



Université ABBES LAGHROUR Khenchela
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Industriel
جامعة عباس لغرور خنشلة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الهندسة الصناعية



N° Série :

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Télécommunications

Spécialité : Systèmes des Télécommunications

THEME

**Optimisation des coefficients d'ondelettes
basée sur les algorithmes génétiques:
Application aux signaux GNSS**

Réalisé par : ZERIBI Sihem

BOUGRINE Chaima

Soutenu le : 15/07/2021 *Devant le jury composé de:*

Mme. KHALFAOUI Fatima

Mr. DOUAK Fouzi

Mr. KHEZZAR Zaki Aissam

Présidente

Encadreur

Co-Encadreur

Université Abbes Laghrour-Khenchela

Université Abbes Laghrour-Khenchela

Université Abbes Laghrour-Khenchela

Promotion 2020/2021

Je dédie ce travail à :



Ma mère,



À la mémoire de mon père Mahmoud, اللهم ارحمه

Pour tous leurs sacrifices, leurs prières, leurs tendresses, leurs soutiens et leurs amours qui m'ont donné la force pour continuer mes études.



Mes frères et mes sœurs,



À tous nos collègues et amis.

Sihem

Je dédie ce mémoire à :

Ma mère,

Mon père,

Mes frères et mes sœurs,

A tous nos collègues et amis.

Chaima

Remerciements

Nous tenons à remercier ALLAH tout puissant qui nous a donné la santé, le courage, et la volonté pour réaliser ce travail.

Nous remercions notre encadreur Monsieur Dr. Fouzi Douak, enseignant à l'université de Khenchela, pour son suivi, pour son aide précieux,

Nous tenons à remercier notre co-encadreur, Monsieur Dr. Zaki Aissam Khezzer, enseignant à l'université de Khenchela, de nous avoir permis d'approfondir nos connaissances avec ses conseils.

Nous adressons nos plus sincères remerciements à Madame Dr. Fatima Khalfaoui, enseignante à l'université de Khenchela, pour nous avoir fait l'honneur de présider le jury de notre mémoire.

Nous tenons à remercier particulièrement tous les enseignants et les responsables de notre département, qui ont veillé sur notre formation.

Nos remerciements vont également à tout le personnel du département du génie industriel pour leur gentillesse et leur disponibilité.

Enfin, nous exprimons notre remerciement à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Résumé

Les ondelettes sont des outils efficaces pour extraire des caractéristiques discriminantes des signaux GNSS. Cependant, la sélection d'une ondelette mère appropriée pour le signal analysé est un critère important. Cela offre la possibilité d'effectuer une procédure d'optimisation pour obtenir la meilleure ondelette adapté à notre problème. Le but de notre travail est de proposer une nouvelle approche pour identifier et supprimer les interférences dans les récepteurs GNSS à l'aide d'une transformée en ondelettes discrète (DWT), basée sur une méthode évolutionnaire (algorithme génétique AG) et un seuillage automatique de machine à vecteurs de support (SVM).

La représentation polyphasée de la transformée en ondelettes discrète (DWT) est exploitée dans cette étude. Une telle représentation permet de générer des bancs de filtres d'ondelettes à partir d'un ensemble de paramètres angulaires, afin de minimiser la fonction fitness basée sur l'optimisation de l'algorithme génétique et le classifieur SVM.

Les résultats que nous avons obtenus, après la simulation sont assez satisfaisants du point de vue amélioration des performances de l'identification et de suppression des interférences par rapport aux bancs de filtres d'ondelettes classiques.

Mots clés: Ondelettes, Interférence, GNSS, DWT, Algorithmes génétiques, SVM.

Abstract

Wavelets are efficient tools for extracting discriminative characteristics in the GNSS signals. However, the selection of an appropriate mother wavelet for the signal being analyzed is an important criterion. This offers the possibility to perform an optimization procedure to obtain the best wavelet suitable for our problem. The aim of our work, is to propose a new approach to identify and remove interference in GNSS receivers using a discrete wavelet transform (DWT), based on an evolutionary method (genetic algorithm GA) and automatic thresholding of support vector machine (SVM).

The polyphase representation of the discrete wavelet transform (DWT) is exploited in this study. Such a representation allows generating a wavelet filters bank from a set of angular parameters, in order to minimize the fitness function based on the optimization of the genetic algorithm and the classification SVM.

The results obtained after the simulation are satisfactory from the point of view of improving the performance of the identification and eliminating interferences compared to the conventional wavelets filters banks.

Keywords: Wavelets, Interference, GNSS, DWT, Genetic algorithms, SVM.

ملخص

الموجات هي أدوات فعالة لاستخراج الخصائص المميزة لإشارات GNSS. ومع ذلك ، فإن اختيار الموجة الأم المناسبة للإشارة التي يتم تحليلها يعد معيارًا مهمًا. يوفر هذا الاختيار إمكانية إجراء تحسينات للحصول على أفضل موجة مناسبة للإشكالية المطروحة. الهدف من عملنا ، هو اقتراح نهج جديد لتحديد وإزالة التداخل في مستقبلات GNSS باستخدام تحويل الموجات المنفصلة (DWT) ، بناءً على طريقة تطويرية (خوارزمية جينية) وعتبة آلية SVM. قمنا باستغلال التمثيل متعدد الأطوار لتحويل الموجات المنفصل (DWT) في هذه الدراسة. يسمح مثل هذا التمثيل بإنتاج مجموعة جديدة من الموجات اعتمادًا على المعاملات ذات الزوايا، من أجل إيجاد الحلول المناسبة استنادًا إلى الخوارزمية الجينية وتصنيف SVM. النتائج التي تم الحصول عليها بعد المحاكاة مرضية من وجهة نظر تحسين أداء تحديد وإزالة التداخل مقارنة ببنوك مرشح الموجات التقليدية.

الكلمات المفتاحية: الموجات ، التداخل ، GNSS ، DWT ، الخوارزميات الجينية ، SVM.

Liste des tableaux

Tableau II. 1. Répartition de la longueur des filtres dans la famille des ondelettes.	38
Tableau IV. 1. Paramètres du signal E5al.	60
Tableau IV. 2. Nombre total des échantillons apprentissage, validation et test.	66
Tableau IV. 3. Les meilleurs résultats obtenus pour les différents types d'ondelettes ('Haar', 'db2', 'sym4', 'rbio4.4', et 'bior4.4').	72
Tableau IV. 4. Les meilleurs résultats obtenus pour les différents types d'ondelettes, et les différents ISR.	74
Tableau IV. 5. Paramètres de GA utilisés dans cette application.	79
Tableau IV. 6. Résultats obtenus en utilisant les algorithmes génétiques et SVM, $ISR=0dB$	80
Tableau IV. 7. Résultats obtenus en utilisant les algorithmes génétiques et SVM, ISR varie entre $10dB$ à $60dB$	80
Tableau IV. 8. Les meilleurs résultats obtenus en utilisant les algorithmes génétiques et l'SVM, et les différents ISR.	81

Liste des figures

Figure I. 1. Position par rapport à un satellite.	6
Figure I. 2. La position du récepteur à l'intersection des deux cercles.	7
Figure I. 3. Position exacte du récepteur avec quatre satellites.	7
Figure I. 4. Principe pour calculer la distance entre le satellite et le récepteur.	8
Figure I. 5. Principe de la trilatération.	9
Figure I. 6. Détermination du temps de transmission d'un signal.	10
Figure I. 7. Structure du signal d'un satellite GPS. Deux fréquences porteuses L1 et L2 modulées sur des codes C/A, des codes P et des codes de navigation.	12
Figure I. 8. Schéma bloc d'un récepteur générique GPS.	15
Figure I. 9. Acquisition d'un satellite visible (la fonction d'ambiguïté).	16
Figure I. 10. Principe de l'acquisition par la recherche en série.	17
Figure I. 11. Principe de l'acquisition par la recherche parallèle.	17
Figure I. 12. Schéma fonctionnel d'une boucle de poursuite du code et de la porteuse.	18
Figure I. 13. Evolution de la corrélation en fonction des codes Avance, En phase et Retard.	19
Figure II. 1. Différence entre une onde sinusoïdale et une ondelette.	27
Figure II. 2. La transformée en ondelettes.	28
Figure II. 3. Décomposition en multi niveau.	30
Figure II. 4. Un banc de filtre d'un seul étage, pour l'analyse et synthèse (reconstruction) des signaux.	31
Figure II. 5. Fonction d'ondelette et fonction d'échelle de Haar.	32
Figure II. 6. Filtre passe-bas et filtre passe-haut pour la phase d'analyse et de synthèse.	33
Figure II. 7. Filtre passe-bas et filtre passe-haut pour la phase d'analyse et de synthèse.	34
Figure II. 8. Fonction d'ondelette et fonction d'échelle de Daubechies 2 (db2).	34
Figure II. 9. Fonction d'ondelette et fonction d'échelle de Symlet4.	35
Figure II. 10. Filtre passe-bas et filtre passe-haut pour la phase d'analyse et de synthèse (type d'ondelette est Symlet4).	35
Figure II. 11 Fonction d'ondelette et fonction d'échelle de rbio4.4.	36

Figure II. 12	Filtre passe-bas et filtre passe-haut pour le type d'ondelette rbio4.4.....	37
Figure II. 13	Fonction d'ondelette et fonction d'échelle de bior4.4.	37
Figure II. 14	Filtre passe-bas et filtre passe-haut pour le type d'ondelette bior4.4.....	37
Figure II. 15.	Exemple d'un signal GNSS avec interférence.	39
Figure II. 16.	Décomposition du signal GNSS en ondelette Haar en un niveau, (a) Approximation, (b) détail.	40
Figure II. 17.	Décomposition du signal GNSS en ondelette de Haar en deux niveaux de décomposition, (a) Approximation A_2 , et détails : (b) D_1 , (c) D_2	40
Figure II. 18.	Décomposition d'un signal GNSS en ondelette db2, avec $D=1$	41
Figure II. 19.	Décomposition d'un signal GNSS en ondelette sym4, avec $D=1$	41
Figure II. 20.	Décomposition d'un signal GNSS en ondelette rbio4.4, avec $D=1$	41
Figure II. 21.	Décomposition d'un signal GNSS en ondelette bior4.4, avec $D=1$	42
Figure III. 1.	Squelette d'un algorithme génétique.	47
Figure III. 2.	Structure d'un algorithme génétique canonique.	47
Figure III. 3.	Les cinq niveaux d'organisation d'une population d'un AG.	48
Figure III. 4.	Principe général de l'évolution d'une population d'un algorithme génétique....	49
Figure III. 5.	Croisement par découpage sur une chaîne binaire.	51
Figure III. 6.	Opérateur de mutation.	52
Figure IV. 1.	La densité spectrale de puissance (PSD) de la bande E5.....	61
Figure IV. 2.	Amplitude du signal E5aI dans le domaine temporel sans interférence.	61
Figure IV. 3.	Amplitude du signal E5aI dans le domaine temporel contaminé par une interférence DMA, ISR varie entre 10dB à 60dB.....	62
Figure IV. 4.	Amplitude du signal E5aI dans le domaine fréquentiel sans interférence.....	63
Figure IV. 5.	Amplitude du signal E5aI dans le domaine fréquentiel contaminé par une interférence DMA, ISR varie entre 10dB à 60dB.....	64
Figure IV. 6.	Transformer l'espace de départ vers un espace de dimension plus élevé.....	66
Figure IV. 7.	Schéma bloc de la suppression numérique de l'interférence pulsée.....	69
Figure IV. 8.	Résultats d'identification et suppression dans le cas $ISR=0dB$, en terme de $RMSE$, pour les différents types ondelettes en fonction de nombre de décomposition D	71

Figure IV. 9. Résultats d'identification et suppression dans le cas $ISR=0dB$, en terme de R , pour les différents types ondelettes en fonction de nombre de décomposition D	71
Figure IV. 10. Résultats d'identification et suppression dans le cas $ISR=0dB$, en terme de $Acc(\%)$, pour les différents types ondelettes en fonction de nombre de décomposition D	72
Figure IV. 11. L'identification des interférences dans le domaine temporel, en utilisant la méthode DWT-SVM, ondelette : Sym4, le nombre de décomposition égal à 7.	73
Figure IV. 12. La suppression des interférences en utilisant la méthode DWT-SVM, ondelette : Sym4, $D=7$	73
Figure IV. 13. La suppression des interférences dans le domaine fréquentiel, en utilisant la méthode DWT-SVM, ondelette : Sym4, $D=7$	74
Figure IV. 14. Performance de la méthode DWT-SVM, en terme de $RMSE$	75
Figure IV. 15. Performance de la méthode DWT-SVM, en terme de R	76
Figure IV. 16. Performance de la méthode DWT-SVM, en terme de $Acc(\%)$	77
Figure IV. 17. Identification et suppression des interférences, en utilisant la méthode DWT-SVM, ondelette : db2, $D=7$, et $ISR=60dB$, (a) identification des interférences, (b) suppression des interférences, (c) DSP du signal traité.....	78
Figure IV. 18. Evolution de la fonction fitness en fonction de nombre de générations.....	82
Figure IV. 19. Filtre passe-bas et filtre passe-haut pour la phase d'analyse et de synthèse....	82
Figure IV. 20. Application de l'algorithme GA-DWT-SVM, (a) localisation des interférences, (b) suppression des interférences, (c) la densité de puissance du signal traité. .	83
Figure IV. 21. Les performances d'identification et de suppression de l'interférence en termes de $RMSE$, R , $Acc(\%)$, en fonction des différentes valeurs ISR	84
Figure IV. 1. La densité spectrale de puissance (PSD) de la bande E5.....	61
Figure IV. 2. Amplitude du signal E5aI dans le domaine temporel sans interférence.....	61
Figure IV. 3. Amplitude du signal E5aI dans le domaine temporel contaminé par une interférence DMA, ISR varie entre $10dB$ à $60dB$	62
Figure IV. 4. Amplitude du signal E5aI dans le domaine fréquentiel sans interférence.....	63
Figure IV. 5. Amplitude du signal E5aI dans le domaine fréquentiel contaminé par une interférence DMA, ISR varie entre $10dB$ à $60dB$	64
Figure IV. 6. Transformer l'espace de départ vers un espace de dimension plus élevé.....	66
Figure IV. 7. Schéma bloc de la suppression numérique de l'interférence pulsée.....	69

Figure IV. 8. Résultats d'identification et suppression dans le cas $ISR=0dB$, en terme de $RMSE$, pour les différents types ondelettes en fonction de nombre de décomposition D	71
Figure IV. 9. Résultats d'identification et suppression dans le cas $ISR=0dB$, en terme de R , pour les différents types ondelettes en fonction de nombre de décomposition D	71
Figure IV. 10. Résultats d'identification et suppression dans le cas $ISR=0dB$, en terme de $Acc(\%)$, pour les différents types ondelettes en fonction de nombre de décomposition D	72
Figure IV. 11. L'identification des interférences dans le domaine temporel, en utilisant la méthode DWT-SVM, ondelette : Sym4, le nombre de décomposition égal à 7.	73
Figure IV. 12. La suppression des interférences en utilisant la méthode DWT-SVM, ondelette : Sym4, $D=7$	73
Figure IV. 13. La suppression des interférences dans le domaine fréquentiel, en utilisant la méthode DWT-SVM, ondelette : Sym4, $D=7$	74
Figure IV. 14. Performance de la méthode DWT-SVM, en terme de $RMSE$	75
Figure IV. 15. Performance de la méthode DWT-SVM, en terme de R	76
Figure IV. 16. Performance de la méthode DWT-SVM, en terme de $Acc(\%)$	77
Figure IV. 17. Identification et suppression des interférences, en utilisant la méthode DWT-SVM, ondelette : db2, $D=7$, et $ISR=60dB$, (a) identification des interférences, (b) suppression des interférences, (c) DSP du signal traité.....	78
Figure IV. 18. Evolution de la fonction fitness en fonction de nombre de générations.....	82
Figure IV. 19. Filtre passe-bas et filtre passe-haut pour la phase d'analyse et de synthèse....	82
Figure IV. 20. Application de l'algorithme GA-DWT-SVM, (a) localisation des interférences, (b) suppression des interférences, (c) la densité de puissance du signal traité. .	83
Figure IV. 21. Les performances d'identification et de suppression de l'interférence en termes de $RMSE$, R , $Acc(\%)$, en fonction des différentes valeurs ISR	84

Liste des symboles

ADC	Analog to D igital C onverter
AG	Algorithms G énétiques
ADN	Acide D ésoxyribo N ucléique
A1	Approximation 1
ATC	Air T raffic C ontrol
ARNs	Aeronautical r adio n avigation s ervice
CWI	Continuous W ave I nterference
CWT	Continuous W avelet T ransform
C/A	Coarse / A cquisition
CvT	Curvelet T ransform
DWT	D iscret W avelet T ransform
DC	D uty C ycle
D1	D étail 1
DLL	D elay L ock L oop
DME	Interférence P ulsé
db	Ondelette de D aubechies
DVB-T	D igital V ideo B roadcasting– T errestrial
DVB-S	D igital V ideo B roadcasting – S atellite
DME	Equipement de M esure de D istance
DoD	D irect o ut w ard D ialing
DCT	D iscrete C osine T ransform
EGNOS	E uropean G eostationary N avigation O verlay S ervice
FFT	F ast F ourier T ransform
FLL	F requency L ock L oop
FM	M odulation d e F requence
GNSS	G lobal N avigation S atellite S ystem
GPS	G lobal P ositioning S ystem
GLONASS	G LObal'naya N Avigatsionnaya S putnikovaya S istema
IGS	I nternational G NSS S ervice

IGN	Institut Géographique National
ILS	Instrument Landing System
JTIDS	Joint Tac tical Information Distribution Système
MOE	Medium Orbit Earth
MIDS	Système de Distribution d'Informations Multifonction
MSS	Service Mobile par Satellite
MCWI	Interférence à Onde Continue Multiple
D	Niveau de Décomposition
NAVSTAR	Navigation Satellite Timing And Ranging
NBI	Narrow Band Interference
PW	Pulse Width
PRF	Pulse Repetition Frequency
PLL	Phase Lock Loop
PPS	Precise Positioning Service
PED	Personal Electronic Devices
RGP	Réseau GNSS Permanent
RFI	Radio France Internationale
RMSE	Root Mean Square Error
R	Corrélation
SPS	Service de Positionnement et de Synchronisation
SIS	Signal In Space
Sym	Ondelette de Symlet
SSR	Surveillance Secondaire Radar
SVM	Support Vector Machine
SATCOM	Communications par Satellite
SCWI	Interférence à onde continue unique
TACAN	TACTical Air Navigation
TF	Transformée de Fourier
WT	Wavelet Transform
UHF	Ultra High Frequency
UWB	Ultra-Wide Band
VHF	Very High Frequency

VHFCOM	Communication en VHF
WBI	Wide Band Interference

Table des matières

Introduction Générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I

Systèmes de navigation par satellite

I.1. Introduction	5
I.2. Principes fondamentaux du GNSS	5
I.2.1. La position.....	6
I.2.2. Mesure du temps	11
I.2.3. Mesure de la vitesse	11
I.3. Segment du système de navigation	11
I.3.1. Segment spatial	11
I.3.2. Segment contrôle.....	12
I.3.3. Segment utilisateur.....	13
I.4. Différents système mondial de navigation.....	13
I.4.1. Système de positionnement global GPS	13
I.4.2. Système de navigation Russe GLONASS.....	14
I.4.3. Système de navigation Galileo.....	14
I.5. Réception du signal GNSS.....	14
I.5.1. Architecture d'un récepteur GPS	14
I.5.2. Acquisition des signaux GNSS	15
I.5.3. Poursuite du signal GNSS.....	17
I.5.4. Calcul de la position d'utilisateur.....	18
I.6. Classification de la source interférente	19
I.6.1. Caractéristiques spectrales d'interférences	19
I.6.2. Les interférences pulsées.....	21
I.7. Sources d'interférences potentielles	21
I.7.1. Signaux hors bande	22
I.7.2. Signaux en bande	23
I.8. Conclusion.....	24

III.3.3.1. Opérateurs de sélection.....	50
III.3.3.2. Opérateurs de croisement	51
III.3.3.3. Opérateur de mutation	52
III.3.3.4. L'opérateur de remplacement.....	53
III.3.4. Critères de convergence.....	54
III.4. Paramètre de dimensionnement.....	55
III.5. Fonctionnement général des algorithmes génétiques	55
III.6. Avantages et inconvénients des algorithmes génétiques.....	56
III.7. Conclusion.....	57

Chapitre IV

Tests et résultats

IV. 1. Introduction	59
IV. 2. Description des bases de données	60
IV. 3. Méthode proposée	64
IV.3.1. Transformée en ondelettes discrètes (DWT)	64
IV.3.2. Classificateur de machines à vecteurs de support (SVM)	65
IV.3.3. Optimisation des coefficients d'ondelettes par les algorithmes génétiques.....	67
IV. 4. Résultats de la simulation.....	68
IV.4.1. DWT-SVM	71
IV.4.2. GA-DWT-SVM.....	79
IV. 5. Conclusion.....	85
Conclusion Générale	87
<i>Bibliographie.....</i>	90

Introduction générale

Introduction générale

Les systèmes de localisation par satellites, plus connus sous le terme GNSS (Global Navigation Satellite System ou Géolocalisation et Navigation par un Système de Satellites). Le besoin de ces systèmes augmente rapidement dans plusieurs domaines tels que: les systèmes de transport intelligents, le secteur militaire englobant le guidage et le ciblage précis des armes, les applications pour les smartphones, l'agriculture, les systèmes de télécommunications, le secteur industriel et autres [1].

Les solutions des systèmes GNSS, sont privilégiées pour les systèmes ayant besoin de se géolocaliser (trouvé le positionnement d'un utilisateur). Les acteurs principaux des GNSS comme le GPS (Global Positioning System), GLONASS (GLObal NAVigation Satellite System), GALILEO, BEIDOU sont extrêmement populaires de part leur accessibilité et leur ouverture [2].

Les récepteurs GNSS traitent les signaux émis par les satellites de la constellation pour déterminer la position, la vitesse et le temps. Les traitements du signal effectués par le récepteur doivent estimer, à la fois, la phase, la fréquence Doppler et le décalage des codes pseudo aléatoires des satellites visibles [3].

Les constellations opérationnelles nominales GPS, GALILEO, GLONASS, et BEIDOU, se composent de plusieurs dizaines de satellites évoluant entre 20000km et 30000km d'altitude suivant des orbites équitablement réparties pour couvrir tous les continents [4]. Grâce à cette couverture, l'utilisateur est en capacité de voir simultanément entre 5 et 35 satellites suivant sa position sur la terre. Chaque constellation est surveillée et pilotée des stations de contrôle qui mettent à jour les informations (potions, éphémérides et correction des d'horloges) de l'ensemble des satellites. Ceux-ci diffusent ensuite leurs paramètres vers la terre par ondes électromagnétiques porteuses de signaux codés.

Les signaux reçus sur terre étant de faible puissance (inférieure à celle du bruit thermique), les récepteurs GNSS sont très vulnérables face aux interférences, notamment sur les bandes de fréquences de réception. La notion d'interférents aux signaux GNSS est ainsi rapidement devenue une problématique majeure. Le récepteur GNSS doit recevoir les signaux GNSS avec un rapport entre puissance du signal utile sur le bruit plus les interférences, ce rapport est assez important.

Pour résoudre le problème des interférences, nombreuses méthodes de détection et de réduire les interférences au niveau de récepteur GNSS ont été proposées dans la littérature scientifique. On peut citer le travail de Z.A. Khezzar et al. [5], dans leur étude ils ont proposé

une méthode composé d'une série d'opérations : Premièrement, le signal reçu immergé dans un bruit gaussien blanc additif (AWGN), est multiplié, dans le domaine temporel, par une fenêtre Tukey. Ensuite, il est transformé dans le domaine DCT (Discrete Cosine Transform). Afin de détecter et de localiser les composantes fréquentielles de l'interférence, le signal transformé est partitionné en paquets non superposés. Le seuillage d'un paquet est obtenue grâce à l'utilisation du seuil universel de l'algorithme de DONOHO. La variance est estimée sur la base de la théorie de l'échantillonnage statistique. La dernière étape consiste en l'application de la DCT inverse pour obtenir une bonne estimation du bruit gaussien. Dans ce travail, la technique d'interférence est efficace pour plusieurs types d'interférences telles que les interférences à ondes continues et les interférences pulsées.

Pour une application donnée, le choix d'une transformée en particulier dépend de la qualité du signal dans le processus de traitement et de la complexité de calcul. Le but est de trouver une transformée qui donne une meilleur représentation du signal pour l'objectif de la séparation entre l'information utile et l'information bruité (interférence). Dans la littérature scientifique, il existe plusieurs types de transformée, telles que : la transformée basées sur la DCT [6], DWT (Discret Wavelet Transform) [7], CvT (Curvelet Transform) [8], etc.

L'objectif de ce travail est d'étudier des systèmes d'identification et de suppression des interférences dans les récepteurs GNSS, la technique de la transformée choisies dans notre mémoire est la transformée en ondelettes discrète (DWT). Nous avons considéré quatre familles d'ondelettes, ondelettes Daubechies, ondelettes Symlets, ondelettes biorthogonales et ondelettes biorthogonales réversibles.

Dans la littérature scientifique, on trouve plusieurs travaux où la DWT a suscité un intérêt croissant dans nombreuses applications de traitement et d'analyse du signal, mais la question qui mérite d'être posée: *Quelle est le type d'ondelette mère appropriée pour la détection et la suppression des interférences dans les récepteurs GNSS?*

Pour cela, nous avons proposée une méthode basée sur l'optimisation des coefficients d'ondelettes par les algorithmes génétiques, avec l'intermédiaire d'une méthode de seuillage automatique à base de classifieur SVM (Support Vector Machine). Notre méthode permet de générer un banc de filtres en ondelettes à partir d'un ensemble des paramètres angulaires, afin de détecté et supprimé les interférences.

L'organisation générale du mémoire est décrite ci-dessous:

Le chapitre I est consacré à la présentation des signaux GNSS en général avec les différentes systèmes de navigation par satellite.

Dans le chapitre II nous étudierons la transformation en ondelette avec ces types (continue et discrète), et nous présenterons quelques familles d'ondelettes utilisées dans notre travail.

Le chapitre III est consacré à une représentation des grands structures d'algorithmes génétiques ainsi leur mécanismes généraux de contrôle et les principaux types des opérateurs génétiques utilisés.

Le chapitre IV est consacré à la discussion des résultats obtenus. Nous présentons une nouvelle méthode d'identification et de suppression des interférences liés aux récepteurs GNSS basé sur deux méthodes : Application des coefficients d'ondelettes DWT classiques, et l'optimisation des coefficients d'ondelettes par les algorithmes génétiques.

La dernière partie de ce mémoire est consacrée à la conclusion générale et quelques perspectives.

Chapitre I

Systèmes de navigation par satellite

I.1. Introduction

La navigation par satellite est une technologie largement utilisée et indispensable dans notre vie quotidienne. Le nombre d'applications qui utilisent ce type de système augmente chaque jour à cause des larges domaines qui nécessitent ce service, que ce soit pour la navigation, le positionnement, la sécurité publique, la surveillance, les recherches géographiques, la cartographie et l'information météorologique et atmosphérique [9]. Les systèmes qui offrent ce service sont connus sous le nom de GNSS (Global Navigation Satellite System) systèmes globaux de navigation par satellite. Il s'agit de l'ensemble des systèmes qui utilisent une constellation de satellites pour offrir la possibilité à un nombre illimité de récepteurs, le calcul de la position exacte en trois dimensions: latitude, longitude et altitude, la précision peut atteindre quelques mètres dans n'importe quel point sur la terre et en temps continu. A l'aide des signaux émis par les satellites, situés dans des orbites distribuées d'une façon à fournir une couverture totale de la terre, le système de positionnement le plus connu et le plus utilisé actuellement dans le monde est le système américain GPS (Global Positioning System) d'autres systèmes sont développés comme le système Russe GLONASS et d'autres sont en cours de développement comme le système Européen Galileo et le système chinois Beidou [10, 11].

Dans ce chapitre en va voir les principes fondamentaux des signaux GNSS, différents système mondial de navigation, leurs application, la réception du ce signal. Ensuite, la représentation des problèmes majeurs des signaux GNSS tel que les interférences.

I.2. Principes fondamentaux du GNSS

Un système de positionnement GNSS est classiquement composé de trois segments [12, 13]:

- **Le segment spatial** constitué de l'ensemble des satellites (une vingtaine généralement pour une couverture globale) ;
- **Le segment de contrôle** permet de piloter le système au travers d'une détermination et d'une prédiction des paramètres d'orbites et d'horloges de chaque satellite. Ces paramètres sont transmis (toutes les 8 h environ pour la constellation GPS) à tous les satellites par un ensemble de stations au sol ;
- **Le segment utilisateur** correspond à l'ensemble des utilisateurs civils et militaires du système. On évoquera notamment les organisations nationales et internationales qui maintiennent leurs propres réseaux GNSS permanents constitués de stations au sol, comme l'IGS (International GNSS Service) ou le RGP (Réseau GNSS Permanent) mis en place et maintenu par l'IGN (Institut

Géographique National) en France. Ces organismes collectent et traitent les données des différentes constellations GNSS avant de les redistribuer aux utilisateurs.

I.2.1. La position

A l'aide de la distance entre le récepteur et plusieurs satellites, quatre au minimum, de positions connues, les systèmes de localisation par satellite GNSS peuvent calculer la position de l'utilisateur en utilisant la méthode de triangulation. En effet, connaissant la position du satellite ainsi que la pseudo-distance entre ce satellite et le récepteur, la position sera l'un des points de la sphère centrée par le satellite [14], comme représenté dans la Figure (I.1), et qui a un rayon égal à la distance entre le satellite et le récepteur.

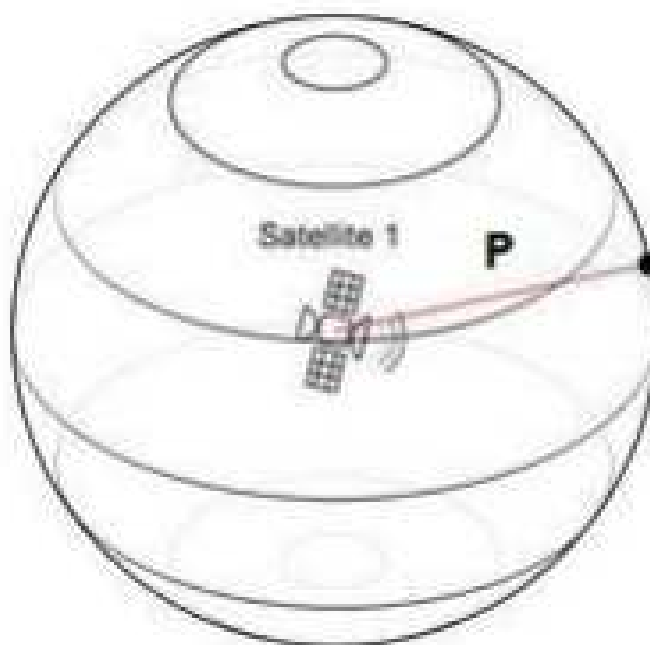


Figure I. 1. Position par rapport à un satellite.

Si un récepteur se déplace à travers un vaste plateau et veut savoir sa position, deux satellites, qui sont en orbite au-dessus de ce récepteur, transmettent leurs heures d'horloge et leurs positions. En utilisant le temps de voyage des signaux des deux satellites le récepteur peut dessiner deux cercles de rayons D_1 et D_2 autour des satellites. Chaque rayon correspond à la distance calculée entre le récepteur et le satellite. Toutes les positions possibles par rapport aux satellites sont situées sur ces milieux. Si la position au-dessus des satellites est exclue, la position du récepteur est au point exact où les deux cercles se coupent sous les satellites ; par conséquent deux satellites sont suffisants pour déterminer une position sur le plan x/y (voir la Figure I.2) [14, 15].

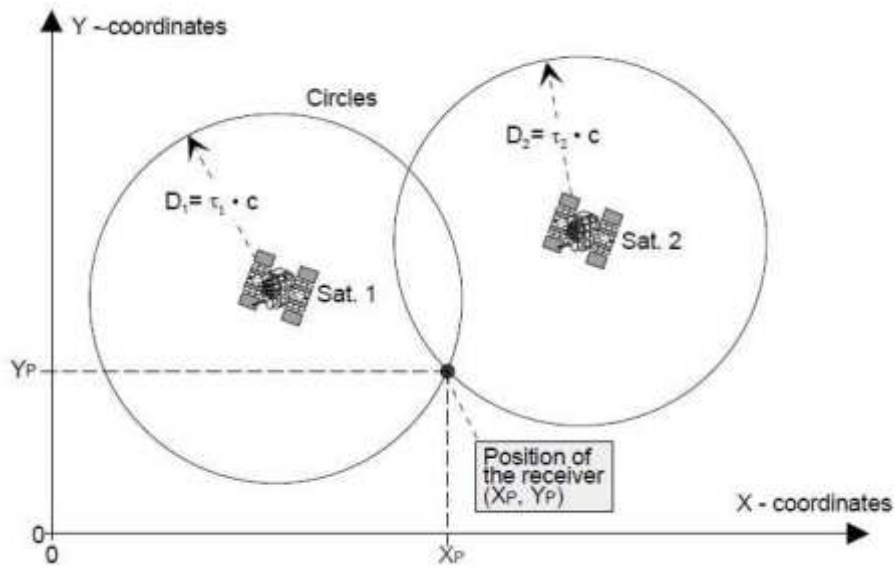


Figure I. 2. La position du récepteur à l'intersection des deux cercles.

La figure suivante représente un exemple du positionnement en 3D. Pour que les récepteurs puissent se localiser, il est faut un minimum de quatre satellites, et l'intersection entre les quatre sphères donne un point qui représente la position exacte du récepteur.

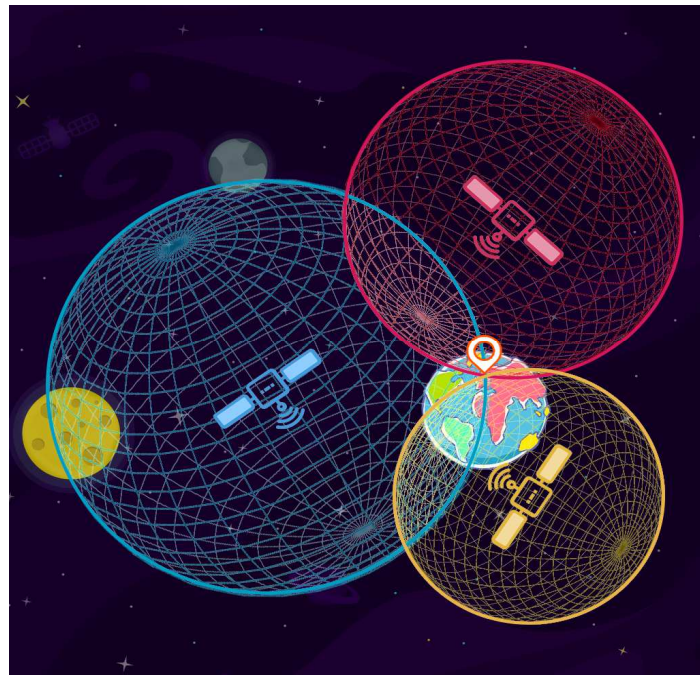


Figure I. 3. Position exacte du récepteur avec quatre satellites.

Toute la démonstration précédente repose sur l'hypothèse que le récepteur GNSS doit savoir deux paramètres importants pour pouvoir calculer sa position. Il doit connaître la position exacte des satellites et à quelle distance il se trouve par rapport à chacun deux.

Il est facile de simplifier les choses. Connaissant la vitesse de propagation des ondes qui est égale à la vitesse de la lumière 3×10^8 m/s et le temps de propagation de cette onde entre le satellite et le récepteur, il est possible de calculer la distance par une multiplication entre le temps et la vitesse. Le satellite transmet un signal au temps t_t et le récepteur reçoit ce signal au temps t_r , le récepteur doit analyser l'écart temporel entre ces deux temps pour estimer le temps de propagation du signal [16]. La distance entre eux sera exprimée par l'équation (I.1) dont le principe est schématisé par la Figure (I.4).

$$P = c \times (t_r - t_t) \quad (\text{I.1})$$

avec « c » est la vitesse de la lumière.

