GALILEO. Une fois GALILEO opérationnel, le GNSS reposera essentiellement sur les deux

systèmes GPS et GALILEO. L'intérêt du GNSS est d'associer à l'interopérabilité, l'indépendance des systèmes, ce qui accroît la continuité de service en cas de défaillance de l'un et une plus grande intégrité du système de navigation [item]. Les récepteurs GNSS sont capables de suivre de nombreux satellites à la fois, ce qui améliore la précision du temps de convergence, la couverture et aussi réduit la possibilité d'erreurs [12].

Les systèmes de positionnement par satellites fournissent à son utilisateur via un récepteur GPS les coordonnées géographiques en trois dimensions (longitude, latitude, l'altitude), la vitesse de déplacement de l'utilisateur et la date et l'heure [10]. Ce sont utilisés dans de nombreuses applications telles que la navigation, la géolocalisation, la cartographie et le géoréférencement et bien d'autres domaines [4]. Voici quelques exemples qui expliquent bien de quoi il s'agit ces applications :

- La navigation automobile et aérienne.
- La géolocalisation des personnes et des objets.
- La cartographie et le géoréférencement.
- La surveillance des flottes.
- Les applications militaires. [13]

Dans la pratique, le positionnement par GNSS peut se faire de deux manières différentes : soit par mesure de code, ou bien par mesure de phase. Ces deux méthodes nécessitent de connaître précisément la position de chaque satellite [12].



Figure I.3 Principe de positionnement par satellites [20].

3 Architecture du système Galileo

Le système Galileo est un système de navigation par satellite (GNSS) européen indépendant, global et contrôlé par l'Europe. Il est développé par l'Agence spatiale européenne (ESA) en collaboration avec l'Union européenne (UE) [10]. Il est conçu pour fournir un

ensemble de services de positionnement, de navigation et de localisation précis, fiables et sécurisés à l'échelle mondiale.

L'architecture du système Galileo est divisée en trois segments principaux :

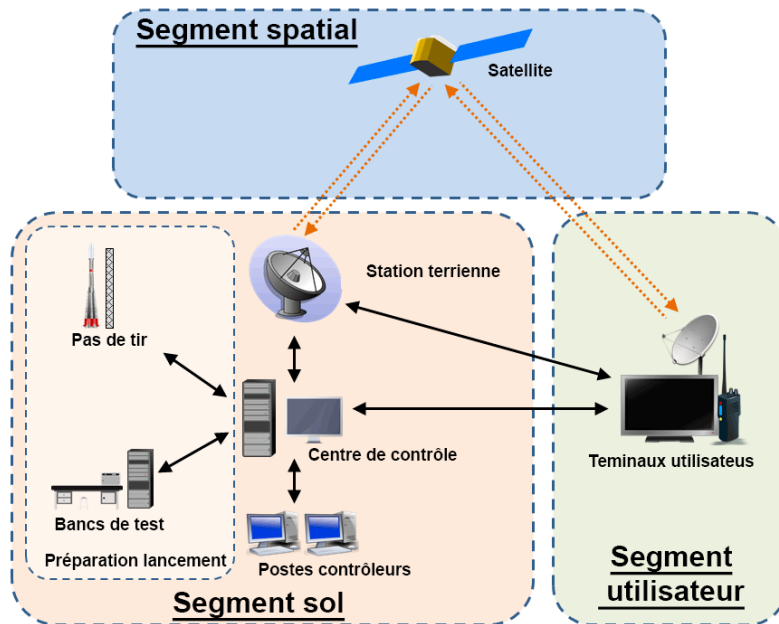


Figure I.4 Architecture du système Galileo [12].

Le segment spatial : il comprend une constellation d'environ 30 satellites, (dont 27 sont opérationnels et 3 en réserve). Les satellites sont répartis sur trois plans orbitaux, chacun à environ 23 222 km d'altitude [11]. Ces satellites sont déployés en orbite moyenne (MEO) sur trois plans inclinés à 56 degrés et émettent des signaux de navigation qui sont utilisés par les utilisateurs pour déterminer leur position, leur vitesse et leur heure [5].



Figure I.5 Le segment spatial [10].

Le segment sol : est composé d'une infrastructure au sol mondiale qui prend en charge le segment spatial et constitué d'installations au sol importantes pour assurer le contrôle et la gestion des satellites, ainsi que de la fourniture des données et des services aux utilisateurs.

Voici les principaux éléments et fonctions du segment sol de Galileo :

- Centres de contrôle : Il y a deux centres de contrôle Galileo, l'un en Europe et l'autre en Chine. Ils sont responsables de la surveillance et du contrôle du système Galileo. Cela inclut la surveillance des satellites, la correction des erreurs et la mise à jour du système [4].
- Stations terrestres : Il existe un réseau de stations terrestres Galileo réparties dans le monde entier. Elles sont responsables de la réception des signaux des satellites Galileo et de leur transmission aux centres de contrôle.
- Centres de traitement des données : responsables du traitement des données collectées par les stations terrestres. Ils génèrent les données de navigation et de correction et les diffusent aux utilisateurs [4].
- Serveurs d'authentification : est responsables de la vérification de l'identité des utilisateurs et de leur accès aux services Galileo.
- Galileo Security Monitoring Center (GSMC) : surveille la sécurité du système [10].

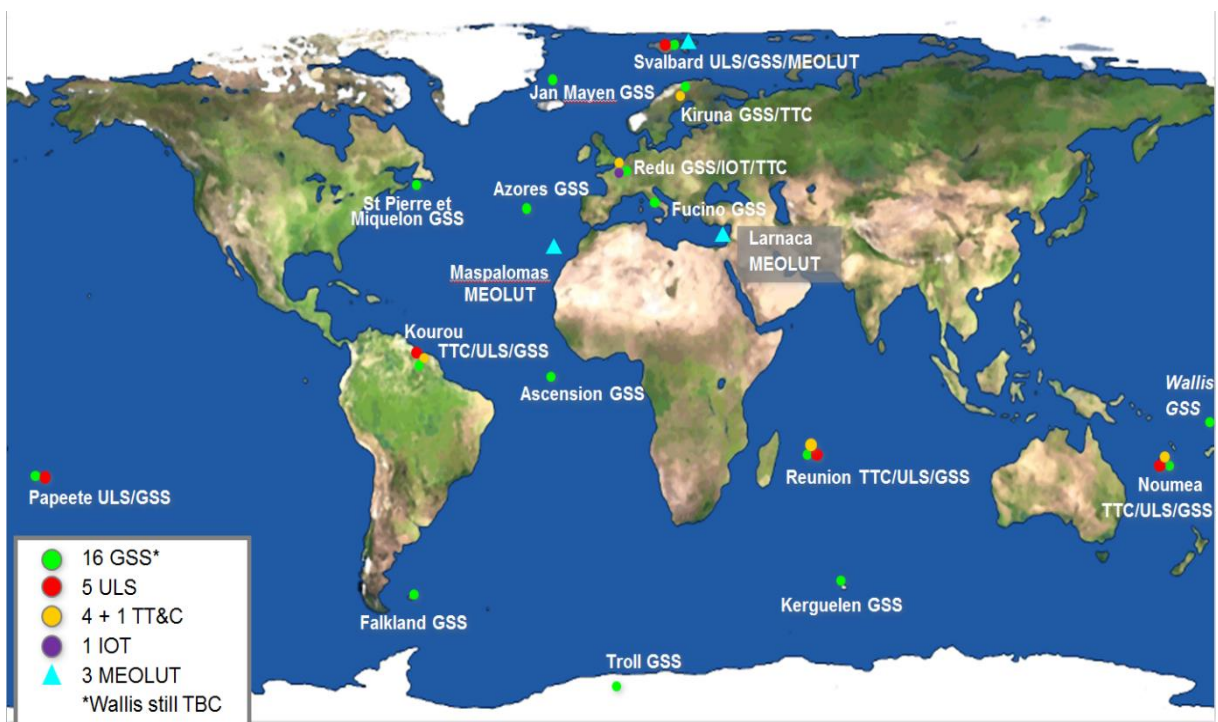


Figure I.6 Le segment de sol [10].

Le segment utilisateur : il comprend les récepteurs GNSS utilisés par les utilisateurs pour recevoir les signaux de navigation et calculer leur position, leur vitesse et leur heure [10].

Cela inclut :

- Récepteurs de navigation : utilisés pour recevoir les signaux Galileo et déterminer la position, la vitesse et le temps.
- Applications et services : utilisent les données Galileo pour fournir une variété de services, tels que la navigation, la cartographie et la synchronisation temporelle.

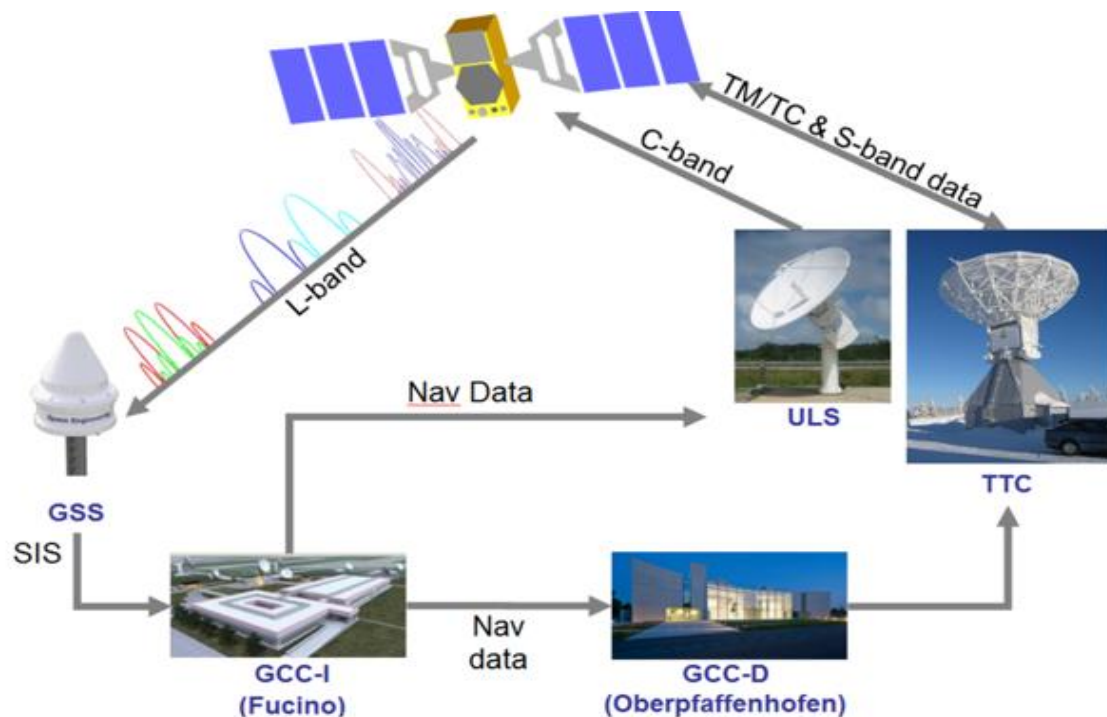


Figure I.7 Le segment utilisateur [10].

L'architecture du système Galileo est conçue pour garantir une haute disponibilité, une grande précision et une sécurité élevée des services de PNT (Positioning, Navigation, Timing). Cette architecture est à la base du succès du système Galileo, qui est devenu un acteur majeur du marché mondial des systèmes de navigation par satellite [14].

4 Les services offerts par le système Galileo

Le système Galileo, le programme européen de géolocalisation, conçu pour répondre à des besoins spécifiques en matière de positionnement, de navigation et de services liés à la sécurité. Comme il est accessible à un large éventail d'utilisateurs, y compris le grand public, les autorités publiques, les marchés commerciaux et les applications nécessitant une fiabilité et une intégrité élevées. Ce système offre une gamme de services notamment :

Service ouvert (ou OS pour open service) : Il s'agit du service de positionnement et de synchronisation de base, comparable au service GPS SPS (Standard Positioning Service) utilisé par tous les récepteurs grand public, mais offrant de meilleures performances que le GPS actuel, notamment grâce à l'utilisation de plusieurs fréquences, ce qui sera également le cas du futur GPS modernisé [4] [7]. Le service OS est un service à accès libre disponible sur l'ensemble du globe. Il sera fourni par les deux signaux E5 (a et b) et E1 (B et C) qui sont destinés à toutes les applications grand public [4].

Service commercial (ou CS pour 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 [7]. Le service CS sera fourni par trois signaux, les deux signaux du service OS plus le signal E6 (B et C). Ce service utilise les 2 bandes de fréquences du service ouvert, ainsi qu'une bande fréquence supplémentaire de 1260 à 1300 MHz. Ce qui permet une précision inférieure à 1m [10].

Service de sûreté de la vie (ou SoL pour Safety Of Life service) : Ce service fournira une information sur l'intégrité des signaux Galileo fournis. Pouvant être garanti par contrat, c'est un service payant à accès contrôlé et garantie de services pour des applications mettant en jeu la sécurité des personnes. Il améliore les performances du service ouvert en avertissant à temps l'utilisateur de l'impossibilité d'assurer certains degrés de précision (intégrité). Le SOL sera fourni par les signaux E5 (a&b), E1 (B&C) [15].

Service public réglementé (ou PRS pour Public Regulated Service) : s'adressera en priorité aux utilisateurs remplissant une mission de service public, très dépendants de la précision, de la qualité du signal et de la fiabilité de sa transmission (services d'urgence, transport de matières dangereuses, etc.) [10]. Comme ce service doit être disponible en tout temps, il utilise deux signaux à part et dispose de plusieurs systèmes prévenant un brouillage ou un leurrage du signal. Il sera également chiffré et disponible seulement sur des récepteurs spécifiques [13]. Il est conçu pour des utilisations critiques et sécurisées, telles que la défense, la sécurité publique et les services de secours.

Service de recherche et secours (ou SAR pour Search And Rescue service) : Renforcera et poursuivra avec Galileo ce qui existe actuellement avec le système SARSAT-COSPAS. Mis en place en 1982 par le Canada, la France, les Etats-Unis et l'Union soviétique, celui-ci permet de recueillir et localiser les émissions de balises de détresse à une fréquence d'inférieure à 10 m pour tout type d'utilisation. Le service SOL sera le service offrant la

meilleure précision et répondra aux critères fixés pour l'atterrissage tous temps. Le SAR sera fourni par le signal L6 [13].

5 Les signaux Galileo OS

Les signaux Galileo OS sont les signaux du service ouvert du système de navigation par satellite Galileo [4]. Ils sont disponibles gratuitement à tous les utilisateurs du monde entier [13]. Les signaux du système de positionnement Galileo comprennent des signaux ouverts (OS) diffusés sur trois bandes : E1, E5 et E6 [10]. Les signaux Galileo sont interopérables avec les signaux GPS et les autres constellations, et partagent notamment deux fréquences (L1-E1/L5-E5a) [13]. Ces signaux sont en phase de test public, avec pour objectif une mise en service début 2023 [10].

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

- Bande E6, bande étroite libre dans la bande dite L1 : 1559 à 1563 MHz.
- Bande E2, bande étroite libre entre dans la bande L1 : 1587 à 1591 MHz.
- Bande E6 en exclusivité : 1260 à 1300 MHz.
- Bande E5 dans la bande 1164 à 1215 MHz avec partage de la première moitié de cette bande avec le GPS [4].

5.1 Technique d'étalement de spectre

Le principe de l'étalement du spectre, quelle que soit la méthode utilisée, repose sur le codage de l'information à transmettre avec une séquence pseudo aléatoire (Pseudo-Noise, PN), connue uniquement par l'émetteur et le récepteur [4]. L'architecture CDMA (Code Division Multiple Access) repose sur la technique de modulation à étalement de spectre SS (Spread Spectrum,) [16]. L'utilisation de cette technique a débuté dans les systèmes militaires pour les propriétés qu'elle offrait en environnement tactique. L'étalement de spectre est un moyen de transmission selon lequel les données occupent une largeur de bande plus large que celle nécessaire au transfert des données d'une communication [16].

Figure (I.8) représente Schéma global du principe d'étalement spectral :

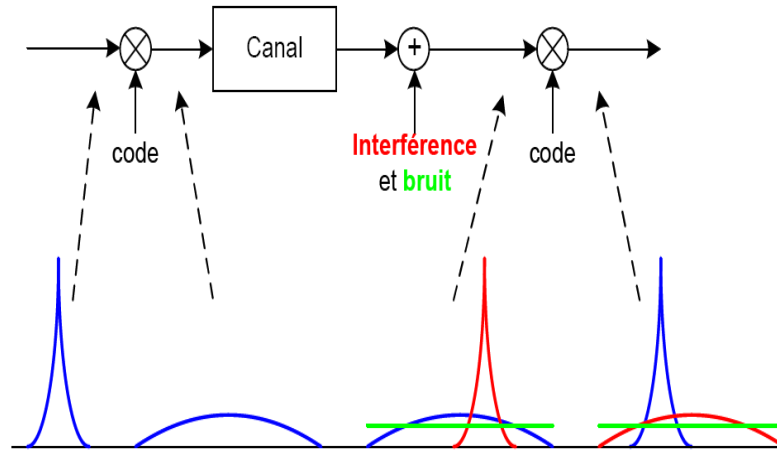


Figure 1.8 Schéma global du principe d'étalement spectral [8].

5.2 Modulation BOC

La modulation BOC a été introduite dans un premier temps pour assurer l'interopérabilité et la compatibilité avec les systèmes GNSS déjà existants, sauf que cette dernière n'a pas tardé à exhiber d'autres avantages notamment l'amélioration des performances des signaux Galileo et GPS-modernisé par rapport à ceux du GPS ancienne génération.

L'expression analytique de l'enveloppe complexe du signal BOC est donnée par [10] :

$$s(t) = e^{-j\theta} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} a_k \mu_{nT_s}(t - k_n T_s - t_0) C_{T_s}(t - t_0) \quad (\text{I.1})$$

Avec :

a_k : Coefficient des données de navigation.

T_s : Demi-période de la sous porteuse.

$C_{T_s}(t)$: Sous porteuse périodique de période $2T_s$.

μ_{nT_s} : Le chip de la séquence d'étalement représenté par une impulsion rectangulaire d'amplitude de ∓ 1 et avec un temps de chip égale à nT_s .

n : le nombre de demi-période de la sous-porteuse dans un chip appelé ordre de modulation.

θ et t_0 : sont respectivement les offsets arbitraires de la phase et du temps dans l'enveloppe complexe par rapport à une certaine référence [10].