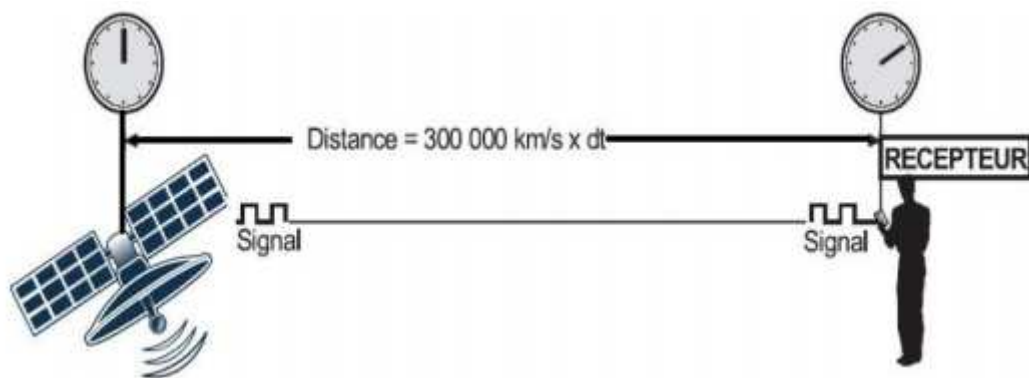


Figure I. 4. Principe pour calculer la distance entre le satellite et le récepteur.

a) Calcul du pseudo distance

La position de chaque satellite étant véhiculée par les messages de navigation et peut être décodée par le récepteur GPS. La distance entre l'antenne du récepteur et le satellite est calculée à partir du temps de vol du signal GPS. De cette manière et avec l'utilisation de trois satellites, le récepteur GPS peut déterminer sa position horizontale.

La trilatération est la méthode la plus basique et intuitive. Cette méthode calcule la position d'un nœud par l'intersection de trois cercles, comme le montre la Figure I.5. Cette méthode est basée sur la résolution d'un système de trois équations à trois inconnues par rapport à trois satellites de positions connues (équations I.2, I.3, I.4). Par exemple, si on considère que la position inconnue d'un récepteur en deux dimensions (2D) est (x, y) et que les coordonnées des trois satellites sont $(x_i, y_i, i = 1, 2, 3)$, nous obtenons le système de trois équations à résoudre ci-dessous :

$$R_1^2 = (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 \quad (\text{I.2})$$

$$R_2^2 = (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 \quad (\text{I.3})$$

$$R_3^2 = (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 \quad (\text{I.4})$$

ou R_i : La distance entre le nœud à localiser et le $i^{\text{ème}}$ satellites.

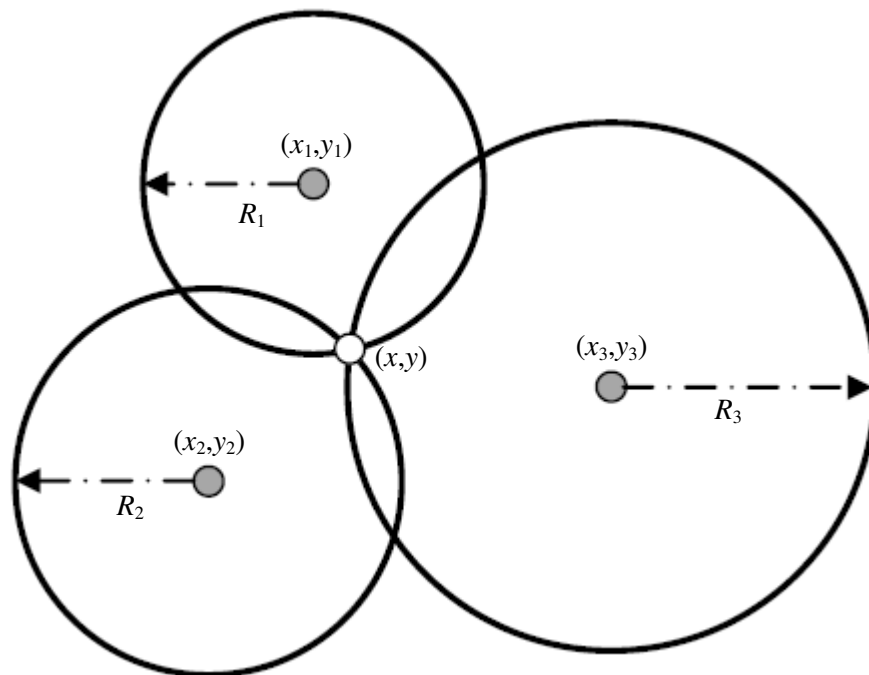


Figure I. 5. Principe de la trilatération.

En soustrayant l'équation (I.4) des deux premières équations, on obtient un système linéaire avec deux équations à deux inconnus (x, y) qui peut donner une seule solution [17]:

$$x(x_3 - x_1) + y(y_3 - y_1) = \frac{1}{2}(x_3^2 - x_1^2 + y_3^2 - y_1^2 + R_1^2 - R_3^2) \quad (\text{I.5})$$

$$x(x_3 - x_2) + y(y_3 - y_2) = \frac{1}{2}(x_3^2 - x_2^2 + y_3^2 - y_2^2 + R_2^2 - R_3^2) \quad (\text{I.6})$$

Dans ce système, les distances R_i sont calculées par le temps de vol ou la durée du trajet reliant le satellite au récepteur (T_i) [$R_i = c \cdot T_i$, $c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$] que met le signal GPS pour faire le trajet entre le récepteur et les satellites. Si le temps T_i est mesuré avec précision, la résolution de ce système suffit pour déterminer la position du récepteur. Cependant, en réalité, le temps de vol est entaché d'erreur de synchronisation entre l'horloge du récepteur et celle du satellite. Cette incertitude sur le temps est considérée comme une quatrième inconnue, d'où la nécessité d'une quatrième équation (donc d'un quatrième satellite) pour qu'un récepteur puisse déterminer sa position. C'est pour cette raison que le nombre minimal de 4 satellites, est fixé pour le positionnement 2D.

Si plus de quatre satellites sont observés, la précision et la fiabilité du positionnement seront plus élevées. La position fait référence à un système de coordonnées géocentriques. Les

coordonnées tridimensionnelles obtenues sont exprimées dans le système de coordonnées utilisé pour le calcul des positions des satellites. Il est à noter que ce système de coordonnées à des difficultés de localisation provient de la perturbation ou de l'interruption causée par les obstacles (bâtiments, rochers, tunnels, interférences électroniques, forêts, conditions météorologiques,...) [18].

b) Le temps de transmission d'un signal

Les systèmes de navigation par satellite utilisent des satellites en orbite au-dessus de la terre et répartis de telle façon que de n'importe quel point sur le terrain il y ait une ligne de contact à vue au moins de quatre satellites. Chacun de ces satellites est équipé d'horloges atomiques à bord. Les horloges atomiques sont les instruments les plus connus permettant une mesure précise du temps et engendrent une perte d'une seconde au maximum tous les 30.000 1.000.000 années. Afin de rendre ces mesures encore plus précises, les satellites GNSS transmettent leurs positions exactes et leurs heures d'horloges de bord à la terre. Ces signaux sont transmis à la vitesse de la lumière (300.000 km/s) et nécessitent donc environ 67.3ms pour parvenir à une position sur la surface de la terre directement sous le satellite. Les signaux nécessiteront une nouvelle tranche de $3.33\mu\text{s}$ pour chaque kilomètre supplémentaire de voyage pour établir la position ; tout ce qui est alors nécessaire sont un récepteur et une horloge précise. En comparant l'heure d'arrivée du signal satellite avec l'heure de l'horloge à bord au moment où le signal a été transmis, il est possible de déterminer, comme dans l'exemple de la voiture, la distance D vers le satellite qui peut être déterminée à partir du signal temporel connu $\Delta\tau$ ou $D=\Delta\tau\times c$ (Figure I.6).

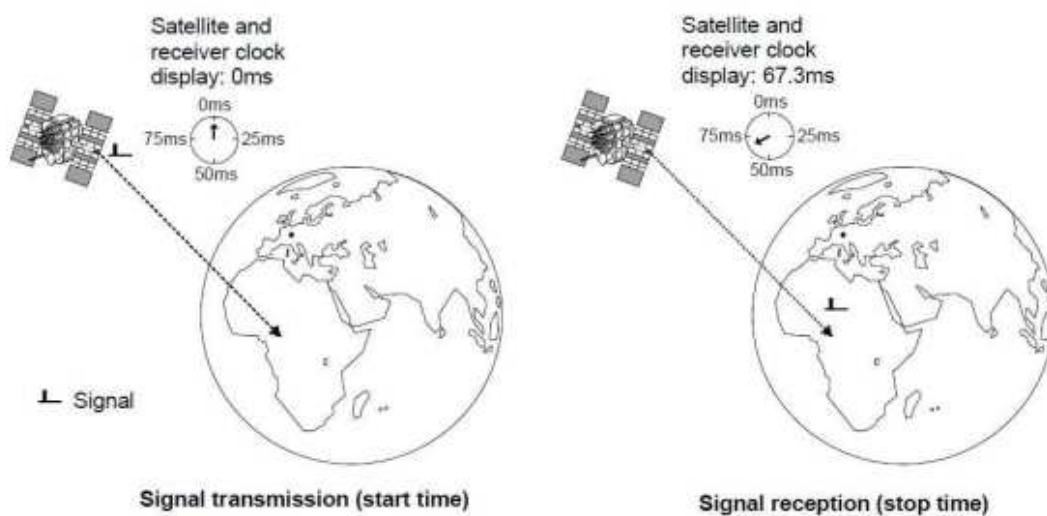


Figure I. 6. Détermination du temps de transmission d'un signal.

I.2.2. Mesure du temps

La mesure du temps repose sur la mise en place d'un système, appelé oscillateur, fournissant des oscillations avec une très grande régularité. C'est par la mesure du nombre des battements de ce système oscillant que l'on mesure l'écoulement du temps [13, 15]. La vitesse de rotation de la terre autour d'elle-même fournit une référence oscillante facilement accessible. C'est la raison pour laquelle elle a longtemps été utilisée comme standard de référence dans la mesure du temps. Ce mouvement de rotation de la terre autour d'elle-même n'est toutefois pas parfaitement régulier. Avec l'apparition de sources oscillantes beaucoup plus stables, comme les vibrations d'un cristal de quartz, il est apparu que la rotation terrestre ne pouvait plus être utilisée comme standard. L'utilisation des horloges à quartz a permis de faire un bond gigantesque en multipliant par 1000 la précision de la mesure du temps. Ces horloges permettent de mesurer l'écoulement du temps avec une précision inférieure à un millionième de seconde de décalage par jour [15].

I.2.3. Mesure de la vitesse

Le système GNSS offre la possibilité de déterminer la vitesse de l'utilisateur en trois dimensions. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour déterminer cette vitesse. Dans certains récepteurs, la vitesse est estimée en formant une dérivée approximative de la position de l'utilisateur :

$$\dot{u} = \frac{du}{dt} = \frac{u(t_2) - u(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (\text{I.7})$$

Dans de nombreux récepteurs GPS modernes, les mesures de vitesse sont faites par le traitement des mesures de la phase de la porteuse et permettent une estimation précise de la fréquence Doppler des signaux satellites reçus. Le décalage Doppler est produit par le mouvement du satellite par rapport à l'utilisateur, Le vecteur v de la vitesse de satellite est calculé par utilisation des informations éphémérides et un modèle orbital dans le système récepteur [3, 19].

I.3. Segment du système de navigation

Le GNSS, comme tous les systèmes basés sur des satellites, se compose de trois segments : le segment spatial (les satellites à proprement parlé), le segment contrôle (les stations au sol qui contrôlent le bon état de marche des satellites) et le segment utilisateur (l'opérateur qui cherche à se géo localiser avec son matériel). Nous allons ci-après détailler le système GPS.

I.3.1. Segment spatial

Il est constitué d'une constellation de satellites transmettant des signaux radios aux utilisateurs. L'Air Force gère la constellation de manière à assurer la disponibilité d'au moins

24 satellites 95 % du temps. Le premier satellite a été lancé en 1975 et le système n'est pleinement opérationnel que depuis 1995. A l'heure actuelle 32 satellites constituent la constellation appelée NAVSTAR plus quelques-uns de déclassés pouvant être réactivés si nécessaire. Les satellites naviguent dans l'Orbite terrestre moyenne (MOE) à une altitude d'environ 20 200 km et effectuent chaque jour 2 fois le tour de la terre. La configuration des trajectoires des satellites permet de capter les signaux d'au moins quatre satellites n'importe où à la surface du globe et à n'importe quel moment. Les satellites sont équipés d'une horloge atomique et émettent en permanence sur deux fréquences L1 (1 575,42 MHz) et L2 (1 227,60 MHz) modulées par des codes et par un message de navigation (éphémérides permettant le calcul de la position des satellites) (voir la Figure I.7). Parmi les codes « portés » par la fréquence L1 (on parle également de Porteuse L1) on retrouve le code C/A (Coarse Acquisition, acquisition brute en français) entièrement ouvert aux civils depuis l'année 2000 et le code P (Précis) réservé aux utilisateurs autorisés par le gouvernement américain. Les récepteurs (ou « géonavigateurs », un GPS pour désigner le récepteur est un abus de langage) commercialisés dans le domaine civil utilisent le code C/A. Quelques récepteurs pour des applications de haute précision, comme la géodésie, mettent en œuvre des techniques permettant d'utiliser le code P (malgré son cryptage).

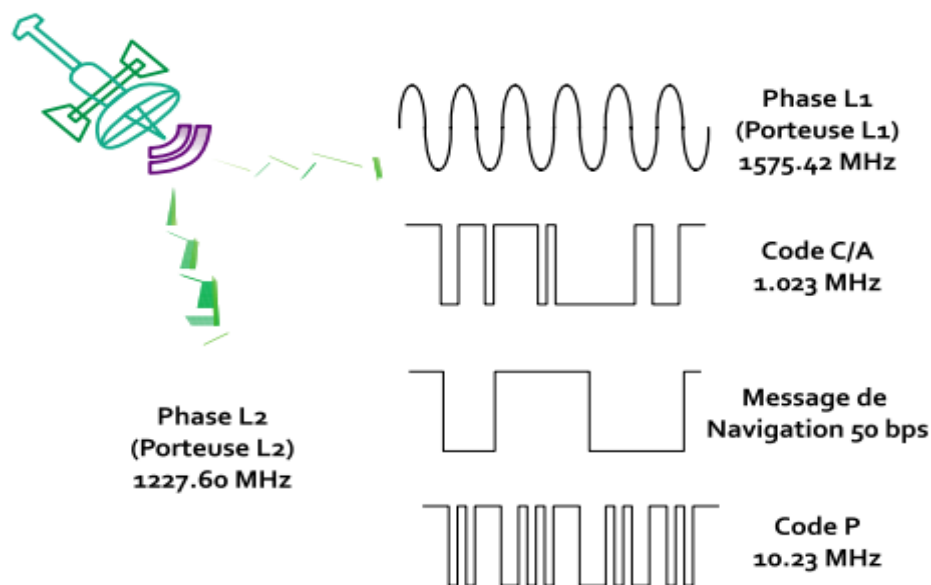


Figure I. 7. Structure du signal d'un satellite GPS. Deux fréquences porteuses L1 et L2 modulées sur des codes C/A, des codes P et des codes de navigation.

I.3.2. Segment contrôle

Il s'agit d'un réseau global de stations au sol qui suivent les satellites de la constellation GPS, vérifient leurs transmissions, réalisent des analyses et leur envoient des commandes et des

données (resynchronisation des horloges, rectification des orbites, ...). A l'heure actuelle le segment de contrôle comprend une station de contrôle principale, une alternative, 12 antennes de contrôle et de commande et 16 sites de suivi.

I.3.3. Segment utilisateur

C'est l'opérateur et son matériel de réception qui « écoute » les signaux et récupère les données de chaque satellite. Le récepteur calcule la géo localisation de son antenne. Le matériel sera plus ou moins sophistiqué selon la précision désirée et selon les contraintes du projet (mobilité de l'opérateur, fermeture du milieu, données à saisir sur le terrain...). L'utilisateur de son côté devra être sensibilisé aux bonnes pratiques du matériel et de la géo localisation : faire attention aux masques, aux surfaces réfléchissantes, prendre en compte la géométrie des satellites [20].

I.4. Différents système mondial de navigation

Techniques de positionnement par satellites 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. Les sous-sections suivantes vont décrire les systèmes de positionnement par satellites existants : GPS, GALILEO, EGNOS, MEOSAR et GLONASS.

I.4.1. Système de positionnement global GPS

Le système GPS assure deux types de services pour les utilisateurs avec des performances différentes, un service pour les applications civiles nommé SPS (Standard Positioning Service) et un autre service dédié aux applications militaires de l'armée Américain PPS (Precise Positioning Service).

a. Le service SPS : Le SPS est un service de positionnement et de synchronisation fourni par le système GPS à la fréquence L1 transmise par tous les satellites. Il utilise le code C/A, ce service est disponible pour un usage civil, commercial, scientifique et pacifique [21].

b. Le service PPS : Le PPS est un service de positionnement et de synchronisation fourni par le système GPS aux fréquences L1 et L2, transmises par tous les satellites, contient un code P, ce code sera normalement crypto graphiquement modifié par un code Y. Le code Y ne sera pas disponible pour les utilisateurs qui ne disposent pas des clés cryptographiques valides. Ce service est principalement destiné aux forces armées et agences gouvernementales américaines, qui est également rendu disponible à d'autres gouvernements [22].

I.4.2. Système de navigation Russe GLONASS

GLONASS «GLObalnaya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistema» est la version Russe du système GPS, c'est un système de radio navigation qui assure le positionnement et le temps aux utilisateurs, il est développé initialement pour l'armée soviétique et il est géré par le ministère de la défense Russe. Ce système peut être considéré comme la deuxième génération du système de localisation soviétique Tsikada qui a été lancés entre 1976 et 1995 et qui donne une précision de l'ordre de 100 mètres [23].

I.4.3. Système de navigation Galileo

À l'inverse du GPS américain et du GLONASS russe, le système GALILEO est développé pour un usage non militaire par l'union européenne pour une couverture globale grâce à 30 satellites (27 opérationnels et 3 en réserve). Ce système est très compétitif au GPS puisqu'il se base sur la même technologie que le GPS mais offre une bien meilleure précision qui va jusqu'à 1 mètre pour le service commercial qui peut être ramené au centimètre en utilisant les corrections des stations de base terrestres avec le système EGNOS déjà déployé [24].

Ce système est non seulement plus précis que les autres systèmes existants mais il est aussi très fiable. Il garanti la validité des données de localisation en intégrant un signal d'intégrité du message. Ce signal d'intégrité permet d'informer l'utilisateur d'une quelconque erreur dans les données reçues. Le système est toujours en phase de test mais l'infrastructure satellitaire est en cours de déploiement et les tests sont menés avec le système EGNOS, le prédécesseur de GALILEO [25, 26].

I.5. Réception du signal GNSS

La première caractéristique du signal GNSS parvenu au récepteur est sa faible puissance qui résulte de l'atténuation à la traversée de l'atmosphère de la terre.

I.5.1. Architecture d'un récepteur GPS

Les récepteurs GNSS sont de nature numérique. Leur architecture s'appuie sur un microprocesseur qui est associé à un ensemble de blocs pour la réalisation des différents traitements en temps réel.

La Figure (I.8) illustre les trois principales parties du récepteur, une première partie section RF composé d'une antenne, des circuits d'amplification, d'un synthétiseur de fréquence et d'un convertisseur analogique numérique (ADC). La deuxième section est constituée par l'étage d'acquisition des canaux des différents satellites. La dernière partie inclus le bloc de traitement de poursuite et de navigation. C'est ainsi qu'est constitué le schéma bloc d'un récepteur générique GPS.

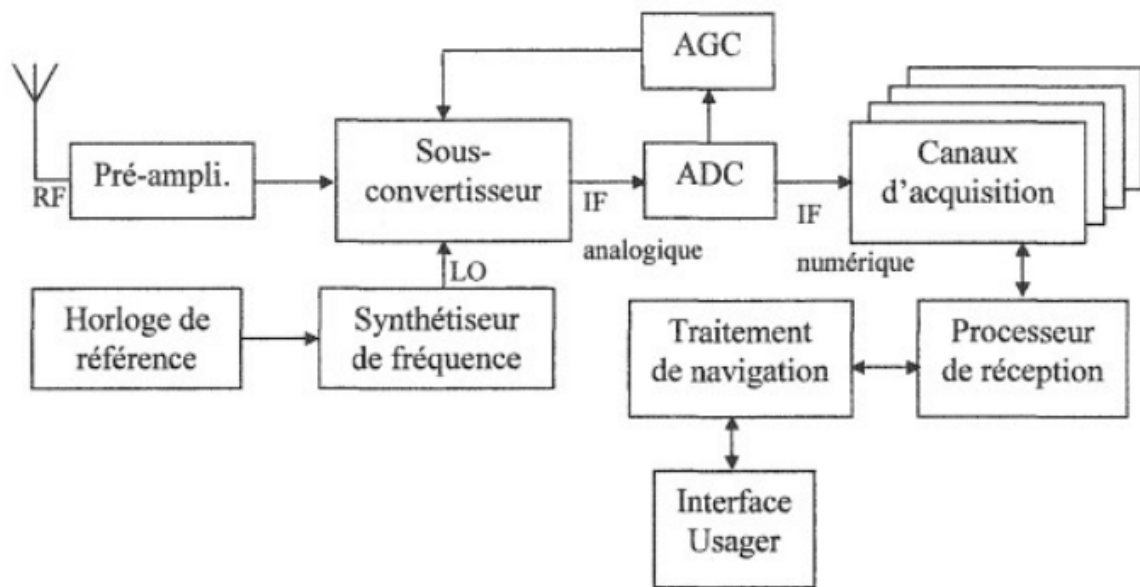


Figure I. 8. Schéma bloc d'un récepteur générique GPS.

Les signaux des différents satellites en visibilité étaient reçus tous ensemble par l'antenne du récepteur GNSS et il faut séparer chaque signal individuel, pour chacun d'eux, mesurer l'instant de réception grâce à la fonction de corrélation. Pour cela, les récepteurs sont dotés de plusieurs "canaux", à chacun desquels est attribué le traitement d'un satellite donné [27, 28].

I.5.2. Acquisition des signaux GNSS

L'acquisition utilise le principe de corrélation des signaux pour identifier les satellites visibles, estimer le retard des séquences de code et la fréquence de chaque signal reçu. Le récepteur calcule ainsi pour chaque satellite i la corrélation entre le signal reçu échantillonné et un signal réplique échantillonné sous la forme :

$$H_i(nT + d\tau) \times \sin(2\pi \hat{f}_s nt) \quad (\text{I.8})$$

Avec dr la valeur de décalage de la réplique du code H_i testée, constituée elle-même de n échantillons et $T=1ms$, la période d'échantillonnage.

En variant aussi la fréquence porteuse de la réplique \hat{f}_s autour de la fréquence d'envoi, on obtient la Figure 9 de corrélation sur les deux dimensions $\{\hat{f}_s, d\tau\}$:

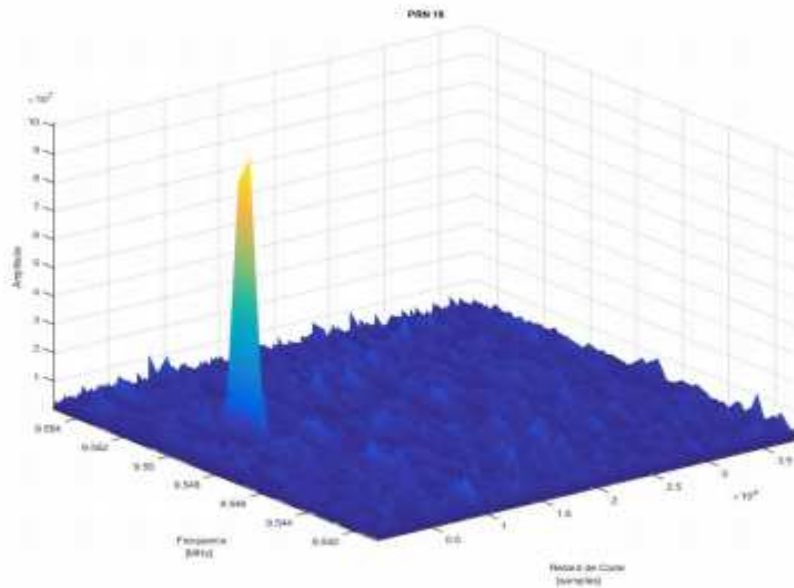


Figure I. 9. Acquisition d'un satellite visible (la fonction d'ambiguïté).

A l'aide de la corrélation, on effectue une recherche tridimensionnelle pour extraire l'ensemble des informations contenues dans le signal reçu, c'est -à-dire la visibilité de tel ou tel satellite, leur fréquence et le retard du code. Ce mode d'acquisition est appelé mode parallèle (la Figure I.10) donc Il existe trois modes d'acquisition que celui décrit précédemment [28, 29]:

- Mode d'acquisition parallèle ;
- Mode d'acquisition fréquentielle: cette méthode repose sur la FFT «Fast Fourier Transform». On calcule le spectre du signal pour chaque décalage de code local et on observe le spectre de la porteuse qui est pondéré par la valeur de la corrélation obtenue. Lorsque le code local est aligné avec le code reçu, la valeur de la corrélation est maximale et, dans le cas contraire, la valeur de corrélation est proche de zéro ;
- Mode d'acquisition série : dans ce mode (Figure I.11), les échantillons numérisés du signal reçu sont multipliés par des échantillons du code généré localement. Le signal résultant est multiplié par deux porteuses de même fréquence en phase et en quadrature. On génère donc deux signaux un sur la voie I (en phase) et l'autre sur la voie Q (en quadrature), qui sont intégrés sur une période du code T égale à 1 ms. Pour améliorer le rapport signal à bruit de la fonction de corrélation, on peut intégrer sur N périodes. Ce mode est une sorte de démodulation par deux porteuses en phase et en quadrature, ce qui permet de retrouver les composantes I et Q du signal. L'élévation au carré et la sommation des composantes I et Q fournit la valeur indépendante de la phase.

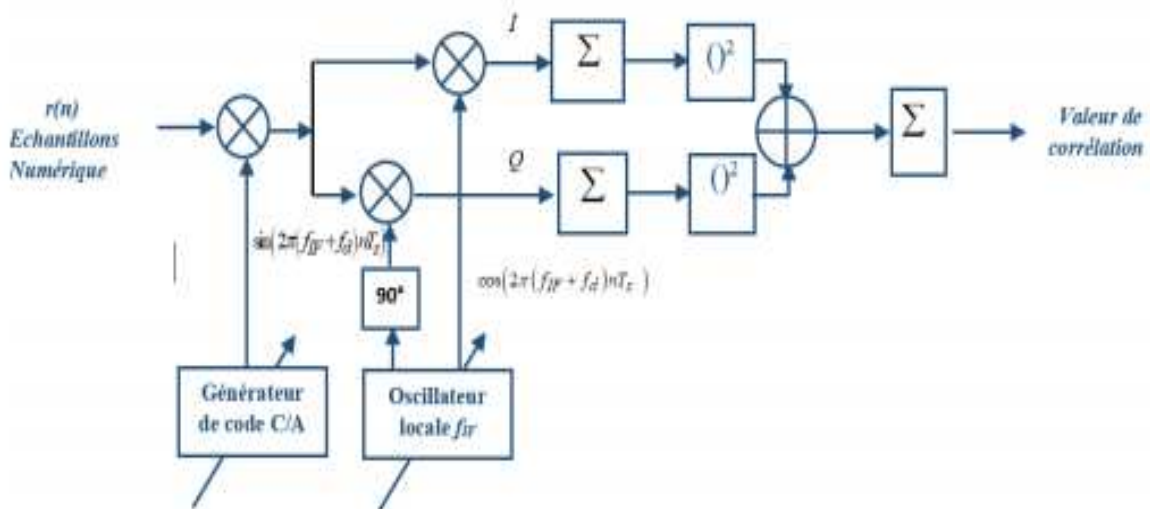


Figure I. 10. Principe de l'acquisition par la recherche en série.

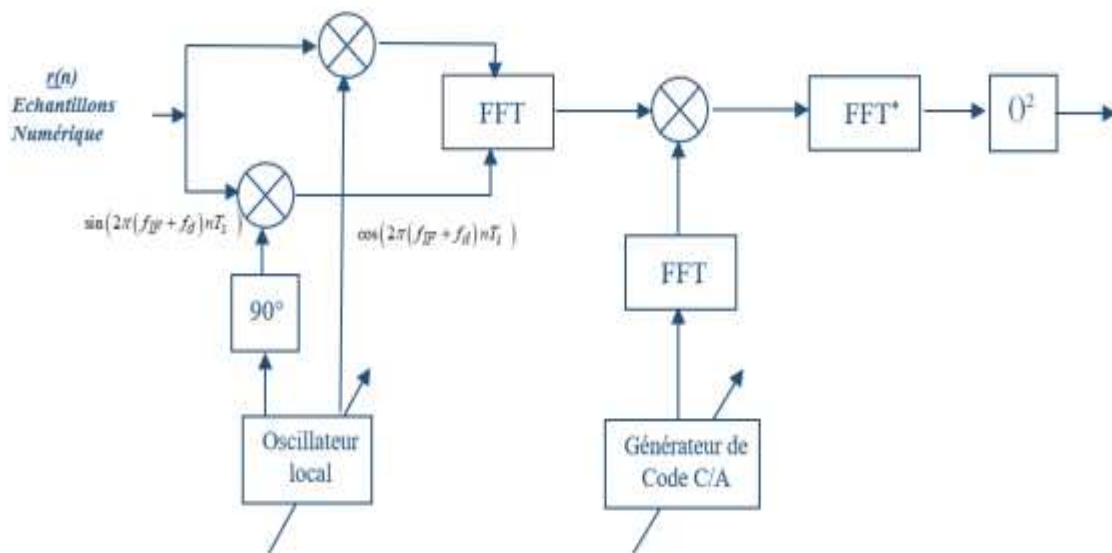


Figure I. 11. Principe de l'acquisition par la recherche parallèle.

Une fois le processus d'acquisition abouti, les estimations de la fréquence Doppler du signal reçu et du retard de code deviennent disponibles. Ces estimations sont utilisées comme des entrées dans la chaîne de poursuite décrite ci-après.

I.5.3. Poursuite du signal GNSS

L'objectif principal de la chaîne de poursuite de la Figure (I.12) est d'affiner les valeurs estimées lors de l'acquisition et de mettre à jour leurs valeurs suite au déplacement des satellites.

Il existe plusieurs méthodes pour suivre le signal GNSS au cours du temps. Les techniques utilisées se basent sur des systèmes bouclés qui vont estimer la phase ou la fréquence de la porteuse et le retard du code grâce à la comparaison du signal reçu avec une réplique. Il existe trois boucles d'asservissement :

- Boucle à verrouillage de fréquence FLL « Frequency Lock Loop » qui poursuit la fréquence de la porteuse autour de la fréquence estimée par la chaîne d'acquisition ;
- Boucle à verrouillage de phase PLL « Phase Lock Loop » ;
- Boucle à verrouillage de retard de code DLL « Delay Lock Loop » qui poursuit les décalages du code.

Cette étape de traitement effectue aussi le suivi de la variation de ces paramètres au cours du temps, La sortie de la boucle de poursuite de la porteuse sera utilisée lors de la démodulation de la boucle de poursuite du code. Ce processus utilise aussi le principe de la corrélation, mais uniquement dans le voisinage de l'estimation du bloc d'acquisition.

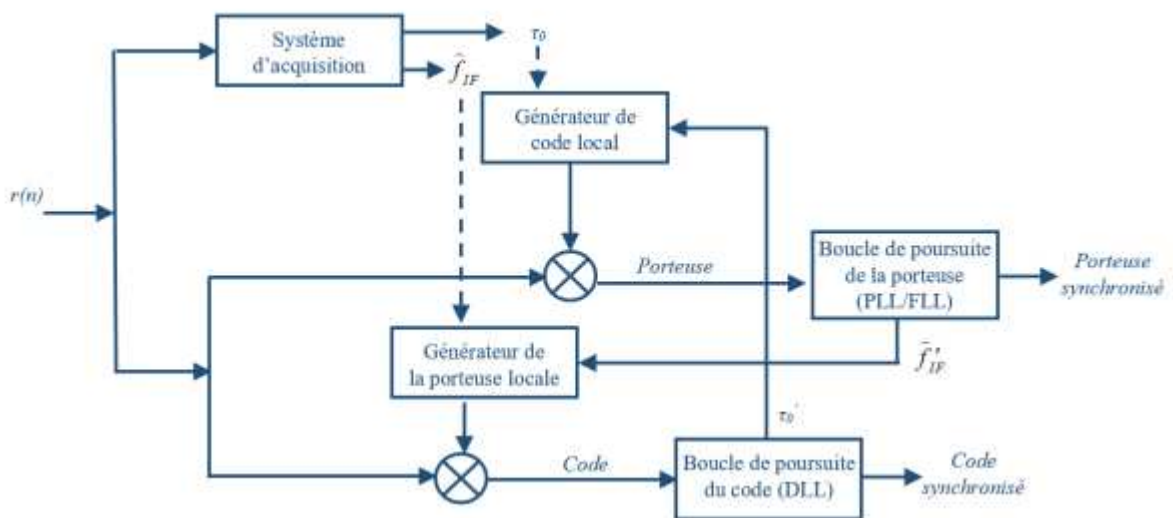


Figure I. 12. Schéma fonctionnel d'une boucle de poursuite du code et de la porteuse.

I.5.4. Calcul de la position d'utilisateur

Pour pouvoir trouver la position, le récepteur va chercher à mesurer la distance qui le sépare des satellites dont il connaît les positions (grâce aux éphémérides contenues dans le message de navigation) à travers les différentes observations données par les algorithmes de poursuite [27, 28]:

La Figure (I.13) représente l'évolution de la corrélation, déduite des composantes I et Q, lorsque le code du signal reçu est en retard, synchronisé, ou bien en avance.

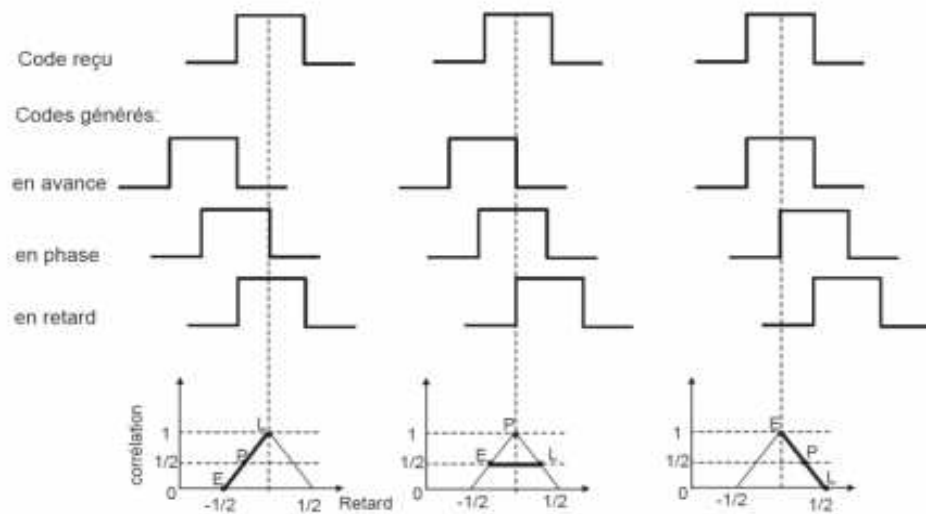


Figure I. 13. Evolution de la corrélation en fonction des codes Avance, En phase et Retard.

I.6. Classification de la source interférente

La classification des principales perturbations pour les récepteurs GNSS tient compte tenir compte des aspects hétérogènes. Les types d'émission peuvent être définis comme étant intentionnel (brouillage) ou non intentionnel. Les premiers sont courants pour les scénarios militaires même si le brouillage des applications civiles commence être commun en raison de la disponibilité des dispositifs de brouillage sur le marché.

De plus, un grand nombre de systèmes de communication présents dans notre vie quotidienne émet une puissance qui pourrait interférer avec la bande L GNSS, en raison d'émissions hors-bande par ces systèmes électroniques. Nous passons maintenant à une discussion sur la classification des brouilleuses sources, en fonction de leurs caractéristiques spectrales et temporelles.

I.6.1. Caractéristiques spectrales d'interférences

Une classification générale des signaux brouilleurs est basée sur leur spectre caractéristiques telles que la fréquence porteuse f_{int} et la bande passante B_{int} , avec respect à la porteuse de signal GNSS f_{GNSS} et à la largeur de bande occupée B_{GNSS}

- Le brouillage hors-bande fait référence aux signaux brouilleurs dont la porteuse
- la fréquence est située à proximité de la bande de fréquences GNSS ciblée
- ($f_{int} < f_{GNSS} - B_{GNSS} / 2$ ou $f_{int} > f_{GNSS} + B_{GNSS} / 2$).
- Les interférences dans la bande font référence aux signaux interférents avec la fréquence porteuse dans la bande de fréquences GNSS ($f_{GNSS} - B_{GNSS} / 2 < f_{int} < f_{GNSS} + B_{GNSS} / 2$).

De plus, les interférences peuvent être classées en fonction de leurs caractéristiques dans le domaine fréquentiel comme suit:

- Interférence à bande étroite (NBI): l'occupation spectrale est plus petite par rapport à la largeur de bande du signal GNSS ($B_{int} \ll B_{GNSS}$).
- Interférence large bande (WBI): l'occupation spectrale est comparable par rapport à la largeur de bande du signal GNSS ($B_{int} \approx B_{GNSS}$).
- Interférence à ondes continues (CWI): représente la limite ultime de NBI et apparaît comme une seule tonalité dans le domaine fréquentiel ($B_{int} \rightarrow 0$).

Les interférences citées ci-dessus peuvent être modélisées comme suit :

✚ **Interférence à onde continue unique (SCWI) :**

$$J_{SCWI}(t) = J \times \cos(2\pi(f_{IF} \pm \Delta f)t + \Phi) \quad (I.9)$$

où J est l'amplitude du signal d'interférence, f_{IF} est la fréquence de l'interférence reçue, Δf est la différence par rapport à la fréquence centrale du signal GNSS, et Φ est une phase initiale aléatoire uniformément distribuée dans l'intervalle $[-\pi, \pi]$.

✚ **Interférence à onde continue multiple (MCWI) :**

$$J_{MCWI}(t) = \sum_{i=1}^N J_i \times \cos(2\pi(f_{IF} \pm \Delta f_i)t + \Phi_i) \quad (I.10)$$

où: J_i , Δf_i et Φ_i sont respectivement l'amplitude, la différence de fréquence et la phase aléatoire de la $i^{\text{ème}}$ tonalité.

✚ **Interférence Pulsé (DME):**

$$J_{DME}(t) = \sqrt{P} \sum_{i=1}^M \left(e^{-\frac{\alpha(t-t_k)^2}{2}} - e^{-\frac{\alpha(t-\Delta t-t_k)^2}{2}} \right) \times \cos(2\pi(f_{IF} \pm \Delta f)t + \Phi) \quad (I.11)$$

où : P est la puissance du pic du DME/TACAN à l'antenne, t_k est l'ensemble des temps d'arrivée des paires d'impulsions, f_{IF} est la fréquence de l'interférence reçue, Φ est la phase de la porteuse du signal d'interférence.

De plus, en général, les interférences peuvent avoir des fréquences variables caractéristiques, par exemple, les signaux chirp caractérisés par une variation dans le temps de la fréquence instantanée, apparaissant ainsi comme WBI. Ce type de signal brouilleur est généralement généré par les brouilleurs. De tels dispositifs sont capables de transmettre des signaux de chirp de forte puissance balayant plusieurs mégahertz en quelques microsecondes, obscurcissant ainsi la bonne réception du signal de chaque canal GNSS. En raison de leur disponibilité sur

le Web, ce type du signal d'interférence intentionnelle gagne de plus en plus d'attention dans les applications civiles.

CWI pourrait avoir un impact grave sur un récepteur GNSS, que ce soit sur l'acquisition ou sur le processus de poursuite, car la puissance d'interférence est dispersée sur tout l'espace de recherche par la corrélation avec le code local, compromettant la précision d'acquisition et affectant les autres blocs fonctionnels. L'impact de CWI et NBI dépend fortement de la valeur de la fréquence centrale de l'interférence dans la bande de fréquences. Cela est dû à la nature presque périodique des signaux GNSS. En fait, Le spectre d'un signal GNSS a des composantes espacées à des multiples de l'inverse de la période de code (par exemple, 1 kHz pour le GPS Code C/A) avec une puissance différente allouée à chaque composant en fonction de la forme du spectre de code. L'impact de CWI est plus important dans les cas où le CWI correspond à de tels composants [30, 31].

I.6.2. Les interférences pulsées

Les signaux parasites pulsés sont caractérisés par un état marche-arrêt de courte durée (ordre des microsecondes), qui alternent dans le domaine temporel. Ce type de signal d'interférence est typique des scénarios aéronautiques, Les services aéronautiques de radionavigation (ATNS) diffusent des signaux pulsés puissants dans une bande passante partagée avec certains des systèmes de navigation par satellite.

Les paramètres utilisés pour décrire les interférences pulsées sont:

- Largeur d'impulsion (PW): durée d'une impulsion.
- Fréquence de répétition des impulsions (PRF): nombre d'impulsions par seconde.
- Cycle de service ($DC=PRF*PW$): le pourcentage de temps occupé par les impulsions.

Les interférences pulsées avec un courant continu faible ont un faible impact sur les performances du récepteur par rapport aux interférences continues avec la même puissance et le même centre la fréquence.

I.7. Sources d'interférences potentielles

L'interférence potentielle peut partager les fréquences GNSS (RFI dans la bande) ou être loin de la porteuse GNSS (RFI hors bande). Il n'y a presque pas d'intrabande émissions autorisées dans les largeurs de bande GNSS; cependant, les interférences viennent principalement des rayonnements non essentiels des systèmes hors bande, qui génèrent harmoniques qui entrent en collision avec les largeurs de bande GNSS.

I.7.1. Signaux hors bande

Dans les sections suivantes, quelques-unes des principales interférences potentielles hors bande les sources sont analysées.

❖ Chaînes TV analogiques

Les émissions TV sont de véritables sources d'interférences pour un récepteur GNSS. Ils peut se manifester par des interférences à large bande et à bande étroite: la voiture vidéo les rieurs sont considérés comme des signaux à bande moyenne / large, tandis que le son. Les rieurs sont considérés comme CWI. Dans le signal de diffusion TV, VHF et UHF des bandes sont utilisées. Les harmoniques de ces bandes générées par la télévision au sol les émetteurs peuvent générer des interférences potentiellement dangereuses pour le GNSS récepteurs

❖ Signaux DVB-T

La norme DVB a été définie (depuis 1993) dans le cadre d'une initiative impliquant plus de 300 membres européens et extra-européens. Le projet DVB etc. a harmonisé les stratégies d'introduction de la télévision numérique et des nouveaux services interactifs multimédias sur des réseaux de transmission. Il a également défini les spécifications techniques. Le projet a défini les spécifications du système pour la Standard Digital Vidéo Broad casting – Satellite (DVB-S), développé pour la diffusion directe diffusion de la multiprogrammation TV depuis les satellites et pour le numérique standard

❖ VHF COM

D'autres systèmes de communication VHF peuvent être considérés comme dangereux pour un GNSS récepteur. La bande VHF (118–137 MHz) contient 760 canaux espacés Par 25 kHz, et il est couramment utilisé par les communications du contrôle de la circulation aérienne (ATC). Les harmoniques sont considérées comme NBI avec une bande passante d'environ 25kHz. Les canaux VHF, centrés sur 121,150, 121,175 et 121,200 MHz, Ont la 13e harmonique dans la bande passante GPS, alors que les canaux centrés sur 131,200, 131,250 et 131,300 MHz sont dangereux pour leur 12e harmonique.

❖ Harmoniques FM

De plus, les petites bandes de fréquences à l'intérieur de la bande FM (87,5–108 MHz) ont des harmoniques qui tombent dans les bandes GNSS. Les canaux à 104,9 et 105,1 MHz Ont leurs 15 harmoniques près des largeurs de bande GPS et Galileo.

❖ Appareils électroniques personnels

Les appareils électroniques personnels (PED) à proximité d'un récepteur GNSS peuvent la perturbation de la réception du signal GNSS. Les PED comprennent les téléphones portables, les téléavertisseurs, radios bidirectionnelles, jouets télécommandés, ordinateurs portables et

bien d'autres. Un plus grand nombre On s'attend à ce que plusieurs PED incluent, à l'avenir, l'ultra-large bande (UWB) transmission qui permet le développement d'appareils personnels à haut débit.

❖ **SATCOM**

Les communications par satellite (SATCOM) fonctionnent dans les bandes de fréquences 1626–1660,5 MHz avec canaux espacés de 0,75 MHz et bande passante de 20 kHz. La transmission multi-porteuse dans un service SATCOM produit de l'intermodulation produits qui peuvent tomber dans la bande GNSS.

❖ **Harmoniques VOR et ILS**

La gamme omnidirectionnelle VHF (VOR) est un type de système de radionavigation Pour les avions qui fournissent des informations sur la position radiale par rapport à Station au sol. Le système d'atterrissage aux instruments (ILS) se compose de deux Émetteurs fournissant un guidage latéral et vertical aux avions pour l'approche atterrissage. Les émetteurs VOR / ILS sont généralement positionnés au début, à la fin, et les côtés des pistes d'aéroport. Ces systèmes d'atterrissage en approche fonctionnent en la bande 108–117,95 MHz comprenant 200 canaux espacés de 50kHz. En détail, le VOR utilise 12 canaux dans la bande 112,24–112,816 MHz tandis que le transpondeur de localisation IL n'utilise qu'une seule fréquence sur 40 canaux dans la bande 108,10 à 111,95 MHz. Leurs harmoniques, la 14e de VOR.

❖ **Service mobile par satellite (MSS)**

Le système du service mobile par satellite (MSS) peut générer deux inter-Menaces à un récepteur GNSS. Les stations terrestres mobiles du SMS utilisent le Bande 1610-1660,5 MHz, introduisant potentiellement une puissance large bande dans le Bande GNSS Interférence de téléphone portable En général, aucune conséquence directe des téléphones mobiles sur un récepteur GNSS ont été rapportés dans la littérature jusqu'à présent. Certaines informations sont disponibles pour équipement de navigation pour avions, où un récepteur GPS est couramment utilisé. une enquête sur les rayonnements non essentiels de six technologies de téléphonie sans filages est décrit, analysant les effets sur les systèmes de l'avion, parmi lesquels un GPS. Les tests sont effectués à partir d'une chambre semi-échoïque et de réverbération. Bers utilisant des technologies de téléphonie sans fil avec différentes fréquences de transmission ciels et différentes antennes de réception.

I.7.2. Signaux en bande

Certaines sources d'interférences diffusent des signaux dont la fréquence porteuse est attribuée dans les bandes GNSS, et donc ils génèrent des interférences dans la bande. Chapitre

Il a été discuté de la manière dont les interférences inter système et intra système doivent être prises en compte une source principale de perturbation dans la bande. Cependant, le niveau d'acceptabilité de l'interférence est définie pendant la phase de conception des systèmes et, jusqu'à présent, le niveau acceptable a été le résultat de négociations internationales, de discussions et accords (considérez, par exemple, l'accord d'interopérabilité GPS/Galileo). Dans cette section, l'accent est mis sur les systèmes terrestres non GNSS. Une courte description des systèmes émettant de la puissance les plus pertinents dans un ou plusieurs des bandes GNSS sont fournies dans les sous-sections suivantes. Systèmes de communication aéronautique militaire / civile.

Les systèmes de communications militaires peuvent être considérés comme des brouilleurs dans la bande raison de la bande de signal utilisée par les systèmes. Les bandes Galileo E5a et E5b, situés entre 1164 et 1214 MHz, occupent les fréquences déjà utilisées pour les Services de radionavigation nautique (ARNS) tels que la navigation aérienne tactique (TACAN), équipement de mesure de distance (DME) et surveillance secondaire radar (SSR), ainsi que par le DoD Joint Tactical Information Distribution System (JTIDS) et le système de distribution d'informations multifonction (MIDS) [32].

I.8. Conclusion

La nécessité d'obtenir une position de plus en plus précise dans un délai de temps court à n'importe quel point de la terre ou de l'espace, nous oblige à utiliser des systèmes de navigation très sophistiqués comme le système de radionavigation par satellite GPS. C'est pour cette raison que les systèmes de navigation par satellites sont en permanente évolution afin d'accroître l'intégrité, la précision, la disponibilité et la robustesse du service pour les applications civiles et militaires. Nous allons nous intéresser dans ce chapitre aux développements des performances d'acquisition des signaux de navigation et les différents types d'interférences. Dans ce travail, nous avons proposé une méthode pour la détection et la suppression des interférences, notre méthode est basée sur l'optimisation des coefficients d'ondelettes avec l'utilisation des méthodes heuristique. Les deux chapitres suivants sont consacrés à l'étude théorique des ondelettes et les algorithmes génétiques.

Chapitre II

Transformée en ondelettes

II.1. Introduction

Partout autour de nous il y a toujours des signaux qui requièrent d'être analysés. Les signaux tels que GNSS, les images médicales, les données financières, la musique, et beaucoup d'autres types de signaux doivent être traités efficacement, comprimés, nettoyés, reconstruits, décrits, simplifiés, modélisés, la détection des interférences. Les ondelettes ont apporté un souffle nouveau dans le domaine du traitement de signal depuis leur apparition.

L'analyse en ondelettes a été introduite au début des années 1980. L'idée originale sur laquelle sont basées les ondelettes est apparue vers les années 1940 grâce au physicien Denis Gabor [33]. Des avancées significatives ont notamment été faites par Meyer, Mallat, Daubechies, Ronald Coifman, et Victor Wickerhauser.

Pour présenter la transformée ondelettes, nous débutons ce chapitre par une définition d'ondelettes, un rappel des concepts de base reliés à la transformée en ondelettes (l'avantage de la transformée en ondelettes par rapport TF, ondelette mère, ondelette continue, ondelette discrète). Par la suite, les fonctions d'ondelettes, les fonctions d'échelles, les bancs de filtres, une description de l'implémentation de la transformée discrète en ondelettes pour des signaux unidimensionnel (signal) sont exposés. Ensuite, les paramètres à considérer lors de la conception d'une architecture à base de la DWT utilisée pour la détection ou la suppression des interférences des signaux GNSS (ordre et longueur du filtre). Finalement, l'application de la DWT sur les signaux GNSS.

II.2. Transformée en ondelettes

II.2.1. Avantage de la transformée en ondelettes par rapport à la transformée de Fourier

La théorie de Fourier repose sur le fait que les fonctions montrant un certain degré de régularité peuvent être représentées par une combinaison linéaire de sinus et cosinus. Les coefficients de cette combinaison linéaire donnent une information au niveau des fréquences présentes dans le signal c'est-à-dire en fonctions localisées dans l'espace de Fourier; contrairement à la transformée en ondelettes qui utilise des fonctions localisées à la fois dans l'espace réel et dans l'espace de Fourier.

II.2.2. Définition des ondelettes

Une ondelette est une forme d'onde qui à une valeur moyenne zéro et une durée limitée, comme la représente la Figure II.1. En regardant des images des ondelettes et des ondes sinusoïdales, on voit intuitivement que des signaux avec les changements pointus pourraient mieux être analysés avec une ondelette irrégulière qu'avec une sinusoïde douce.

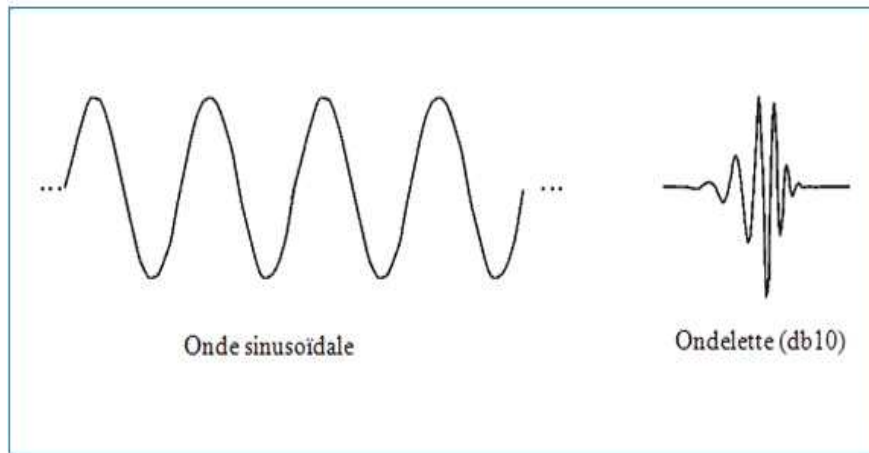


Figure II. 1. Différence entre une onde sinusoïdale et une ondelette.

La transformée en ondelettes est similaire à la transformée de Fourier, avec une fonction de mérite complètement différente. La différence principale est la suivante : la transformée de Fourier décompose le signal en sinus et en cosinus, c'est-à-dire en fonctions localisées dans l'espace de Fourier; contrairement à la transformée en ondelettes qui utilise des fonctions localisées à la fois dans l'espace réel et dans l'espace de Fourier. De manière générale, la transformée en ondelettes continues (CWT) peut être exprimée avec l'équation suivante :

$$F(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)\psi_{(a,b)}^*(x)dx \quad (\text{II.1})$$

Où le symbole * désigne le conjugué complexe et ψ est une fonction donnée. Cette fonction peut être choisie arbitrairement à condition qu'elle obéisse à certaines règles.

Comme on peut le voir, la transformée en ondelettes est en fait un ensemble infini de diverses transformées, dépendant de la fonction de mérite utilisée pour la calculer. C'est la raison pour laquelle nous pouvons entendre parler de la «transformée en ondelettes» dans des contextes et applications très divers. Il existe aussi de nombreuses manières de classer les types de transformées en ondelettes. Nous pouvons utiliser les ondelettes orthogonales pour le développement en ondelettes discrètes et les ondelettes non-orthogonales pour le développement en ondelettes continues.

La transformée en ondelettes est un outil mathématique (Figure II.2) qui décompose un signal en fréquences en conservant une localisation spatiale. Le signal de départ est projeté sur un ensemble de fonctions de base qui varient en fréquence et en espace. Ces fonctions de bases s'adaptent aux fréquences du signal à analyser. Cette transformation permet donc d'avoir une localisation en temps et en fréquence du signal analysé.

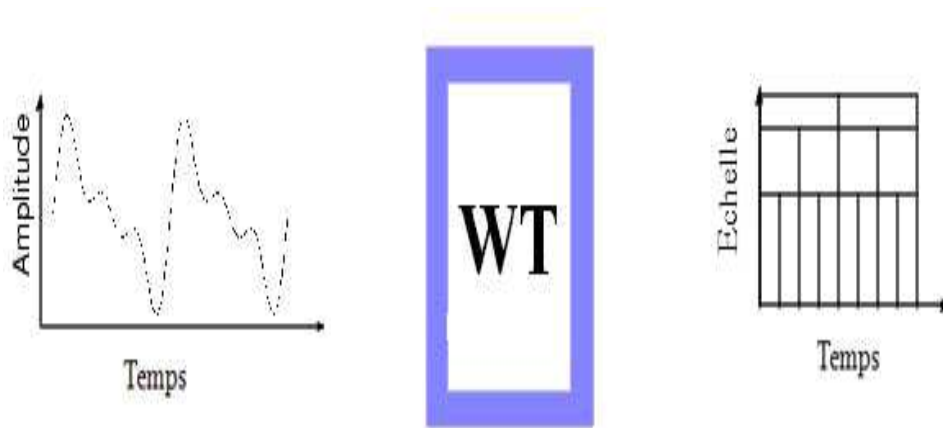


Figure II. 2. La transformée en ondelettes.

II.2.3. Ondelette mère

L'analyse en ondelettes adopte une fonction de prototype d'ondelettes connue sous le nom de "Ondelette mère". Cette Ondelette mère génère un ensemble de fonctions de base connues sous le nom "Ondelettes enfants" par des translations et dilatations récursives. La définition de l'ondelette mère est donnée par la formule suivante :

$$\psi(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (\text{II.2})$$

Où :

- a Facteur de dilatation «Echelle».
- b Facteur de translation.
- $\psi(a, b)$ Ondelette mère.
- $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ Ondelette enfants.
- $\frac{1}{\sqrt{a}}$ Facteur de normalisation de l'énergie afin que le signal transformé ait la même énergie à toutes les échelles.

La transformée en ondelettes continues (CWT) est réversible si l'ondelette mère vérifie la condition d'admissibilité suivante [34]:

$$\int_0^{+\infty} \frac{|\psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < +\infty \quad (\text{II.3})$$

Si ψ vérifie la condition ci-dessus, alors l'ondelette est dite admissible. On peut remarquer que la condition d'admissibilité impose nécessairement que l'ondelette soit de moyenne nulle [34]:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (\text{II.4})$$

C'est-à-dire que l'ondelette mère oscille de part et d'autre de l'axe t , ce qui lui donne dans une certaine mesure l'apparence d'une onde.

II.2.4. Transformée en ondelettes discrète

On peut adapter la transformée en ondelettes dans le cas où l'on se trouve dans un ensemble discret. La transformée en ondelette discrète (DWT) est essentiellement introduite pour réduire la redondance des coefficients obtenus lors de l'application d'une transformée en ondelette continue (CWT) [35].

La transformée en ondelettes continues (CWT) est obtenue en prenant le facteur d'échelle a et le pas de translation b dans l'ensemble des nombres réels. Ce type de transformation ne peut être effectué dans la pratique que de façon approximative, et il y a toujours, en fait, une discrétisation du calcul, qui est opérée [36].

La transformée en ondelettes discrète (DWT) est produite pour surmonter le problème de redondance de la CWT, Cette redondance mobilise une grande quantité de ressource de calcul. La transformée discrète en ondelettes (DWT), au contraire, fournit suffisamment d'information, tant pour l'analyse que pour la reconstruction du signal original. Ceci en un temps de calcul notablement réduit. Jean Morlet a formulé des bases construites par une discrétisation dyadique de ces paramètres sur le modèle suivant:

$$\begin{cases} a = 2^{-j} \\ b = k2^{-j} \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

avec $j=1,2,\dots,D$ et $k=1,2,\dots,2^{-j} - 1$.

L'ensemble des fonctions d'ondelettes analysantes seront donc :

$$\psi_{(a,b)}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) = \psi_{(j,k)}(t) = 2^{\frac{j}{2}} \psi(2^j t - k) \quad (\text{II.6})$$

La transformée en ondelettes discrètes (DWT) de la fonction $f(t)$ est donc en fonction de j et k , au lieu de a et b , respectivement, et entraîne un ensemble de coefficients d'ondelettes (détail) :

$$D_{(j,k)} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{(j,k)}(t) dt \quad (\text{II.7})$$

Comme les fonctions d'ondelettes, il y a encore un autre ensemble de fonctions appelées fonctions d'échelle $\phi_{j,k}(t)$ qui donnent par convolution avec $f(t)$, l'ensemble des coefficients d'approximation :

$$A_{(j,k)} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\phi_{(j,k)}(t)dt \quad (\text{II.8})$$

Il est à noter donc que la DWT d'un signal intervient deux fonctions :

- ❖ La fonction d'ondelette ψ , se comportant comme un filtre passe-haut correspondant aux détails.
- ❖ La fonction d'échelle ϕ , se comportant comme un filtre passe-bas correspondant aux parties plus lisses ou douces du signal (approximation).

Les fonctions d'ondelettes (détail) et d'échelles (approximation) établissent un algorithme de décomposition multi-résolutions. La fonction d'ondelette est orthogonale à la fonction d'échelle à un indice d'échelle particulière j . Ainsi, les informations contenues dans les coefficients d'approximation d'un indice d'échelle j ne sont pas répétées dans les coefficients d'ondelettes. Les fonctions d'approximation à un indice d'échelle donnée peuvent être reconstruites en utilisant la fonction d'approximation et les coefficients de détails.

II.2.4.1. Algorithme de Mallat

L'idée est de décomposer un signal S en sa moyenne $A1$ (approximation) et en ses détails $D1$ (détails). On répète ensuite l'opération en prenant pour signal $A1$, puis $A2$... On s'arrête quand on atteint la résolution souhaitée ou quand la décomposition n'est plus possible. Donc, le signal est décomposé en plusieurs composantes de basse résolution: ceci s'appelle l'arbre de décomposition d'ondelette (voir la Figure II.3).

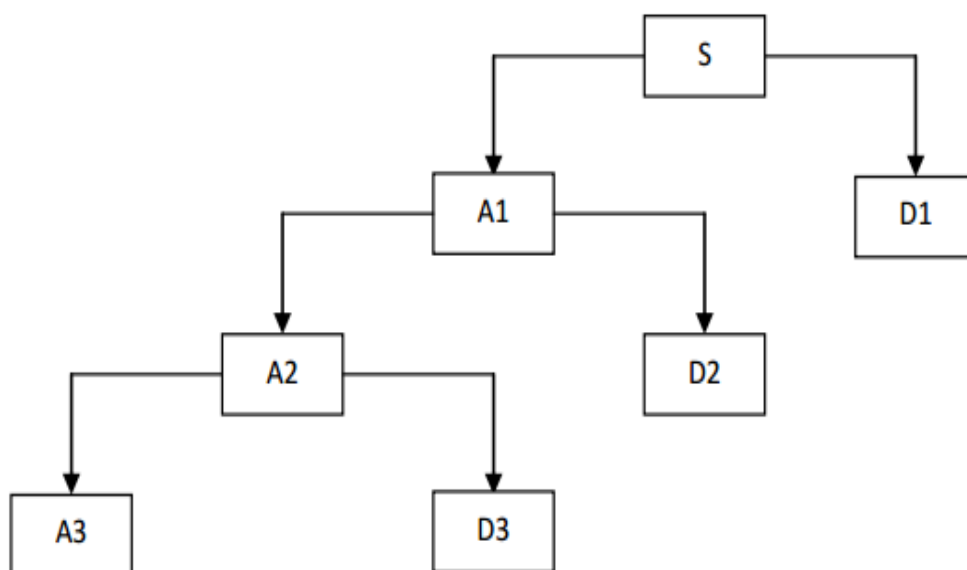


Figure II. 3. Décomposition en multi niveau.

La Figure II. 3 représente un exemple de décomposition d'un signal S à $D=3$ niveaux de décomposition. Pour la reconstruction du signal, on procède de manière inverse, on additionne les coefficients d'approximation et de détail de niveau j ($j=1,2,\dots,D$) puis on additionne les coefficients d'approximation de niveau $j-1$ et ainsi de suite.

La transformée en ondelettes discrètes (DWT) est devenue un outil très polyvalent de traitement de signal, après l'introduction de la représentation multi-résolutions des signaux basée sur la décomposition en ondelettes en 1987. Stéphane Mallat a mis en avant une certaine catégorie de décompositions en ondelettes (Figure II. 4), qui peuvent être réalisées numériquement en un temps très court, par «une transformée en ondelettes rapide», constitué d'une cascade de filtres passe-bas et passe-haut suivis par des opérations de sous échantillonnages par un facteur de deux. Cette approche réduit considérablement la complexité de la construction d'ondelette. Au lieu de choisir une fonction, on choisit l'ensemble discret des coefficients des deux filtres. La première étape est la phase d'analyse (transformation en ondelette), pour la reconstruction de signal, il faut donc une deuxième étape qui est la phase de synthèse.

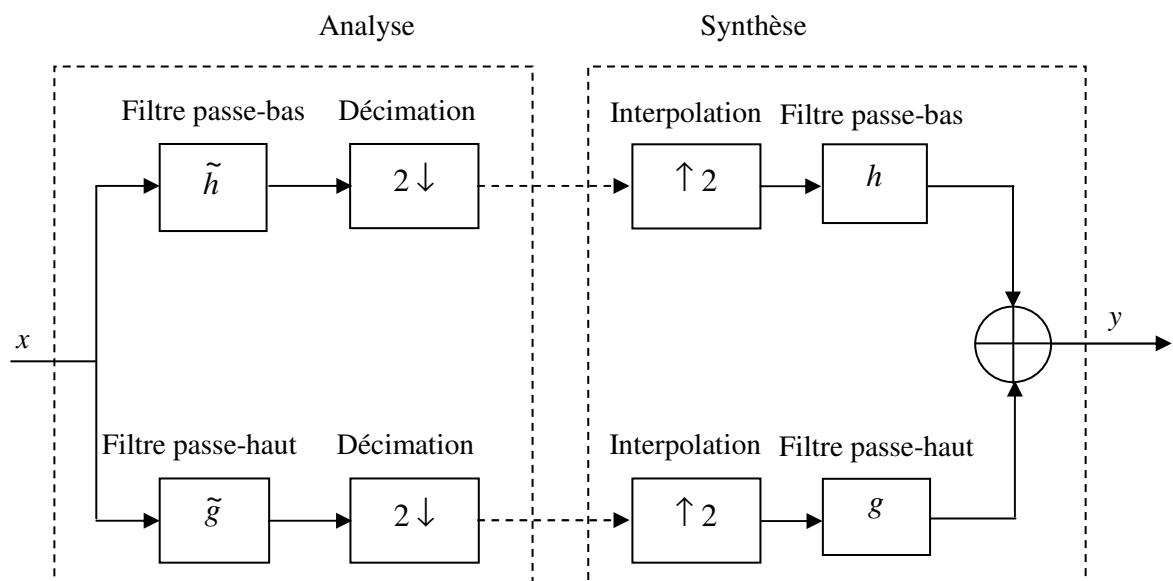


Figure II. 4. Un banc de filtre d'un seul étage, pour l'analyse et synthèse (reconstruction) des signaux.

II.3. Familles d'ondelette

Il existe de nombreuses formes d'ondelettes, le choix de l'ondelette optimale dépend de l'application envisagée. Les différentes familles d'ondelettes sont utilisées selon leurs propriétés en fonction du problème à résoudre [37].

Nous avons choisi de présenter quelques ondelettes qui nous semblent être les plus utilisées dans le traitement du signal : ondelette de Haar, ondelettes de Daubechies, ondelette de Symlet et ondelette biorthogonale.

II.3.1. Ondelette de Haar

Le mérite revient à Alfred Haar d'avoir construit en 1909 des bases considérées aujourd'hui comme le fondement de la théorie des ondelettes [38]. En effet, Haar a défini une fonction $\psi(x)$ telle que :

$$\psi(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } 0 < x < 1/2 \\ -1 & \text{si } 1/2 < x < 1 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

La fonction d'échelle associée est alors une fonction porte:

$$\phi(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } 0 < x < 1 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

Les deux fonctions sont représentées dans la Figure II.5. Les filtres utilisés dans la phase d'analyse et dans la phase de reconstruction sont illustrés dans la Figure II.6.

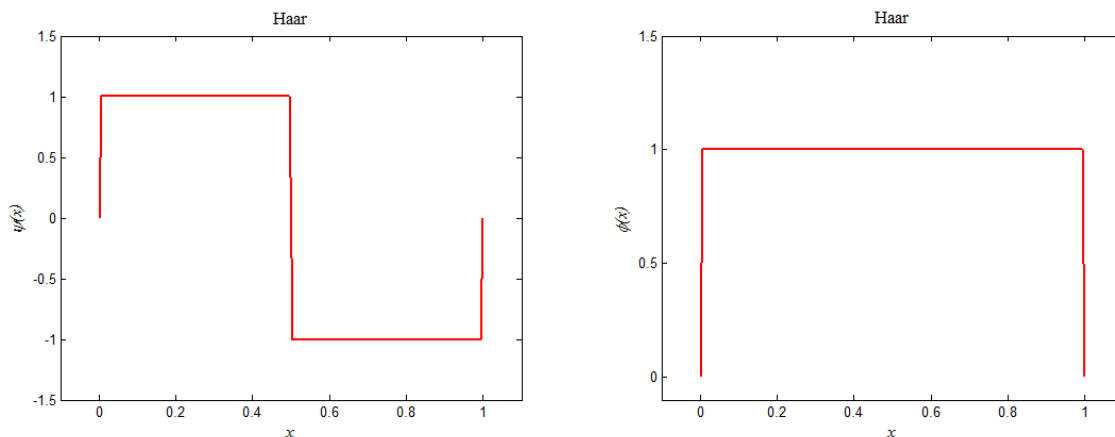
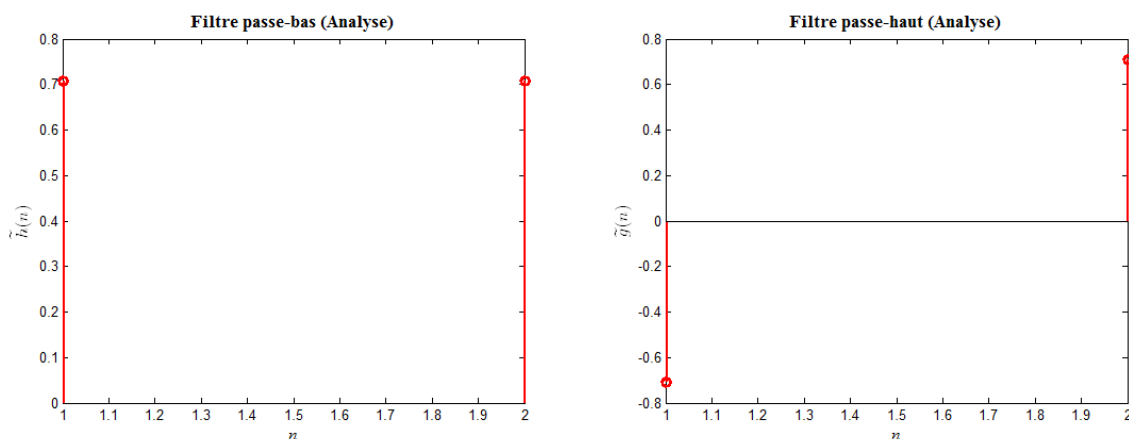


Figure II. 5. Fonction d'ondelette et fonction d'échelle de Haar.



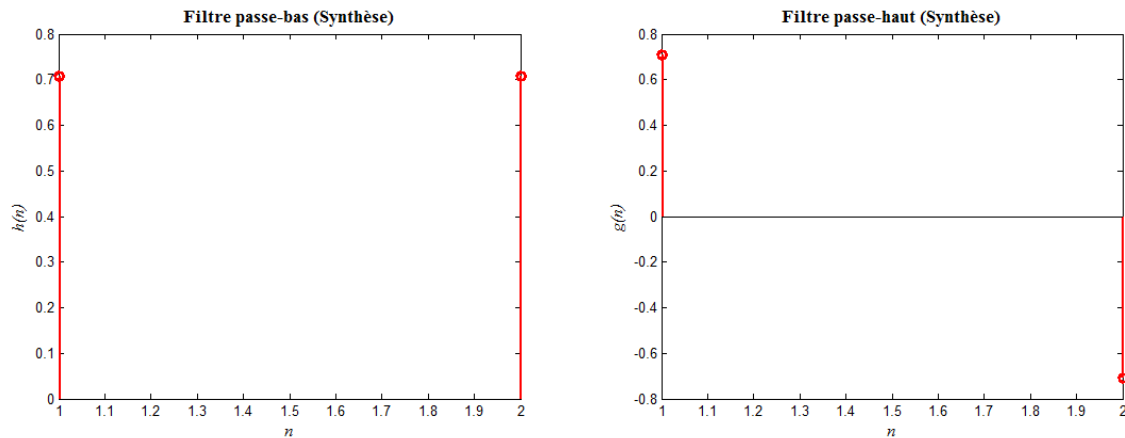


Figure II. 6. Filtre passe-bas et filtre passe-haut pour la phase d'analyse et de synthèse.

✚ Propriétés d'ondelette de Haar

C'est une ondelette orthonormale à support compact, symétrique. Elle permet d'obtenir une reconstruction exacte du signal. Elle est utilisée à la fois pour les transformées continue et discrète.

✚ Intérêt d'ondelette de Haar

Cette ondelette est très simple et facile à implémenter. De plus elle est à support compact. Le calcul de la transformée de Fourier est donc exact.

II.3.2. Ondelette de Daubechies

Nommées d'après leur créatrice Ingrid Daubechies, les ondelettes de Daubechies sont une famille d'ondelettes orthogonales définissant une transformée en ondelettes discrète (Figure II.7), caractérisées par un nombre maximal de moments dissipant pour un support donné. Pour chaque type d'ondelette de cette classe, il existe une fonction d'ondelette et une fonction d'échelle (appelée aussi ondelette mère) qui génère une analyse multi-résolution orthogonale (Figure II. 8).

✚ Propriétés

Quand l'ordre augmente, les supports grandissent ainsi que la régularité des ondelettes [39].

✚ Intérêt

La mathématicienne Ingrid Daubechis a cherché dans ses travaux à concilier deux contraintes respectives : l'orthogonalité de la base d'ondelettes et la compacité du support de l'ondelette-mère. Ce qui implique que toute ondelette de la base est à support compact et donc que le calcul de la transformée en ondelettes est exact. De plus, elle a imposé à ses ondelettes une troisième condition: avoir n moments nuls [40].