En général, le signal BOC est noté par $BOC(m, n)$ ou (f_s, f_c) , où f_s est la fréquence de la sous-porteuse et f_c est la fréquence du code d'étalement tels que [10] :

$$f_s = m \times 1.023 \text{ MHz} = 1 / (2 \cdot T_s) \quad (\text{I.2})$$

$$f_c = n \times 1.023\text{MHz} = 1/(nT_s) = (2/n) \cdot f_s \quad (\text{I.3})$$

La Figure (I.9) montre une représentation des signaux de code Pseudo Random Noise (PRN), de sous-porteuse et de porteuse :

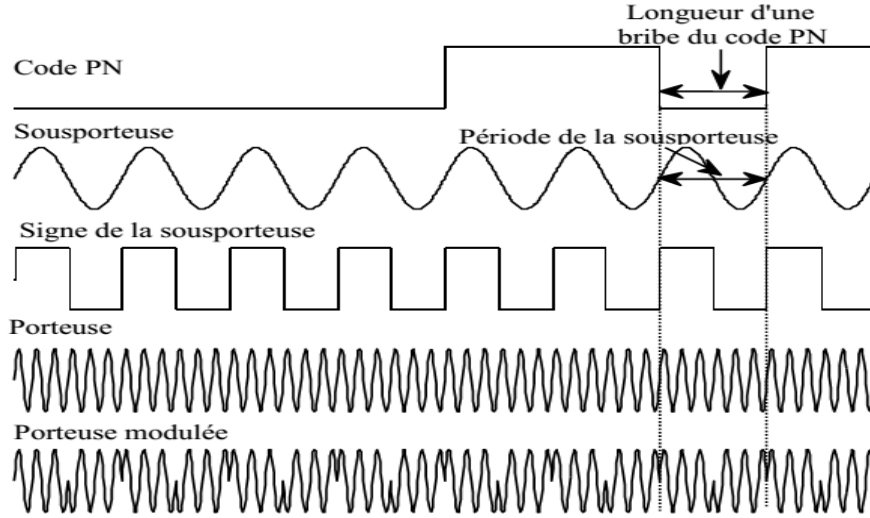


Figure I.9 Code PRN, sous porteuse et signal modulé [4].

5.3 Fonction d'Autocorrélation et Densité Spectrale de puissance du signal BOC

La forme de la fonction d'autocorrélation (FAC) des signaux BOC (m, n) dépend en particulier des paramètres de la sous porteuse comme le rapport $M=2m/n$ (l'ordre de modulation) et la durée de la demi-période T_s de la sous-porteuse comme l'indique cette expression [4] :

$$R_{BOC(m,n)}(\tau) = \begin{cases} (-1)^{j-1} \left[\frac{j+(M-1)(2j-1)}{M} + \frac{-1-2(M-j)}{M} \frac{\tau}{T_s} \right], & \text{pour } 0 \leq \tau \leq T_x \\ (-1)^j \left[\frac{(M+j-1)(1-2j)(1-j)}{M} + \frac{2(M+j-1)}{M} \frac{\tau}{T_s} \right], & \text{pour } T_x \leq \tau \leq 0 \\ 0, & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (\text{I.4})$$

Où τ exprime le changement du retard du code généré localement.

La figure (I.10) montre la FAC normalisée pour une modulation BOC (kn, n) idéale (k entier) pour différentes valeurs de k. La FAC d'ordre M d'un signal modulé en BOC (kn, n) est constituée d'un pic central et de M-1 différents couples positifs et négatifs alternés de pics symétriques latéraux qu'on appellera « pics secondaires ». On constate d'une part, que l'ouverture du pic central est nettement inférieure à l'ouverture du triangle de la FAC du signal BPSK ; d'autre part, lorsque M augmente le nombre des pics secondaires augmentent et le pic central ne devient plus point [4].

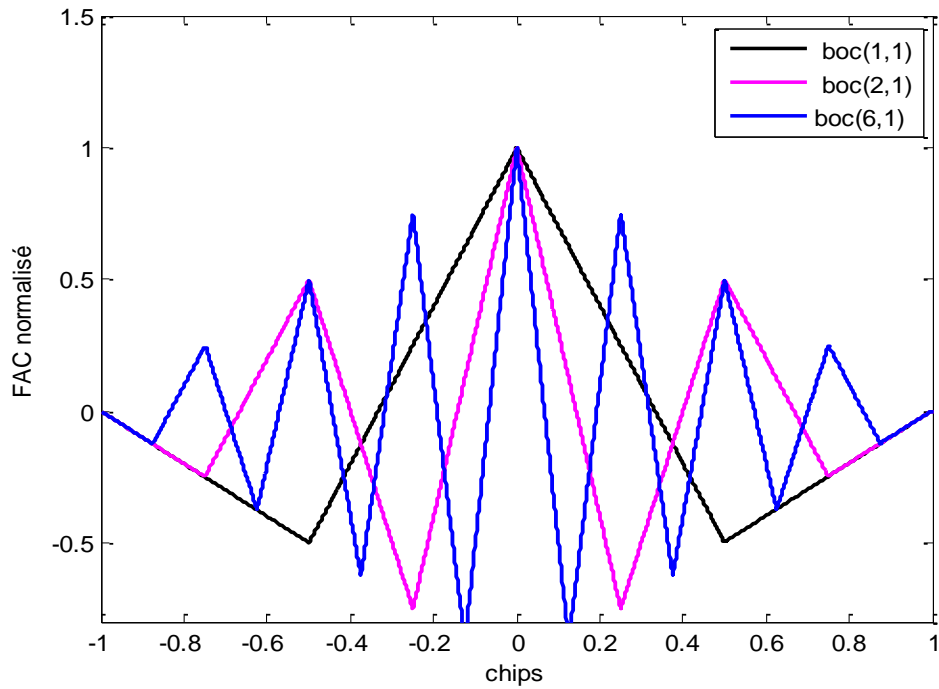


Figure 10 FACs des signaux BOC (kn, n) [4].

La transformée de Fourier de la FAC des signaux BOC (m, n) donne la forme de la DSP de ces derniers qui dépend aussi des paramètres de la sous-porteuse mentionnés ci-dessus comme il est indiqué dans l'expression suivante [4] :

$$(f) = \begin{cases} f_c \left(\frac{\sin(\frac{\pi f}{2f_s}) \sin(\frac{M\pi f}{2f_s})}{\pi f \cos(\frac{\pi f}{2f_s})} \right)^2, & \text{pour } M \text{ pair} \\ f_c \left(\frac{\sin(\frac{\pi f}{2f_s}) \cos(\frac{M\pi f}{2f_s})}{\pi f \cos(\frac{\pi f}{2f_s})} \right)^2, & \text{pour } M \text{ impair} \\ 0, & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (I.5)$$

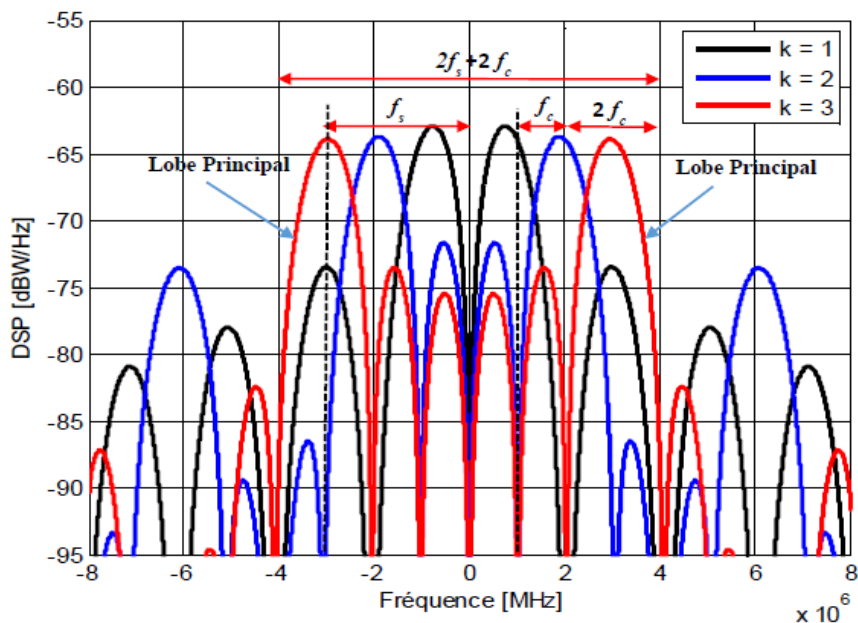


Figure I.11 DSPs des signaux BOC (kn, n) leurs caractéristique [4].

La figure (I.11) montre la DSP normalisée pour une modulation BOC (kn, n) en bande de base pour différentes valeurs de k . La DSP d'ordre M d'un signal modulé en BOC (kn, n) est constituée de deux lobes principaux aux fréquences $\pm f_s$ et de $M-2$ lobes secondaires situés à l'intérieur des lobes principaux plus d'autres lobes secondaires situés à l'extérieur des lobes principaux [4].

5.4 Modulation MBOC (Multiplexed BOC)

Elle est notée MBOC (6, 1,1/11), où le terme (6,1) représente modulation BOC (6,1), et le rapport de 1/11 représente la distribution de la puissance entre les signaux BOC (1,1) et BOC (6,1). L'ajout de la sous-porteuse BOC (6,1) apporte un supplément de puissance dans les hautes fréquences en comparaison avec la modulation BOC (1,1) [5]. Cela se traduit par la création d'une FC très étroite et par conséquent de meilleures performances en présence du bruit et des MTs. Deux approches fondamentales différentes ont été proposées, CBOC (Composite BOC) comme une forme d'onde du signal Galileo OS et TMBOC (Time Multiplexed BOC) pour le signal civil GPS L1C [5].

Actuellement il existe deux types d'implémentation de la modulation MBOC dans le domaine temporel utilisant les deux composantes, pilote et données :

- CBOC pour le système Galileo E1 OS, basée sur la combinaison linéaire des deux composantes BOC (1,1) et BOC (6,1).
- TMBOC pour GPS L1C, basée sur le multiplexage des symboles d'étalement de BOC (1,1) et BOC (6,1).

Les FACs des signaux CBOC TMBOC sont représentées respectivement dans les figures (I.12) et (I.13).

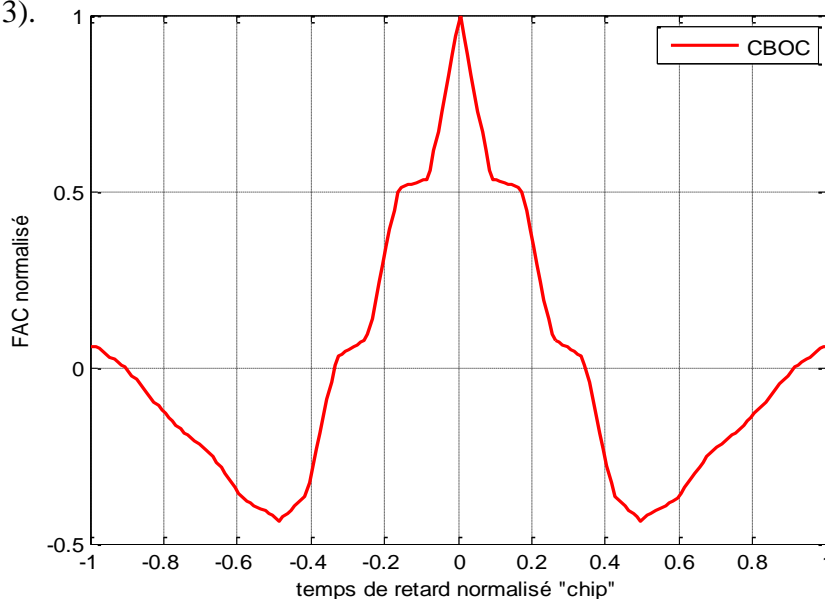


Figure I.12 Fac du signal CBOC.

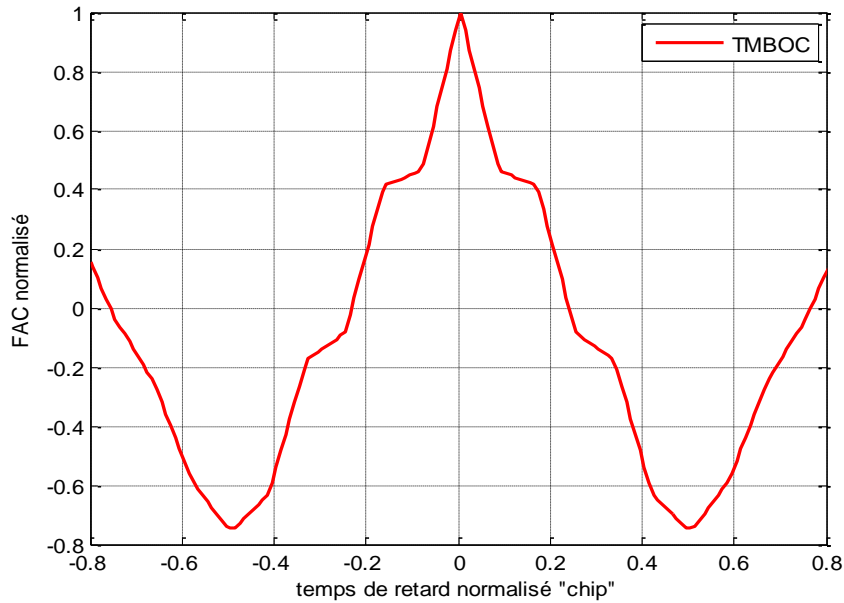


Figure I.13 FAC du signal TMBOC.

Et la densité spectrale de puissance du signal MBOC est la transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation, selon le théorème de Wiener-Khintchine [5] [17]. Elle est donnée par :

$$R_{\text{MBOC}}(\tau) = \frac{1}{2} \left[S_{\text{BOC}(6,1)}(f) + \frac{1}{11} S_{\text{BOC}(1,1)}(f) \right] \quad (\text{I.6})$$

Où $S_{\text{BOC}(m,n)}(\tau)$ est la densité spectrale de puissance du signal BOC (m,n) [17].

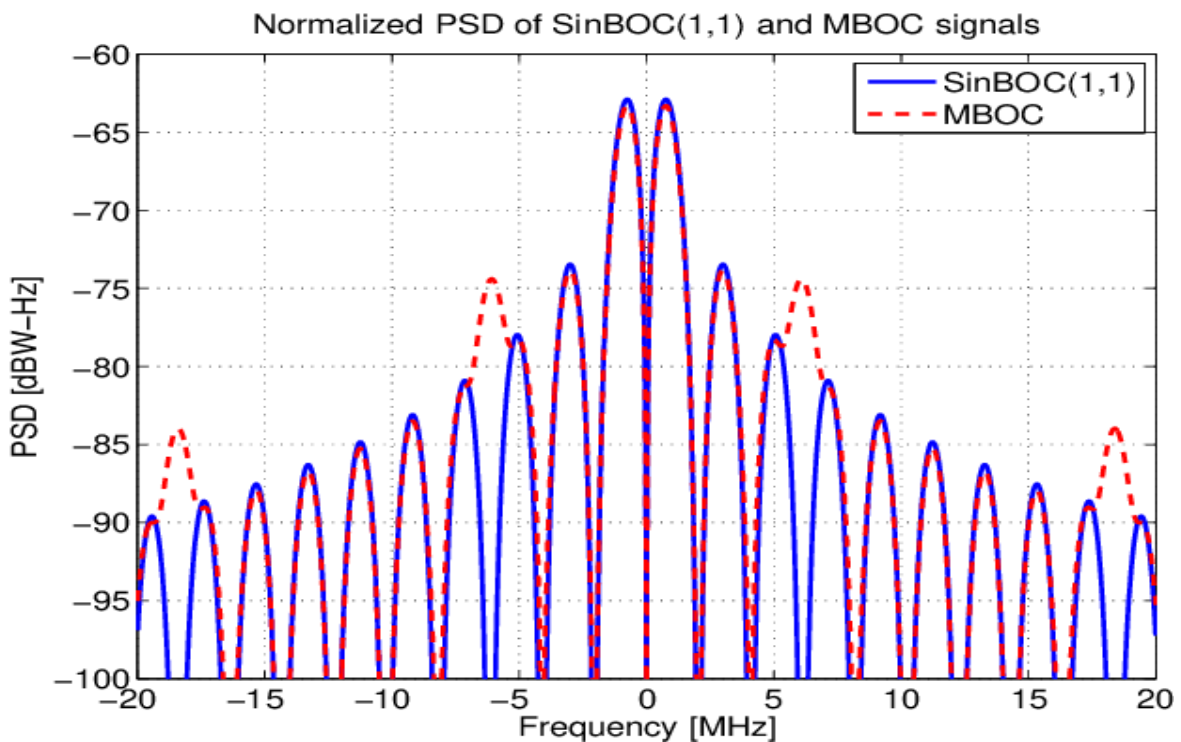


Figure I.14 Densité spectrale de puissance du signal MBOC [17].

On trouve que la fonction d'autocorrélation et la densité spectrale de puissance du signal MBOC sont des concepts essentiels pour bien comprendre et concevoir des systèmes de communication tels que le signal MBOC.

6 Récepteur GNSS

Le récepteur doit effectuer plusieurs étapes pour extraire les informations nécessaires au "calcul du point". Et dans le but de synchroniser le récepteur avec les signaux de navigation on doit exécuter deux étapes de traitement du signal reçu. La première étape est l'acquisition qui permet la détection des satellites en vision et de faire une estimation grossière du retard du code reçu et de la porteuse. Ensuite, l'étape de la poursuite qui permet de réaliser un alignement parfait entre le code reçu et le code généré localement.

6.1 Acquisition

L'acquisition du signal, se réalise lorsque le récepteur effectue la corrélation entre le signal reçu et le code qu'il génère lui-même. Pour cela, le récepteur doit ajuster les deux paramètres suivants :

- Le décalage Doppler de la porteuse, selon lequel le signal reçu au niveau du récepteur apparaît avec une fréquence différente de celle du signal émis par le satellite.
- Le décalage temporel du code, dont la détermination est l'objet de l'opération de corrélation [18].

6.2 Poursuite

Après l'acquisition, on passe à l'étape de poursuite de code qui permet d'ajuster en permanence le décalage Doppler et le retard de code jusqu'à l'obtention d'une fréquence porteuse plus affinée et la réalisation d'un alignement parfait entre le code reçu et le code local pour le calcul du temps de propagation et la détermination de la position. L'affinement de la fréquence porteuse est assuré par la PLL (Phase Locked Loop), tandis que celui du retard de code est assuré par la DLL (Delay Locked Loop) [18].