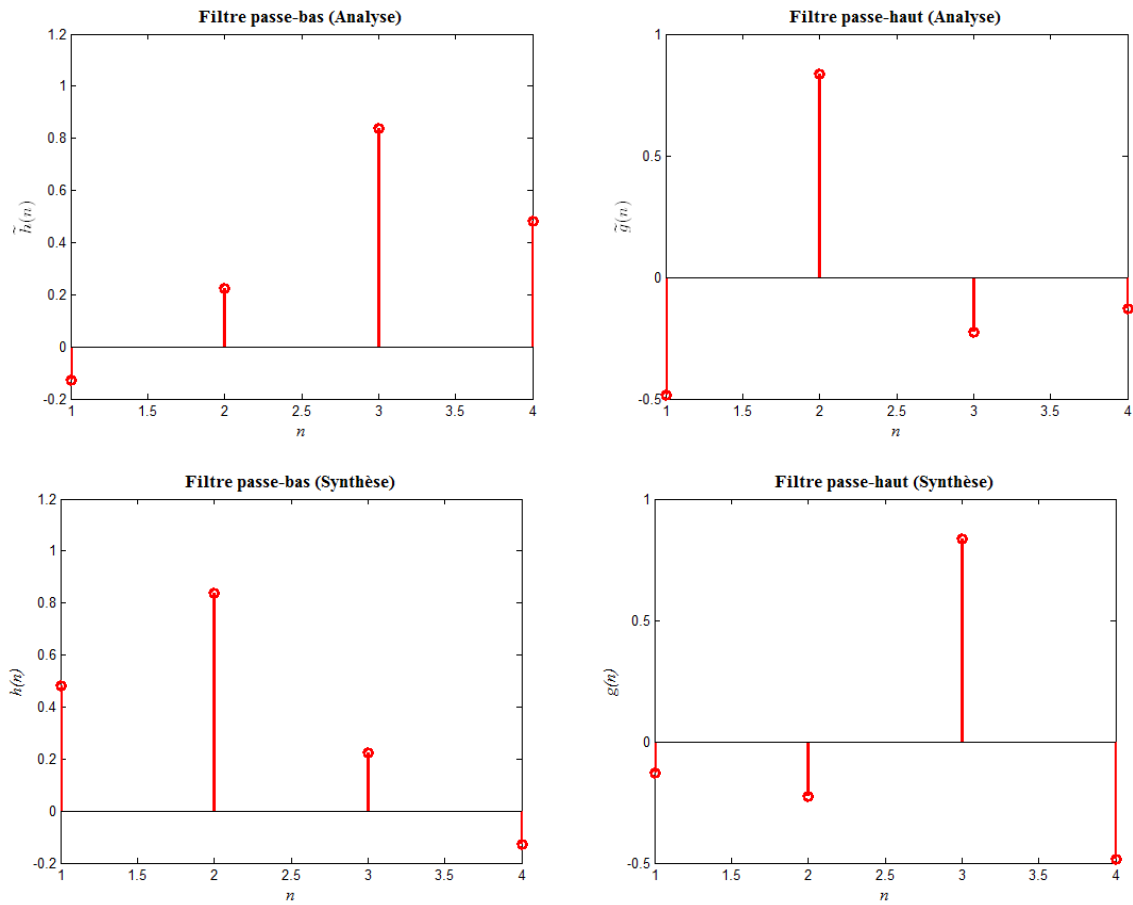


Figure II. 7. Filtre passe-bas et filtre passe-haut pour la phase d'analyse et de synthèse.

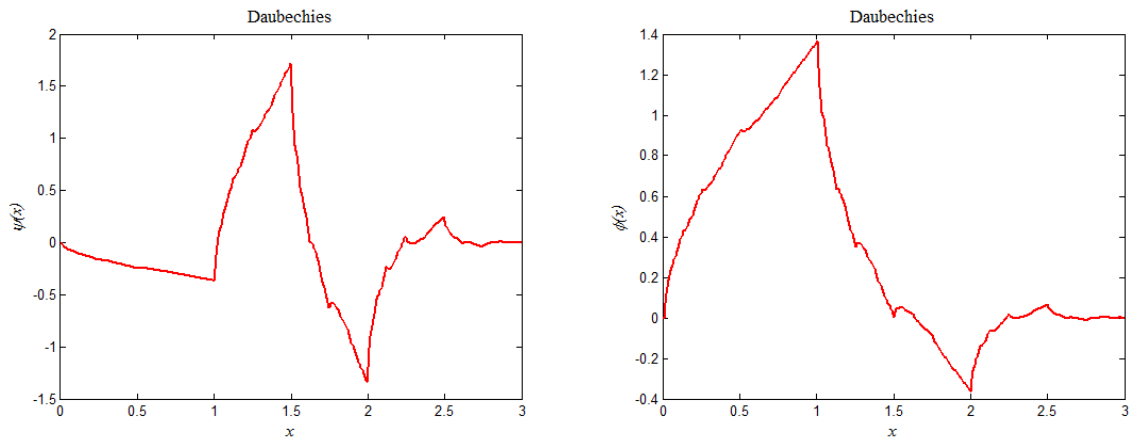


Figure II. 8. Fonction d'ondelette et fonction d'échelle de Daubechies 2 (db2).

II.3.3. Ondelette de Symlet

Les symlets ($\text{sym}N$) constituent une famille d'ondelettes presque symétrique, Daubechies en modifiant la construction des dbN . A part la symétrie, les autres propriétés des deux familles sont similaires. La Figure II.9 illustre les fonctions d'ondelette et d'échelle de Symlet4.

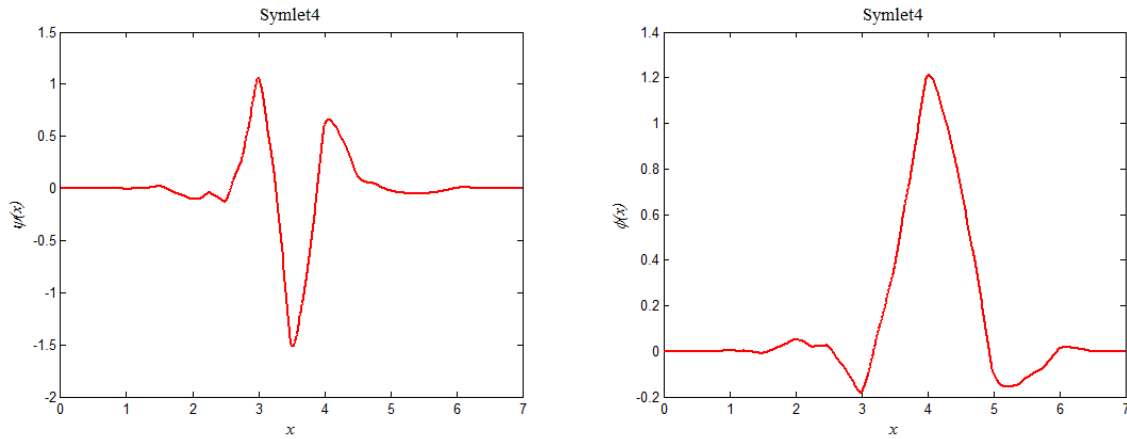


Figure II. 9. Fonction d'ondelette et fonction d'échelle de Symlet4.

Les coefficients des filtres passe-bas et passe-haut sont représentés dans la figure suivante :

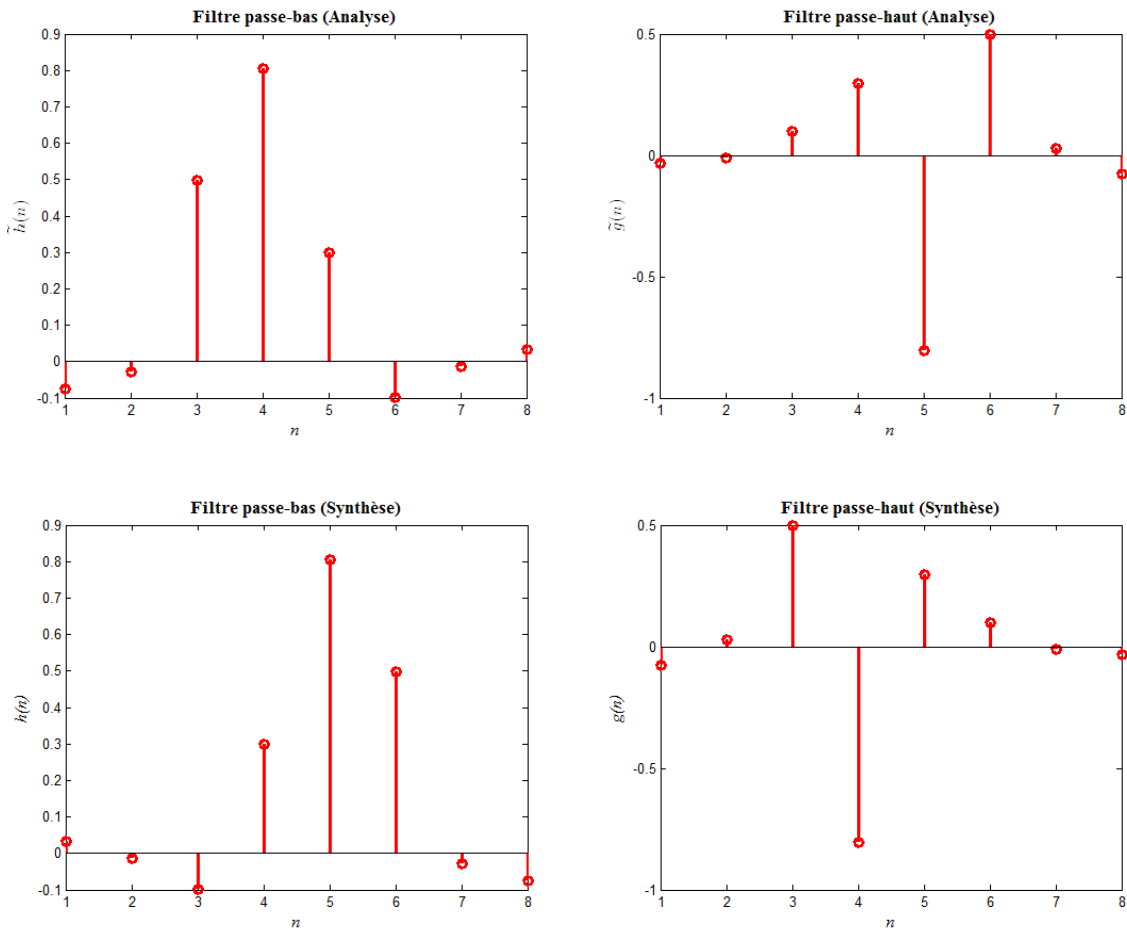


Figure II. 10. Filtre passe-bas et filtre passe-haut pour la phase d'analyse et de synthèse (type d'ondelette est Symlet4).

II.3.4. Ondelette biorthogonale

Ondelettes biorthogonales soulignons tout d'abord que les analyses multirésolutions orthogonales sont un cas particulier des analyses multirésolutions biorthogonales. Dans la pratique, les ondelettes orthogonales présentent un grand intérêt car elles facilitent l'inversion de la transformée, la famille d'ondelettes orthogonales et à support compact est la plus intéressante, les filtres étant à réponse impulsionnelle finie ce qui facilite leur implémentation (discrète), l'orthogonalité permet d'avoir une bonne "qualité" de reconstruction du signal, cependant les ondelettes orthogonales ne sont pas symétriques et introduisent des distorsions lors du changement de base, pour palier à ce problème, les ondelettes biorthogonales ont été proposées, de plus elles présentent une certaine "souplesse" par rapport aux ondelettes orthonormales, en effet, la base permettant l'analyse (décomposition) n'est pas la même pour la synthèse (reconstruction), d'où des conditions moins strictes pour la construction des ondelettes [41].

Nous nous sommes intéressés dans ce mémoire à deux types d'ondelettes biorthogonales (réversible rbio4.4 et non réversible bior4.4), représentées dans les Figures II. 11 à II. 14.

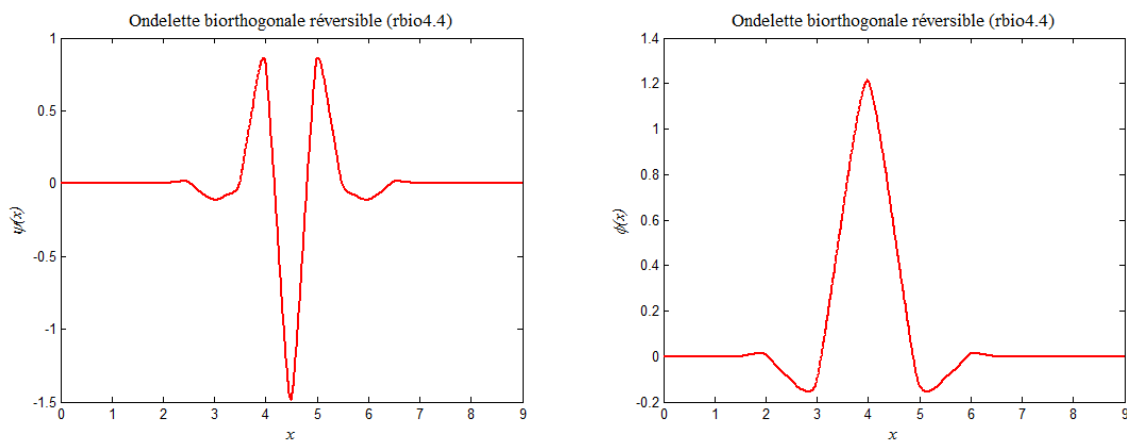
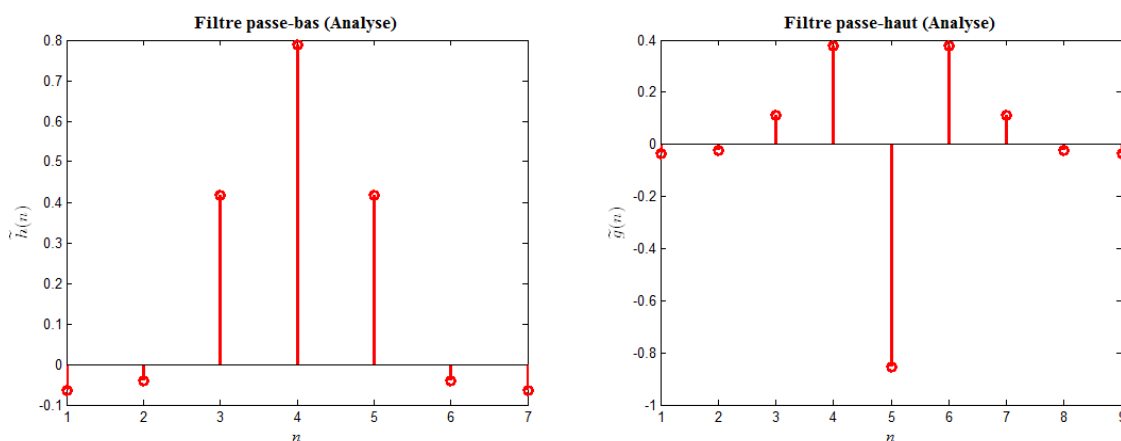


Figure II. 11 Fonction d'ondelette et fonction d'échelle de rbio4.4.



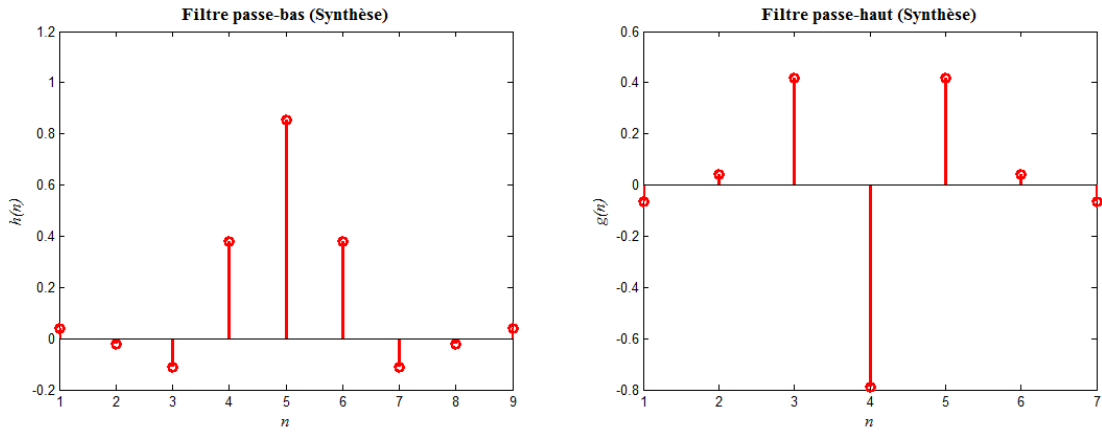


Figure II. 12 Filtre passe-bas et filtre passe-haut pour le type d'ondelette bior4.4.

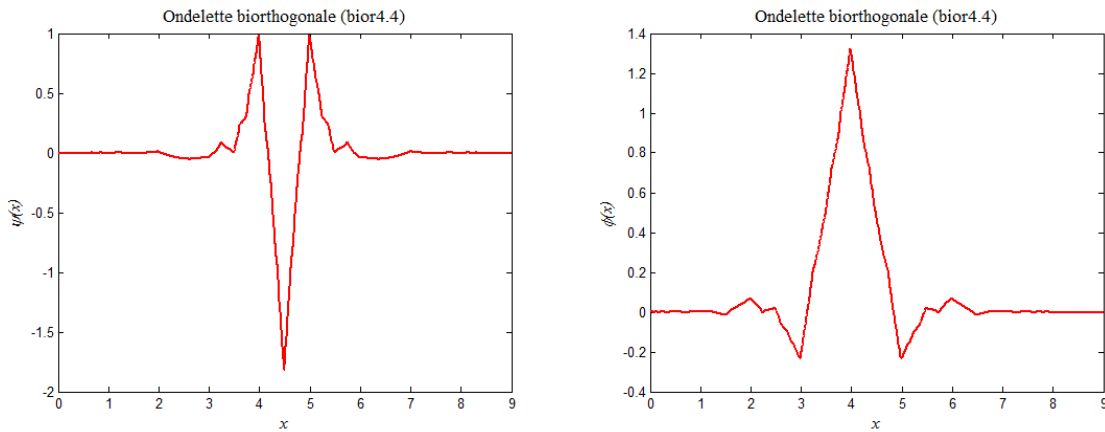


Figure II. 13 Fonction d'ondelette et fonction d'échelle de bior4.4.

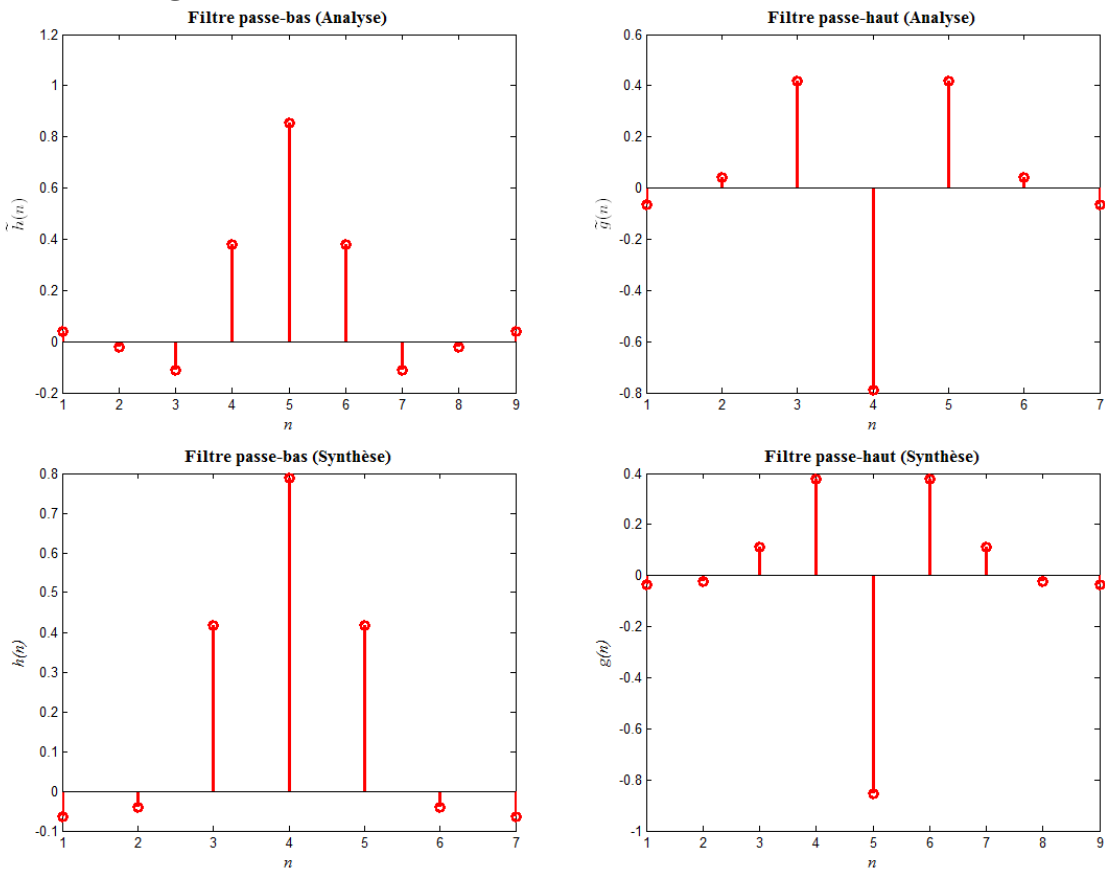


Figure II. 14 Filtre passe-bas et filtre passe-haut pour le type d'ondelette bior4.4.

II.4. Ordre et longueur du filtre

La relation entre l'ordre et la longueur du filtre dépend de la famille des ondelettes. Nous avons cinq familles d'ondelettes à support compact, les ondelettes de Haar (où Daubechies 1), les ondelettes de Daubechies, les ondelettes de Symlet les ondelettes biorthogonales réversibles, et les ondelettes biorthogonales.

Tableau II. 1. Répartition de la longueur des filtres dans la famille des ondelettes.

Filtre/Ondelettes	Haar	Daubechies	Symlet	Biothogonal réversible	Biothogonal
Ordre	1	N	N	$N_d N_r$	$N_d N_r$
Longueur	2	$2N$	$2N$	--	--

Le tableau II. 1 présente la relation entre l'ordre et la longueur du filtre pour les cinq familles des ondelettes. On peut voir que l'ondelette de Haar est un cas spécial des ondelettes de Daubechies; pour un ordre du filtre $N=1$, la longueur du filtre est $L=2$. Pour la famille Daubechies et la famille Symlet, si l'ordre du filtre est N alors la longueur du filtre est $2N$.

Pour la famille des ondelettes biorthogonales et biorthogonales réversibles, le numéro qui accompagne le nom de l'ondelette indique l'ordre du filtre utilisé dans la décomposition du signal (N_d) et l'ordre du filtre utilisé lors de la reconstruction (N_r) respectivement. Comme on peut le remarquer dans les fonctions des ondelettes biorthogonales et biorthogonales réversible, la longueur des filtres passe-bas et la longueur des filtres passe-haut utilisés dans la décomposition et la reconstruction sont différentes. Elles doivent être déterminées pour chaque type de filtre.

Donc on peut distinguer les ondelettes par un nom qui représente la famille des ondelettes et un numéro qui indique l'ordre du filtre.

II.4.1. Nombre de décompositions

La qualité de détection des interférences est déterminée par le nombre de décompositions de signal GNSS. Le nombre optimal de décompositions du signal permet d'avoir une valeur minimum du *RMSE* : Root Mean Square Error (ou maximum de coefficient de corrélation R) pour un certain ordre de filtre. Après avoir décomposé le signal GNSS et récupéré les coefficients de la transformation en ondelettes, la suppression des interférences peut être achevée par l'élimination des coefficients inférieurs à un seuil donné (seuillage).

II.5. Application de la DWT sur les signaux GNSS

La DWT est utilisée pour l'analyse des composantes de signal pour différents niveaux de décomposition. Ces niveaux de décomposition contiennent un nombre de sous-bandes, composées chacune de coefficients qui décrivent les caractéristiques d'approximation et de détail du signal GNSS. La DWT permet seulement des décompositions de puissance 2 sous la forme d'une décomposition dyadique. On passe d'un niveau $D-1$ à D par un filtrage passe-bas et passe-haut et sous échantillonnés d'un facteur 2. Chaque sous-bande représente l'activité du signal dans les différentes bandes de fréquence à différentes résolutions spatiales. Pour un niveau de décomposition $D=1$, on obtient une décomposition de signal en sa composante principale (approximation A_1) et une composante de détail D_1 du signal GNSS. Si $D=2$, on obtient une approximation A_2 et deux composantes de détails (D_1 et D_2). La Figure II.15 représente un exemple d'un signal GNSS, et les Figures II.16 et II.17 illustrent leur décomposition en ondelette de Haar avec un niveau de décomposition $D=1$ et $D=2$, respectivement.

Les Figures II.18 à II.21 représentent l'application de la DWT sur un exemple de signal GNSS, avec une décomposition égal à 1 et les filtres de Daubechies : db2, Symlet : sym4, biorthogonales réversible : rbio4.4 et biorthogonales: bior4.4.

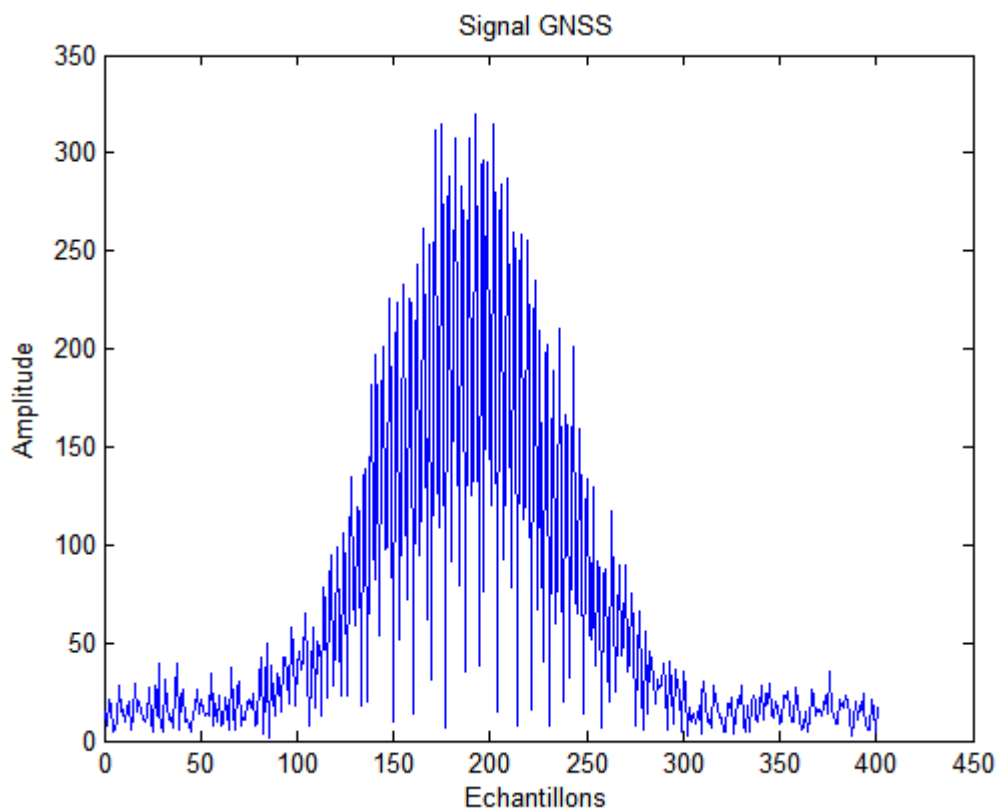


Figure II. 15. Exemple d'un signal GNSS avec interférence.

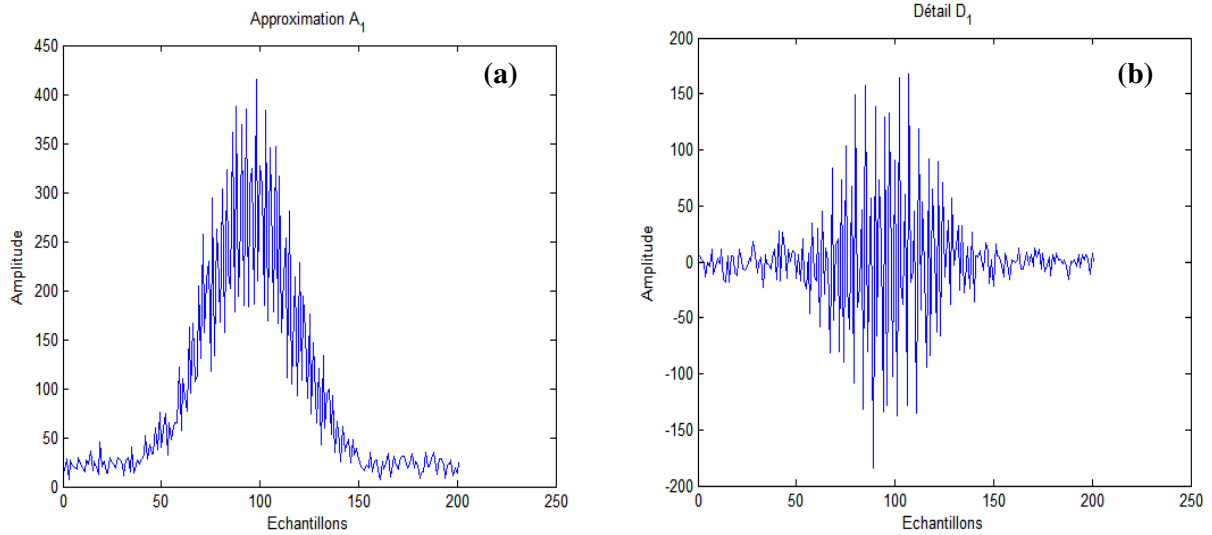


Figure II. 16. Décomposition du signal GNSS en ondelette Haar en un niveau, (a) Approximation, (b) détail.

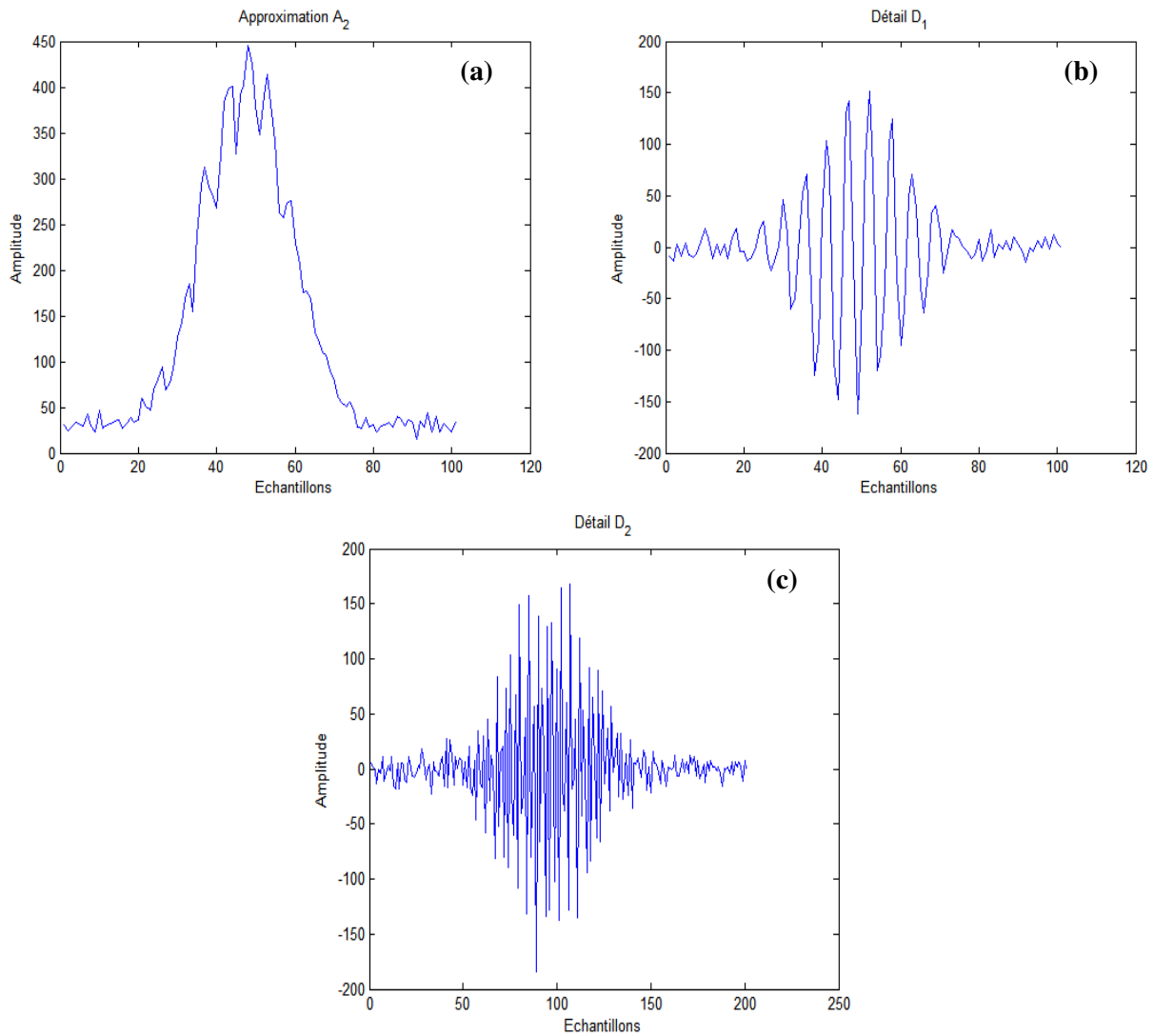


Figure II. 17. Décomposition du signal GNSS en ondelette de Haar en deux niveaux de décomposition, (a) Approximation A_2 , et détails : (b) D_1 , (c) D_2 .

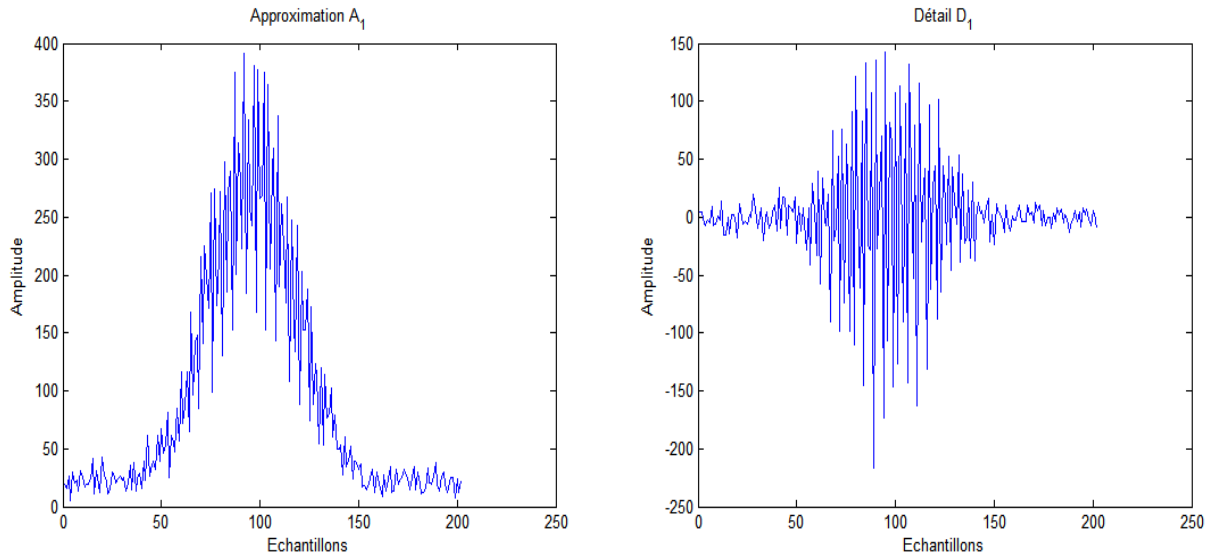


Figure II. 18. Décomposition d'un signal GNSS en ondelette db2, avec $D=1$.