7 DLL

7.1 DLL Cohérente

Dans les applications de navigation par satellite Galileo et GPS, le rôle des circuits de poursuite de code est de maximiser la CF entre le code local et le code reçu par rapport à la différence de phase entre les deux à savoir τ et ceci en connaissant le changement de fréquence f_d due à l'effet Doppler [7]. La corrélation d'un code reçu avec des codes identiques générés localement en avance, en retard et en phase, se traduit par des valeurs se situant de part et d'autre du triangle de corrélation tel qu'on le représente sur la figure (15). Si le code reçu est décalé par rapport aux code prompt local, la position des point E, Pr et L sur le triangle sera différente tel que présenté dans la figure (15. b). On construit à partir de ces voies un discriminant de boucle de code appelé discriminant cohérent [18].

$$D_{\tau}(t) = I_E - I_L \quad (I.7)$$

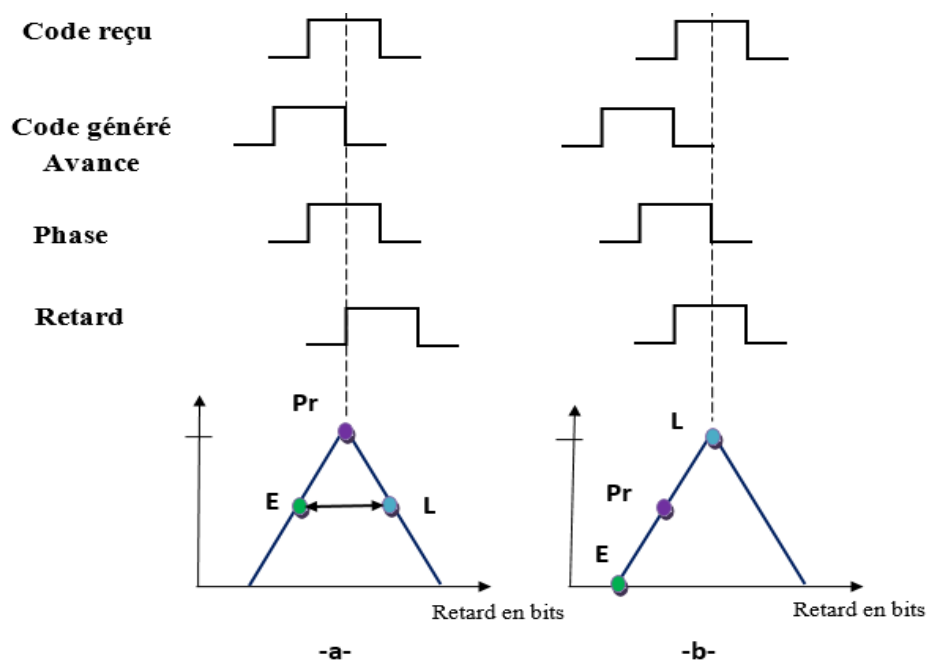


Figure I.15 Principe de fonctionnement de la DLL [13].

7.2 DLL non Cohérente

Dans les systèmes de radionavigation tel que le système Galileo, quand on est capable, au préalable, d'obtenir une estimation correcte de la fréquence porteuse à l'aide des circuits PLL, on peut supprimer la modulation et travailler en bande de base. Ce signal peut alors être traité par des boucles DLL cohérente [7]. Dans le cas contraire, le signal doit être traité en bande transposée, c'est le rôle de la boucle non cohérente.

8 La courbe S

La caractéristique du discriminateur de la boucle de code, est appelée aussi « tension d'erreur » ou « courbe S ». Elle est utilisée pour piloter un oscillateur commandé en tension. Ce dernier, à son tour, pilote en fait le rythme de l'horloge du générateur de code PN en variant le retard qui permet d'ajuster le code local avec le signal reçu [7]. L'asservissement de la boucle est considéré comme parfait lorsque la tension d'erreur s'annule pour une différence de phase nulle. Si ce n'est pas le cas, alors on doit augmenter ou diminuer, selon le signe de $\Delta\tau$, le rythme de l'horloge du VCO d'une façon à avoir la condition de verrouillage [18]. La figure (I.16) illustre la tension d'erreur pour les deux types de DLL.

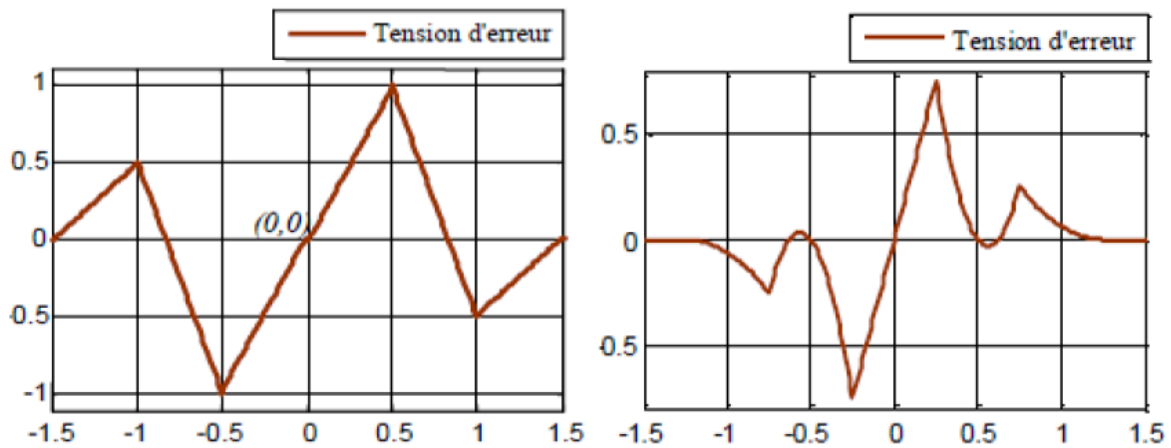


Figure I.16 Tension d'erreur « DLL Cohérente » et « DLL non-Cohérente » [17].

9 Performances et sources d'erreur

L'intérêt grandissant pour les applications fondées sur le GPS et Galileo est très fortement lié à la qualité du service de positionnement offert par ces systèmes. Cette qualité de service s'exprime sous la forme d'un ensemble de paramètres, qui caractérisent les performances offertes aux usagers [25]. Plusieurs phénomènes physiques et facteurs techniques ont un effet sur ces performances. Nous présentons dans ce chapitre les différentes sources d'erreur qui affectent la précision du positionnement et de la synchronisation au niveau du récepteur.

9.1 Les performances

La performance du service de positionnement est un élément primordial pour l'ensemble des applications utilisant le GPS et Galileo. En effet, le champ des applications possibles est très variable selon les performances offertes et garanties [25]. De plus, le type de performance recherché est très variable en fonction des applications. Ainsi, les applications de transport,

par exemple aérien ou maritime, pour lesquelles des vies sont en jeu, exigent une précision instantanée, de l'ordre du mètre à quelques dizaines de mètres, mais aussi et surtout une fiabilité à toute épreuve [4].

9.2 Les sources d'erreurs

Les erreurs dans les signaux de navigation par satellites peuvent être classifiées dans trois catégories principales : Erreurs dus au segment spatial, Erreurs de propagation et Erreurs dus au récepteur. Les erreurs dus au segment spatial incluent dérive d'horloge et l'erreur de satellites d'éphéméride [4]. Les erreurs de propagation de signal incluent des erreurs liées au retard de propagation dans l'atmosphère dû à l'ionosphère, la troposphère, et au retard de propagation par MTs et à l'interférence. Les erreurs dus au récepteur incluent le bruit thermique et d'autres erreurs plus petites, tels que, par exemple, des biais inter-canal et de l'erreur d'antenne [18]. Horloge interne de faible qualité. Une connaissance sur les sources d'erreur possibles est essentielle pour l'obtention d'une solution de position de l'utilisateur avec le niveau des performances désiré. Dans la suite, les différentes sources d'erreur de signaux de navigation par satellite sont discutées avec un accent majeur sur l'erreur de MT, comme étant l'erreur la plus difficile en raison de son comportement non corrélé [18]. La Figure (I.17) montre une représentation des différentes erreurs de propagation :

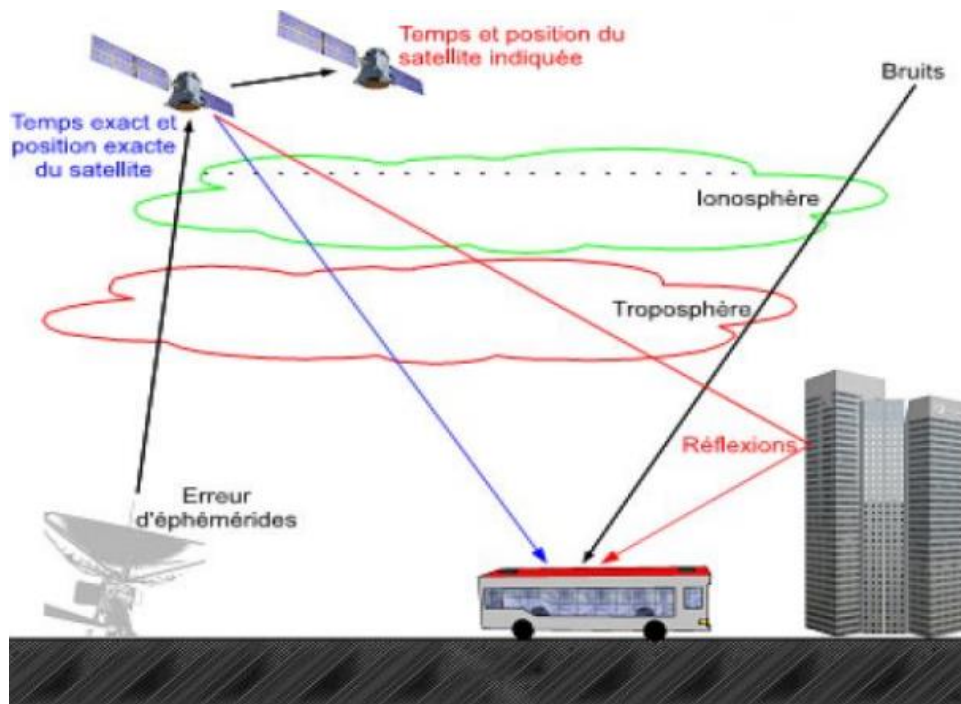


Figure I.17 Représentation des différentes erreurs de propagation [7].

10 Conclusion

Dans ce chapitre les caractéristiques des signaux Galileo ont été définies et présentés en détail dans les deux domaines, temporel et fréquentielle, Par la suite nous avons introduit la modulation BOC et ces dérivés, et ils ont permis un partage plus efficace du spectre de la bande L par les différents utilisateurs civils et militaires, tout en utilisant simultanément le système de positionnement Galileo. Finalement, nous avons présenté une étude sur les sources d'erreurs de positionnement et on a présenté la théorie du MT.

Chapitre II : Méthodes de réduction des erreurs de multi-trajets

1 Introduction

Dans de nombreuses applications des systèmes GNSS, les multi-trajets sont une source d'erreur dominante. Le signal provenant du satellite se réfléchit sur différentes structures (bâtiment, voiture, sol ...). Il parvient alors au récepteur un signal composite, somme du signal direct et de tous les signaux réfléchis. L'apparition de ces signaux réfléchis peut perturber le traitement du signal et conduire à des estimations biaisées des délais de propagation direct des signaux [3]. Les erreurs des MTs peuvent être atténuées en utilisant diverses méthodes de filtrage et techniques de traitement du signal. Ces techniques incluent le corrélateur NC, corrélateur HRC et Filtrés différentiateurs ...etc, qui présentent une meilleure résistivité au phénomène des MTs.

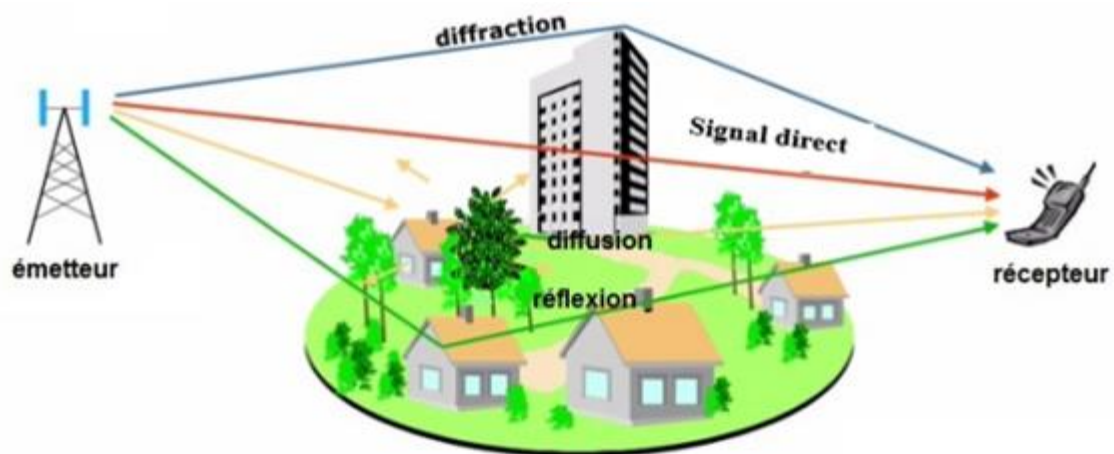


Figure II.18 Exemplification des Multi-Trajet [24].

2 Multi trajets

Les multi-trajets sont un phénomène de propagation dans les systèmes sans fil, ou ce produit le signal direct ainsi qu'une ou plusieurs réflexions pour le même satellite. Le signal reçu est alors la somme de tous les signaux reçus (retardés et atténués) [19], car chaque chemin subit un déphasage et une atténuation différents, ce qui peut entraîner des interférences constructives ou destructives au niveau du récepteur [19]. Les multi-trajets peuvent être réduits en utilisant des techniques basées sur le comportement des corrélateurs, comme le corrélateur étroit et le corrélateur double delta, ou en utilisant des antennes GPS avec une forme et une polarisation spécifique pour rejeter certains MTs [13].

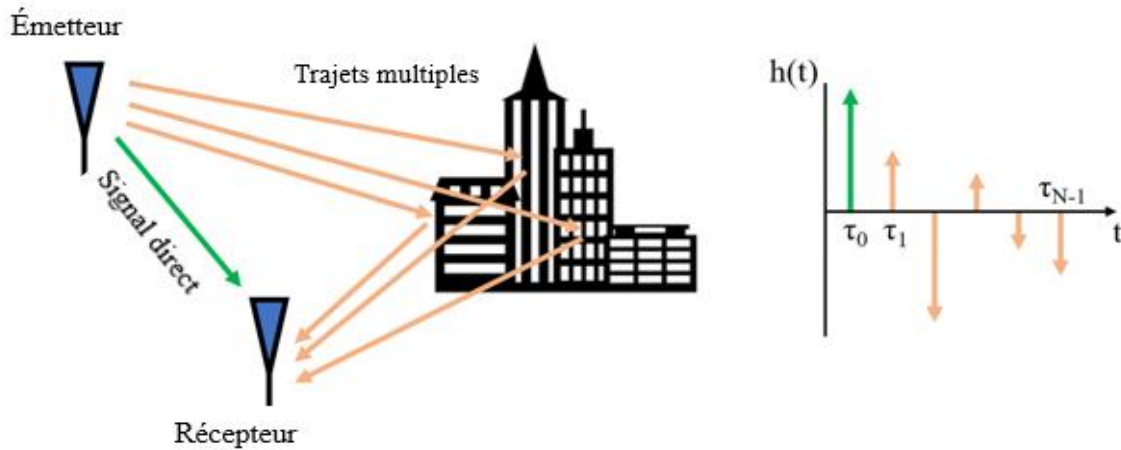


Figure II.19 Illustration du phénomène du Multi-trajet [6].

La superposition du signal direct et d'un signal MP est illustrée sur la figure (II.20) pour un MT en phase (ayant la même phase que celle du signal direct).

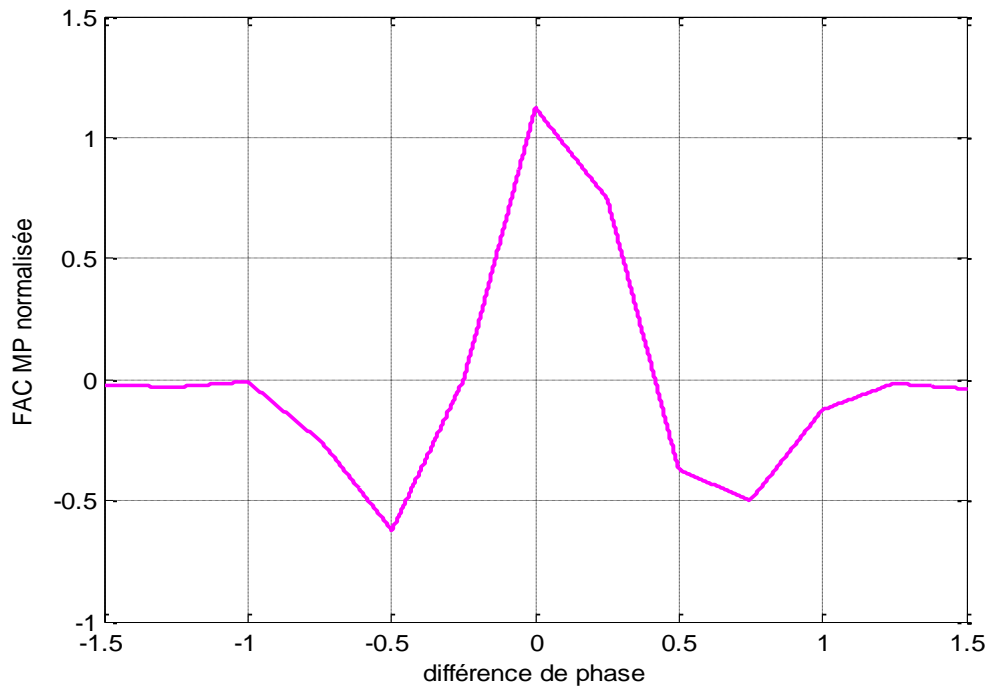


Figure II.20 Fonction d'autocorrélation avec MT.