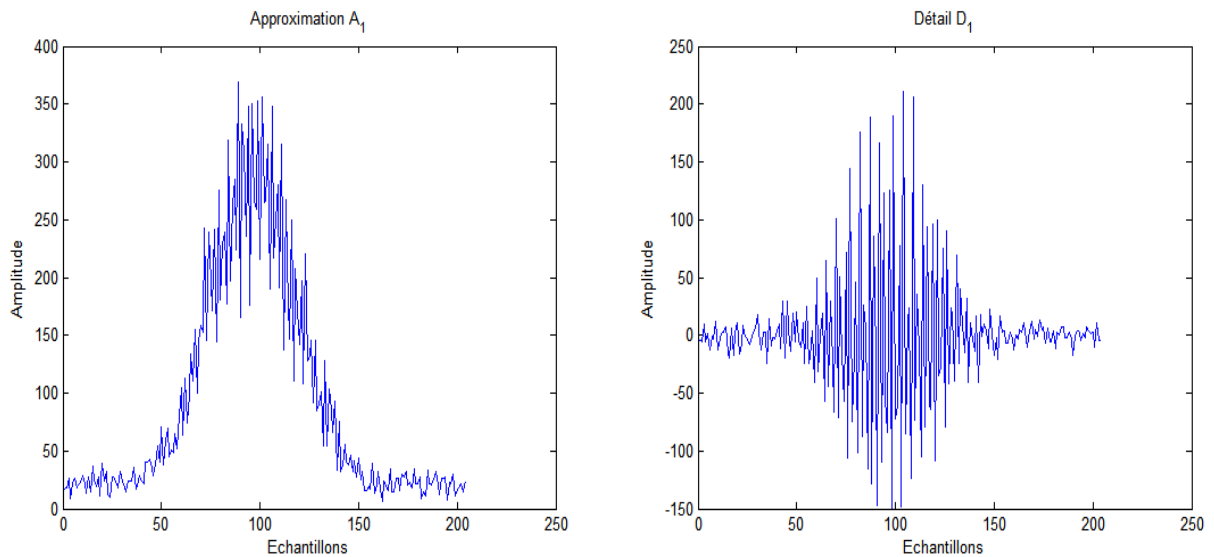


Figure II. 19. Décomposition d'un signal GNSS en ondelette sym4, avec $D=1$.

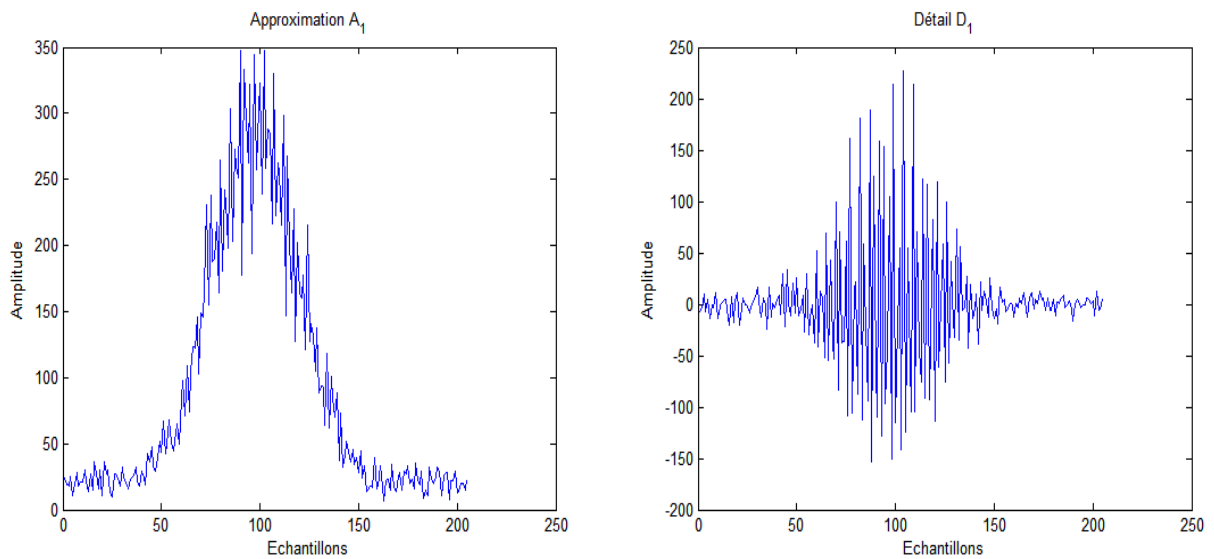


Figure II. 20. Décomposition d'un signal GNSS en ondelette rbio4.4, avec $D=1$.

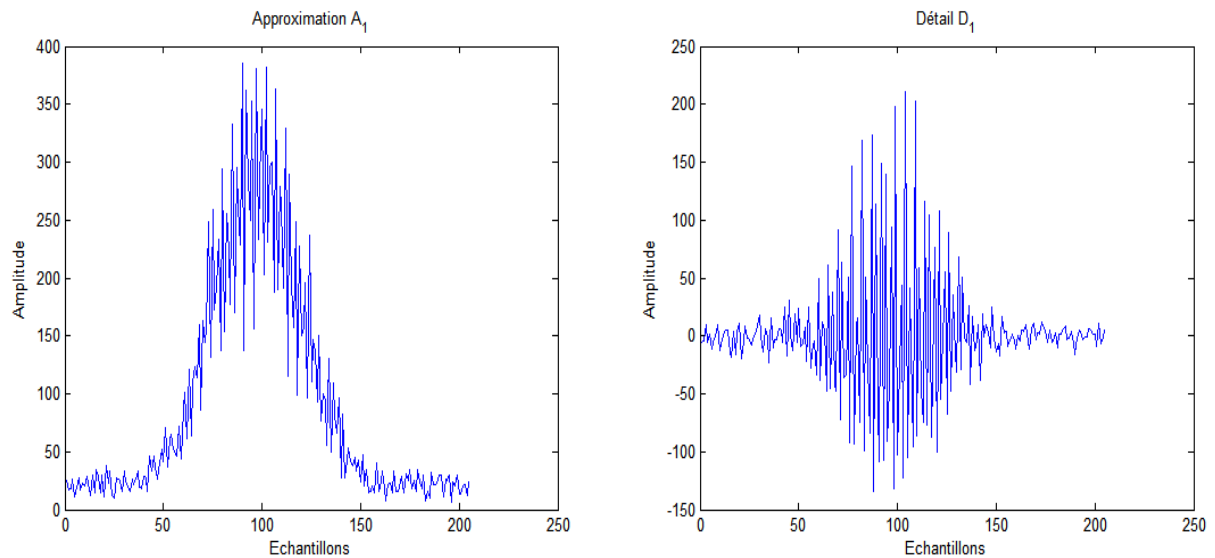


Figure II. 21. Décomposition d'un signal GNSS en ondelette bior4.4, avec $D=1$.

II.6. Conclusion

Les ondelettes sont considérées comme une découverte importante en mathématiques appliqués. Dans plusieurs domaines d'applications où l'analyse de Fourier était habituellement utilisée, les propriétés et les caractéristiques de la transformée en ondelettes, et mieux apprécier leurs avantages ainsi que leurs inconvénients dans l'analyse des signaux.

Dans la suite de cette étude, nous allons présenter une méthode évolutionnaire (algorithmes génétiques). Afin d'utiliser cette méthode pour l'objectif d'optimiser les coefficients d'ondelettes.

Chapitre III

Algorithmes Génétiques

III.1. Introduction

Les ingénieurs se heurtent quotidiennement à des problèmes de complexité grandissante, qui surgissent dans des secteurs très divers, comme le traitement d'images, la conception de systèmes de commande et de diagnostic, la détection des interférences etc. Le problème à résoudre peut souvent être considéré comme un problème d'optimisation dans lequel on définit une ou plusieurs fonctions objectif, ou fonctions de coût, que l'on cherche à minimiser (ou maximiser) par rapport à l'ensemble des paramètres concernés. La résolution d'un tel problème a conduit les chercheurs à proposer des méthodes de résolution de plus en plus performantes, parmi lesquelles on peut citer les méta-heuristiques. Ces dernières qui comprennent notamment la méthode du recuit simulé [42], la méthode de recherche Tabou [43], les algorithmes de colonies de fourmis, les algorithmes génétiques (AG) etc., Les algorithmes génétiques sont des algorithmes d'optimisation s'appuyant sur des techniques dérivées de la génétique et de l'évolution naturelle : croisements, mutations, sélection, etc. Dans ce chapitre nous introduisons les concepts théoriques des AG pour l'objectif de l'optimisation des coefficients d'ondelettes, et l'adaptation de ces derniers dans le domaine des signaux GNSS.

III.2. Définition d'algorithmes génétiques (AG)

Un algorithme génétique recherche le ou les extrema d'une fonction définie sur un espace de données. Pour l'utiliser, on doit disposer des cinq éléments suivants :

- ✚ Un principe de codage de l'élément de population. Cette étape associe à chacun des points de l'espace d'état une structure de données. Elle se place généralement après une phase de modélisation mathématique du problème traité. Le choix du codage des données conditionne le succès des algorithmes génétiques. Les codages binaires ont été très employés à l'origine. Les codages réels sont désormais largement utilisés, notamment dans les domaines applicatifs, pour l'optimisation de problèmes à variables continues.
- ✚ Un mécanisme de génération de la population initiale. Ce mécanisme doit être capable de produire une population d'individus non homogène qui servira de base pour les générations futures. Le choix de la population initiale est important car il peut rendre plus ou moins rapide la convergence vers l'optimum global. Dans le cas où l'on ne connaît rien du problème à résoudre, il est essentiel que la population initiale soit répartie sur tout le domaine de recherche.

- ✚ Une fonction à optimiser, aussi appelée fitness ou fonction d'évaluation de l'individu. Celle-ci est utilisée pour sélectionner et reproduire les meilleurs individus (ou solution) de la population.
- ✚ Des opérateurs permettant de diversifier la population au cours des générations et d'explorer l'espace d'état. L'opérateur de croisement recompose les gènes d'individus existant dans la population, l'opérateur de mutation a pour but de garantir l'exploration de l'espace d'état.
- ✚ Des paramètres de dimensionnement: taille de la population, nombre total de générations ou critère d'arrêt, probabilités d'application des opérateurs de croisement et de mutation [44].

III.2.1. Analogie avec la génétique

La génétique est une branche de la biologie qui étudie la transmission des caractères héréditaires chez les êtres vivants. Les êtres vivants sont constitués de cellules. Chaque cellule contient des chromosomes. Le nombre de chromosomes contenu dans une cellule est spécifique à chaque espèce. À l'intérieur de chaque chromosome, se trouve l'information génétique de chaque être, conservée sous forme d'une molécule d'acide désoxyribonucléique communément appelée ADN. L'élément de base de ces chromosomes est un gène, qui est une séquence d'ADN. Sur chaque chromosome, il existe une suite de gènes constituant une chaîne qui code les diverses caractéristiques de l'organisme (par exemple, la couleur des cheveux, la forme du nez). Chez une espèce donnée chaque gène possède, sur un chromosome, un emplacement fixe appelée le locus. Les différentes formes qui peuvent être prises par un même gène sont appelées des allèles. L'ensemble des gènes d'un individu est son génotype et son apparence physique constitue son phénotype.

Par analogie à la génétique, les AG travaillent sur une population d'individus et non sur un individu isolé. Ici, un individu est une solution potentielle au problème posé. Une population est donc un ensemble de solutions, plus ou moins performantes, pour ce problème. Chaque individu est représenté par un chromosome unique constituant son génotype. Une population constitue donc un ensemble de chromosomes. Un chromosome est composé d'une chaîne de symboles qui sont les gènes. Le phénotype est la représentation naturelle d'une solution au problème traité, obtenue après le décodage du génotype. La population évolue durant une succession d'itérations, appelées générations, jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt, spécifié à l'avance, soit vérifié [45].

III.2.2. A quoi sert l'algorithme génétique ?

L'algorithme génétique résout des problèmes n'ayant pas de méthode de résolution décrite précisément ou dont la solution exacte, si elle est connue, est trop compliquée pour être calculée en un temps raisonnable. Ceci dit, face à un problème pour lequel il existe pour ainsi dire une infinité de solutions, plutôt que d'essayer naïvement toutes les solutions une à une pour trouver la meilleure, on va explorer l'espace des solutions en se laissant guider par les principes des algorithmes génétiques [46].

III.2.3. Applications d'algorithme

Ayant été reconnue comme une approche valide des problèmes nécessitant une exploration performante et économique du point de vue calcul, les algorithmes génétiques sont maintenant appliqués plus largement, aux domaines des affaires, à la recherche scientifique en général, ainsi que pour l'industrie. Les raisons de ce nombre grandissant d'applications sont claires. Ces algorithmes sont simples d'un point de vue de calcul, cependant très performants dans leur recherche d'amélioration [46].

III.2.4. Principe d'algorithme génétique

Le principe général du fonctionnement d'un algorithme génétique est représenté sur la Figure (III.1). L'algorithme commence avec un ensemble de solutions possibles du problème (population initiale). Les individus sont formés par des variables, qui sont les paramètres à ajuster par exemple les coefficients d'ondelettes. Cette population est conçue aléatoirement à l'intérieur de limites prédéfinies.

Certaines solutions de la première population sont utilisées pour former, à partir d'opérateurs génétiques (croisement, mutation, etc.), une nouvelle population. Ceci est motivé par l'espoir que la nouvelle population soit meilleure que la précédente. Les solutions qui serviront à former de nouvelles solutions sont sélectionnées aléatoirement d'après leurs mérites (représentés par une «fonction objectif» spécifique au problème posé, qui devra être minimisée ou maximisée, par exemple : le taux de classification ou de détection des interférences): meilleur est l'individu, plus grandes seront ses chances de se reproduire (c'est-à-dire, plus grande sera sa probabilité d'être sélectionné pour subir les opérateurs génétiques). Ceci est répété jusqu'à ce qu'un critère de convergence soit satisfait (par exemple, le nombre de générations ou le mérite de la meilleure solution) [47].

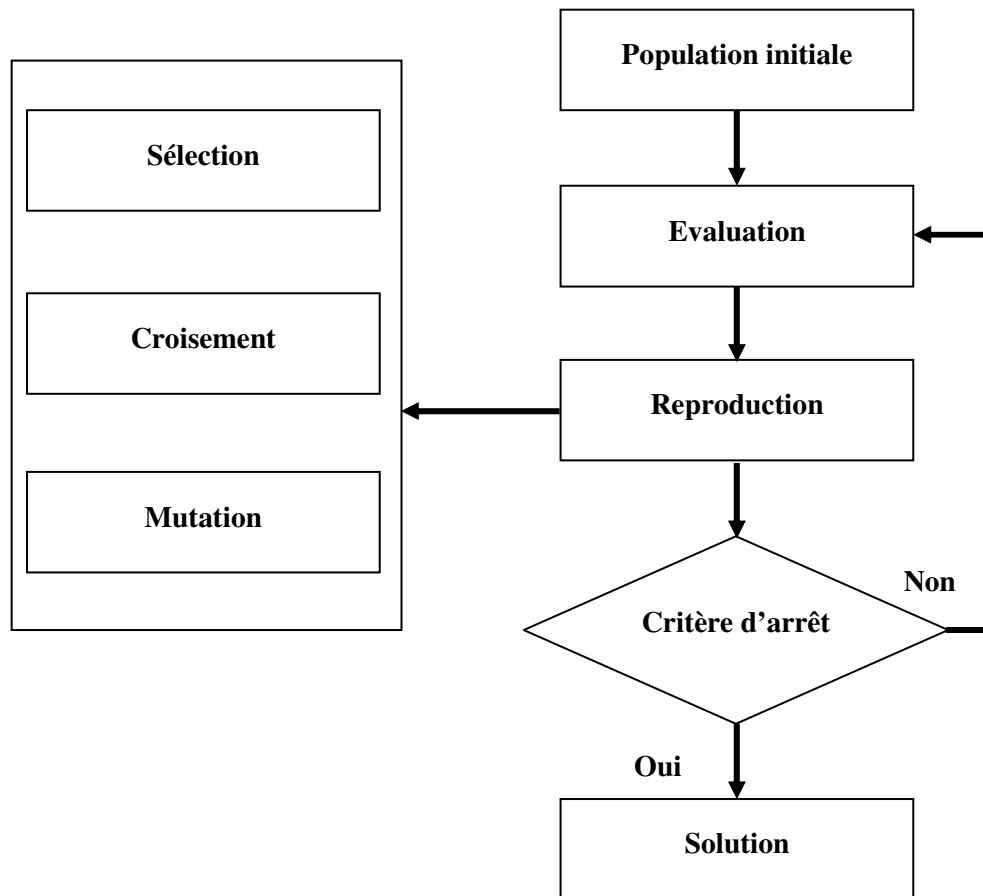


Figure III. 1. Squelette d'un algorithme génétique.

La Figure III.2 illustre la structure d'un algorithme génétique canonique [48]:

1. Initialiser la population $P(0)$ aléatoirement en mettre $i=0$.
2. Répéter
 - a. Evaluer la fitness pour chaque individu dans $P(i)$.
 - b. Sélection des Parents dans $P(i)$ par le calcul de leur fitness ;
 - c. Appliquer l'opérateur de croisement sur $P(i)$ pour sélectionner les parents;
 - d. Appliquer l'opérateur de mutation pour la reproduire de nouveaux individus;
 - e. Remplacer les anciens de P par leurs Descendants (progéniture) pour la création de la génération $P(i+1)$;
3. Jusqu'à un critère d'arrêt satisfaisant.

Figure III. 2. Structure d'un algorithme génétique canonique.

III.3. Caractéristiques des algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques, en tant qu'approche de résolution de problèmes, se caractérisent par certains aspects particuliers: le codage des paramètres du problème à traiter, l'espace de

recherche et la fonction d'évaluation qui permet de déterminer la pertinence d'une solution trouvée et l'évolution d'une génération à une autre par la sélection des chromosomes qui participent à la reproduction et les chromosomes à disparaître [49].

III.3.1. Codage

Le codage est une fonction qui permet de passer de la donnée réelle du problème traité à la donnée utilisée par l'algorithme génétique (Figure III.3). Le choix du codage est l'élément le plus important dans la conception de l'algorithme puisqu'il permet d'une part de représenter les données, les paramètres et les solutions et d'autre part il influe sur la mise en œuvre des opérations génétique telles que le croisement et la mutation qui influent directement sur le bon déroulement de l'algorithme génétique et de leur convergence vers la bonne solution.

Généralement on a trois types de codage les plus utilisés:

- **Représentation binaire :** Chaque gène dispose du même alphabet binaire 0, 1. Un gène est alors représenté par un entier, les chromosomes, qui sont des suites de gènes sont représentés par des tableaux de gènes et les individus de l'espace de recherche sont représentés par des tableaux de chromosomes.

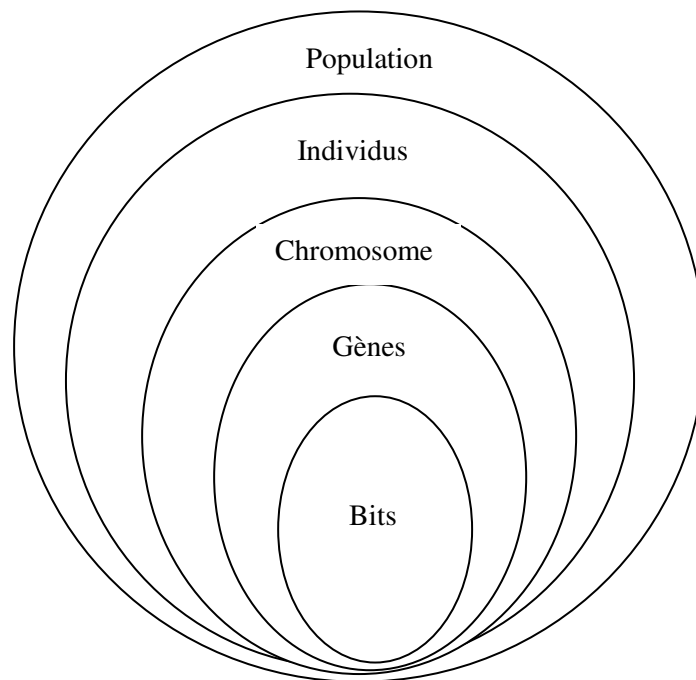


Figure III. 3. Les cinq niveaux d'organisation d'une population d'un AG.

- **Représentation avec réels:** Contrairement au codage binaire, un gène est représenté par une suite de bits (un bit dans le code binaire) qui est associé à un réel. Ce type de

codage peut être utile notamment dans le cas où l'on recherche le maximum d'une fonction réelle.

- **Représentation à l'aide d'arbres syntaxiques:** Ce type de codage utilise une structure arborescente (une racine de laquelle peuvent être issus un ou plusieurs fils eux mêmes des arbres).

Ce type de codage peut être utilisé lorsque la taille du problème ou de la solution n'est pas finie. Son inconvénient est qu'on peut trouver des arbres de solutions de taille importante difficile à analyser [50].

Dans notre travail nous intéressent à la représentation avec réels des individus.

III.3.2. Fonction d'évaluation

La Figure III.4, représente le principe général d'évaluation d'une population après chaque génération k . La fonction de performance, qu'on appelle aussi fonction d'adaptation, fonction objectif ou fonction fitness, associe une valeur de performance à chaque individu ce qui offre la possibilité de le comparer à d'autres individus et permet à l'algorithme génétique de déterminer qu'un individu sera sélectionné pour être reproduit ou pour déterminer s'il sera remplacé [51].

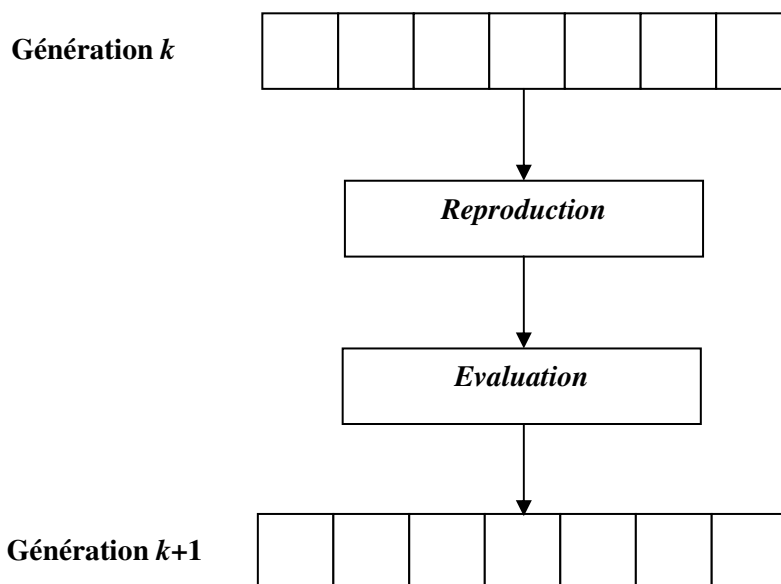


Figure III. 4. Principe général de l'évolution d'une population d'un algorithme génétique.

III.3.3. Opérateurs génétiques

Trois opérateurs jouent un rôle prépondérant dans la possible réussite d'un AG : l'opérateur de sélection, l'opérateur de croisement et l'opérateur de mutation. Si le principe de chacun de ces opérateurs est facilement compréhensible, il est toutefois difficile d'expliquer

l'importance isolée de chacun de ces opérateurs dans la réussite de l'AG. Pour partie cela tient au fait que chacun de ces opérateurs agit selon divers critères qui lui sont propres (valeur sélective des individus, probabilité d'activation de l'opérateur, etc.) [52].

III.3.3.1. Opérateurs de sélection

La sélection permet d'identifier statistiquement les meilleurs individus d'une population et d'éliminer les mauvais. On trouve dans la littérature un nombre important de principes de sélection plus ou moins adaptés aux problèmes qu'ils traitent. On trouve essentiellement quatre types de méthodes de sélection différentes: la sélection uniforme, la sélection stochastique, la méthode de la *roulette biaisée*, la méthode élitiste, et la sélection par tournois. La méthode de sélection la plus connue et la plus utilisée est la méthode de la *roulette biaisée*. Avec cette méthode, chaque individu a une probabilité d'être sélectionné proportionnelle à sa performance, donc plus les individus sont adaptés au problème, plus ils ont de chances d'être sélectionnés. La probabilité d'être choisie est directement liée à la valeur d'aptitude du parent, elle est inversement proportionnel à leur aptitude. Le chromosome avec un petit aptitude a une grande probabilité et vice-versa.

- **L'aptitude du rang:** Cette approche est indépendante au problème à résoudre, et calcule la probabilité (P_n) à partir du rang des chromosomes (n) [53]:

$$P_n = \frac{N_{sel} - n + 1}{\sum_{n=1}^{N_{sel}} n} \quad (\text{III.1})$$

La population de petite taille a une grande probabilité de sélectionner le même chromosome. L'avantage de cette approche est que les probabilités ne change plus à chaque génération.

- **L'aptitude du fitness:** La probabilité de la sélection est calculée à partir de la valeur de fitness du chromosome dans la population. La valeur de fitness normalisée pour chaque chromosome est calculée par [53]:

$$F_n = f_n - f_{N_{sel}+1} \quad (\text{III.2})$$

où : F_n est la valeur de fitness normalisée, f_n est la valeur de fitness de l'individu et $1 + N_{sel}$ est la petite valeur de fitness des chromosomes jetés. Donc, la probabilité (P_n) est calculée par [53]:

$$P_n = \frac{F_n}{\sum_{m=1}^{N_{sel}} F_m} \quad (\text{III.3})$$

où : m est le numéro d'individu.

On tire successivement des couples d'individus et on sélectionne celui qui possède la meilleure fitness. On itère le processus jusqu'à ce que l'on n sélectionné suffisamment de parents. Afin d'éviter la perte des meilleurs individus, on peut choisir de les recopier directement vers la génération suivante. On évite ainsi que la meilleure fitness puisse décroître et que les très bonnes solutions soient éliminées par la nature stochastique (aléatoire) de l'opérateur de sélection. On conserve généralement 5 à 10% des meilleurs individus. Comme ce sera le cas pour les autres opérateurs, il existe très peu de base théorique pour guider le choix de la méthode de sélection [47]. Seuls des tests sur notre application aux signaux GNSS permet de déterminer l'approche la plus efficace.

III.3.3.2. Opérateurs de croisement

Le croisement a pour but d'enrichir la diversité de la population en manipulant la structure des chromosomes. Classiquement, les croisements sont envisagés avec deux parents et génèrent deux enfants.

Initialement, le croisement associé au codage par chaînes de bits est le croisement à découpage de chromosomes (Slicing Crossover). Pour effectuer ce type de croisement sur des chromosomes constitués de G gènes, on tire aléatoirement une position dans chacun des parents. On échange ensuite les deux sous-chaînes évolutives comme montre la Figure (III.5).

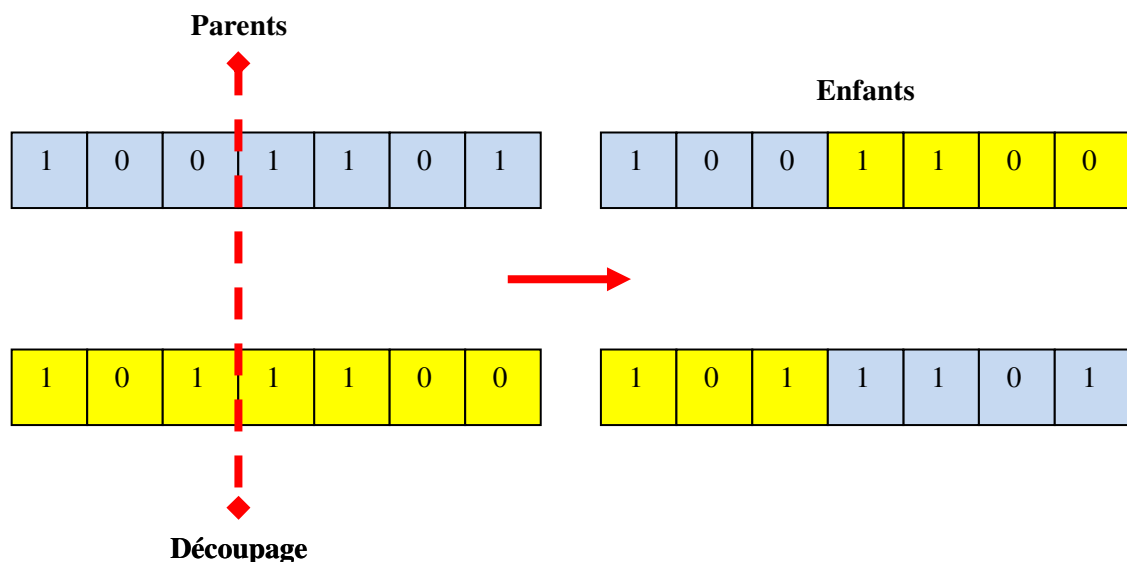


Figure III. 5. Croisement par découpage sur une chaîne binaire.

Ce type de croisement à découpage de chromosomes est très efficace pour les problèmes discrets. Pour les problèmes continus, un croisement «barycentrique» est souvent utilisé: Pour

générer deux enfants e_1 et e_2 à partir des parents p_1 et p_2 , on commence par tirer un nombre α au hasard dans l'intervalle $[-0.5;1.5]$, on applique ensuite les formules [47]:

$$e_1 = \alpha p_1 + (1 - \alpha) p_2 \quad (\text{III.4})$$

$$e_2 = \alpha p_2 + (1 - \alpha) p_1 \quad (\text{III.5})$$

III.3.3.3. Opérateur de mutation

La mutation est le processus selon lequel la valeur d'un gène choisi au hasard dans un chromosome est régénérée (voir la Figure III.6). C'est un processus qui ne survient qu'occasionnellement dans un algorithme génétique avec une probabilité P_m très faible. Une mutation consiste simplement en l'inversion d'un bit (ou de plusieurs bits, mais vu la probabilité de mutation c'est extrêmement rare) se trouvant en un locus bien particulier et lui aussi déterminé de manière aléatoire.

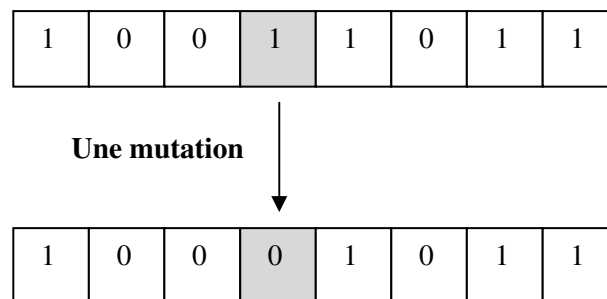


Figure III. 6. Opérateur de mutation.

L'opérateur de mutation modifie donc de manière complètement aléatoire les caractéristiques d'une solution, ce qui permet d'introduire et de maintenir la diversité au sein de notre population de solutions. Cet opérateur joue le rôle d'un *élément perturbateur*, il introduit du *bruit* au sein de la population.

En effet, une mutation pouvant intervenir de manière aléatoire au niveau de n'importe quel locus, on a la certitude mathématique que n'importe quel permutation de notre chaîne de bits peut apparaître au sein de la population et donc que tout point de l'espace de recherche peut être atteint. On notera que la mutation règle donc le problème exposé après le croisement.

La mutation est définie étant la modification aléatoire d'une partie d'un chromosome. Elle constitue une exploration aléatoire de l'espace des chaînes. C'est un phénomène qui a un rôle théoriquement plus marginal: il est là pour éviter une perte irréparable de la diversité. Différentes manières de mutation d'un chromosome sont aussi définies dans la littérature scientifique.

➤ **Mutation en codage binaire**

Dans un algorithme génétique simple, la mutation en codage binaire est la modification aléatoire occasionnelle (de faible probabilité) de la valeur d'un caractère de la chaîne.

➤ **Mutation en codage réel**

Pour le codage réel, les opérateurs de mutation les plus connus et les plus utilisés sont les suivants:

- **L'opérateur d'inversion simple:** Consiste à choisir aléatoirement deux points de coupure et inverser les positions des bits situés au milieu.
- **L'opérateur d'insertion:** Consiste à sélectionner au hasard un bit et une position dans le chromosome à muter, puis à insérer le bit en question dans la position choisie.
- **L'opérateur d'échange réciproque:** Cet opérateur permet la sélection de deux bits et les inters changés [46].

III.3.3.4. L'opérateur de remplacement

Cet opérateur est le plus simple, son travail consiste à réintroduire les descendants obtenus par application successive des opérateurs de sélection, de croisement et de mutation (la population P') dans la population de leurs parents (la population P). On trouve essentiellement 2 méthodes de remplacement différentes [54]:

- **Le remplacement stationnaire:** dans ce cas, les enfants remplacent automatiquement les parents sans tenir compte de leurs performances respectives, et le nombre d'individus de la population ne varie pas tout au long du cycle d'évolution simulé, ce qui implique donc d'initialiser la population initiale avec un nombre suffisant d'individus. Cette méthode peut être mise en œuvre de 2 façons différentes:
 - La première se contente de remplacer la totalité de la population P par la population P' , cette méthode est connue sous le nom de remplacement générationnel et on a donc un génération gap qui vaut 1.
 - La deuxième méthode consiste à choisir une certaine proportion d'individus de P' qui remplaceront leurs parents dans P (proportion égale à 100% dans le cas du remplacement générationnel. Ce type de remplacement engendre une population ayant une grande variation et de se fait favorise la dérive génétique qui se manifeste d'autant plus que la population est de petite taille. De plus dans bien des cas, étant donné que même un enfant ayant une faible

performance remplace forcément un parent, on n'atteint pas la meilleure solution mais on s'en approche seulement.

- **Le remplacement élitiste** : dans ce cas, on garde au moins l'individu possédant les meilleures performances d'une génération à la suivante. En général, on peut partir du principe qu'un nouvel individu (enfant) prend place au sein de la population que s'il remplit le critère d'être plus performant que le moins performant des individus de la population précédente. Donc les enfants d'une génération ne remplaceront pas nécessairement leurs parents comme dans le remplacement stationnaire et par la même la taille de la population n'est pas figée au cours du temps.

Ce type de stratégie améliore les performances des algorithmes évolutionnaire dans certains cas. Mais présente aussi un désavantage en augmentant le taux de convergence prématuré.

III.3.4. Critères de convergence

Un aspect important des algorithmes génétiques concerne le choix du critère de convergence. Quand on exécute l'AG, on ne peut pas suivre la dynamique de la population en regardant seulement la population à chaque étape de l'exécution. Le problème c'est qu'il y a différentes statistiques à observer et établir les relations entre elles pour comprendre les informations extraites.

Les mesures statistiques sont importantes pour contrôler et réajuster les paramètres. Le critère d'arrêt peut être fixé en imposant un nombre maximal de générations (G_{max}). On estime alors que l'algorithme a convergé et que l'individu de plus forte performance dans la dernière génération correspond à la solution recherchée. Une autre méthode consiste à supposer que l'algorithme converge vers l'optimum lorsque l'adaptation d'une partie ou de l'ensemble de la population se rapproche de celle du meilleur individu [55, 56]:

$$\left| \frac{S_c - S_m}{S_c} \right| \times 100 \leq \varepsilon \quad (\text{III.4})$$

Où ε est la précision requise sur la convergence, S_m est la performance du meilleur individu de la population et S_c est la solution à comparer.

Dans le cas, le meilleur individu de la population reste inchangé pendant un nombre donné de générations, on considère que l'algorithme a convergé et que cette meilleure solution est l'optimum de cette recherche. Ce critère vérifie la création de nouvelles solutions plus performantes parmi la population. Sinon, le nombre d'itérations atteint le nombre de génération G_{max} fixé.

III.4. Paramètre de dimensionnement

Le processus de l'algorithme génétique est guidé par un certain nombre de paramètres fixés à l'avance. La valeur de ces paramètres influence la réussite ou non de l'algorithme. Ces paramètres sont les suivants :

- ✚ La taille de la population N , et la longueur du codage de chaque chromosome L . Si N est trop petit, la population peut converger trop rapidement vers un mauvais individu.
- ✚ La probabilité de croisement P_c : elle dépend de la forme de la fonction de fitness. Plus elle est élevée, plus la population subit des changements importants. Les valeurs généralement admises sont comprises entre 0.5 et 0.9.
- ✚ La probabilité de mutation P_m : ce taux est généralement faible puisqu'un taux élevé risque de conduire à une solution sous-optimale, et à la perte de la population originale.
- ✚ Le nombre de générations peut également être défini a priori comme critère d'arrêt.

Les paramètres décrits ici sont des paramètres communs, il peut exister plusieurs d'autres selon le modèle de l'algorithme génétique utilisé.

III.5. Fonctionnement général des algorithmes génétiques

Le principe d'un algorithme génétique consiste à évaluer une population et à générer une autre de façon itérative grâce aux actions opérées par les opérateurs génétiques. Le nombre de chromosomes dans une population reste inchangé à travers les diverses générations. Pour mettre en œuvre un AG, il faut disposer d'un schéma pour coder les solutions du problème, une fonction d'évaluation, une procédure d'initialisation, un ensemble d'opérateurs et un ensemble de paramètres qui gouvernent l'élaboration de la population initiale, l'exécution des opérateurs et l'arrêt de génération de nouvelles populations. De façon générale, un AG fonctionne selon les étapes suivantes [57]:

- ✚ **Étape 1:** On génère une population initiale de taille N , représentant le nombre de chromosomes. Puis on choisit au hasard les gènes qui composent chaque chromosome. La qualité de la population initiale est très importante pour la génération de meilleures solutions. La diversité de la population est très importante pour éviter la convergence prématurée vers des minimums locaux. Cette diversité de population se définit initialement et se maintient en combinant diverses stratégies de croisement et de mutation.
- ✚ **Étape 2:** On évalue chaque chromosome par la fonction objective, ce qui permet de déduire sa valeur d'aptitude.

- ✚ **Étape 3:** On exécute les cycles de génération de populations. Chaque nouvelle génération remplace la précédente. Le nombre de cycle x est déterminé au départ. Dans chaque cycle, N chromosomes sont choisis pour reproduction et croisement deux à deux. Après la création de la $x^{\text{ème}}$ population, les chromosomes vont évoluer de façon telle que cette dernière génération contient des chromosomes qui sont meilleurs que ceux des générations précédentes.

III.6. Avantages et inconvénients des algorithmes génétiques

Les avantages des algorithmes génétiques :

- Les algorithmes génétiques opèrent au niveau du codage des paramètres sans se soucier de leur nature, donc ils s'appliquent à de nombreuses classes de problèmes, qui dépendent éventuellement de plusieurs paramètres de natures différentes (booléens, entiers, réels, fonctions...);
- Pour les mêmes raisons un algorithme génétique est dans l'idéal totalement indépendant de la nature du problème et de la fonctionnelle à optimiser, car il ne se sert que des valeurs d'adaptation, qui peuvent être très différentes des valeurs de la fonction à optimiser, même si elles sont calculées à partir de cette dernière;
- Potentiellement les algorithmes génétiques explorent tous l'espace des points en même temps, ce qui limite les risques de tomber dans des optimums locaux;
- Les algorithmes génétiques ne se servent que des valeurs de la fonctionnelle pour optimiser cette dernière, il n'y a pas besoin d'effectuer de coûteux et parfois très complexes calculs;
- Les algorithmes génétiques présentent une grande robustesse c'est-à-dire une grande capacité à trouver les optimums globaux des problèmes d'optimisation.

Les inconvénients des algorithmes génétiques :

- Les algorithmes génétiques ne sont encore actuellement pas très efficaces en coût (ou vitesse de convergence), vis-à-vis de méthodes d'optimisation plus classiques;
- Parfois les algorithmes génétiques convergent très vite vers un individu particulier de la population dont la valeur d'adaptation est très élevée;
- Le respect de la contrainte de domaine par la solution codée sous forme de chaîne de bits pose parfois problème. Il faut bien choisir le codage, voir modifier les opérateurs;

- L'utilisation d'un algorithme génétique ne garantit pas le succès de l'optimisation;
- En pratique l'efficacité d'un algorithme génétique dépend souvent de la nature du problème d'optimisation. Selon les cas de choix des opérateurs et des paramètres seront souvent critiques, mais aucune théorie générale ne permet de connaître avec certitude la bonne paramétrisation, il faudra faire plusieurs expériences pour s'en approcher.

III.7. Conclusion

Ce chapitre a établi les fondations nécessaires à la compréhension des algorithmes génétiques, de leurs mécanismes et de leur puissance. Le domaine d'application des algorithmes génétiques est assez large. En effet, depuis leur adaptation, ces méthodes connaissent une expansion considérable. Les algorithmes génétiques dans les applications qu'on leur a soumis ont montré leur grande souplesse et leur simplicité d'utilisation.

Au cours de ce chapitre, un algorithme d'optimisation basé sur les principes des algorithmes génétiques a été présenté. Dans le chapitre IV, cet algorithme sera appliqué à la résolution d'un problème d'optimisation des coefficients d'ondelettes relié à la détection et la suppression des interférences dans les récepteurs GNSS.

Chapitre IV

Tests et résultats

IV. 1. Introduction

Dans ce chapitre, notre objectif est l'identification des interférences GNSS, d'où la nécessité d'une détection automatique et d'un système de classification basé sur le classifieur SVM (support vector machine). Les techniques d'ondelettes sont largement utilisées pour la détection et l'analyse de signaux GNSS. Dans la littérature scientifique, plusieurs études comparatives de différentes familles d'ondelettes pour la classification des signaux GNSS, ont démontré que les performances des systèmes de classification dépendent de la sélection de l'ondelette mère. Cependant, la sélection d'une ondelette mère appropriée pour le signal analysé est un critère important. Cela offre la possibilité d'effectuer une procédure d'optimisation pour obtenir les meilleurs coefficients d'ondelette. En effet pour améliorer les performances des ondelettes dans la classification des signaux GNSS; il faut concevoir des ondelettes optimisées pour cette application spécifique.

La méthode proposée dans ce mémoire s'inspire de l'algorithme d'optimisation d'ondelettes dans la référence [58] et l'adapte à notre problème de classification des signaux GNSS. Dans ce contexte, l'objectif de la méthode proposée est l'estimation des coefficients d'ondelettes discrètes qui permettent d'obtenir l'erreur de classification minimale basée sur les algorithmes génétiques. Concernant la fonction fitness (ou fonction de coût), nous utilisons le classifieur SVM pour sa grande capacité de généralisation [59-61], donc notre fonction fitness est l'erreur d'identification des interférences ou l'erreur de classification. Cette fonction de fitness est une estimation empirique de la précision de généralisation de notre système; qui conduit l'algorithme génétique au meilleur type d'ondelette adapté à notre problème. Il est à noter que, les coefficients de chromosome de l'algorithme génétique sont les paramètres du classifieur SVM, les paramètres angulaires correspondant au coefficient du banc de filtres (passe-bas et passe-haut) et le niveau de décomposition en ondelettes (D).

Le chapitre présent est divisé en quatre parties, dans la première partie nous présentons une description des bases de données utilisées dans notre travail, dans la deuxième partie, nous présentons la méthode proposée. La troisième partie, on va présenter les résultats de simulations de notre méthode proposée, cette partie est divisée en deux sous-sections : (i) l'application de cinq différentes ondelettes 'Haar', 'db2', 'sym4', 'rbio4.4', et 'bior4.4' sur les signaux GNSS, (ii) l'optimisation des coefficients d'ondelettes et le seuillage automatique (SVM), cette dernière est basée sur une méthode évolutionnaire (algorithmes génétiques). Enfin, la dernière partie de ce chapitre est consacrée à la conclusion de notre étude.

IV. 2. Description des bases de données

Pour tester les performances de notre méthode d'optimisation sur les signaux GNSS, nous utilisons les simulateurs. Par ailleurs, puisque les situations inattendues peuvent être difficilement à corriger. Ainsi, les faibles coûts de déploiement, la flexibilité et la grande capacité à contrôler de nombreux scénarios et à traiter une énorme quantité de données font des simulateurs, un outil indispensable.

Les performances des techniques d'atténuation des interférences ont été obtenues à l'aide d'un simulateur 'GE5-TUT' open-source dans le MATLAB. Ce simulateur du système Galileo est dédié à la bande E5. Le simulateur permet la simulation de la transmission de données, qui est composée de trois blocs essentiels qui sont : émetteur, le canal de propagation et le bloc du récepteur. Par conséquent, l'algorithme d'atténuation est simulé en tant qu'un bloc défini et intégré dans le simulateur [62].

Les caractéristiques des signaux Galileo sont mentionnées précédemment dans le chapitre I. Le signal E5 de Galileo est constitué de deux bandes, la première est centrée sur 1176.45 MHz et la deuxième est centrée sur 1207.140 MHz. Le signal E5 de Galileo est modulé avec la technique AltBOC (15,10) avec un débit des chips égale à 10.23 Mbps. Les détails concernant les paramètres du signal sont illustré dans le tableau IV.1.

La Figure IV.1 représente la densité spectrale de puissance (PSD) de la bande E5. Par conséquent, le signal Galileo E5a-I a été choisi dans tous nos scénarios de simulation.

Les tests de simulations sont composés du signal Galileo E5aI et du signal d'interférence à bande étroite ajouté. Le rapport de l'interférence sur signal ISR de l'interférence à onde continue unique (SCWI), du l'interférence à onde continue multiple (MCWI) et de l'interférence pulsé (DME) est varié entre 10 et 60dB. Il est a noté que le rapport est décrit par l'équation suivante:

$$ISR = 10 \times \log\left(\frac{I}{S}\right) \quad (IV.1)$$

où I est la puissance d'interférence et S est la puissance du signal GNSS.

Tableau IV. 1. Paramètres du signal E5aI.

Paramètres	Valeur
Signal désiré	Galileo E5a-I
Fréquence d'échantillonnage F_e	31.500 MHz
Fréquence intermédiaire F_i	4.655 MHz
Intégration cohérente	1 ms
CNR	49 dB-Hz

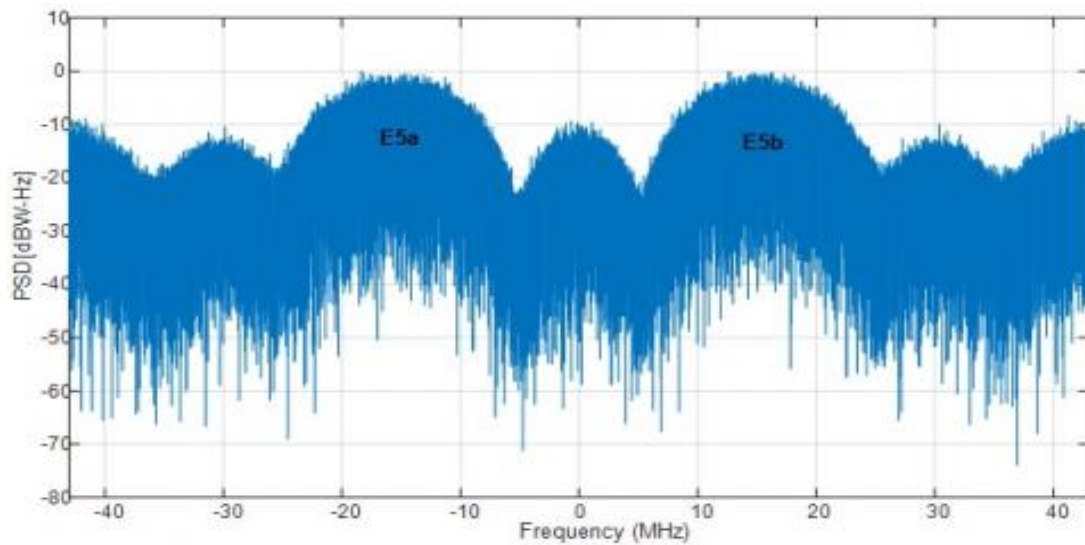


Figure IV. 1. La densité spectrale de puissance (PSD) de la bande E5.

Le CWI employé, est un signal sinusoïdal pur dans le cas du SCWI, il est situé au centre du lobe principal à la fréquence intermédiaire $f_{IF} = 4,655\text{MHz}$ de la bande E5a ce qui correspond à une fréquence porteuse de $1176,45\text{MHz}$. Ce scénario présente l'attaque la plus dangereuse sur le système. L'interférence MCWI simulée est la somme de plusieurs signaux sinusoïdes avec des fréquences différents répartis sur la bande E5aI, avec celle de la fréquence intermédiaire $f_{IF} = 4,655\text{MHz}$. Pour plus d'illustration, des exemples de l'amplitude du signal E5aI dans le domaine temporel sans interférence et avec interférence, sont montrés dans les Figures IV.2 et IV.3. Dans le cas de signal contaminé par une interférence DME, le rapport interférence sur signal ISR est varié entre 10dB à 60dB avec un pas de 10dB . La représentation des signaux contaminé et non contaminé dans le domaine fréquentiel sont illustrés dans les Figure IV.4 et IV.5.

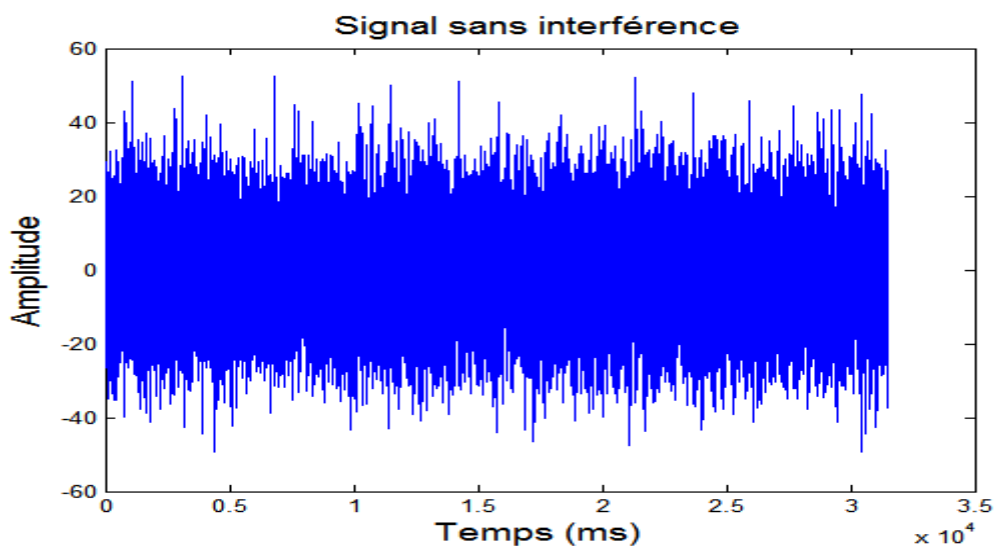


Figure IV. 2. Amplitude du signal E5aI dans le domaine temporel sans interférence.

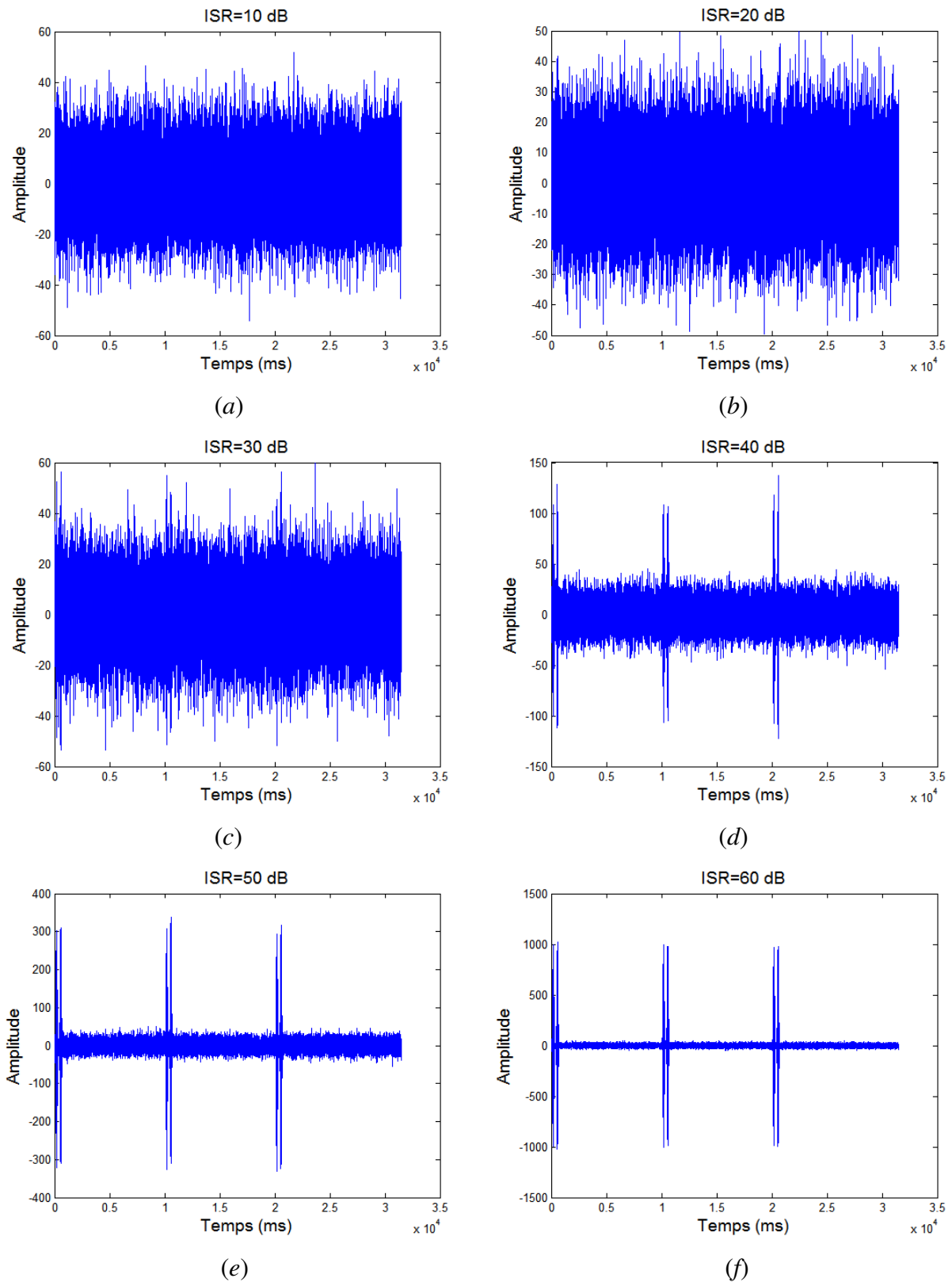


Figure IV. 3. Amplitude du signal E5aI dans le domaine temporel contaminé par une interférence DMA, ISR varie entre 10dB à 60dB.

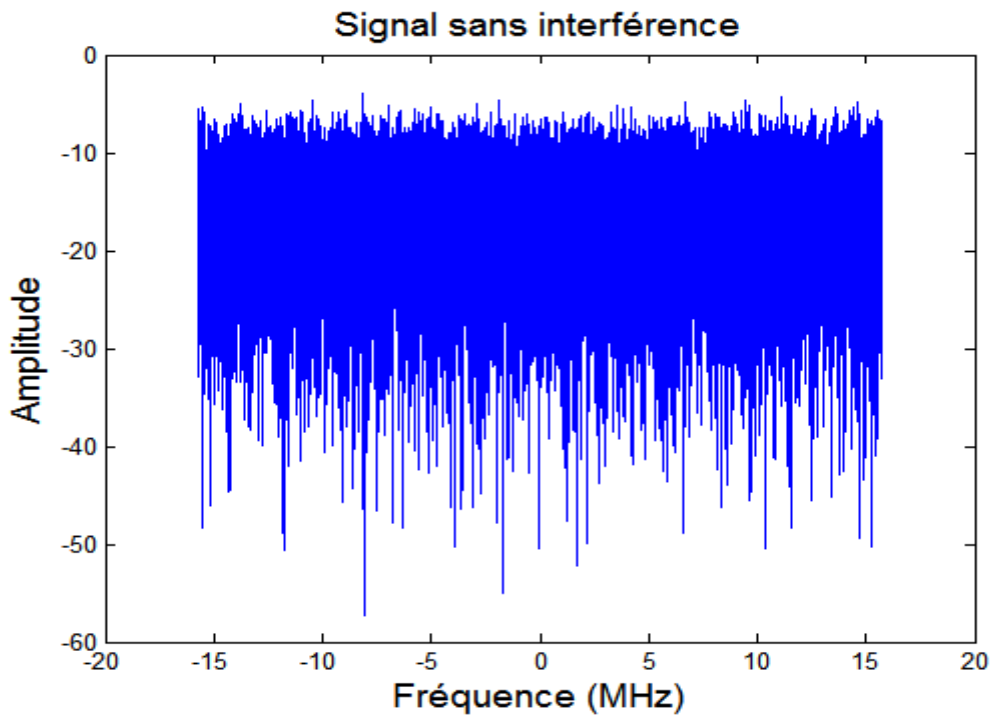
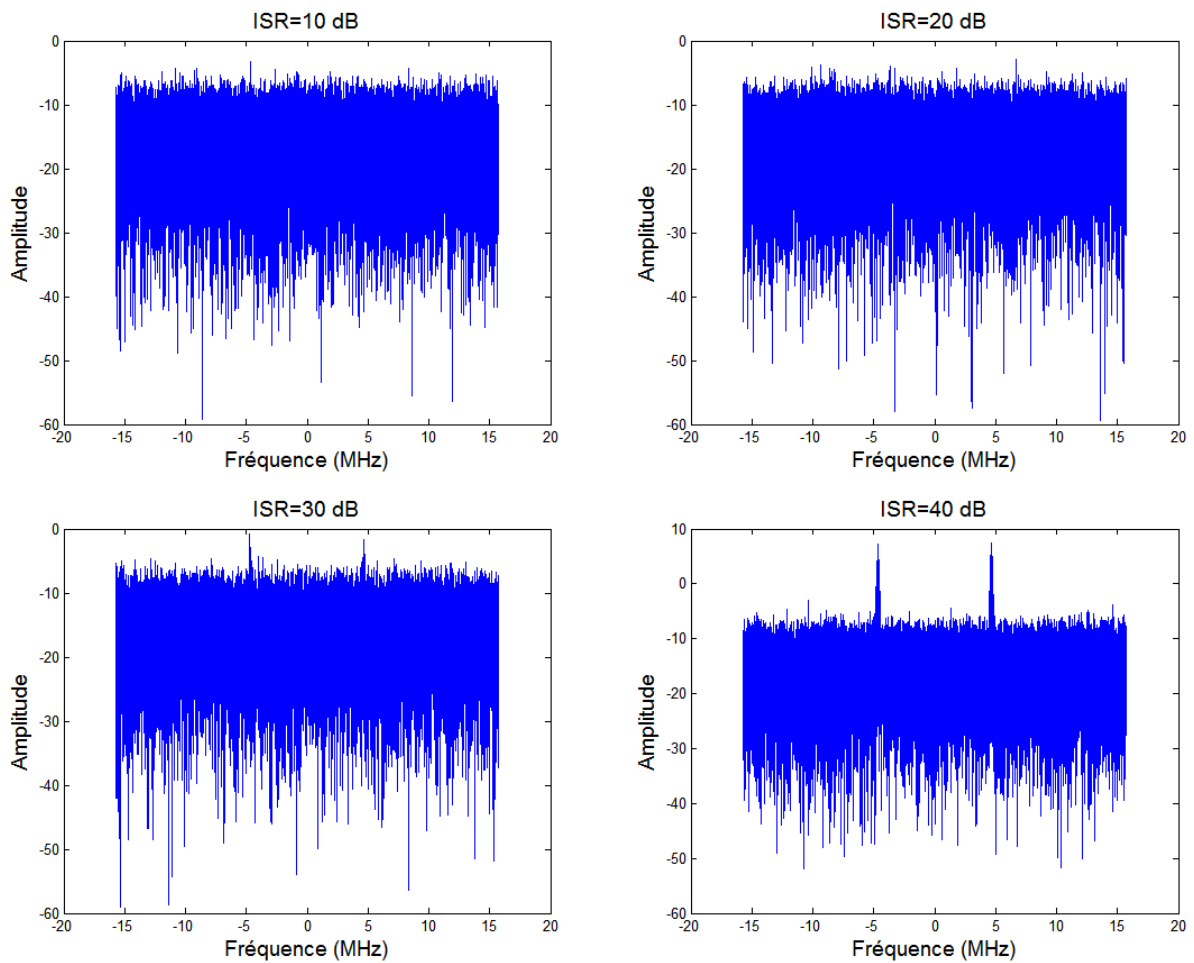


Figure IV. 4. Amplitude du signal E5aI dans le domaine fréquentiel sans interférence.



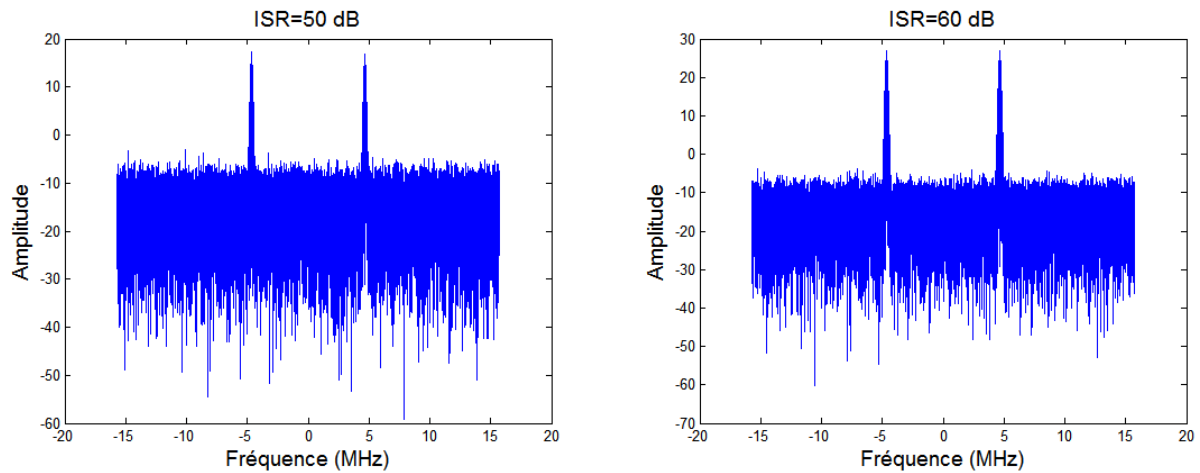


Figure IV. 5. Amplitude du signal E5aI dans le domaine fréquentiel contaminé par une interférence DMA, ISR varie entre 10dB à 60dB.

IV. 3. Méthode proposée

IV.3.1. Transformée en ondelettes discrètes (DWT)

L'idée de base de la transformée en ondelettes est de représenter tout un signal arbitraire $x(t)$ comme une superposition d'un ensemble d'ondelettes ou d'une fonction de base (ondelette mère) [60]. La transformée en ondelettes mère d'un signal continu $x(t)$ est définie par l'équation suivante [63, 64]:

$$c(a, b) = \int_{\mathfrak{R}} x(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (\text{IV.2})$$

où, les indices $c(a, b)$ sont appelés coefficient d'ondelette du signal $x(t)$, a est la dilatation et b est la translation, $\Psi(t)$ est la fonction de transformation (l'ondelette mère). Les coefficients d'ondelette sont trouvés en évaluant l'intégral dans l'équation IV.2 en temps continu. Alors que dans le cas du temps discret, les coefficients sont trouvés en passant un vecteur ($x(n)$, n entier) à travers un banc de deux filtres, le premier est un filtre passe-bas et le second est un filtre passe-haut [64, 65]. Cependant, en général, comme le choix d'une ondelette optimale dépend du problème donné, la conception DWT peut obtenir par plusieurs méthodes.

Sherlock et Monro [66], développé une méthode pour déterminer les coefficients d'un banc de filtre (passe-bas et passe-haut). Cette approche est une méthode polyphasée basée sur une méthode de factorisation proposée par Vaidyanathan [67]. Dans ce mémoire, une fois que les coefficients des filtres passe-bas et passe-haut sont déterminés par la méthode de Sherlock et al; ces deux filtres ensuite seront utilisés par la DWT, formulant ainsi le problème de conception en ondelettes pour l'identification et la suppression des interférences.

Dans ce qui suit, l'algorithme est brièvement décrit [60, 65, 66]. Soit les coefficients du filtre de mise à l'échelle désignés par h_i , qui sont donnés dans le domaine z par la relation suivante [67]:

$$H(z) = \sum_i h_i z^{-i} \quad (\text{IV.3})$$

Dans la référence [67], proposé le paramétrage de l'espace de tous les bancs de filtres de longueur $2N$, avec N paramètres d'angle :

$$H(z) = (1 \ 0) R_0 \left(\prod_{i=1}^{N-1} \wedge R_i \right) \begin{pmatrix} 1 \\ z^{-1} \end{pmatrix} \quad (\text{IV.4})$$

$$\text{avec : } \wedge = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & z^{-1} \end{pmatrix}, \text{ et } R_i = \begin{pmatrix} c_i & s_i \\ -s_i & c_i \end{pmatrix},$$

où $c_i = \cos(\theta_i)$ et $s_i = \sin(\theta_i)$

Sherlock et Monro [66], trouver a partir les formules précédents les coefficients récursive $\{h_i^{(k)}\}$ pour un filtre de longueur $2(k+1)$. Ils sont obtenus pour les coefficients de filtres pairs suivant:

$$\begin{cases} h_0^{(k+1)} = c_k h_0^{(k)} \\ h_{2i}^{(k+1)} = c_k h_{2i}^{(k)} - s_k h_{2i-1}^{(k)}, i = 1, 2, \dots, k-1 \\ h_{2k}^{(k+1)} = -s_k h_{2k-1}^{(k)} \end{cases} \quad (\text{IV.5})$$

$$\begin{cases} h_1^{(k+1)} = s_k h_0^{(k)} \\ h_{2i+1}^{(k+1)} = s_k h_{2i}^{(k)} + c_k h_{2i-1}^{(k)}, i = 1, 2, \dots, k-1 \\ h_{2k+1}^{(k+1)} = c_k h_{2k-1}^{(k)} \end{cases} \quad (\text{IV.6})$$

Les coefficients de filtre passe-bas est donné par les coefficients $\{h_i^{(k)}\}$ (équations IV.5 et IV.6). Cependant, les coefficients du filtre passe-haut sont trouvés en utilisant l'équation suivante :

$$g_i = (-1)^{i+1} h_{2N-1-i} \quad (\text{IV.7})$$

IV.3.2. Classificateur de machines à vecteurs de support (SVM)

Pour les problèmes de classification binaire, SVM effectue la reconnaissance de formes en déterminant un hyperplan de séparation optimal pour des modèles linéairement séparables. Afin d'effectuer une séparation linéaire, une transformation utilisant une fonction de noyau, mappe les données qui représentent les deux classes de l'entrée d'origine dans un espace de dimensionnel plus élevé (voir la Figure IV.6). Dans notre cas, la fonction noyau de base radiale est utilisée pour différencier entre l'interférence et non interférence. La largeur du

noyau RBF (γ) et le paramètre de régularisation C sont les deux paramètres à optimiser en utilisant les algorithmes génétiques mentionné dans la section suivante afin d'améliorer l'apprentissage de classifieur SVM.

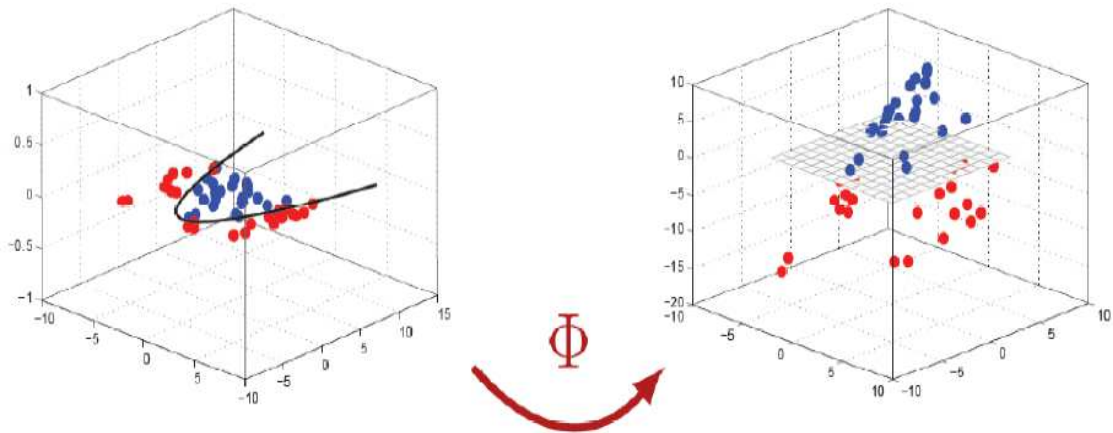


Figure IV. 6. Transformer l'espace de départ vers un espace de dimension plus élevé.

Pour la construction des bases de données (Figures IV.2 à IV.5) pour le classifieur SVM, on a appliqué deux étapes : (i) le signal dans le domaine temporel est divisée en L paquets non superposés. Nous avons trouvé, empiriquement, que la longueur appropriée de chaque paquet peut être $L=100$ coefficients. (ii) la deuxième étape est la division des données trouvé dans l'étape précédente en 3 ensembles : apprentissage, validation, et test :

- ❖ Le premier ensemble est utilisé pour estimer les paramètres du modèle SVM.
- ❖ L'ensemble de validation est utilisé pour trouver le meilleur modèle, c'est-à-dire la meilleure architecture.
- ❖ L'ensemble de test est utilisé pour estimer les performances du meilleur modèle sélectionné.

Notre base de données est constituée de deux classes (classe 1 : non interférence, classe 2 : interférence), la répartition de cette dernière en trois ensembles est donnée par le tableau suivant :

Tableau IV. 2. Nombre total des échantillons apprentissage, validation et test.

	Classe 1	Classe 2
Apprentissage	100×100	100×100
validation	100×100	100×100
Test	630×100	630×100

IV.3.3. Optimisation des coefficients d'ondelettes par les algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques (GA) sont des méthodes heuristiques qui fonctionnent avec un ensemble de solutions appelées populations. Les solutions d'une population sont prises et utilisées pour construire une nouvelle population. Ceci est motivé par l'espoir que la nouvelle population sera meilleure que l'ancienne. L'AG obtient la solution optimale après une série de calculs itératifs. Il génère des populations successives de solutions alternatives représentées par un chromosome, jusqu'à l'obtention de résultats acceptables [68, 69]. Une fonction fitness évalue la qualité de la solution dans l'étape d'évaluation. Les principaux opérateurs qui ont un impact aléatoire sur les valeurs de la fonction fitness sont: sélection, croisement et mutation. Les chromosomes sont sélectionnés pour la reproduction en évaluant la fonction fitness.

Dans la littérature scientifique, on trouve plusieurs travaux où la DWT a suscité un intérêt croissant dans nombreuses applications de traitement et d'analyse du signal, mais la question qui mérite d'être posée : *Quelle est le type d'ondelette mère appropriée pour la détection et la suppression des interférences des signaux GNSS?*

Pour cela, nous avons fait deux scénarios, le premier scénario est de tester quelques types d'ondelettes qui nous semblent être les plus utilisées dans le traitement du signal: ondelette de Haar, ondelettes de Daubechies, ondelette de Symlet et ondelette biorthogonale. Le deuxième scénario est d'optimiser les coefficients d'ondelettes en utilisant les algorithmes génétiques.

Nous pensons que les performances des ondelettes pourraient être améliorées si la conception est pilotée par la précision de la classification des interférences. Dans ce contexte, la représentation polyphasée de la transformée en ondelettes discrète (DWT) basée sur l'optimisation de l'algorithme génétique, comme mentionné dans la section précédente, est exploitée pour améliorer la précision de la classification. Tel que la représentation permet de générer un banc de filtres en ondelettes à partir d'un ensemble de paramètres angulaires, afin de minimiser l'erreur de classification. Les principales étapes de l'optimisation par ondelettes proposée en utilisant l'algorithme génétique sont les suivants :

- 1 La population initiale est créée de manière aléatoire avec un nombre pair d'individus. Un individu est caractérisé par le vecteur des paramètres du classificateur SVM (la régularisation C , et la largeur de gaussien γ), les paramètres angulaires $\{\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_{N-1}\}$ dont les valeurs sont dans l'intervalle $[0, 2\pi]$ correspondant au coefficient du banc de filtres (passe-bas et passe-haut) et le niveau de décomposition en ondelettes D . Donc le chromosome est représenté par le vecteur : $\{C, \gamma, \theta_0, \theta_1, \dots, \theta_{N-1}, D\}$.

- 2 Pour chaque chromosome, on calcul la valeur de la fonction de fitness correspondante.
- 3 Générer les $2N$ coefficients des filtres passe-bas et passe-haut à partir les paramètres angulaires. Ensuite, on applique la DWT sur chaque signal GNSS.
 - Un modèle de classificateur SVM est construit à partir le vecteur initial des paramètres correspondant aux caractéristiques d'ondelettes générées pour les deux classes (classe 1: signal sans interférence, classe 2: signal avec interférence). Ensuite, on calcule la précision de la classification pour définir la valeur de la fonction fitness du chromosome.
 - Après avoir évalué la fonction fitness des chromosomes de la population initiale, on effectue ensuite les opérateurs : sélection, croisement et mutation, afin de créer une nouvelle population qui contient les meilleurs solutions.
- 4 Retourner à l'étape 2, si le critère d'arrêt n'est pas satisfaisant.
- 5 Le meilleur chromosome est sélectionné, ce dernier contient les meilleurs paramètres qui donnent le minimum de l'erreur de classification de classifier SVM.

IV. 4. Résultats de la simulation

La contre-mesure de l'interférence pulsée, la plus courante, est la méthode de suppression d'impulsions dans le domaine temporel. Le schéma principal de la suppression numérique d'impulsions dans la partie numérique de la chaîne radiofréquence du récepteur GNSS est illustré par la Figure IV.7.