2.1 Réflexion spéculaire

La réflexion spéculaire joue un rôle essentiel dans la compréhension des multi-trajets et leur réduction pour les récepteurs GNSS. Elle est généralement décrite en optique géométrique, la propagation électromagnétique étant modélisée comme un simple rayon [8]. L'onde réfléchie est le résultat de la radiation de plusieurs points dans le plan de Fresnel, ou le signal reçu est en fait la somme globale du signal direct et d'une réplique retardée de ce signal multipliée par un coefficient d'amplitude relative dépendant de la constitution de la surface

réfléchissante et du gain de l'antenne dans la direction du signal incident. Par conséquent, elle est plus déterministe que d'autre type de réflexion. [4] la première zone de Fresnel peut être approximée par la formule suivante :

$$F \cong \frac{\pi\lambda D}{\sin(\theta)} \quad (\text{II.8})$$

λ : Longueur d'onde.

θ : Angle d'incidence.

D : Distance entre le récepteur et le point de réflexion.

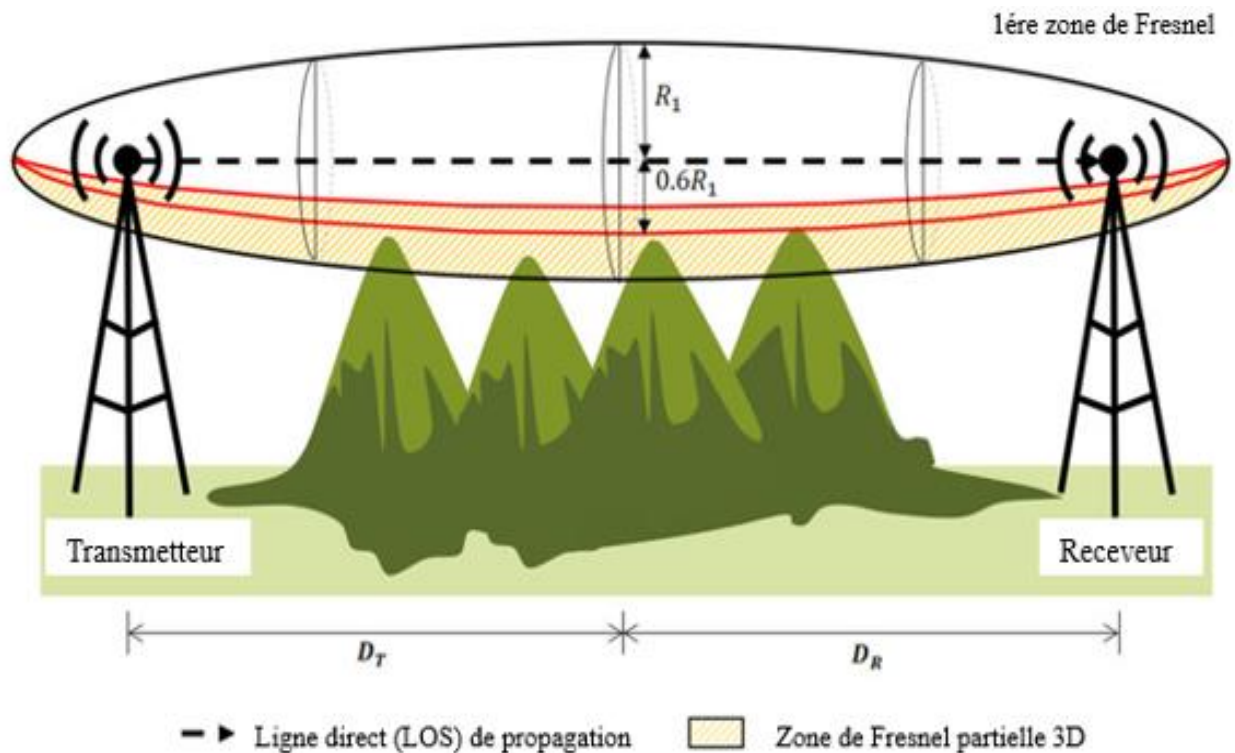


Figure II.21 Première zone de Fresnel sur le plan réfléchissant [24].

2.2 Réflexion diffusée

La deuxième modélisation de la réflexion est celle rencontrée en présence d'un grand nombre de réflexions [7], ou le phénomène de propagation des ondes se produit lorsqu'un signal émis par une source suit une multitude de chemins de propagation avant d'atteindre un récepteur. Les réflexions diffuses peuvent avoir pour effet une augmentation ou une diminution de l'amplitude du signal, et peuvent être modélisées en utilisant un coefficient de réflexion diffuse [7]. Pour réduire les effets des erreurs dues aux MTs, il est possible d'utiliser des techniques de spatiale diversité, telles que les systèmes MIMO (Multiple Input Multiple Output), qui permettent de séparer les signaux directs des signaux réfléchis ou diffractés [20].

Il utilise aussi la loi de Rayleigh car elle provient du fait qu'il n'y a pas de réflecteur dominant et que les phases des signaux réfléchis sont uniformément distribuées sur $[0, 2\pi]$ [7].

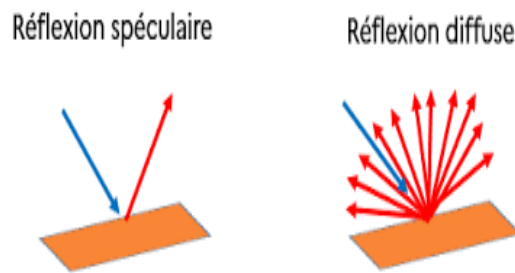


Figure II.22 Réflexion spéculaire et réflexion diffusée [7].

2.3 Diagramme de phase

Le diagramme de phase représente la relation de phase entre les différents trajets que prend un signal de l'émetteur au récepteur. Pour compléter la démonstration du phénomène de propagation par trajets multiples, on peut utiliser ces diagrammes pour spécifier les relations entre les signaux directs, réfléchis et composites réellement suivis par la boucle de code DLL du récepteur Galileo [4]. Dans un canal à trajets multiples, le signal reçu est la superposition de plusieurs copies du signal transmis. Chaque copie a un retard, une atténuation et un déphasage différents en raison des différents chemins empruntés par le signal. Le diagramme de phase d'un canal à trajets multiples peut être représenté mathématiquement comme une somme d'exponentielles complexes, chacune représentant un trajet avec un retard, une atténuation et un déphasage spécifiques. Un diagramme de phase peut également être représenté graphiquement sous la forme d'un nuage de points de la différence de phase entre différents trajets en fonction du temps ou de la fréquence [14].

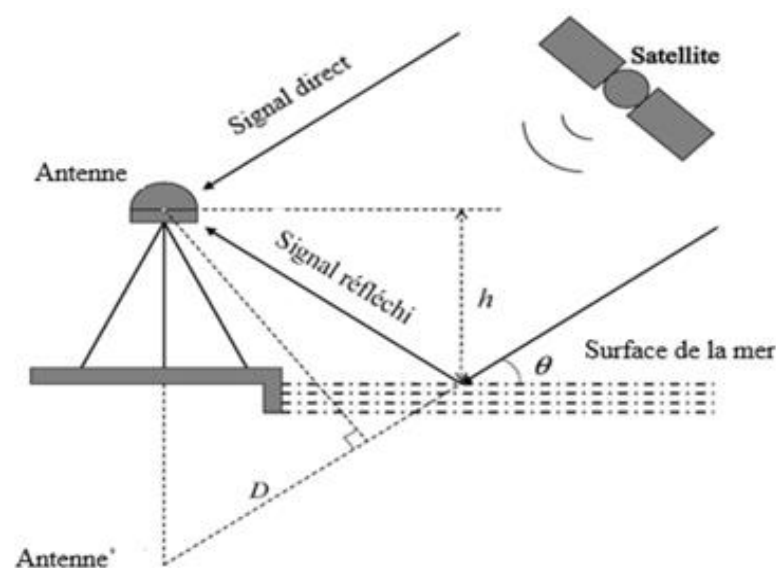


Figure II.23 Diagramme de phase [3].

3 Caractéristique des MTs Galileo

Les caractéristiques des multi-trajets Galileo sont liées aux défis rencontrés par les récepteurs Galileo en raison de signaux réfléchis qui atteignent le récepteur par des chemins multiples, provoquant des interférences et des inexactitudes dans le calcul de la position et sont importantes car elles peuvent affecter la précision des signaux reçus.

Les principales caractéristiques des MTs sont les suivantes [4] :

- Chaque MT est associée à un trajet généralement plus long que celui du trajet direct.
- La puissance de chaque MT doit être inférieure à celle du trajet direct, car l'amplitude maximale du coefficient de réflexion est inférieure à 1.
- Le signal MT est caractérisé par un retard de propagation supérieur à celui du LOS.
- La superposition de deux trajets ayants la même phase peut produire un MT fort (Strong) par rapport au trajet direct.

Pour atténuer ces problèmes, les antennes Galileo doivent répondre à des critères stricts de stabilité, d'erreur de phase, et de gain, tout en tenant compte de facteurs tels que la fréquence de résonance, la polarisation, et le diagramme de rayonnement pour garantir des performances optimales sur les bandes de fréquence Galileo [4].

3.1 FAC en présence de MT

Dans le cas des systèmes de localisation par satellites où le temps de retard du trajet est la base de la mesure, le LOS (Line Of Sight) est sollicité puisqu'il est plus proche de la ligne géométrique reliant le satellite récepteur.

On présence de MTs, le résultat de la FAC d'un signal réfléchi reçu par le récepteur Galileo est différent de celui du LOS, du fait que les deux signaux ont des atténuations, des temps de retard et des phases de porteuse différentes. La FAC $r(t)$ du signal réfléchi peut être exprimée en utilisant $v(t)$ comme suit [8] :

$$r(t) = \alpha e^{j\phi} v(t - \tau) \quad (\text{II.9})$$

Au niveau du récepteur le signal réfléchi et le signal LOS sont donné par les équations (9) et (10) [8] :

$$g(t) = v(t) + r(t) \quad (\text{II.10})$$

$$g(t) = v(t) + \alpha e^{j\phi} v(t - \tau) \quad (\text{II.11})$$

Avec :

α : Est l'atténuation du signal réfléchi par rapport au signal de LOS qui est supposée être reçue sans atténuation.

ϕ : La différence de phase de porteuse entre le signal LOS et réfléchi.

τ : Le retard de temps entre le LOS et un signal réfléchi.

D'après cette figure, on constate que pour la FAC composite (FACC) de la modulation BOC est déformée par rapport à FACLOS. La déformation de la FAC du LOS dépend de plusieurs paramètres à savoir le retard, l'amplitude et la phase du signal réfléchi par rapport au signal direct.

3.2 Tension d'erreur (courbe S) en présence de MT

La tension d'erreur (courbe S) est un concept utilisé dans les systèmes GPS et Galileo pour contrôler le taux d'horloge du générateur de code en modifiant le délai. Cela est réalisé en comparant deux corrélateurs, ce qui forme la base de la tension d'erreur. En présence de Multi-trajets, tels que des réflexions ou des signaux multipath, la tension d'erreur est utilisée pour estimer la fonction d'autocorrélation du code C/A sur une durée T1 sont donc données par [8] :

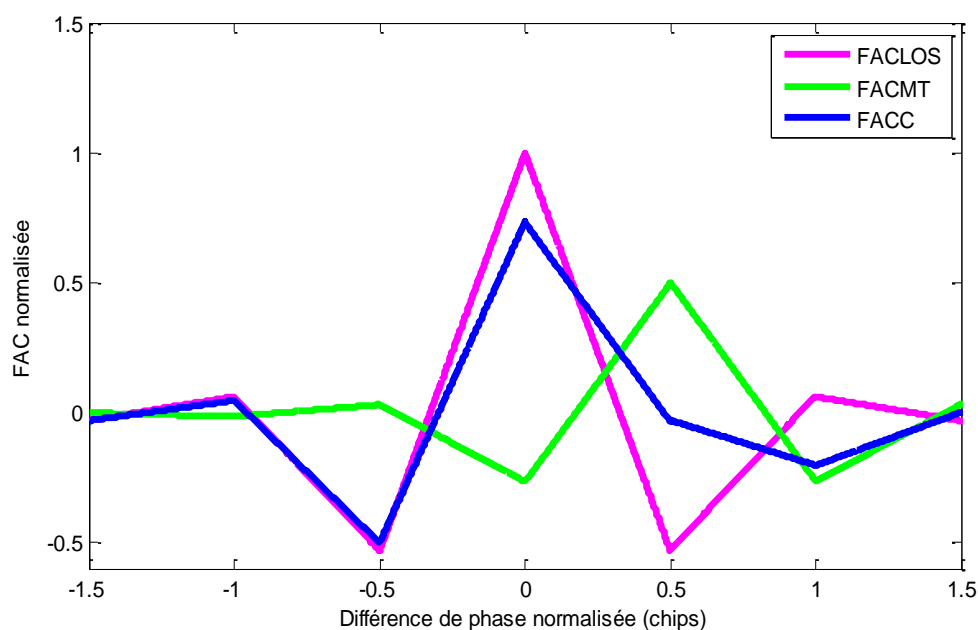


Figure II.24 LOSFAC, MFAC et FACC du signal BOC (1,1).

$$y_A(t) = \sum_{m=0}^N a_m R_p \left(\hat{\tau}_0 - \tau_m + \frac{C_s}{2} \right) \exp[j(\phi_m - \hat{\phi}_0)] \quad (\text{II.12})$$

$$y_R(t) = \sum_{m=0}^N a_m R_p \left(\hat{\tau}_0 - \tau_m - \frac{C_s}{2} \right) \exp[j(\phi_m - \hat{\phi}_0)] \quad (\text{II.13})$$

Donc la courbe – S après passage dans le filtre de la boucle est donnée par :

$$V_{ec}(t) = \int_{t-T_2}^t \left\{ \sum_{m=0}^N a_m \exp[j(\phi_m - \hat{\phi}_0)] \times \left[R_p \left(\hat{\tau}_0 - \tau_m - \frac{C_s}{2} \right) - R_p \left(\hat{\tau}_0 - \tau_m + \frac{C_s}{2} \right) \right] \right\} dt \quad (\text{II.14})$$

En présence d'une seule composante multi-trajet, nous obtenons :

$$V_{ec}(\Delta\tau) = a_0 V_{ec-idéal}(\Delta\tau) + a_1 \cos(\phi_{1r}) V_{ec-idéal}(\Delta\tau + \tau_0 + \tau_1) \quad (\text{II.15})$$

Et ceci en supposant que la boucle de phase est asservie sur la phase du trajet direct, et que :

$$\phi_{1r} = \phi_1 - \phi_0 \quad (\text{II.16})$$

τ_m : Le retard de la $m^{\text{ième}}$ composante du signal reçu.

ϕ_m : La phase de la $m^{\text{ième}}$ composante du signal reçu.

a_m : Coefficient d'amplitude qui affecte la $m^{\text{ième}}$ composante réfléchi.

En présence de MT, la tension d'erreur est donc déformée et le point de passage par zéro est affecté (le point de passage par zéro est décalé) [8], comme illustré dans la figure (II.25). Par conséquent, le récepteur s'asservit sur une mauvaise valeur du retard et commet une erreur de poursuite sur l'estimation du retard du signal direct, plus communément appelée offset de code.

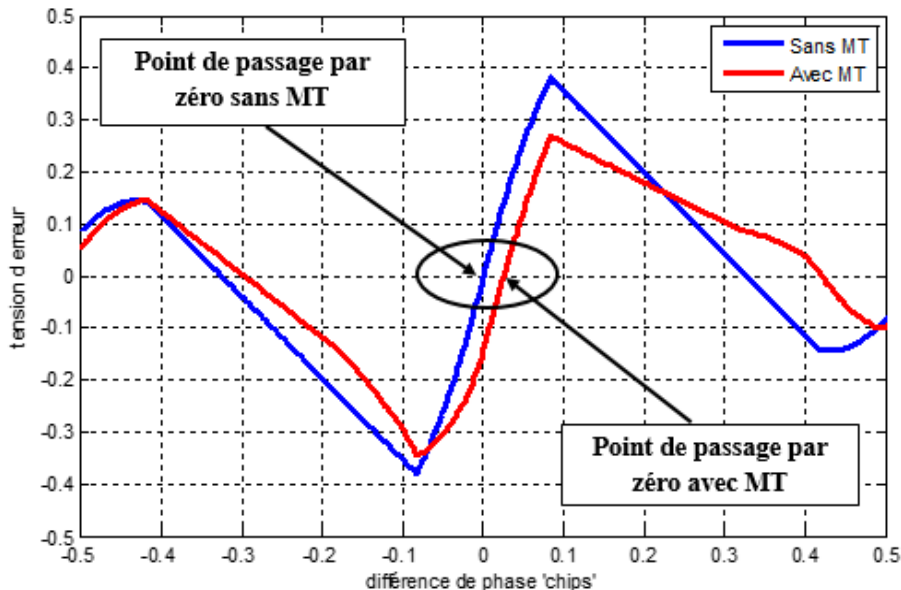


Figure II.25 Tension d'erreur avec et sans MTs.

3.3 Retard de Propagation

L'erreur sur la position d'un utilisateur dans un milieu urbain dépend des retards causés par les signaux réfléchis ou diffractés qui arrivent avec un retard par rapport au rayon direct, ce qu'on appelle le retard propagation [7]. Ces signaux décalent le pic de corrélation et corrompent la forme de la corrélation du récepteur [22]. Le pseudo distance reposant sur le calcul du temps de propagation, si le signal satellitaire se réfléchit sur un obstacle avant d'arriver au récepteur, il aura parcouru une distance plus grande. Le récepteur va ainsi utiliser des données faussées. Ce problème est difficile à corriger d'autant plus que les retards varient aléatoirement au cours du temps [14].

Ce retard pour un trajet d'indice « m » est défini comme suit :

$$\tau_m = \frac{L_m - L_0}{c} \quad (\text{II.17})$$

L_m : Longueur de la $m^{\text{ième}}$ composante réfléchie.

L_0 : Longueur du trajet direct.

$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$: vitesse de la lumière [4].

3.4 Atténuation due aux MTs

L'atténuation due aux multi-trajets est un phénomène qui se produit lorsqu'un signal émis par un satellite suit une multitude de chemins de propagation depuis l'antenne jusqu'au récepteur [14]. Les différents chemins forment le signal reçu, qui est composé des rayons réfléchis ou diffractés, décrits comme des échos, qui arrivent avec un retard par rapport au rayon direct. Cette absorption est due à l'absorption d'une partie de l'onde réfléchie par rapport à l'onde incidente. Elle est fonction de la nature des matériaux des obstacles rencontrés par l'onde [14]. L'atténuation de chaque trajet suit le modèle de décroissance en espace libre.

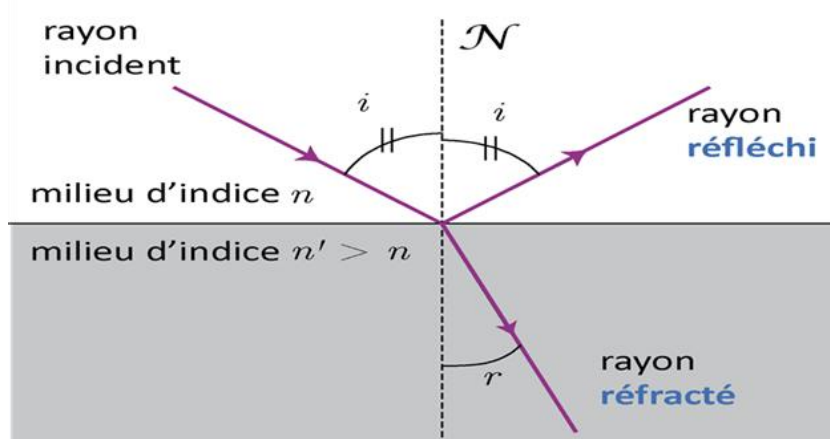


Figure II.26 Réflexion sur un plan quelconque [4].

Chacune des composantes est atténuée de manière différente. La figure (II.27) illustre un signal réfléchi atténué par rapport à un signal direct [4].

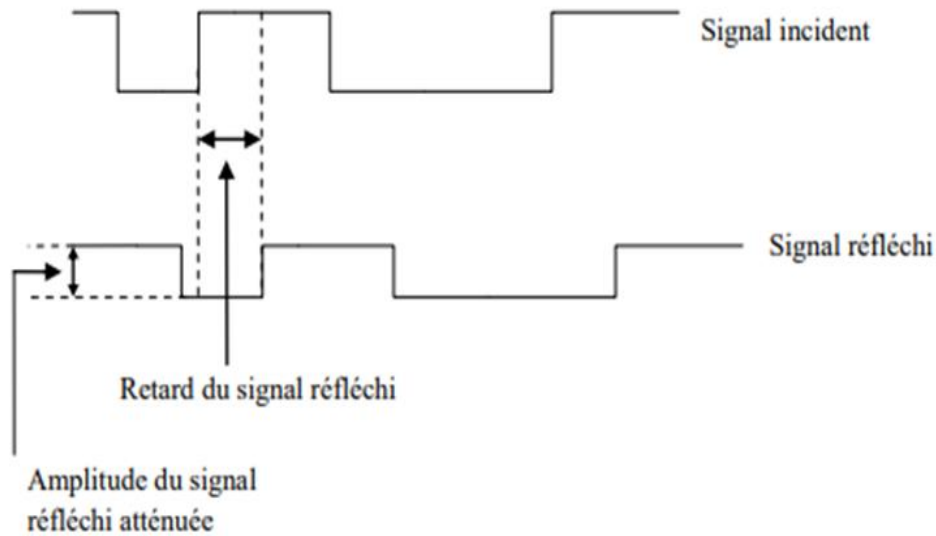


Figure II.27 Signal réfléchi atténué par rapport au trajet direct [4].

3.5 Changement de polarisation

Le changement de polarisation qui introduit le phénomène de réflexion dans les MTs est un aspect crucial de la propagation des ondes électromagnétiques [23]. Lorsqu'une onde se propage dans un environnement avec des MTs, les réflexions peuvent entraîner un changement de polarisation de l'onde [23]. Ce phénomène est essentiel à comprendre pour évaluer la diversité d'antenne en polarisation et son impact sur la qualité de la transmission du signal. En utilisant deux antennes avec des polarisations complémentaires, un système peut combattre la dépolarisation entre les antennes émettrices et réceptrices [24], évitant ainsi la dégradation du signal. Cette technique est particulièrement utile dans les scénarios où les antennes sont polarisées verticalement [24]. La modification de la polarisation pour les MTs, implique l'utilisation de deux antennes avec des polarisations différentes pour améliorer la robustesse du signal contre la dépolarisation, réduisant ainsi la dégradation du signal [20].

4 Techniques d'amélioration des performances

Les techniques d'amélioration des performances des effets des MTs sont des méthodes utilisées pour réduire les erreurs causées par les réflexions multiples des signaux dans les systèmes de communication. Ces techniques comprennent l'utilisation de méthodes adaptatives telles que les corrélateurs étroits, les corrélateurs haute résolution etc., Ces

approches visent à améliorer la détection et le suivi des trajets directs et indirects des signaux et en corrigeant les distorsions induites par les MTs, et pour améliorer la précision des récepteurs GNSS en environnements perturbés.

4.1 Corrélateurs étroits

Puisque, l'amplitude de l'offset de code est directement proportionnelle à la valeur de l'espacement de chip C_s d'une boucle de code de type avance retard, la réduction de ce dernier peut réduire l'effet des MTs dans certaines conditions. Dans ce cas, on utilise ce qu'on appelle le corrélateur étroit (Narrow Correlator (NC)) [8].

La sortie d'un discriminateur « Dot Product » est donnée par l'équation :

$$DP = I_P(I_E - I_L) \quad (\text{II. 18})$$

Où les deux corrélateurs (avance I_E et retard I_L) sont utilisés avec un espacement de d chips et I_P est le corrélateur ponctuel (Prompt)

En présence de MT I_E et I_L peuvent être exprimés comme [4] :

$$I_E = R(\tau - d/2) + \alpha R(\tau - d/2 + \delta) \quad (\text{II. 19})$$

$$I_L = R(\tau + d/2) + \alpha R(\tau + d/2 + \delta) \quad (\text{II. 20})$$

Cependant, le problème du corrélateur étroit est la plage de variation de l'offset de code qui reste inchangeable. En fait, tous les trajets réfléchis qui ont un retard de propagation inférieur à 320 mètres par rapport au LOS produisent une erreur de poursuite de code. L'erreur maximale dépend dans ce cas de l'amplitude du retard et de la phase du trajet réfléchi par rapport au LOS [18].

4.2 Corrélateur Double-delta

Le corrélateur double delta est une technique de corrélation utilisée pour mesurer les retards de propagation des signaux dans les systèmes de réception, comme dans le cas des récepteurs GPS. Cette technique utilise deux paires de corrélateurs au lieu d'une seule, ce que permet de mesurer les retards de propagation avec une grande précision, ce qui est essentiel pour le fonctionnement des systèmes de réception [18]. Il est classé comme un corrélateur de haute résolution (HRC) et basé sur la combinaison de quatre corrélateurs (deux avances et

deux retards) au lieu de deux dans le cas des corrélateurs classiques [18]. L'espacement entre les répliques Early et Late dans chaque paire est différent.

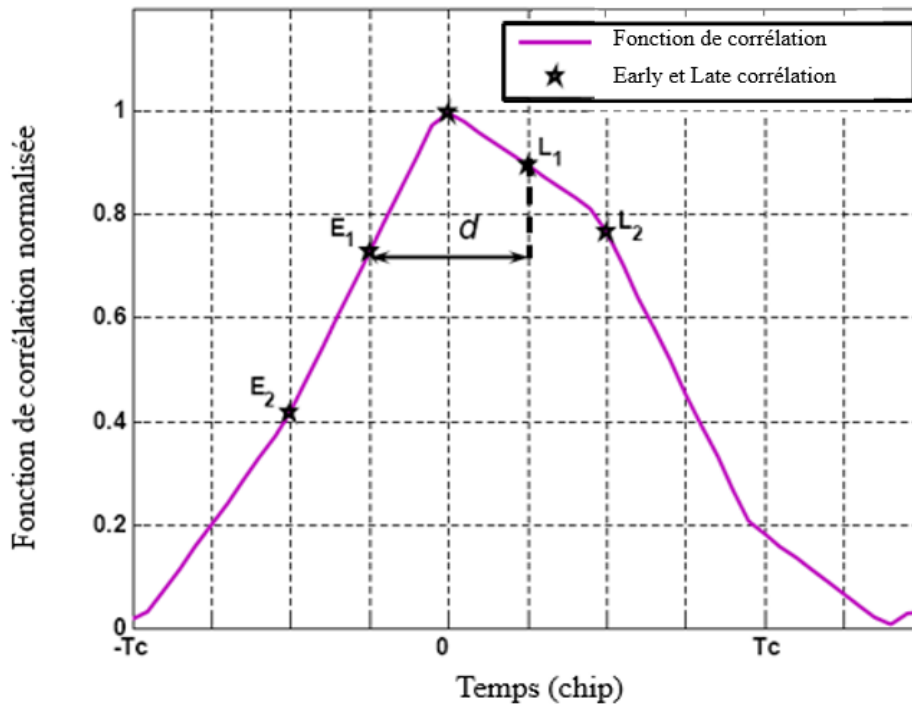


Figure II.28 Concept de corrélateur double delta [4].

4.3 Corrélateur HRC

La HRC est une des techniques qui utilise la dérivée seconde du code généré localement. A cet effet, il utilise cinq corrélateurs c'est-à-dire 2 corrélateurs en plus que le cas classique. La HRC utilise un code généré localement qui est différent du code local habituel [7].

L'ensemble des formules qui décrivent la HRC sont données par [4] :

$$E_{\text{HRC}}(\tau) = 2E_1 - (E_2 + P) \quad (\text{II. 21})$$

$$L_{\text{HRC}}(\tau) = 2L_1 - (L_2 + P) \quad (\text{II. 22})$$

$$D_{\text{HRC}}(\tau) = (E_1 + L_1) - (E_2 + L_2)/2 \quad (\text{II. 23})$$

Où E_1 et L_1 sont les corrélateurs avec espacement (d) et E_2 et L_2 les corrélateurs avec espacement ($2d$).

4.4 Un corrélateur stroboscopique

Le corrélateur stroboscopique est un autre type de discriminateur qui emploie le corrélateur double delta. En effet, il utilise deux bras supplémentaires qui sont deux paires de corrélateurs avance-retard. Typiquement, les corrélateurs de la première paire sont espacés de (d_1) et les

corrélateurs de la 2ème paire sont espacés de $(2d_1)$. Dans les récepteurs classiques, les valeurs des corrélations avance et retard constituent les entrées de la boucle de poursuite de code DLL.

Par conséquent, dans le corrélateur stroboscopique, ce sont les différences entre les corrélateurs avance et retard qui sont utilisées comme entrées de la boucle de poursuite de code DLL.

La fonction de discrimination du SC est donnée comme suit [4] :

$$D_{SC} = 2NC(d_1) - NC(2d_1) \quad (\text{II. 24})$$

$$D_{SC} = 2 \cdot D_{HRC} \quad (\text{II. 25})$$

4.5 Filtres différentiateurs

Soit f un signal échantillonné avec une période égale à h . Dans ce cas le signal échantillonné f_k est donné par :

$$f_k = f(x_k), x_k = x^* + kh, k = -M, \dots, M, M = \frac{N-1}{2} \quad (\text{II. 26})$$

Puis la dérivée numérique peut être écrite sous sa forme générale :

$$f'(x^*) \approx \frac{1}{h} \sum_{K=1}^M C_K \cdot (f_k - f_{-k}) \quad (\text{II. 27})$$

$\{c_k\}$: est un filtre antisymétrique ; sa réponse fréquentielle est donnée par ($h = 1$) :

$$H(\omega) = 2i \sum_{K=1}^M C_K \sin(k\omega) \quad (\text{II. 28})$$

L'objectif est de déterminer les coefficients $\{C_k\}$ de telle sorte que $H(\omega)$ soit aussi proche que possible d'une réponse d'un dérivateur idéal $H_d(\omega) = i\omega$ dans la région de basse fréquence et tend doucement vers zéro dans la haute fréquence la plus élevée $\omega=\pi$. Les résultats sont illustrés ci-dessous [18].

Différentiateurs robustes de bruit doux ($n=2$ exacte en 1, x, x2, x3, x4)

$$\frac{2(f_1 - f_{-1}) + f_2 - f_{-2}}{8h} \quad (\text{II. 29})$$

$$\frac{5(f_1 - f_{-1}) + 4(f_2 - f_{-2}) + f_3 - f_{-3}}{32h} \quad (\text{II. 30})$$

$$\frac{14(f_1 - f_{-1}) + 14(f_2 - f_{-2}) + 6(f_3 - f_{-3}) + (f_4 - f_{-4})}{128h} \quad (\text{II. 31})$$

$$\frac{42(f_1 - f_{-1}) + 48(f_2 - f_{-2}) + 27(f_3 - f_{-3}) + 8(f_4 - f_{-4}) + f_5 - f_{-5}}{512h} \quad (\text{II. 32})$$

Différentiateurs robustes de bruit doux (n=4 exacte en 1, x, x2, x3, x4)

$$\frac{39(f_1 - f_{-1}) + 12(f_2 - f_{-2}) - 5(f_3 - f_{-3})}{96h} \quad (\text{II. 33})$$

$$\frac{27(f_1 - f_{-1}) + 16(f_2 - f_{-2}) - (f_3 - f_{-3}) - 2(f_4 - f_{-4})}{96h} \quad (\text{II. 34})$$

$$\frac{322(f_1 - f_{-1}) + 256(f_2 - f_{-2}) + 39(f_3 - f_{-3}) - 32(f_4 - f_{-4}) - 11(f_5 - f_{-5})}{1536h} \quad (\text{II. 35})$$

5 Critères d'évaluation de performance

Ces critères d'évaluation de performance sont utilisés pour évaluer les performances des algorithmes de traitement du signal et des récepteurs dans des environnements MTs. Ils sont utilisés pour comparer les performances des différents algorithmes et des différents types de récepteurs, et pour optimiser les paramètres de conception des récepteurs pour minimiser l'impact des MTs sur la qualité du signal reçu.

5.1 Critère de l'enveloppe d'erreur de MT

L'enveloppe d'erreur est un outil d'évaluation de performances très adapté aux différentes techniques de poursuite de codes utilisées dans les récepteurs GNSS [3]. A la sortie du discriminateur et en présence d'un signal réfléchi, Pour la calculer, on suppose qu'un seul signal

réfléchi est présent avec une amplitude relative fixée (généralement égale à 0.5 en pire cas)[6]. La fonction de discrimination est donnée par [5]

$$V(\varepsilon_\tau) = D(\varepsilon_\tau) + \alpha \cdot D(\varepsilon_\tau + \tau_k) e^{j(\varphi_k - \varphi)} + n_s(t) \quad (\text{II. 36})$$

Où, $D(\varepsilon_\tau)$ est la fonction de discrimination en absence de MT et $n_s(t)$ représente le bruit à la sortie du discriminateur.

En l'absence du signal réfléchi, la boucle fait tendre la tension de discriminateur vers zéro, ceci étant réalisé pour une valeur de ε_τ nulle. En présence d'un signal réfléchi, la boucle converge en faisant tendre $V(\varepsilon_\tau)$ vers zéro [25]. Or ceci est réalisé pour une valeur de ε_τ qui n'est pas nulle.

Il en résulte une erreur de poursuite. Cette erreur est la solution en ε_τ de l'équation suivante [13] :

$$D(\varepsilon_\tau) = -\alpha \cdot D(\varepsilon_\tau + \tau_k) e^{j(\varphi_k - \varphi)} + n_s(t) \quad (\text{II. 37})$$

5.2 Critère de la moyenne courante

Le critère du courant moyen des trajets multiples fait référence à une méthode utilisée dans l'étude de la propagation par trajets multiples dans les systèmes de communication sans fil pour évaluer la qualité du signal reçu et les performances du système de communication [21]. Ce critère est basé sur la moyenne de l'enveloppe du signal sur une certaine période de temps, et il est utilisé pour déterminer la qualité du signal et la précision de l'estimation du signal, et il consiste aussi à analyser les caractéristiques de propagation du signal affectées par les réflexions et les chemins indirects entre émetteurs et récepteurs, particulièrement importants dans les environnements urbains avec diverses surfaces réfléchissantes comme les bâtiments et les routes [26]. La variabilité des signaux reçus due aux différentes amplitudes, angles de phase et directions d'arrivée caractérise ce phénomène [21]. Des paramètres tels que le délai moyen et l'étalement du délai jouent un rôle crucial dans la description des effets statistiques de la propagation sur plusieurs trajets, aidant ainsi à comprendre le comportement du signal dans de tels environnements [26] [27].

5.3 Critère de la variance

C'est une mesure du degré de dispersion d'un ensemble de données. On la calcule en prenant la moyenne de l'écart au carré de chaque nombre par rapport à la moyenne d'un ensemble donné [28].

Les unités de mesure ne sont pas les mêmes que celles des observations originales. Par exemple, si on mesure en mètres (m) la variance doit être mesurée en mètres carrés (m^2). Sa formule est comme suivie [14] :

$$\text{Var}(x) = E[(x - E[x])^2] \quad (\text{II. 38})$$

6 Conclusion

Dans ce chapitre, dans un premier temps nous avons détaillé le phénomène de propagation par trajets multiple. Ensuite, nous avons présenté quelques techniques pour diminuer l'effet du phénomène de MT telle que le corrélateur étroit, la SC, la HRC et les filtres différentiateurs. Finalement nous avons présenté trois critères d'évaluation de performance à savoir, le critère de l'enveloppe d'erreur, de la moyenne courante et celui de la variance. Le prochain chapitre sera consacré aux résultats de simulation et à leur interprétation.

Chapitre III : Résultats de Simulation

1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de simulations numériques sur les différentes structures que nous avons implémentées sur Matlab pour des signaux Galileo. En premier lieu nous allons présenter l'implémentation des différentes méthodes de mitigation de multi-trajets telles que NC, HRC, SC appliqués aux signaux BOC et MBOC. Les résultats obtenus seront soumis à trois critères de performance notamment l'enveloppe d'erreur, la moyenne courante et la variance.

2 Implémentation numérique

La fonction d'autocorrélation composite pour le signal BOC (1,1) avec une réplique du code généré localement est illustrée sur la figure (III.29). La déformation de la FAC du LOS dépend de plusieurs paramètres à savoir le retard, l'amplitude et la phase du signal réfléchi par rapport au signal direct.