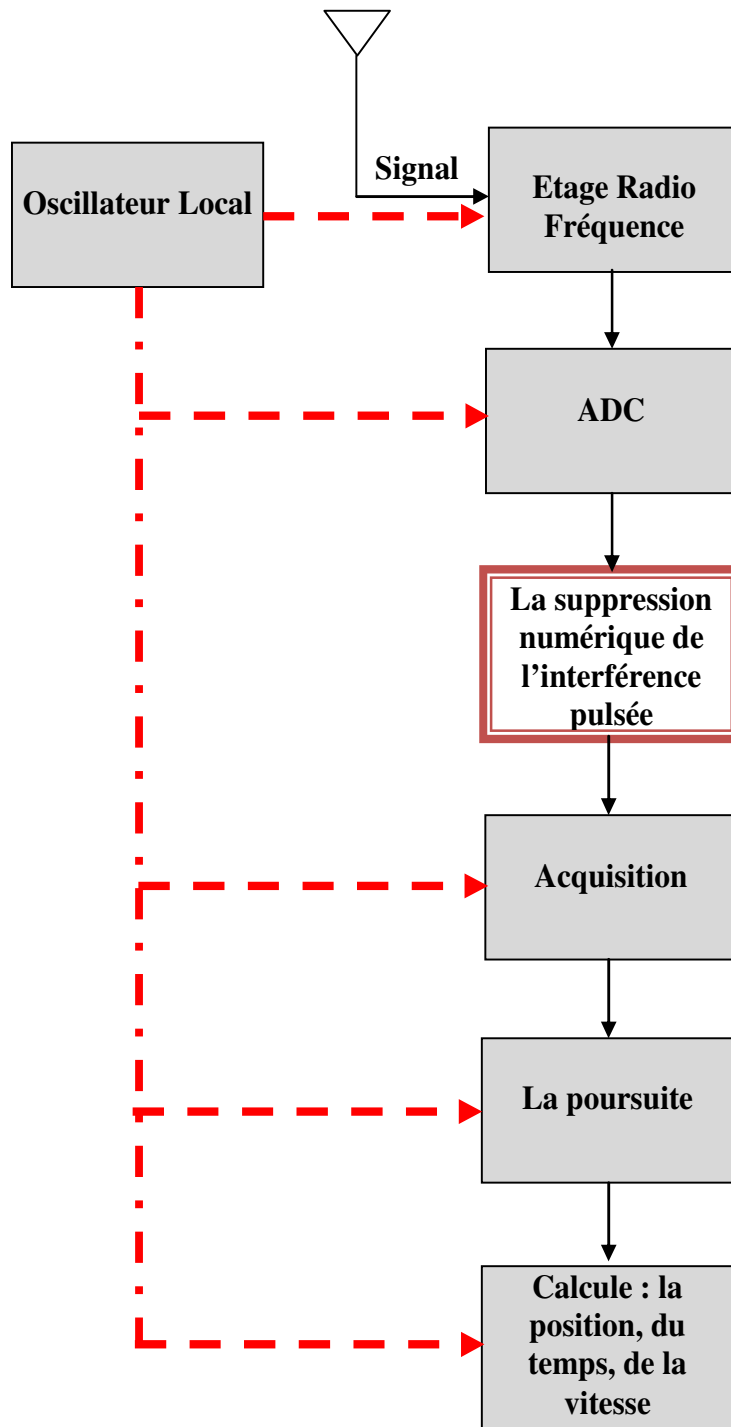


Figure IV. 7. Schéma bloc de la suppression numérique de l'interférence pulsée.

Ce type de circuit numérique fournit une excision d'interférence pulsée par le moyen d'une opération de seuillage sur les échantillons à la sortie du convertisseur ADC. Fondamentalement, chaque échantillon est comparé à un niveau de seuil numérique, qui est établi en fonction d'une estimation de la puissance de bruit thermique uniquement «les impulsions sont courtes et ont une très grande amplitude par rapport au niveau de bruit». Dans notre travail, la stratégie de suppression et d'identification des interférences est différente.

Afin d'éviter le problème de seuillage, nous avons proposée une méthode de suppression automatique des interférences basée sur le classifieur SVM.

Pour évaluer les performances de la méthode proposée sur les bases de données mentionnées précédemment (Figure IV.2 à IV.5), nous avons utilisés trois critères : la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne $RMSE$, le coefficient de corrélation R et le taux d'identification des interférences $Acc(\%)$.

La racine de l'erreur quadratique moyenne ($RMSE$) ou racine de l'écart quadratique moyen (en anglais, Root Mean Square Error) est une mesure fréquemment utilisée des différences entre les vraies valeurs (valeurs d'échantillon du signal original sans interférence) et les valeurs et signal récupéré après la suppression des interférences. Le critère $RMSE$ est donné par l'équation suivante :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (IV.8)$$

où : y_i est le signal original, \hat{y}_i est le signal récupéré, et N est le nombre d'échantillons.

Le deuxième critère d'évaluation est le coefficient de corrélation, qu'il indique le degré de similitude entre deux signaux (le signal récupéré et le signal propre origine). Il peut être décrit comme suit :

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}}_i)^2}} \quad (IV.9)$$

où : \bar{y}_i est la moyenne du signal original et $\bar{\hat{y}}_i$ est la moyenne du signal récupéré.

Dans le cas de l'identification des interférences, nous avons besoin d'un critère de précision. Dans notre cas nous avons choisi de calculer le taux de classification ou d'identification, ce critère il est donné par la formule suivante:

$$Acc(\%) = \frac{P}{N} \times 100 \quad (IV.10)$$

P : Echantillons bien classées.

N : Nombre d'échantillons des classes cibles.

Dans la suite, nous avons développé deux stratégies, une analyse DWT-SVM et une autre méthode basée sur l'optimisation des coefficients d'ondelettes avec l'intermédiaire de l'SVM (GA-DWT-SVM), pour l'objectif d'identifier et supprimer les interférences dans les récepteurs GNSS.

IV.4.1. DWT-SVM

L'identification et la suppression des interférences par ondelettes sont effectuées à l'aide de la boîte d'outils MATLAB, «*Wavelets Toolbox*». Elle est basée sur une décomposition en ondelettes utilisant les fonctions 'Haar', 'db2', 'sym4', 'rbio4.4', et 'bior4.4', suivie par un seuillage automatique en utilisant le classifieur SVM.

Les Figures IV.8 à IV.10, présentent les $RMSE$, R , $Acc(\%)$ obtenues pour le signal avec $ISR=0dB$.

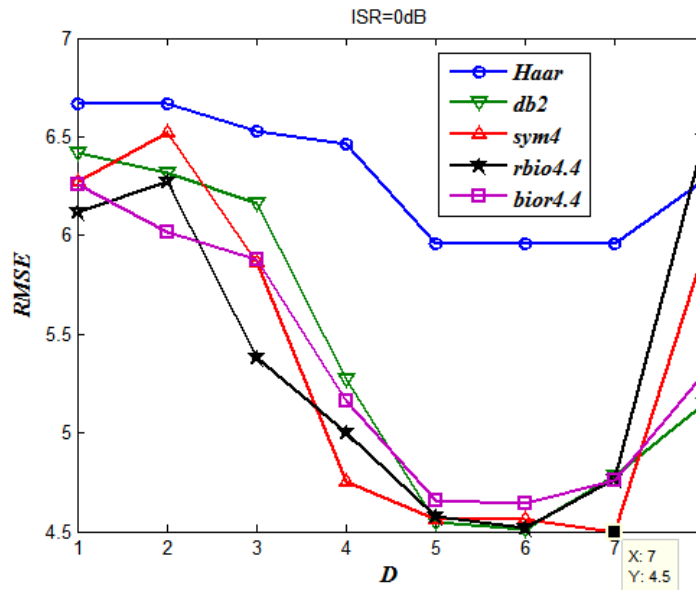


Figure IV. 8. Résultats d'identification et suppression dans le cas $ISR=0dB$, en terme de $RMSE$, pour les différents types ondelettes en fonction de nombre de décomposition D .

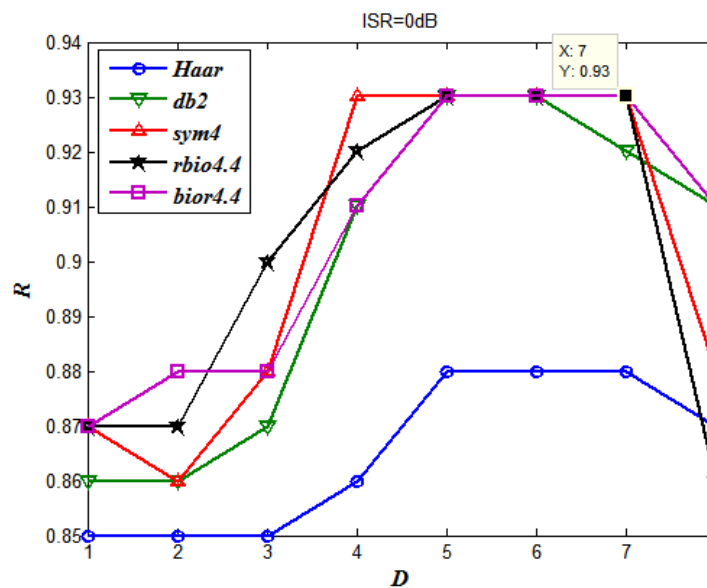


Figure IV. 9. Résultats d'identification et suppression dans le cas $ISR=0dB$, en terme de R , pour les différents types ondelettes en fonction de nombre de décomposition D .

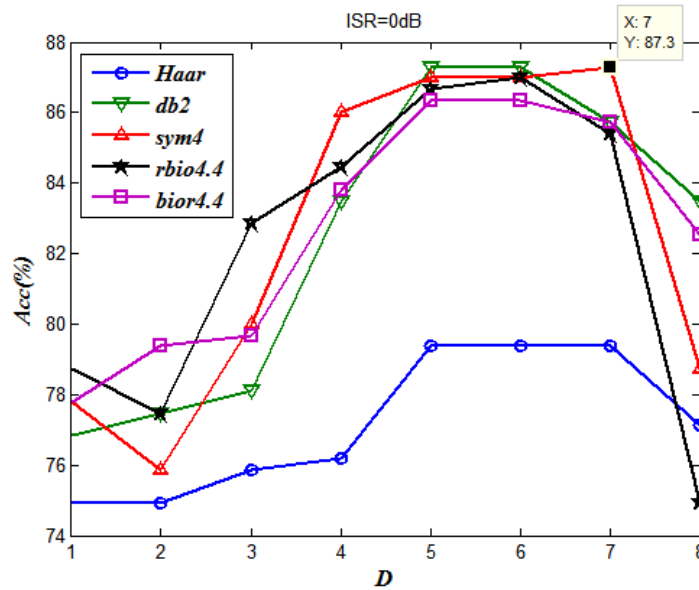


Figure IV. 10. Résultats d'identification et suppression dans le cas $ISR=0dB$, en terme de $Acc(\%)$, pour les différents types ondelettes en fonction de nombre de décomposition D .

Les critères d'évaluations $RMSE$, R , $Acc(\%)$, varient d'une manière remarquable pour les cinq types d'ondelettes utilisées (Ondelettes de Haar, db2, sym4, rbio4.4, et bior4.4). Les meilleurs résultats obtenus pour les différents types d'ondelettes sont donnés dans le tableau IV.3. Comme montré le tableau IV.3, pour les différentes familles des ondelettes appliquées sur ce signal ($ISR=0dB$), l'ondelette Sym4 avec une décomposition $D=7$ donne des résultats meilleurs par rapport Haar, db2, sym4, et bior4.4, en termes de $RMSE$, R et $Acc(\%)$. La représentation de spectre du signal dans le domaine fréquentiel est donnée dans la Figure IV.13.

Tableau IV. 3. Les meilleurs résultats obtenus pour les différents types d'ondelettes ('Haar', 'db2', 'sym4', 'rbio4.4', et 'bior4.4').

DWT	D	$RMSE$	R	$Acc(\%)$
db1	5	5.96	0.88	79.37
db2	5	4.55	0.93	87.30
Sym4	7	4.50	0.93	87.30
rbio4.4	6	4.52	0.93	86.98
bior4.4	6	4.64	0.93	86.35

Les Figures IV.11 à IV.13 représentent l'identification (en couleur rouge) et la suppression des interférences dans le domaine temporel et fréquentiel (densité spectrale de puissance DSP), respectivement.

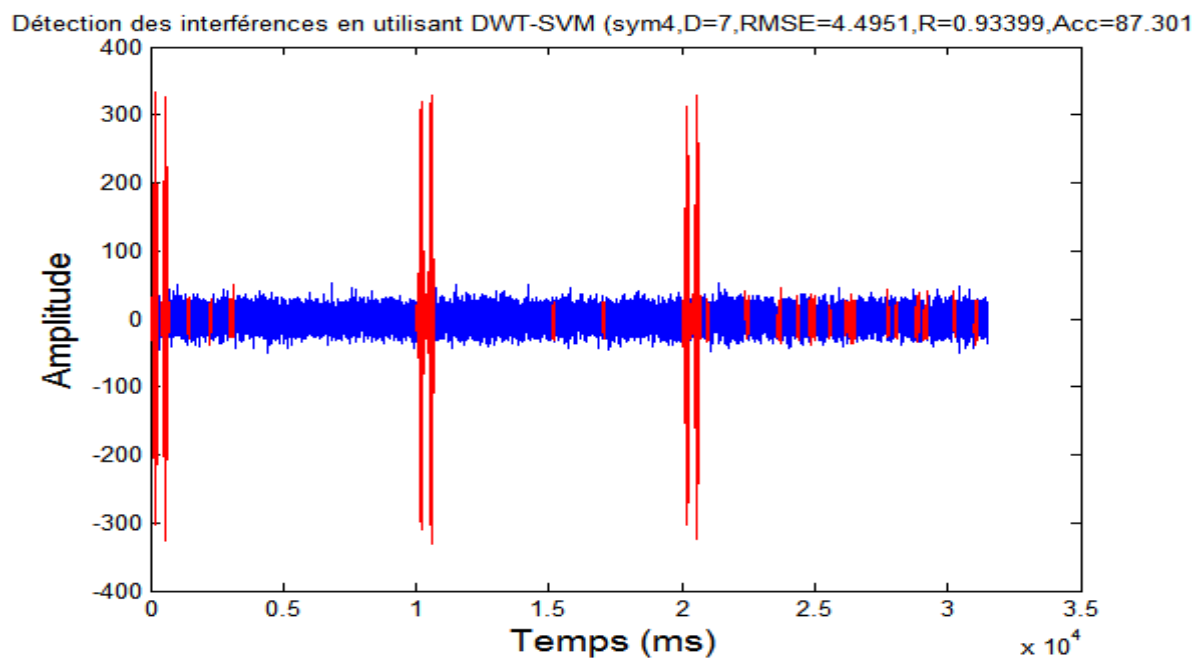


Figure IV. 11. L'identification des interférences (en rouge) dans le domaine temporel, en utilisant la méthode DWT-SVM, ondelette : Sym4, le nombre de décomposition égal à 7.

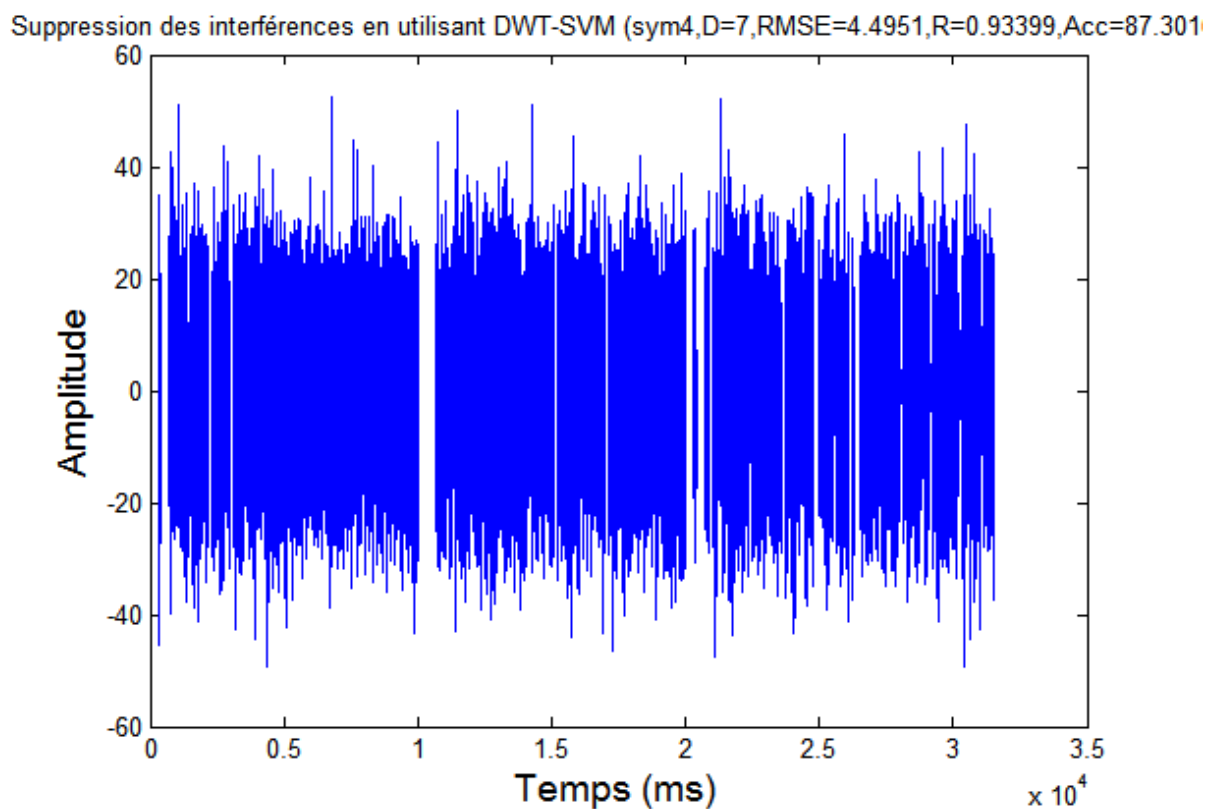


Figure IV. 12. La suppression des interférences en utilisant la méthode DWT-SVM, ondelette : Sym4, $D=7$.

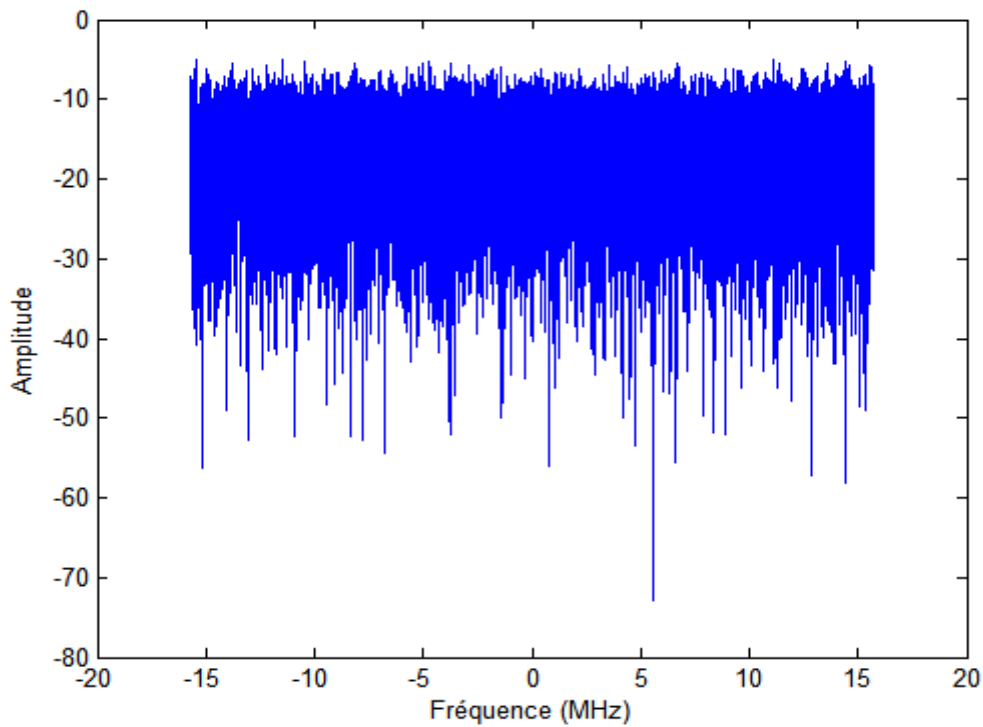


Figure IV. 13. La suppression des interférences dans le domaine fréquentiel, en utilisant la méthode DWT-SVM, ondelette : Sym4, $D=7$.

Les résultats pour l'identification et la suppression des signaux GNSS avec un rapport signal interféré entre 10dB à 60dB de notre méthode DWT-SVM sont présentés dans les Figures suivantes (Figures IV.14 à IV.16). Pour une meilleure illustration, le tableau IV.4 montre les meilleurs résultats obtenu sur les différentes bases de données (ISR varie entre 10dB à 60dB). D'après ce tableau, on constate que lorsqu'ISR est maximum (voir la Figure IV.17), l'identification des interférences est meilleure ($Acc=92.70\%$).

Tableau IV. 4. Les meilleurs résultats obtenus pour les différents types d'ondelettes, et les différents ISR.

<i>ISR(dB)</i>	<i>DWT</i>	<i>D</i>	<i>RMSE</i>	<i>R</i>	<i>Acc(%)</i>
10	bior4.4	2	7.42	0.81	68.89
20	bior4.4	3	6.66	0.85	74.60
30	sym4	3	7.17	0.82	70.48
40	bior4.4	4	5.96	0.88	79.05
50	bior4.4	5	4.21	0.94	89.21
60	db2	7	3.47	0.96	92.70

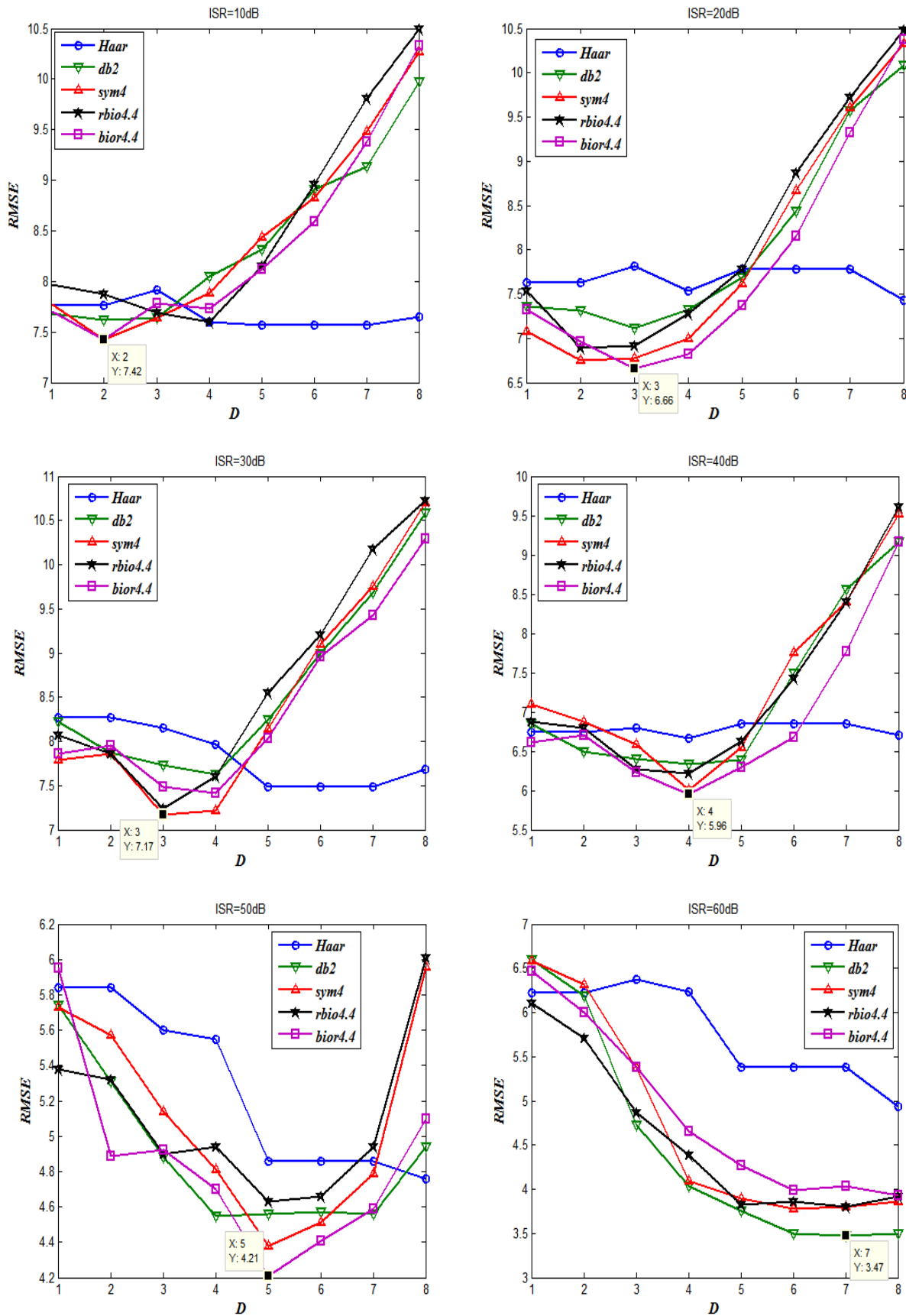


Figure IV. 14. Performance de la méthode DWT-SVM, en terme de RMSE.

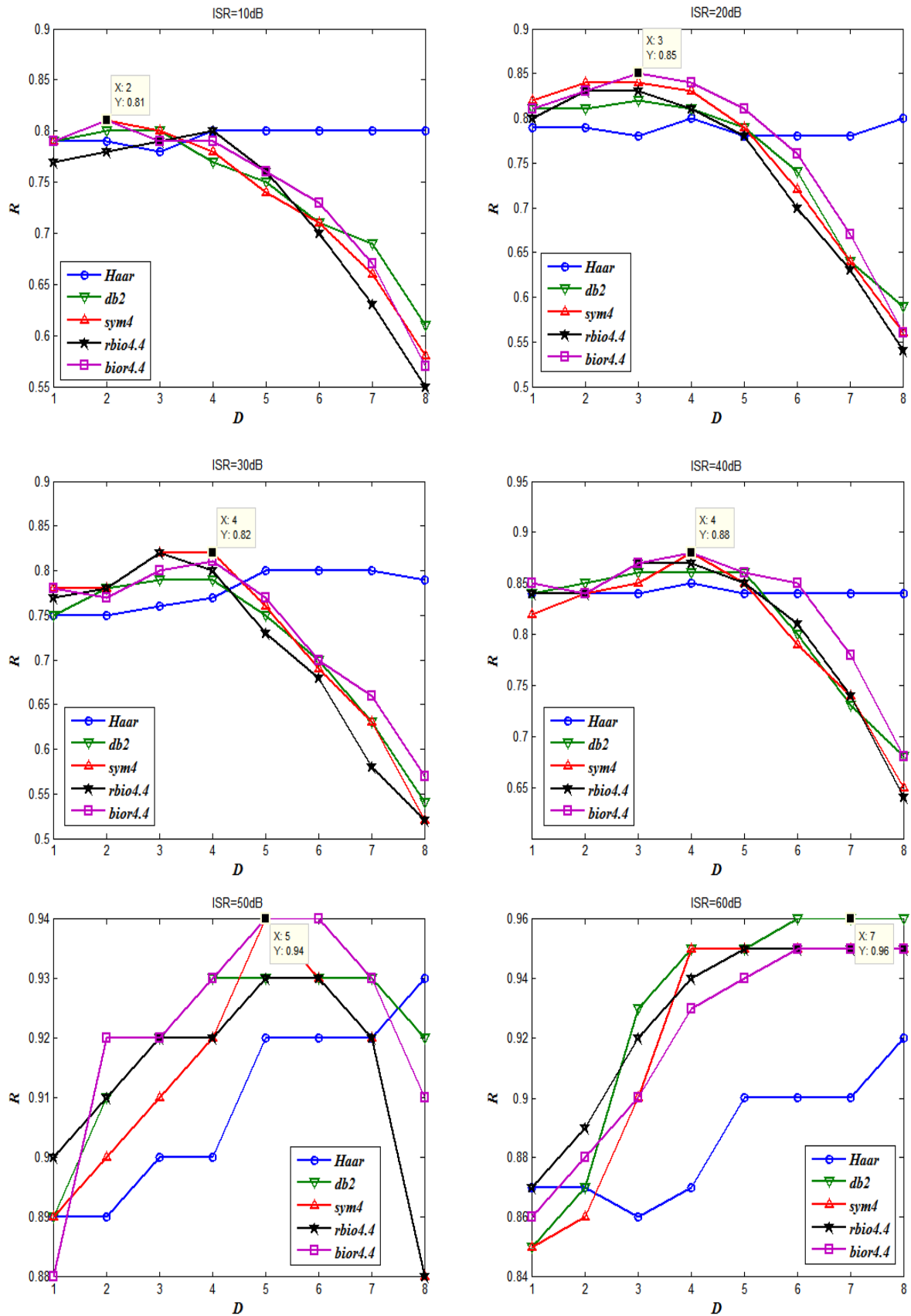


Figure IV. 15. Performance de la méthode DWT-SVM, en terme de R .

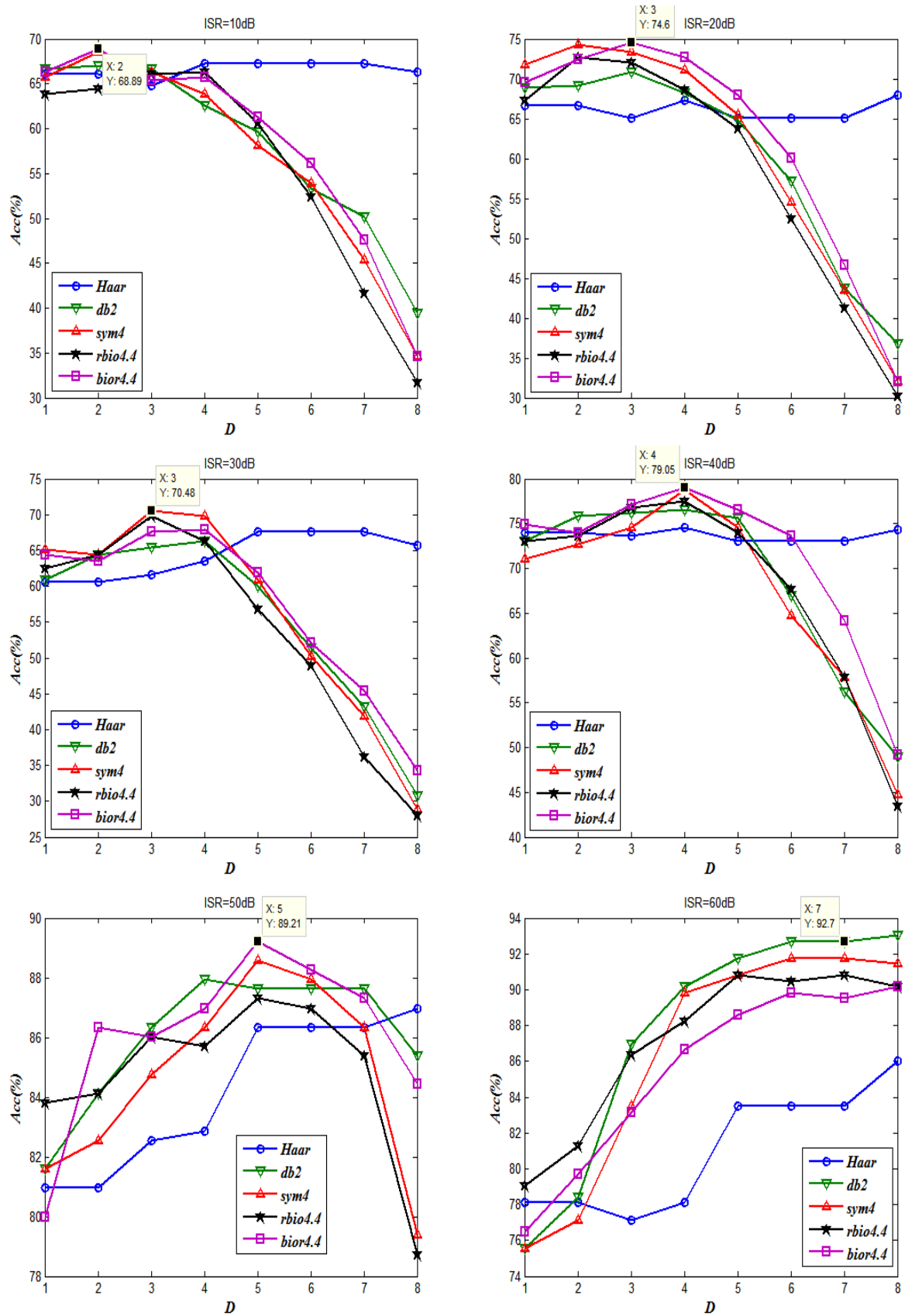


Figure IV. 16. Performance de la méthode DWT-SVM, en terme de $Acc(\%)$.

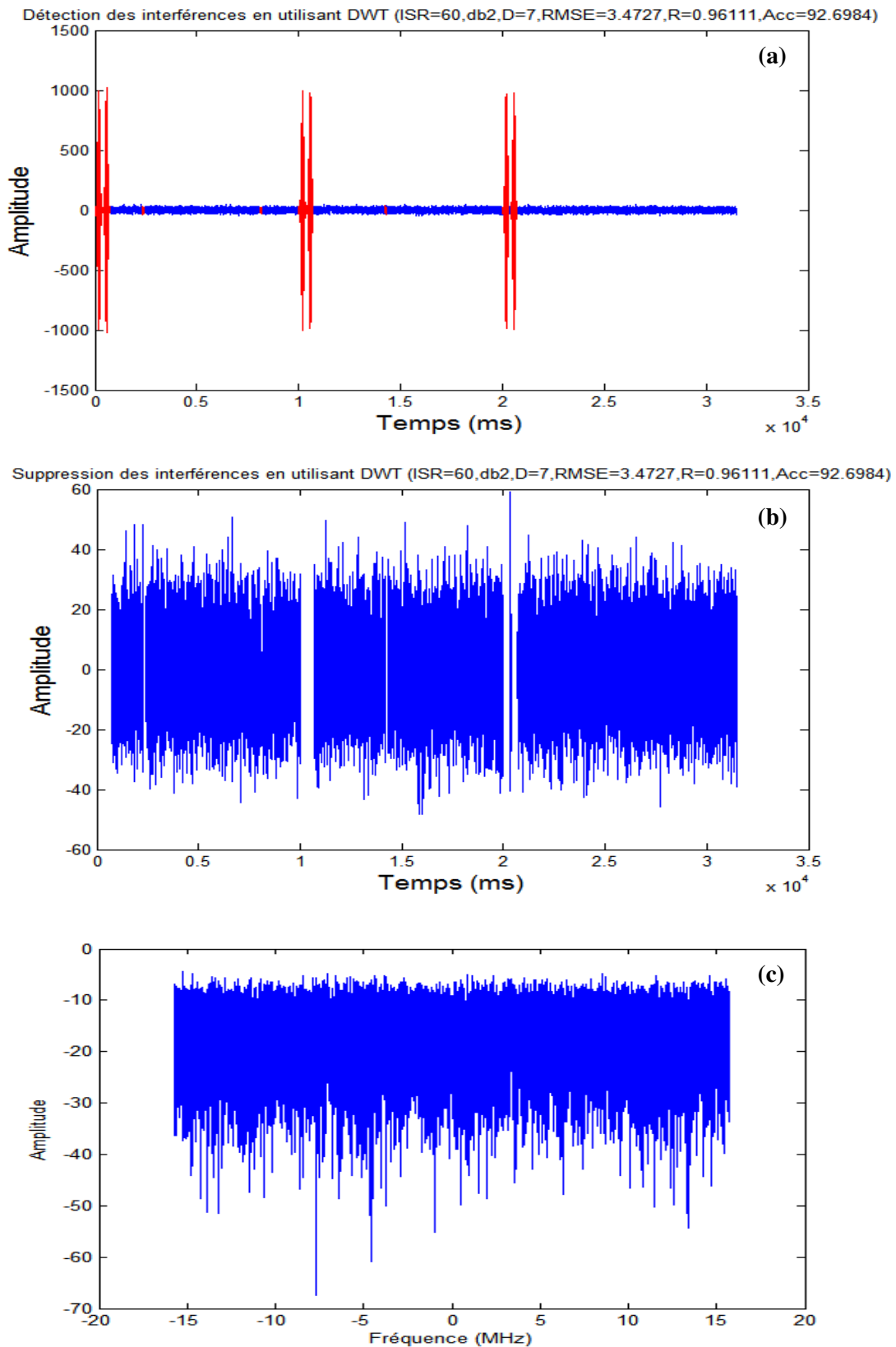


Figure IV. 17. Identification et suppression des interférences, en utilisant la méthode DWT-SVM, ondelette : db2, $D=7$, et $ISR=60dB$, (a) identification des interférences, (b) suppression des interférences, (c) DSP du signal traité.