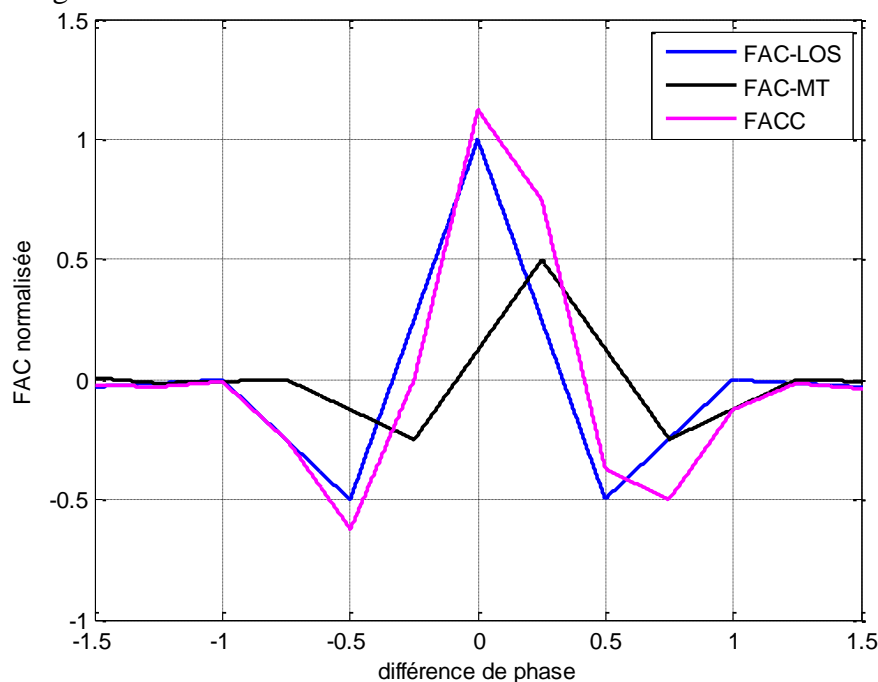


Figure III.29 Superposition de la corrélation du MT sur la corrélation directe.

2.1 Méthode du NC

2.1.1 Présenter le schéma bloc

Le schéma bloc de la NC est présenté sur la figure (III.30). Comme l'illustre cette figure, la procédure de corrélation NC est appliquée sur une boucle de poursuite de code de type DLL qui utilise deux corrélateurs avance et retard. Chacun des pics de la FAC de la NC

est détecté par un point de passage par zéro de la fonction discriminatrice (tension d'erreur), qui est présenté dans la figure (III.31).

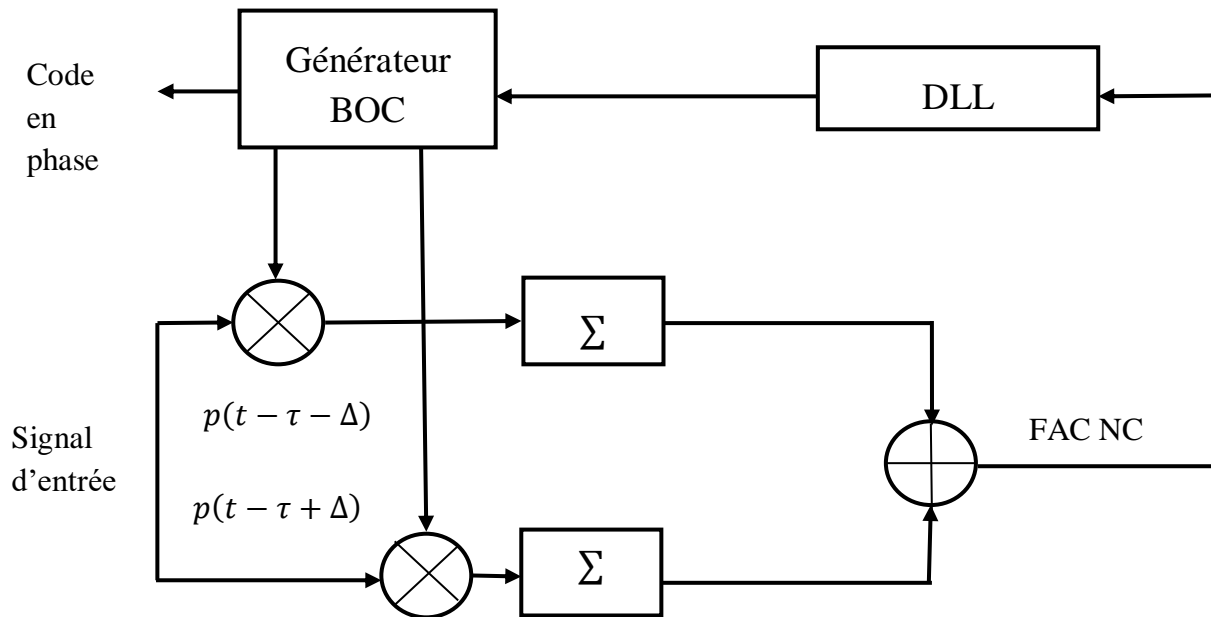


Figure III.30 Diagramme bloc de la NC.

2.1.1 La fonction ou discrimination avec et sans MT

Comme nous l'avons observé dans le chapitre précédent concernant la méthode de corrélateur étroite, la réduction de l'espacement de chip d'une boucle de code DLL peut réduire l'effet des MTs dans certaines conditions. Comme l'illustre la figure (III.30), qui représente la différence entre les courbes dans la présence et l'absence des MTs.

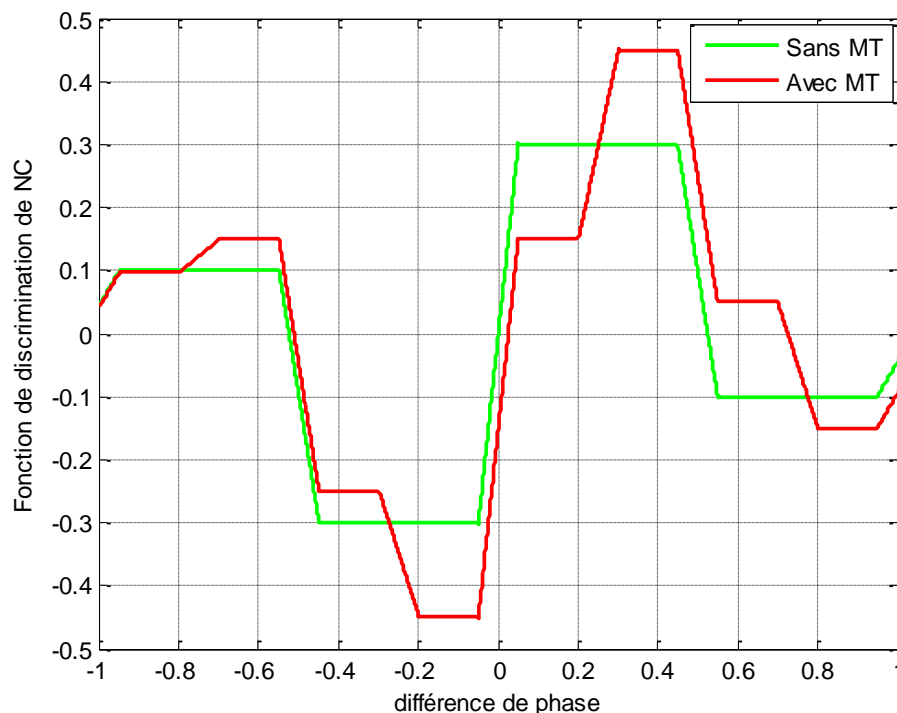


Figure III.31 Les fonctions de discrimination avec et sans MT du NC.

On remarque que les signaux réfléchis et diffractés sont bien traités, la résolution et la précision de la discrimination sont améliorées. La variation d'amplitude fait référence à la disparité de la puissance entre le signal direct et le signal multiples.

2.2 Méthode du HRC

2.2.1 Présenter le schéma bloc

Le schéma bloc de la HRC est présenté dans la figure (III.32). Comme l'illustre cette figure, la procédure de corrélation HRC, est appliquée sur une boucle de poursuite de code de type DLL qui utilise trois corrélateurs, en avance, en retard et en phase. Chacun des pics de la FAC de la HRC est détecté par un point de passage par zéro de la fonction discriminatrice (tension d'erreur), qui présente la figure (III.33).

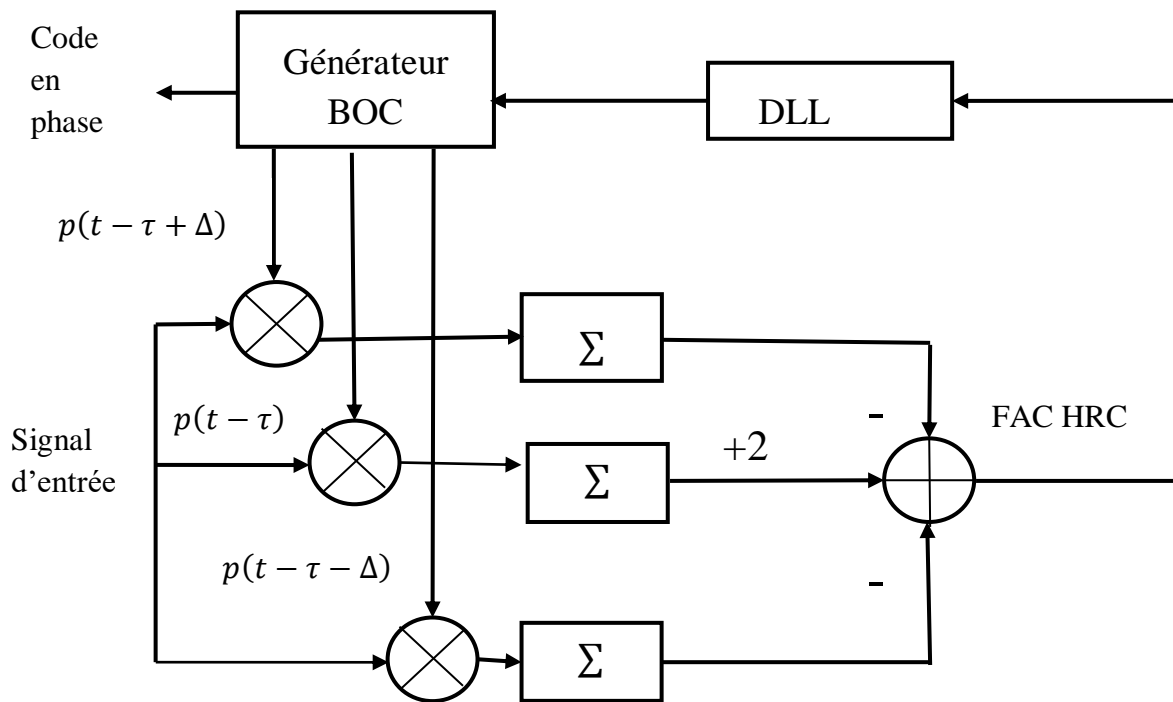


Figure III.32 Diagramme bloc de la HRC.

2.2.2 La fonction ou discrimination avec et sans MT

La simulation est regroupée en deux sous-sections, en absence et en présence des MTs. A partir de la figure (III.33) les résultats de simulation de la DF de la technique HRC illustrent qu'en absence des MPS, présente un pic plus fin ce qui donne de meilleures performances en termes de poursuite. Cependant en présence des MTs, on remarque l'apparition de nouveaux pics, ce qui rend le processus de poursuite plus complexe comme il est représenté dans la figure (III.33).

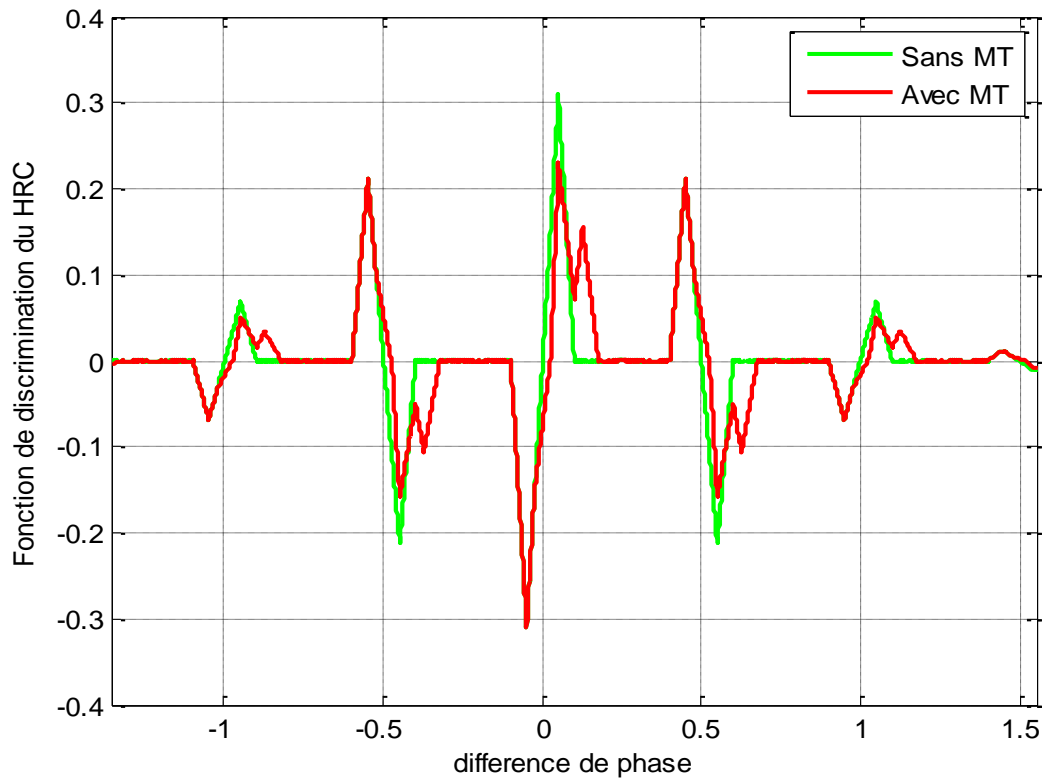


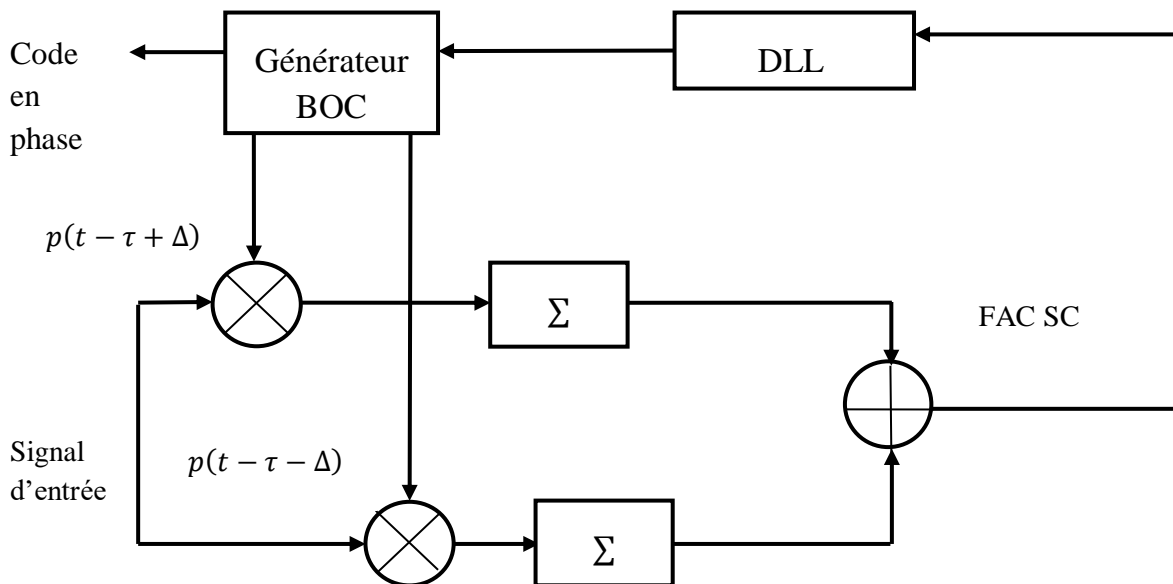
Figure III.33 Les fonctions de discrimination avec et sans MT du HRC.

On observe que, pour un retard plus petit on voit bien l'atténuation d'amplitude qu'on subit les pics principaux. Les MTs restent toujours un obstacle pour la bonne précision dans le cas des petits retards.

2.1 Méthode du SC

2.3.1 Présenter le schéma bloc

Le schéma bloc de la SC est présenté dans la figure (III.34). Comme l'illustre cette figure, la procédure de corrélation SC est appliquée sur une boucle de poursuite de code de type double DLL qui utilise deux corrélateurs en avance et en retard. Chacun des pics de la FAC de la SC est détecté par un point de passage par zéro de la fonction discriminatrice (tension d'erreur), qui est présentée la figure(III.35).



2.3.2 *Figure III.34 Diagramme bloc de la SC.*

Comme l'illustre la figure (III.35), la méthode SC fonctionne de manière optimale, et les corrélateurs avance et retard permettent de suivre précisément le retard du signal direct en assurant une poursuite fiable du code.

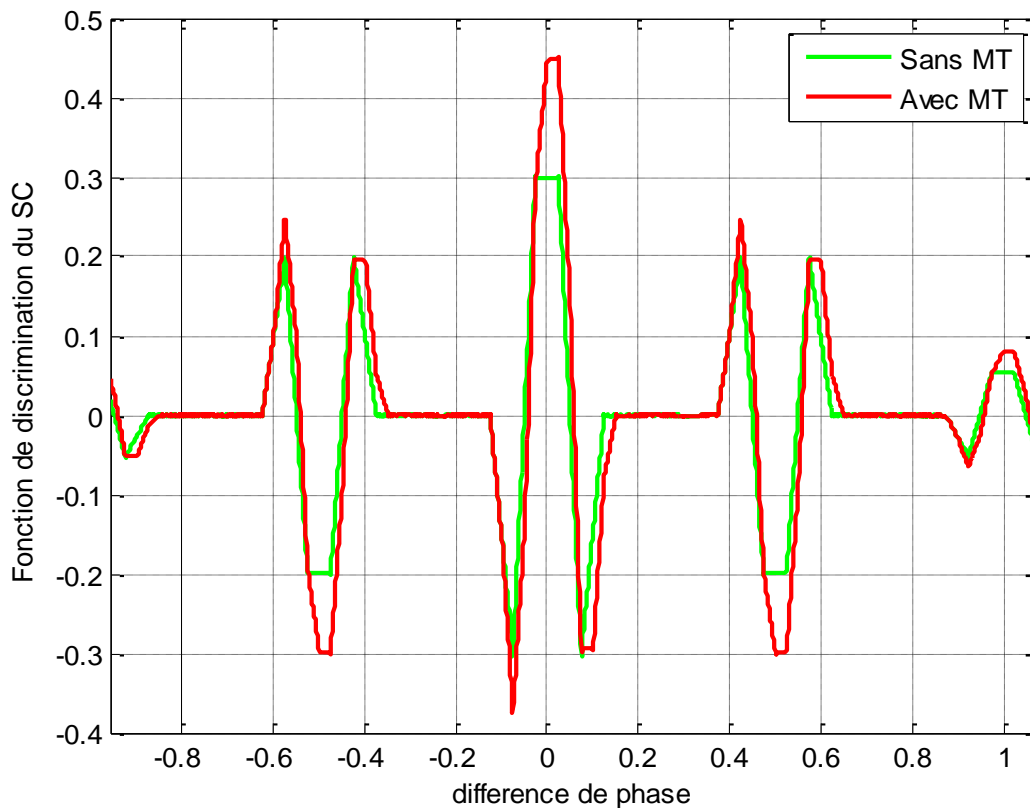


Figure III.35 Les fonctions de discrimination avec et sans MT du SC.

On remarque que, la SC permet de visualiser ces effets des MTs en montrant comment les différents trajets s'additionnent au niveau du récepteur, influençant la déformation de la

boucle discriminateur et le point de passage par zéro. Ainsi, en utilisant la méthode SC, il est possible de caractériser de manière détaillée les distorsions et les erreurs de position induites par les trajets multiples sur le signal composite par rapport au signal direct.

3 Discriminateur du NC, HEC et SC

3.1 Comparaison entre les trois Méthodes

Les trois méthodes de corrélateurs, NC, HRC et SC avec MT, sont des techniques utilisées pour améliorer la précision de la détection et de la réduction des signaux MTs dans les systèmes de traitement de signaux. Grâce au corrélateur étroit, il est possible de déterminer la relation entre un signal reçu et un signal de référence. Elle est utilisée pour mesurer des paramètres tels que le retard, l'amplitude et la phase des éléments du signal reçu. L'objectif du HRC est d'améliorer la précision de l'estimation et de diminuer les signaux MTs ce qui permet d'obtenir des mesures plus précises.

Le SC consiste en l'utilisation d'impulsions stroboscopiques complexes pour la corrélation et en l'utilisation de techniques avancées pour détecter le LOS dans des environnements perturbés. La méthode classique consiste à utiliser un corrélateur classique pour détecter les signaux de navigation, sans prendre en compte les effets de la MTs. Le HRC est plus efficace comme il est montré dans la figure (III.36).

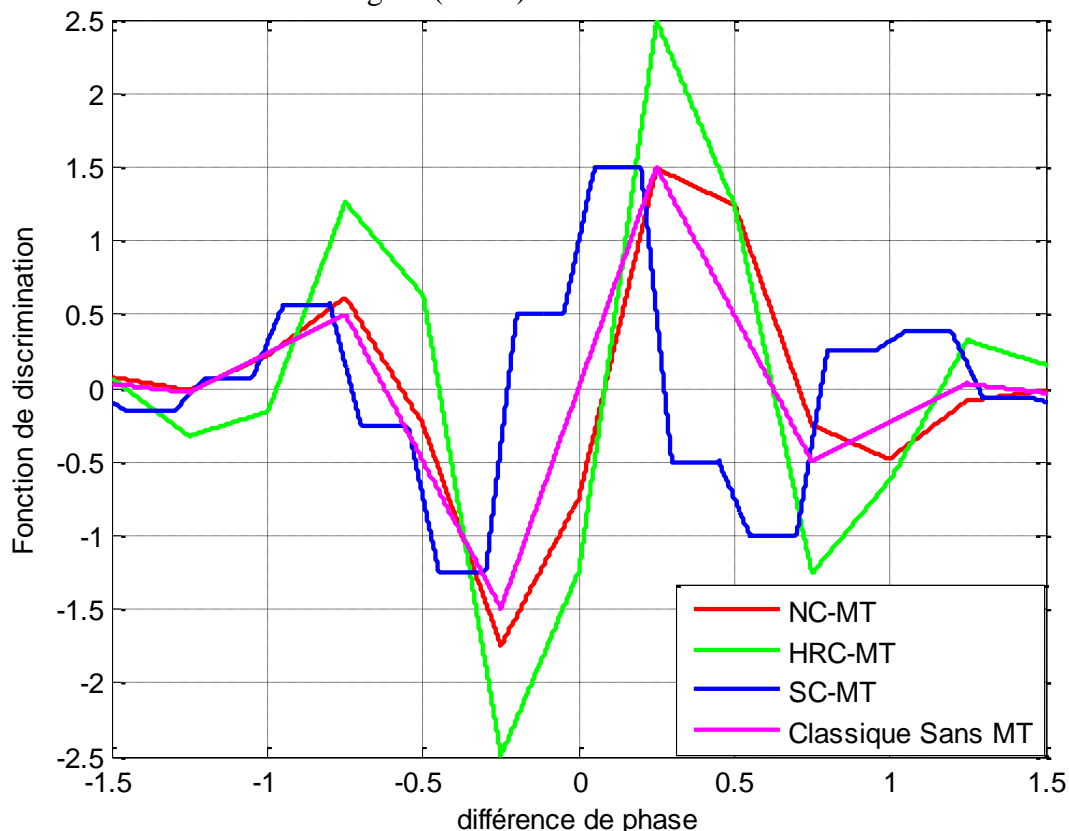


Figure III.36 Discrimination des trois Méthodes avec MT et classique sans MT.

Observe que, les différentes méthodes de discrimination proposées présentent chacune leurs propres avantages et inconvénients. Le corrélateur étroit et le HRC sont plus efficaces pour réduire les effets des MTs, mais peuvent être plus complexes à mettre en œuvre. Le SC constituer une approche plus simple, mais peut-être moins efficace dans certaines conditions. La méthode classique sans MTs est la plus simple, mais elle est moins efficace dans les environnements où les MTs sont présents.

4 Effet des MTs

Les simulations sont menées afin de tester les méthodes proposées. Pour cette raison, trois scénarios de mesure de performance sont envisagés. Dans ce qui suit les méthodes seront testées selon trois critères : l'enveloppe de l'erreur MT, la moyenne courante de l'erreur et la variance. Les simulations sont effectuées dans une scène contenant un signal LOS et un signal MT d'amplitude 0.5 et dont le retard varie de (0 à 30) mètres par rapport au LOS.

4.1 Critère de la moyenne courante

Les erreurs sont calculées pour un signal MT qui a une amplitude de 0,5 et un retard qui varie de 0 à 30 mètres par rapport au LOS. Les enveloppes d'erreurs des MTs sont calculées aux points maximums quand le signal MT est en phase par rapport au LOS.

4.1.1 Signal BOC

La modulation BOC (n, n) permet de réduire les effets des multi-trajets par rapport à la modulation BPSK classique. Dans la figure (III.37) les résultats des moyennes courantes des erreurs sont représentés les courbes des erreurs des méthodes que sont approximativement superposées. Pour un retard de MTs inférieur à 100 m, l'erreur maximale commise par la boucle à verrouillage de délai (DLL) sur le code. Cette erreur devient nulle pour un retard supérieur à 300 m.

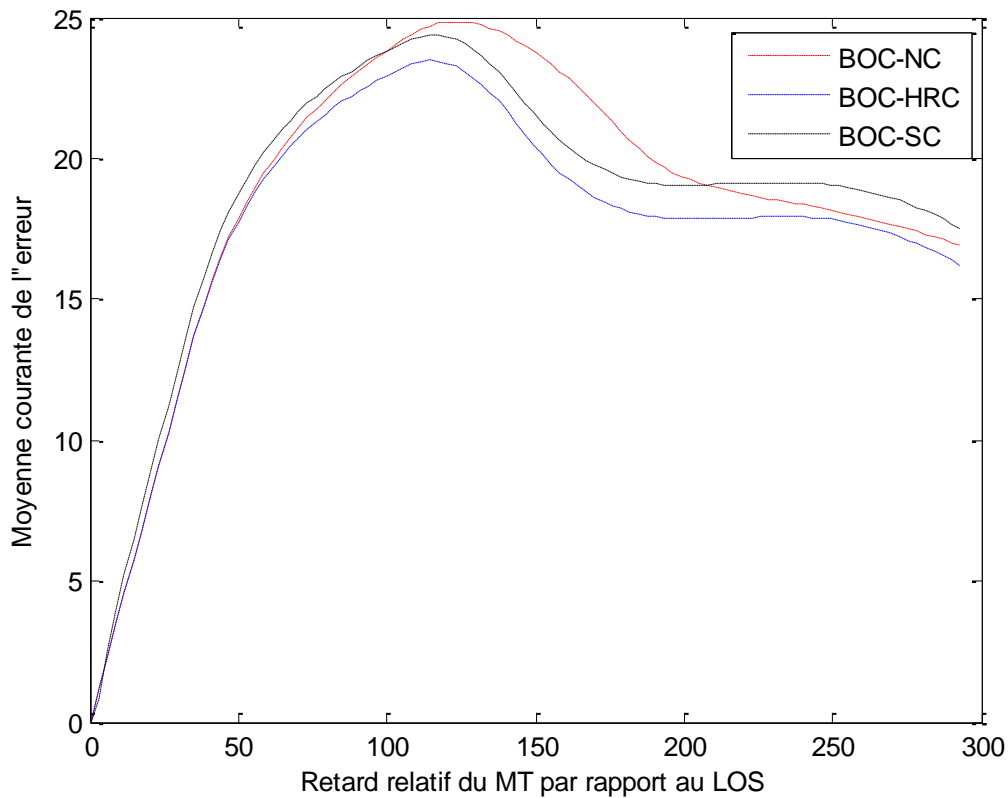


Figure III.37 La moyenne courante de l'erreur pour la modulation BOC.

Comme illustré dans cette figure, lorsque le signal MT d'amplitude 0.5 subit une variation en retard de 0 à 300m par rapport au signal LOS. Les méthodes SC et HRC présentent des performances MT meilleures par rapport à la NC, du fait qu'elle est sensible seulement pour les retards MT courts. Les moyennes courantes des erreurs pour SC et HRC décroissent rapidement vers zéro par rapport au NC. Ceci montre que la SC et HRC disposent d'une meilleure résistance aux MTs.

4.1.2 Signal MBOC

4.1.2.1 Signal CMBOC

Les trois courbes représentées sur la figure (III.38) illustrent la moyenne courante de l'erreur pour différentes modulations CBOC. On peut remarquer que la courbe CBOC-NC montre une augmentation rapide de l'erreur qui atteint un pic avant de diminuer progressivement. Cela peut indiquer une sensibilité plus grande aux retards dans le signal. Et pour CBOC-HRC, elle suit une trajectoire similaire à celle du CBOC-NC, mais avec un pic d'erreur légèrement inférieur, ce qui pourrait suggérer une meilleure performance dans certaines conditions de retard. Concernant la courbe CBOC-SC, elle présente une augmentation plus graduelle de l'erreur et atteint son pic plus tard que les deux autres.

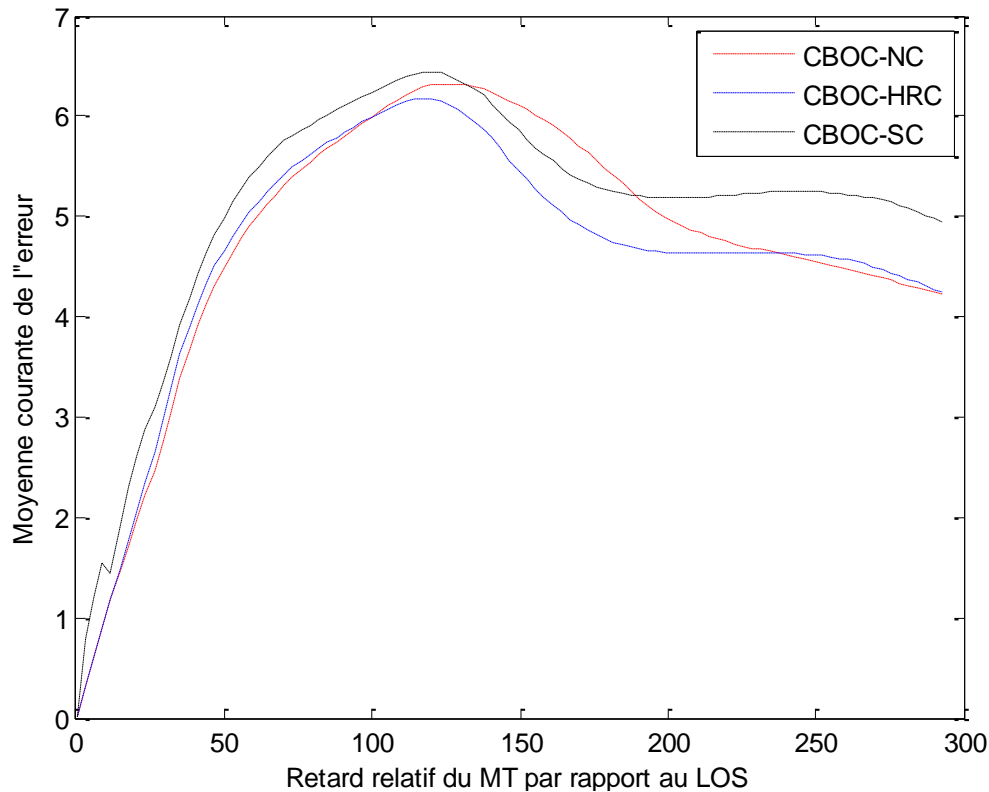


Figure III.38 La moyenne courante de l'erreur pour la modulation CBOC.

On voit que, les trois types de modulation CBOC présentent des caractéristiques communes, elles augmentent, atteignent un pic vers le milieu de l'axe des abscisses, puis diminuent. Cependant, il y a des différences notables dans leur performance en fonction du retard relatif du MT par rapport au LOS, montrant que le CBOC-NC est considéré comme le plus sensible aux erreurs de multi-trajets par rapport au CBOC-HRC.

4.1.2.2 Signal TMBOC

La figure (III.39) illustre la moyenne courante de l'erreur pour la modulation TMBOC et les trois courbes représentent différentes méthodes de corrélation. Tout d'abord la courbe TMBOC-NC, elle montre une augmentation rapide de l'erreur avant d'atteindre un pic, puis une diminution progressive. Cela indique que la méthode NC pourrait être plus sensible aux erreurs de multi-trajets ou aux interférences. Puis la courbe TMBOC-HRC montre une augmentation plus modérée de l'erreur et un pic plus bas que la NC et la SC, ce qui suggère une meilleure performance en termes de gestion des erreurs et une plus grande résistance aux perturbations. La courbe TMBOC-SC présente le comportement d'erreur le plus stable avec une augmentation graduelle, ce qui pourrait indiquer une faible performance, en particulier dans des environnements où les signaux sont susceptibles d'être affectés par des multi-trajets.

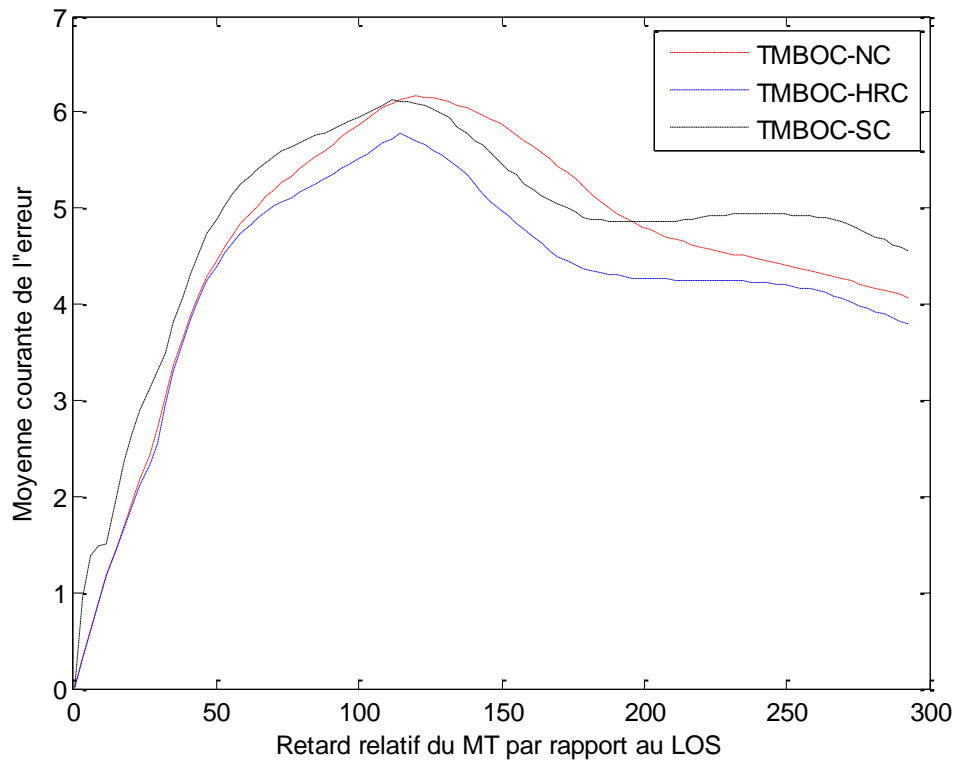


Figure III.39 La moyenne courante de l'erreur pour la modulation TBOC.

On remarque que, la méthode HRC semble offrir la meilleure performance en termes de gestion des erreurs, ce qui est crucial pour la précision des systèmes de navigation par satellite.

4.2 Critère de l'enveloppe d'erreur

L'enveloppe d'erreur est utilisée comme critère de comparaison. Cependant la fonction d'autocorrélation du signal BOC présente plusieurs pics secondaires en plus du pic principal. Cela induit une ambiguïté dans la détection du trajet direct, ce qui peut dégrader les performances de poursuite en présence de MTs.

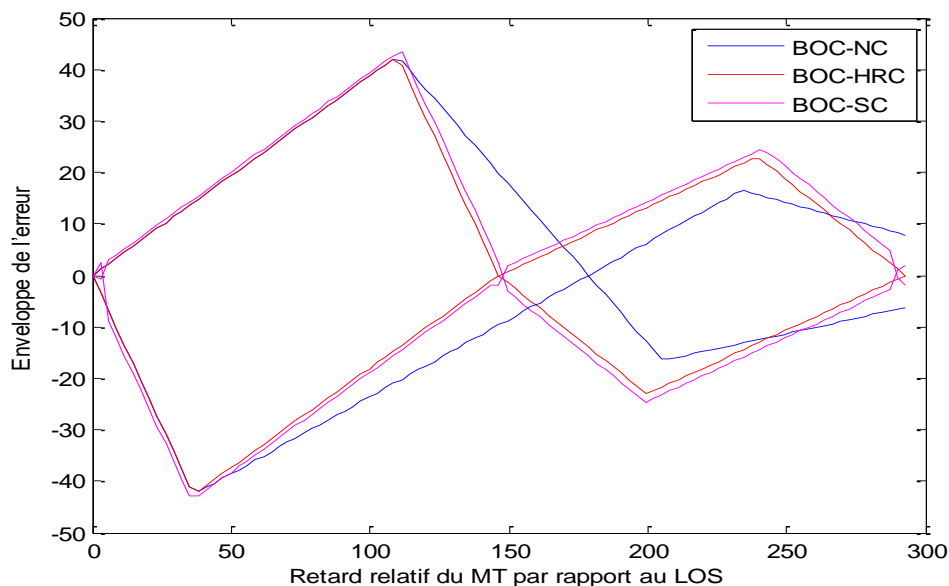


Figure III.40 l'enveloppe d'erreur de modulation BOC.

D'après la figure (III.40), il est clair que les méthodes SC et HRC sont exécuté mieux que le corrélateur NC en termes de l'enveloppe de l'erreur. Quel que soit le retard du MT, l'enveloppe de l'erreur des méthodes SC, HRC est toujours inférieure à l'erreur du NC dans la plage de variation qui est inférieure à 170m, d'autre part dans la plage qui supérieure à 170m NC est exécuté mieux que les deux méthodes. En général, les méthodes SC et HRC montre une bonne performance pour une grande plage de variation du retard des MTs puisqu'elle est sensible pour seulement les retards moyens. L'enveloppe de l'erreur du code diminue pour se mettre à zéro pour les longs et courts retards.

4.3 Critère de la variance

La figure (III.41) présente la comparaison des performances en termes du SNR, selon le critère de la variance, entre les différentes méthodes NC, HRC, SC appliquées au signal BOC (n, n).

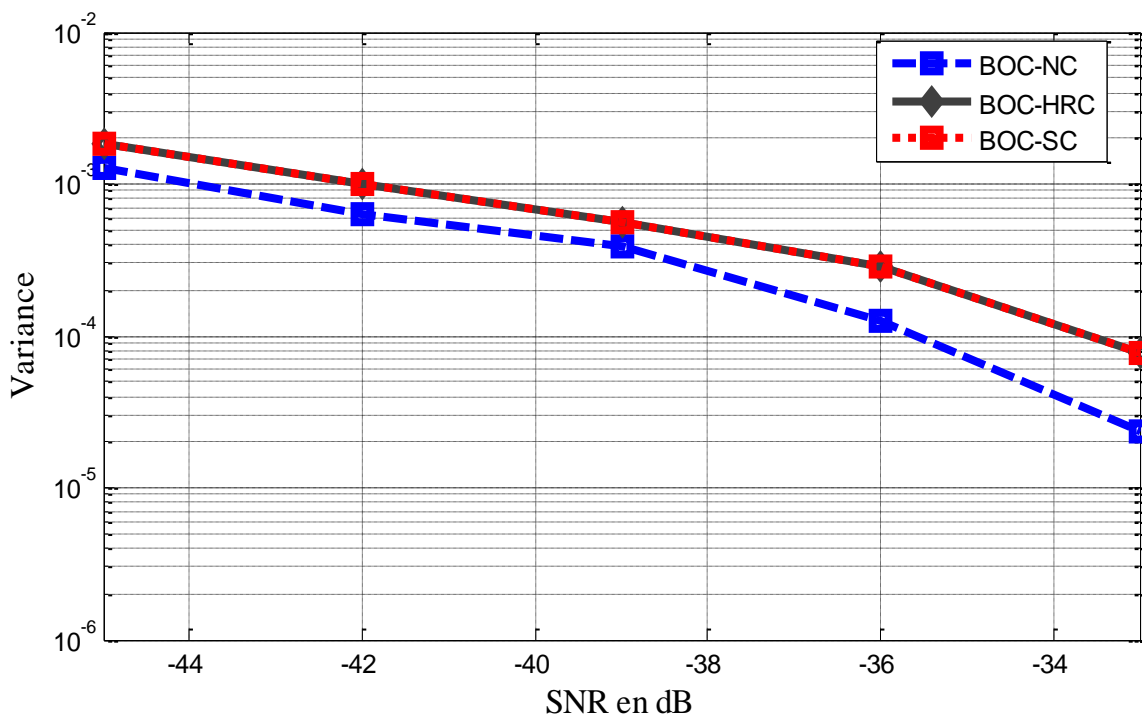


Figure III.41 Comparaison des Variances de l'estimation d'amplitude du signal direct en fonction du SNR pour le signal BOC avec les méthodes NC, SC, HRC.

Comme l'illustre la figure ci-dessus, les variances sont représentées en fonction du SNR qui varie de -45 dB à -30 dB. La variance de la méthode SC et HRC décroît moins rapidement vers ses plus petites valeurs en comparaison avec la NC. On peut donc conclure que la méthode NC présente une meilleure résistance au bruit par rapport aux SC et HRC.

5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté et validé les résultats de simulation des techniques permettant de réduire les effets du phénomène des MTs et du bruit. En premier lieu, le modèle ainsi que le block digramme ont été établis pour chaque méthode. Ensuite, les résultats de simulation de la validation de ces techniques ont été présentés et commentés. Finalement, nous avons établi une étude comparative basée sur des critères de performances lesquelles l'enveloppe de l'erreur MT, la moyenne courante de l'erreur et la variance. Après l'étude comparative selon les trois critères on constate que les méthodes SC et HRC présentent les meilleures performances par rapport à la méthode NC.

Conclusion Générale

Le phénomène de MTs est très pénalisant pour les systèmes de navigation GNSS tels que le système Américain GPS, Russe GLONASS et Européen Galileo. Bien que, dans les autres systèmes de communications, les signaux MTs sont combinés pour produire un meilleur rapport signal sur bruit et aider par conséquent à la décision, dans les systèmes de navigation GNSS toute différence entre les estimées du retard de propagation et de la phase de la porteuse et leurs vraies valeurs se traduit par une erreur de positionnement.

L'avènement de la nouvelle modulation BOC a permis d'améliorer considérablement les performances des systèmes de navigation par satellites ; cependant l'effet des MTs reste toujours une source potentielle d'erreur lors du positionnement. A cet effet, plusieurs travaux de recherche se sont orientés vers la conception de systèmes d'acquisition et de poursuite qui permettent de réduire ce problème.

Dans ce mémoire nous avons justement étudié et validé trois techniques de mitigation de MTs : la NC, la HRC et la SC. Toutes ces techniques ont été appliquées aux signaux BOC et soumises aux critères d'évaluation de performances notamment l'enveloppe d'erreur, l'erreur moyenne courante et la variance. Les résultats obtenus ont fait l'objet d'une étude comparative qui a permis de classer la méthode SC comme étant la meilleure en termes de résistance au bruit et MTs ; alors que la NC et le HRC présentent pratiquement les mêmes performances.

Comme perspective de ce mémoire on suggère de transposer les algorithmes de réduction des MTs étudiés et validés sous MATLAB vers une implémentation matérielle sur FPGA. Cette démarche vise à :

Évaluer la faisabilité de l'implémentation des algorithmes sur un FPGA.

Tester et valider les performances de ces algorithmes dans des scénarios réels, notamment en milieu rural, afin de confirmer ou infirmer les résultats obtenus lors des simulations sous MATLAB.

Références

- [1] Y. AIT MENSSOUR, «Traitement du signal pour la réflectométrie GNSS par mesure de déphasage de porteuse,» Thèse mémoire, Ecole supérieur de Géométries et Topographies, 1-72, 05 07 2018. [En ligne]. Available: <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02091191v1/file/AIT%20MENSSOUR%20Yassir.pdf>. [Accès le 18 02 2024].
- [2] R. ROSSO, «Le développement du positionnement par satellites,» Journal, Annales des mines réalités industrielles, 51-56, 05 2009. [En ligne]. Available: <https://www.annales.org/ri/2009/ri-mai-2009/rosso.pdf>. [Accès le 18 02 2024].
- [3] V. HEIRIES, «Optimisation d'une chaîne de réception pour signaux de radionavigation à porteuse à double décalage (BOC) retenus pour les systèmes GALILEO et GPS modernisé,» Thèse doctorat, Université de Toulouse, 1-196, 20 12 2007. [En ligne]. Available: https://depozit.isae.fr/theses/2007/2007_Heiries_Vincent.pdf. [Accès le 19 02 2024].
- [4] K. ROUABAH, «Etude et Amélioration des Performances des boucles de poursuite de code dans les Récepteurs de Navigation Galileo en Présence de Trajectoires Multiples,» Thèse doctorat de science, Université FARHAT ABBAS - Sétif 1-280, 15 10 2010. [En ligne]. Available: <https://tdoctorat.univ-setif.dz/facultes/facultes1/TEC/rouabehkhaled.pdf>. [Accès le 19 02 2024].
- [5] S. CHEBIR, «Acquisition et Poursuite des Signaux GNSS Multifréquences et Multi-Constellations dans un milieu Outdoor,» Thèse doctorat LMD, Université Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi de Bordj Bou Arréridj, 1-193, 18 02 2019. [En ligne]. Available: https://dspace.univ-bba.dz/bitstream/handle/123456789/4766/These_Chebir.pdf. [Accès le 19 02 2024].
- [6] A. SENOUCI et K. SOUL , «Etude et implémentation d'un algorithme d'acquisition des signaux GPS/Galileo basé sur la décomposition de la fonction de corrélation,» Thèse

- mémoire, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, 1-60, 15 09 2021. [En ligne]. Available: <https://dspace.univ-bba.dz/xmlui/handle/123456789/1109>. [Accès le 19 02 2024].
- [7] N. DERRASSE CHOUK et Y. DJENANE , «Etude Comparative des Techniques de Mitigation des Multitrajets dans les Récepteurs GNSS,» Thèse mémoire de fin d'étude Université A/Mira-Bejaia, 1-82 , 2020. [En ligne]. Available: https://univ-bejaia.dz/xmlui/bitstream/handle/123456789/14703/version_finale.pdf. [Accès le 20 02 2024].
- [8] K. ROUABAH, D. CHIKOUCHE et S. ATTIA , «Evaluation des Erreurs de Poursuite de Code dans les Récepteurs C/A – GPS et BOC(1,1) – GALILEO en Présence des Multitrajets,» Thèse mémoire, Université FARHAT ABBAS Sétif, 1-7 , 25-29 03 2007. [En ligne]. Available: http://www.setit.rnu.tn/last_edition/setit2007/TS/141.pdf. [Accès le 20 02 2024].
- [9] D. MANANDHAR, «Introduction to Global Navigation Satellite System (GNSS),» Mémoire, University of Tokyo, 1-71, 14-18 01 2019. [En ligne]. Available: https://www.unoosa.org/documents/pdf/icg/2019/ait-gnss/AIT2019_02.pdf. [Accès le 18 02 2024].
- [10] F. BELHAFFAF et S. DJEZZAR, «Acquisition Du Signal BOC (Binary Offset Carrier),» Mémoire, Universté SAAD DAHLEB Blida Faculte des Sciences de l'Ingenieur, 1-88, 2007. [En ligne]. Available: <https://di.univ-blida.dz/jspui/bitstream/123456789/4774/1/026-2007.pdf>. [Accès le 13 04 2024].
- [11] A. GOUNDAFI, «DEVELOPPEMENT D'UN MODELE DE GESTION D'OBJETS GEO-LOCALISABLES CENTRALISÉ UTILISANT DIFFERENTS MOYENS DE COMMUNICATION DANS UN ENVIRONNEMENT OSGI,» Mémoire, L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI, 1-182, 04 12 2010. [En ligne]. Available: <https://constellation.uqac.ca/id/eprint/236/1/030166451.pdf>. [Accès le 26 02 2024].
- [12] S. YOUAN BI IRIE, «Positionnement par la méthode du GNSS différentiel à partir de la station permanente IGS YKRO,» Mémoire, Ecole supérieur des travaux publiques, 1-

- 145, 27 08 2020. [En ligne]. Available: <https://fr.scribd.com/document/696721240/2019-2020INGYOUANBIMEMOIRETFE>. [Accès le 10 03 2024].
- [13] M-A. BENTOUCHA, «Etude et evaluation des effets des multitrajets au niveau d'un récepteur Galileo ALTBOC E5,» Mémoire, Université SAAD DAHLEB de Blida, 1-91, 07 2012. [En ligne]. Available: <https://di.univ-blida.dz/jspui/bitstream/123456789/5801/1/32-620-199-1.pdf>. [Accès le 03 04 2024].
- [14] D-F. NAHIMANA, «Impact des multitrajets sur les performances des systèmes de navigation par satellite : Contribution à l'amélioration de la précision de localisation par modélisation bayésienne,» Thèse doctorat, Ecole centrale de lille, 1-154, 16 03 2011. [En ligne]. Available: <https://theses.hal.science/tel-00446552v1/document>. [Accès le 08 04 2024].
- [15] K. BELAIDOUNI, «Positionnement par GPS basé sur le filtre de Kalman : application à l'antenne de poursuite d'ALSAT-1,» Mémoire, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 1-85, 2016. [En ligne]. Available: http://www.univ-usto.dz/theses_en_ligne/doc_num.php?explnum_id=1453. [Accès le 11 04 2024].
- [16] S. TAY, «Analyse et modélisation de l'utilisation de signaux GNSS en environnement marin,» Thèse doctorat, Sous le sceau de l'Université européenne de Bretagne, 1-132, 06 02 2012. [En ligne]. Available: <https://theses.hal.science/tel-00776316/document>. [Accès le 02 05 2024].
- [17] S. GUENDOUZEN et S-A. BENKHIDER , «Modélisation de l'Offset d'Erreur Cohérent pour des Signaux MBOC en Environnement Dégradé,» Thèse mémoire, Université A.MIRA-BEJAIA, 1-70, 2016. [En ligne]. Available: <https://www.univ-bejaia.dz/xmlui/bitstream/handle/123456789/14743/M%C3%A9moire.pdf>. [Accès le 16 03 2024].
- [18] L. RAHMOUNI et B. AIT DJIDA , «Réduction des erreurs des multitrajets au niveau d'un récepteur GPS par méthode adaptative NLMS,» Mémoire, Université SAAD DAHLAB de BLIDA, 1-98, 2009. [En ligne]. Available: <http://di.univ-blida.dz:8080/jspui/handle/123456789/3898>. [Accès le 01 05 2024].

- [19] N. VIANDIER, «Modélisation et utilisation des erreurs de pseudodistances GNSS en environnement transport pour l'amélioration des performances de localisation,» Thèse doctorat, Ecole Centrale de Lille, 1-192, 30 01 2012. [En ligne]. Available: <https://theses.hal.science/tel-00664264/document>. [Accès le 25 04 2024].
- [20] A. DIALLO, «Systèmes multi-antennes pour diversité et MIMO,» Thèse doctorat, Université Nice Sophia Antipolis, 1-268, 09 02 2012. [En ligne]. Available: <https://theses.hal.science/tel-00454612/document>. [Accès le 16 04 2024].
- [21] R. LEGROS, L. MOREL, F. VIGUIER et F. BIROT , «Méthodes de travail dans les réseaux GNSS,» Mémoire, Conseil national de l'information géographique, 1-78, 19 02 2013. [En ligne]. Available: https://cnig.gouv.fr/IMG/pdf/methodes_travail_reseau_gnss_130219.pdf. [Accès le 01 04 2024].
- [22] F. BRAHIM, O. RABASTE et T. CHONAVEL , «Acquisition de canaux multitrajets pour la géolocalisation avec Galiléo,» Doctorat, Université Brest, 381-384, 11-14 09 2007. [En ligne]. Available: https://www.gretsi.fr/data/colloque/pdf/2007_001-0381_17522.pdf. [Accès le 22 03 2024].
- [23] G. TESSERAULT, «Modélisation multi-fréquences du canal de propagation,» Thèse mémoire, Université de Poitiers, 1-155, 11 12 2008. [En ligne]. Available: <http://nuxeo.edel.univ-poitiers.fr/nuxeo/site/esupversions/f04e7d40-2150-4970-b178-5428218add13>. [Accès le 06 04 2024].
- [24] W. KROUKA et S. FENNI , «Évaluation de la diversité d'antenne en polarisation,» Mémoire, ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE, 1-64, 06 2024. [En ligne]. Available: https://repository.enp.edu.dz/jspui/bitstream/123456789/2243/1/FENNI.Sofia_KROUKA.Wafa.pdf. [Accès le 19 03 2024].
- [25] J. MARAIS, «Positionner par satellite dans les environnements transports. Impact du canal de propagation sur les performances de localisation GNSS,» Mémoire, Université Lille 1 Nord de France, 1-128, 08 10 2018. [En ligne]. Available: <https://hal.science/tel-01886043/document>. [Accès le 22 04 2024].

- [26] C. FOUQUE, «Apport des cartes routières navigables pour le positionnement par satellites des véhicules terrestres.,» Doctorat, Université de technologie Compiègne, 1-174, 01 09 2010. [En ligne]. Available: https://www.hds.utc.fr/~bonnif/supervision/MemoireClementFouque_versionFinale.pdf. [Accès le 22 04 2024].
- [27] Y. TRAORE et M. SAAD, «Egalisation des canaux de transmission à trajets multiples par l'algorithme des moindres carrés récursifs,» Mémoire, Université SAAD DAHLAB de Blida, 1-82, 2017. [En ligne]. Available: <https://di.univ-blida.dz/xmlui/handle/123456789/2092>. [Accès le 23 04 2024].
- [28] V. SAVAUX, «Contribution à l'estimation de canal multi-trajets dans un contexte de modulation OFDM,» Doctorat, Ecole Doctorale MATISSE, 1-248, 29 11 2013. [En ligne]. Available: <https://theses.hal.science/tel-00988283/document>. [Accès le 12 04 2024].