IV.4.2. GA-DWT-SVM

Dans la littérature scientifique, il n'y a pas une ondelette qui soit meilleure qu'une autre. Tout dépend de l'application utilisée. D'après les résultats trouvés dans la section précédente, dans certains cas, l'ondelette *db2* sera optimale. Pour d'autres bases de données, ce sera le pire des choix possibles. Pour cela nous avons proposée une méthode d'optimisation des coefficients d'ondelettes basée sur les algorithmes génétiques et le seuillage automatique SVM. Algorithme proposé pour l'identification et la suppression des interférences basée sur l'AG (voir la section IV.3.3):

Étape 1: On génère une population initiale de taille $n=50$, représentant le nombre de chromosomes. Puis on choisit au hasard les gènes qui composent chaque chromosome sur l'intervalle de recherche :

C, γ	$\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_{N-1}$	D
Les paramètres SVM	Les paramètres angulaires	Décomposition

La qualité de la population initiale est très importante pour la génération de meilleures solutions. La diversité de la population est très importante pour éviter la convergence prématurée vers des minimums locaux. Cette diversité de population se définit initialement et se maintient en combinant diverses stratégies de croisement et de mutation.

Étape 2: On évalue chaque chromosome par la fonction fitness, ce qui permet de déduire sa valeur d'aptitude. La fonction fitness est l'erreur de classification donnée par l'équation suivante :

$$Err(\%) = 100 - Acc(\%) \quad (IV.11)$$

avec *Err* est l'erreur de classification, et *Acc* le taux de classification.

Étape 3: On exécute les cycles de génération de populations. Chaque nouvelle génération remplace la précédente. Le nombre de cycle x est déterminé au départ.

Dans chaque cycle, n chromosomes sont choisis pour reproduction et croisement deux à deux. Après la création de la $x^{ème}$ population, les chromosomes vont évoluer de façon telle que cette dernière génération contient des chromosomes qui sont meilleurs que ceux des générations précédentes. Notre configuration de AG est donnée par le tableau suivant :

Tableau IV. 5. Paramètres de GA utilisés dans cette application.

Les paramètres de AG	valeurs
La taille de la population	50
Le nombre maximum de générations	50
Le croisement	Simple point
Taux de croisement	0.9
La mutation	Uniforme
Taux de mutation	0.01

Étape 4: Pour évaluer numériquement les performances de la méthode basée sur les algorithmes génétiques et SVM, nous avons calculé la racine de l'erreur quadratique moyenne (*RMSE*), le coefficient de corrélation *R*, et le taux de classification *Acc*(%) sur les signaux GNSS, avec *ISR=0dB* (voir le tableau IV.6) et les différents *ISR* comme mentionnés dans le tableau IV.7. En observation générale, il apparaît clairement que la méthode GA-DWT-SVM est la plus performante en termes de taux d'identification des interférences, *Acc*(%) est varié entre 92% à 94.50%.

Tableau IV. 6. Résultats obtenus en utilisant les algorithmes génétiques et SVM, *ISR=0dB*.

<i>N</i>	<i>D</i>	<i>RMSE</i>	<i>R</i>	<i>Acc</i> (%)
2	10	4.10	0.95	93.00
4	6	3.78	0.95	94.50
6	8	4.15	0.94	92.00
8	7	4.32	0.94	93.50

Tableau IV. 7. Résultats obtenus en utilisant les algorithmes génétiques et SVM, *ISR* varie entre 10*dB* à 60*dB*.

<i>ISR</i>	<i>N</i>	<i>D</i>	<i>RMSE</i>	<i>R</i>	<i>Acc</i> (%)
10	2	7	7.26	0.82	56.50
10	4	5	6.74	0.85	59.00
10	6	5	6.69	0.85	60.50
10	8	5	6.99	0.83	60.00
20	2	3	6.61	0.85	61.00
20	4	3	6.40	0.86	61.50
20	6	6	6.62	0.85	61.00
20	8	5	6.83	0.84	65.50
30	2	4	7.65	0.79	57.50
30	4	4	7.04	0.83	60.50
30	6	5	7.59	0.80	61.00
30	8	6	6.87	0.84	63.00
40	2	5	6.30	0.86	72.50
40	4	6	6.07	0.87	73.50
40	6	5	5.91	0.88	75.50
40	8	5	5.49	0.9	75.00
50	2	8	4.11	0.95	90.50
50	4	7	3.93	0.95	93.00
50	6	7	3.93	0.95	94.50
50	8	7	3.91	0.95	93.50
60	2	9	3.57	0.96	98.50
60	4	9	3.59	0.96	99.00
60	6	9	3.52	0.96	98.50
60	8	10	3.53	0.96	98.50

Tableau IV. 8. Les meilleurs résultats obtenus en utilisant les algorithmes génétiques et l'SVM, et les différents ISR.

<i>ISR(dB)</i>	<i>N</i>	<i>D</i>	<i>RMSE</i>	<i>R</i>	<i>Acc(%)</i>
10	6	5	6.69	0.85	60.50
20	4	3	6.40	0.86	61.50
30	4	4	7.04	0.83	60.50
40	8	5	5.49	0.9	75.00
50	8	7	3.91	0.95	93.50
60	6	9	3.52	0.96	98.50

Le tableau IV.8 présente les meilleurs résultats obtenus en utilisant la méthode GA-DWT-SVM, avec ISR varie entre 10dB à 60dB. On a obtenu un taux d'identification *Acc(%)* minimum et maximum de l'ordre de 60.50% et 98.50%, pour les différents types d'ondelettes optimisées avec les algorithmes génétiques, ainsi que pour des filtres passe-bas et passe-haut de longueur $2N$. Le minimum *RMSE* obtenu est dans le cas $ISR=60dB$, largeur des filtres égale à 12, une décomposition égale à 9. Les coefficients d'ondelettes obtenues en utilisant les algorithmes génétiques (filtres passe-bas et passe-haut) sont effectués sur signaux GNSS de test pour l'objectif d'une projection d'espace originale vers un autre espace plus adapté, le taux d'identification est 98.50%.

Dans le cas $ISR=60dB$, la Figure IV.18 montre le comportement de convergence vers la solution optimale (l'évolution de la fonction fitness) au fur et à mesure des générations, avec une erreur de classification égale à 1.5% (taux de classification 98.5%).

La Figure IV.19, représente les coefficients d'ondelettes obtenues par l'AG pour la phase d'analyse et de synthèse.

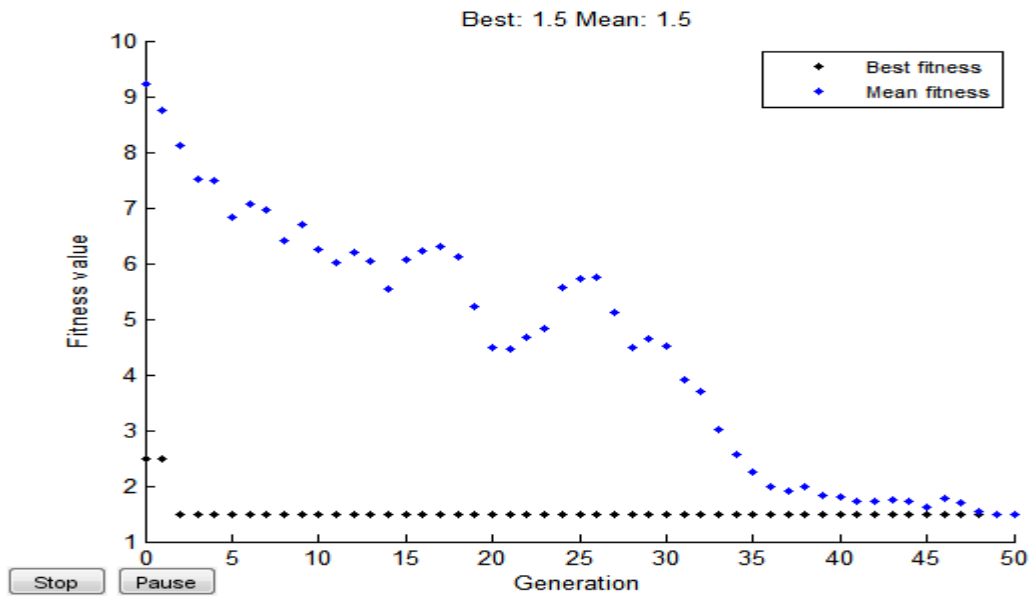


Figure IV. 18. Evolution de la fonction fitness en fonction de nombre de générations.

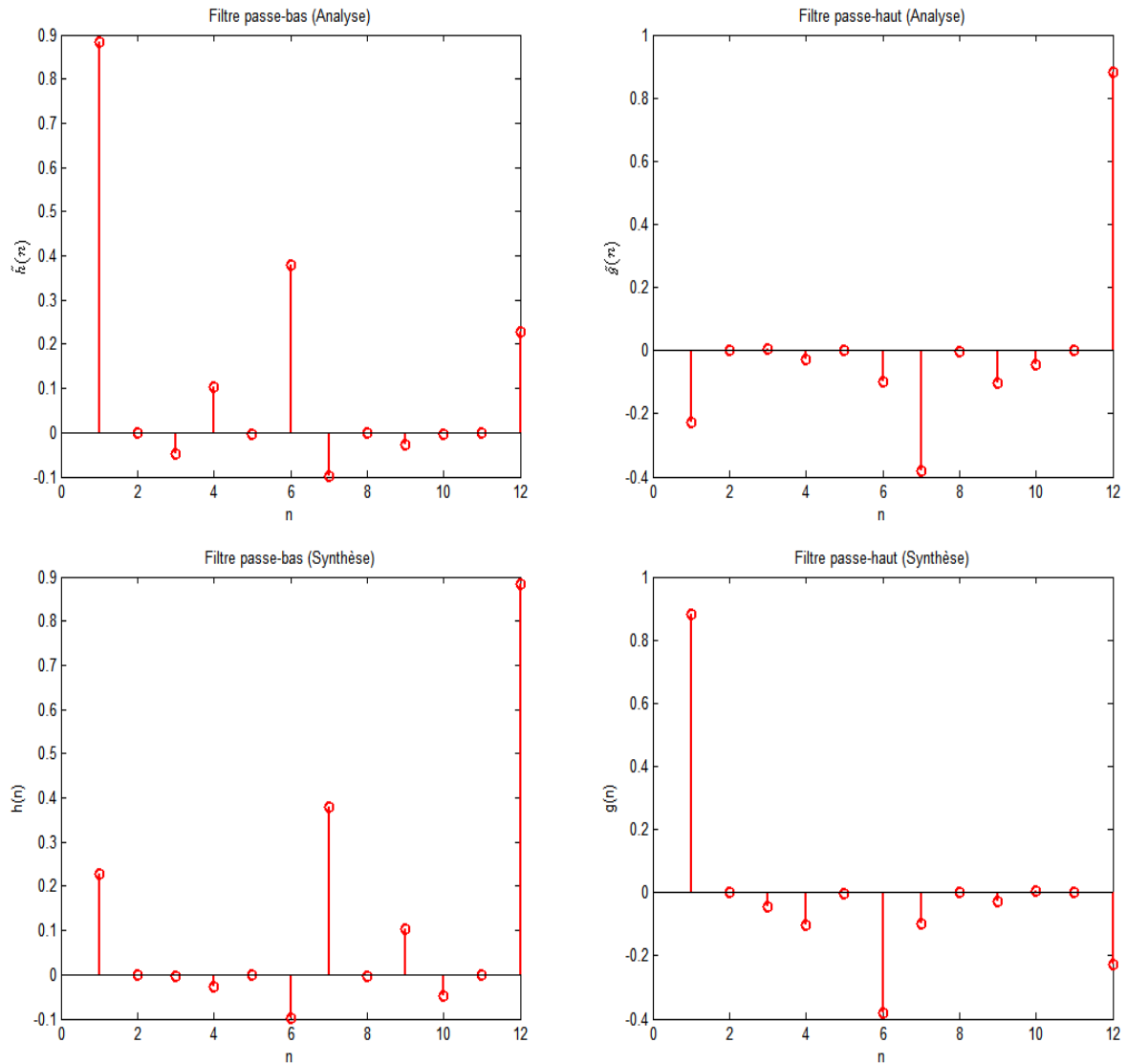


Figure IV. 19. Filtre passe-bas et filtre passe-haut pour la phase d'analyse et de synthèse.

L'application de notre algorithme GA-DWT-SVM est montrée dans la figure suivante.

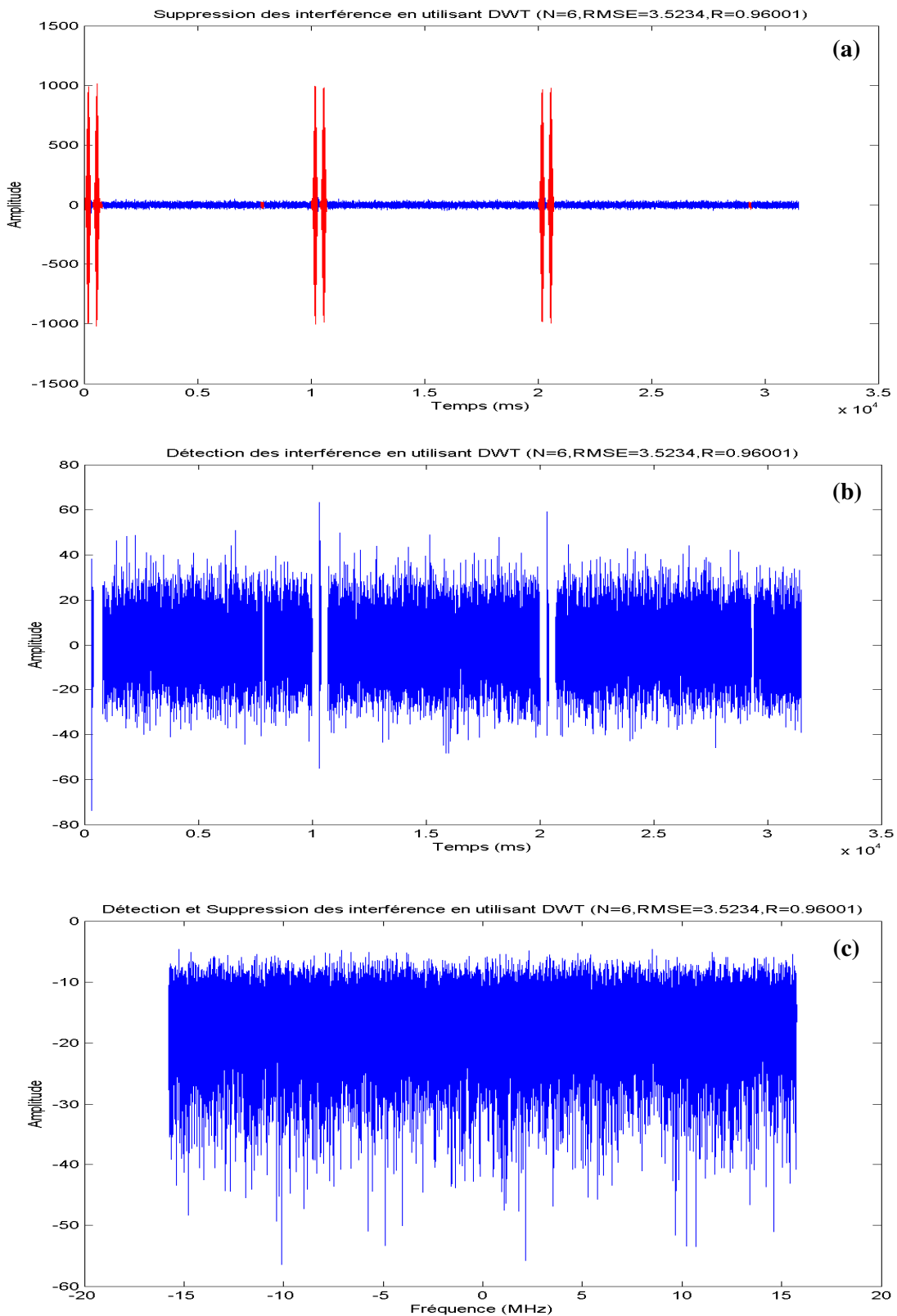


Figure IV. 20. Application de l'algorithme GA-DWT-SVM, (a) localisation des interférences, (b) suppression des interférences, (c) la densité spectrale de puissance du signal traité.

La Figure IV.21 représente les résultats obtenues de la $RMSE$, R et $Acc(\%)$ pour les deux méthodes DWT-SVM et GA-DWT-SVM avec les différents valeurs de ISR, ce qui nous permet de remarquer que la meilleure combinaison $RMSE-R-Acc$ est celui de l'application de la méthode proposée basée sur l'optimisation des coefficients d'ondelettes sur les signaux GNSS.

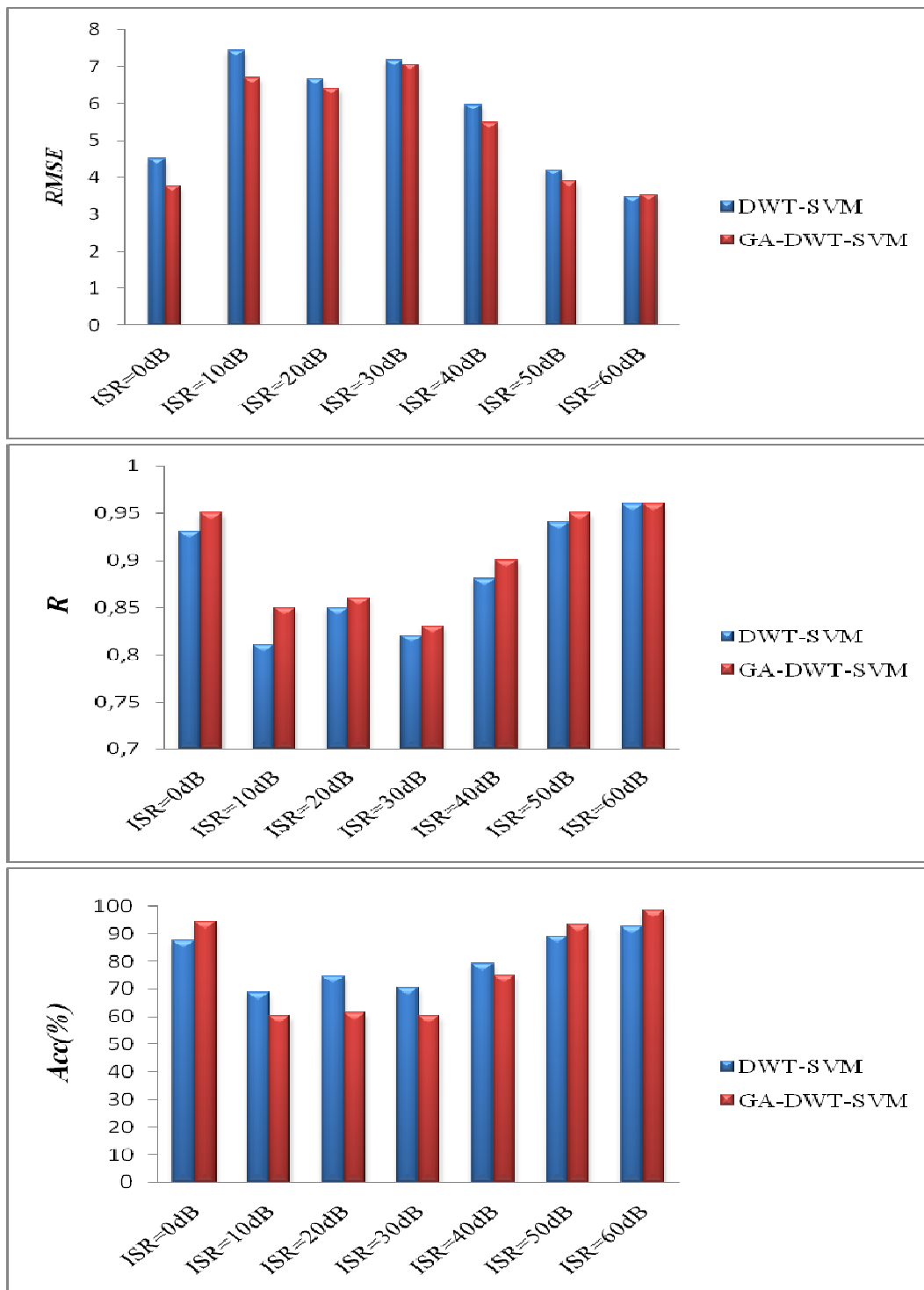


Figure IV. 21. Les performances d'identification et de suppression de l'interférence en termes de $RMSE$, R , $Acc(\%)$, en fonction des différentes valeurs ISR.

IV. 5. Conclusion

L'objectif principal de ce mémoire est l'optimisation des coefficients d'ondelettes, adapté à notre problème d'identification et de suppression des interférences dans les récepteur GNSS. Cette méthode est basé sur les algorithmes génétiques, pour l'objective de trouvé les meilleurs combinaisons entre les coefficients d'ondelettes et le seuillage automatique (SVM). Cette dernière est considérée comme étant un outil essentiel dans la chaine radiofréquence du récepteur GNSS.

Pour valider notre méthode, nous avons proposée deux stratégies, la première est à base de la DWT-SVM et la deuxième basé sur une technique hybride entre l'optimisation des coefficients d'ondelettes DWT et une méthode de classification SVM (GA-DWT-SVM). Nous avons pu montrer que l'algorithme proposée GA-DWT-SVM est mieux adapté à l'identification et la suppression des interférences dans les récepteur GNSS.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le phénomène des interférences est un phénomène très pénalisant sur les systèmes de navigation GNSS, le récepteur GNSS peut facilement être aveuglé et perturbé par ces signaux. Dans ce mémoire, une classification des différentes sources d'interférences a été fournie et les différents types d'interférence ont été discutés.

Ce travail a pour objectif de présenter l'application des différents types d'ondelettes sur les signaux GNSS déjà proposées dans la littérature scientifique pour faire face à ce problème des interférences, ensuite proposée une méthode adaptée à notre problème basée sur l'optimisation des coefficients d'ondelettes avec l'intermédiaire d'une méthode de seuillage automatique (SVM), et enfin faire une étude comparative afin d'évaluer leurs capacités à identifier et supprimer les interférences dans les récepteurs GNSS.

Habituellement, la représentation des signaux GNSS dans le domaine temporel n'est pas le mieux adapté pour le processus de traitement, puisqu'il on ne peut pas faire une séparation entre l'information utile et les interférences. Nous effectuons, dans une première étape, un changement d'espace originale vers un autre espace en utilisant la transformée en ondelettes. Evidemment, cette transformation permet la localisation précise des interférences dans le domaine DWT, et enfin l'estimation automatique du seuil avec l'utilisation de la capacité de classification SVM.

Notre objectif est l'identification et la suppression des interférences dans les récepteurs GNSS, d'où la nécessité d'une détection automatique des interférences basé sur le classifieur SVM. Les techniques d'ondelettes sont largement utilisées pour la détection et l'analyse de signaux GNSS. Dans la littérature scientifique, plusieurs études comparatives de différentes familles d'ondelettes pour la classification des signaux GNSS, sont démontrés que les performances des systèmes de classification dépendent de la sélection de l'ondelette mère. Cependant, la sélection d'une ondelette mère appropriée pour le signal analysé est un critère important. Cela offre la possibilité d'effectuer une procédure d'optimisation pour obtenir les meilleurs coefficients d'ondelette adaptés à notre problème. En effet pour améliorer les performances des ondelettes dans la classification des signaux GNSS; il faut construire des coefficients d'ondelettes optimisés pour cette application spécifique.

Pour cela, nous avons proposée deux stratégies, la première est basée sur l'application de quatre familles d'ondelettes (Daubechies, Symlets, biorthogonales et ondelettes biorthogonales réversibles) et un seuillage automatique SVM. La deuxième méthode est la construction d'une ondelette spéciale basée sur les paramètres angulaires en utilisant les

algorithmes génétiques, ainsi que un classifieur SVM pour l'identification et la suppression des interférences est appliqué sur les signaux GNSS.

Les résultats que nous avons obtenus, et que nous avons présentés dans ce travail, sont assez satisfaisants du point de vue amélioration et sa grande capacité de la localisation des interférences de notre méthode après l'optimisation des coefficients en ondelettes, par rapport à la transformée en ondelettes classiques (Daubechies, Symlets, biorthogonales et ondelettes biorthogonales réversibles).

Par ailleurs, de nombreuses pistes sont possibles pour améliorer et développer de nouvelles solutions dans le domaine de traitement des signaux GNSS.

- ✚ Utilisation des méthodes de prétraitement des données.
- ✚ Application d'une autre méthode de classification par exemple apprentissage profond (Deep Learning).
- ✚ L'optimisation des coefficients d'ondelettes en utilisant d'autres techniques évolutionnaires (Particle Swarm Optimization-PSO, Differential Evolution-DE, Firefly Algorithm-FA, Bat Algorithm).
- ✚ Utilisation des algorithmes robustes de seuillage, comme DONOHO.
- ✚ Diminuer la complexité de quelques algorithmes existants par la réduction du temps d'exécution.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Z. A. Khezzar, "Traitement des signaux GNSS," *Thèse de doctorat, Option : Micro-Ondes, Université de Batna 2*, 2021.
- [2] V. Truong, "DIGUE: Détection d'Interférences Gnss pour Uav autonomE," *Thèse de doctorat. Institut Polytechnique de Paris*, 2020.
- [3] E. Kaplan, C. Hegarty, "Understanding GPS: principles and applications," *Artech House, Northwestern University*, 2005.
- [4] R. W. Renbiao, W. D. L. Wenyi, L. Wang, J. Qiongqiong, "Adaptive Interference Mitigation in GNSS," *Springer Nature Singapore*, 2015.
- [5] Z. A. Khezzar, R. Benzid, L. Saidi, "New Thresholding Technique in DCT Domain for Interference Mitigation in GNSS Receivers," *Traitement du Signal*, vol. 37, pp. 169-180, 2020.
- [6] N. Ahmed, T. Natarajan, R. R. Kamisetty, "Discrete cosine transform," *IEEE transactions on Computers*, vol. 100, pp. 90-93, 1974.
- [7] M. J. Shensa, "The discrete wavelet transform: wedding the a trous and Mallat algorithms," *IEEE Transactions on signal processing*, vol. 40, pp. 2464-2482, 1992.
- [8] J. Ma, G. Plonka, "The curvelet transform," *IEEE signal processing magazine*, vol. 27, pp. 118-133, 2010.
- [9] G. M. Someswar, T. P. S. C. Rao, D. R. Chigurukota, "Global Navigation Satellite Systems and Their Applications," *International Journal of Software and Web Sciences*, vol. 3, pp. 17-23, 2013.
- [10] L. Jacobson, "GNSS Markets and Applications," *Artech House, Northwestern University*, 2007
- [11] P. D. Groves, "Principles of GNSS, inertial, multisensor integrated navigation systems," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 30, pp. 26-27, 2015.
- [12] F. Duquenne, S. Botton, F. Peyret, D. Bétaille, P. Willis, "GPS: localisation et navigation par satellites " *Hermes science publications*, 2005.
- [13] N. Roussel, "Application de la réflectométrie GNSS à l'étude des redistributions des masses d'eau à la surface de la Terre," *Thèse de doctorat, Spécialité : Télédétection et Géodésie Spatiale, Université Toulouse III - Paul Sabatier*, 2016.
- [14] P. Bosser, "GNSS systèmes Globaux de positionnement par satellite," *école nationale des sciences géographic*, 2013.
- [15] Z. A. Khezzar, "Acquisition rapide des signaux GNSS par un récepteur logiciel," *Magister en électronique, Option: Micro-onde pour Télécommunication, Université de Batna*, 2011.
- [16] H. W. Bernhard, H. Lichtenegger, E. Wasle, "GNSS—global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo and more," *Springer Science & Business Media*, 2007.
- [17] M. Kara, "Réseau de capteurs sans fil: étude en vue de la réalisation d'un récepteur GPS différentiel à faible coût " *Thèse de doctorat Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II*, 2009.
- [18] S. Malys, J. Slater, "Maintenance and enhancement of the World Geodetic System 1984," *In Proceedings of the 7th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1994)*, pp. 17–24, 1994.
- [19] J. B.-Y. Tsui, "Fundamentals of global positioning system receivers: a software approach," *John Wiley & Sons*, vol. 137, 2005.
- [20] https://www6.inrae.fr/cahier_des_techniques/content/download/3806/34077/version/2/file/05_CH1_LAHAYE_gnss.pdf.
- [21] A. Annex, "Global positioning system standard positioning service signal specification," *United States Coast Guard Navigation Center*, 1995.
- [22] J. Grimes, "Global Positioning System Precise Positioning Service Performance Standard," *Thèse de doctorat, USA*, 2007.

- [23] B. Beldjilali, "Traitement des signaux GNSS pour optimiser les récepteurs de localisation," *Thèse de doctorat, Spécialité : Signaux et systèmes de Télécommunication, Université de Tlemcen*, 2017.
- [24] Galileo, "http://ec.europa.eu/dzs/energy_transport/galileo/intro/challenge, European satellite navigation system, economic and political challenge," 2009.
- [25] Galileo, "European Space Agency, : Europe's global navigation satellite system, <http://www.satellite-navigation.eu/>," 2010.
- [26] A. Goundafi, "Développement d'un modèle de gestion d'objets géo-localisables centralisé utilisant différents moyens de communication dans une environnement OSGI," *Université du Québec à Chicoutimi*, 2010.
- [27] M. Mosavi, M. Rezaei, M. Pashaian, M. Moghaddasi, "A fast and accurate anti-jamming system based on wavelet packet transform for GPS receivers," *GPS Solutions*, vol. 21, pp. 415-426, 2018.
- [28] L. Musumeci, F. Dovic, "Use of the wavelet transform for interference mitigation in global navigation satellite systems," *International Journal of Navigation and Observation*, vol. 2014, pp. 1687-5990, 2014.
- [29] R. J. Landry, P. Mouyon, D. Lekaim, "Interference mitigation in spread spectrum systems by wavelet coefficients thresholding," *European Transactions on Telecommunications*, vol. 9, pp. 191-202, 1998.
- [30] A. V. Oppenheim, R. Schaffer, "Discrete-Time Signal Processing," *Upper Saddle River, NJ: Pearson Education*, vol. 2, 2006.
- [31] D. Borio, "GNSS Acquisition in the Presence of Continuous Wave Interference," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 46, pp. 46-60, 2010.
- [32] F. Dovic, "GNSS interference threats and countermeasures," *Artech House*, 2015.
- [33] J. Morlet, G. Arens, E. Fourgeau, D. Giard, "Wave propagation and sampling theory-Part I: Complex signal and scattering in multilayered media," *Geophysics*, vol. 47, pp. 203-221, 1982.
- [34] K. P. Soman, *Insight into wavelets: From theory to practice*: PHI Learning Pvt. Ltd, 2010.
- [35] A. Cohen, "Ondelettes et Traitement Numérique du Signal," *ISBN 2-225-83954-9*, Masson.
- [36] O. Kadri, "Compression d'images fixes par Ondelettes géométriques par utilisation des Curvelets et différents types d'interpolation dans la quantification scalaire," *Mémoire de Magister. Université Mohamed Khider Biskra*, 2014.
- [37] S. A. Mallat, "Wavelet tour of signal processing " *Academic Press, 2ème édition*, 1998.
- [38] Y. Meyer, "Ondelettes et opérateurs I-Ondelettes," *Hemann, Paris*, 1990.
- [39] M. Bergounioux, "Mathématiques pour le traitement du signal : Cours et exercices corrigés," *2ème édition , Dunod*, 2012.
- [40] F. Truchete, "Ondelettes pour le signal numérique," *Edition Hermès, Paris* 1998.
- [41] Y. Bentaleb, "Analyse par ondelettes des signaux sismiques: Applications aux ondes de surface," *Thèse de doctorat, Université de Mohammed V-AGDAL, Rabat*, 2006.
- [42] C. K. Scott, D. Gelatt, M. P. Vecchi., "Optimization by simulated annealing," *Science*, vol. 220, pp. 671-680, 1983.
- [43] F. Glover, "Tabu search—part I," *ORSA Journal on computing*, vol. 1, pp. 190-206, 1989.
- [44] A. Gacem, "Utilisation des méthodes d'optimisations métaheuristiques pour la résolution du problème de répartition optimale de la puissance dans les réseaux électriques," *Thèse de magister, Université d'El-oued*, 2010.
- [45] E. A. Lemamou, "Ordonnancement de projet sous contraintes de ressources à l'aide d'un algorithme génétique à croisement hybride de type OER," *Maîtrise en informatique, Université du Québec*, 2009.
- [46] N. Zerari, "Les algorithmes génétiques en maintenance," *Thèse de magister, Université El Hadj Lakhdar, Batna*, 2006.
- [47] N. Harrag, "Optimisation des paramètres d'un réseau Ad Hoc par algorithmes génétiques," *Thèse de magister, Université Ferhat Abbas, Sétif*, 2011.
- [48] V. B. Gantovnik, "An Improved Genetic Algorithm for the Optimization of Composite Structures," *Thèse de doctorat, PIS University Virginia, Blacksburg, Virginia, USA*, 1999.

- [49] G. Legault, "Un algorithme génétique pour la conception topologique de réseaux téléinformatiques à commutation de paquets," *Mémoire de maîtrise en mathématique, Université du Québec*, 2004.
- [50] I. Chouchani, "Utilisation d'un algorithme génétique pour la composition de services web," *Mémoire maîtrise en informatique, Université du québec à montreal*, 2010.
- [51] E. Taillard, P. Siarry, J. Dréo, A. Petrowski, "Métaheuristiques pour l'optimisation difficile," *Eyrolles*, 2003.
- [52] V. Thomas, M. Yaldizoglu, "Présentation des algorithme génétique et de leurs applications en économie," *Revue d'économie politique*, vol. 114, pp. 711-745, 2004.
- [53] R. L. Haupt, S. E. Haupt, "Practical Genetic Algorithms," *2nd edition, John Wiley & Sons edition, New York, USA*, 2004.
- [54] T. Bendib, "Modélisation et simulation du transistor DGMOSFET en utilisant les Algorithmes Génétiques," *Mémoire de magister en électronique, Université de Batna 2*, 2008.
- [55] D. Rahiel, "Répartition optimale des puissances en tenant compte des méthodes heuristiques d'un système électrique complexe," *Thèse de doctorat, USTO, Université de Oran*, 2009.
- [56] H. Bouzeboudja, "Optimisation des puissances actives par les Algorithmes Génétiques," *Thèse de Doctorat, Option: génie électrique, Université Djilali Liabes, Sidi Bel Abbes, Algérie*, 2006.
- [57] A. Kada, "Contribution aux techniques et algorithmes évolutifs de traitement de l'information et de communication: Applications en télécommunications, sécurité et réseaux," *Thèse de doctorat, Spécialité : Automatique et Technologie de l'information, Université Mohammed V, Rabat*, 2007.
- [58] F. Douak, A. Tafsast, D. Fouan, K. Ferroudji, A. Bouakaz, N. Benoudjit, "A wavelet optimization approach for microemboli classification using RF signals," *IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, pp. 1-4, 2016.
- [59] C. Cortes, V. Vapnik, "Support-vector networks," *Machine learning*, vol. 20, pp. 273-297, 1995.
- [60] A. Daamouche, L. Hamami, N. Alajlan, F. Melgani, "A wavelet optimization approach for ECG signal classification," *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 7, pp. 342-349, 2012.
- [61] B. Marir, M. Kalla, F. Douak, A. Daamouche, "A Modular Support Vector Machine for Active Learning of Urban Remote Sensing Images Classification in Algeria," *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, vol. 46, pp. 515-529, 2017.
- [62] D. A. d. Diego, N. G. Ferrara, J. Nurmi, E. S. Lohan, G. Hein, "Interference mitigation in the E5a Galileo band using an open-source simulator, ," *Inside GNSS*, vol. 11, pp. 55-63, 2016.
- [63] N. Aydin, F. Marvasti, H. Markus, "Emboic Doppler ultrasound signal detection using discrete wavelet transform," *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, vol. 8, pp. 182-190, 2004.
- [64] G. Strang and T. Nguyen, "Wavelets and filter banks," *SIAM*, 1996.
- [65] A. Daamouche and F. Melgani, "Swarm Intelligence Approach to Wavelet Design for Hyperspectral Image Classification," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 6, pp. 825-829, 2009.
- [66] B. G. Sherlock, D. M. Monro, "On the space of orthonormal wavelets," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 46, pp. 1716-1720, 1998.
- [67] P. P. Vaidyanathan, "Multirate Systems and Filter Banks," *Pearson Education India*, 2006.
- [68] C.-L. Huang, C.-J. Wang, "A GA-based feature selection and parameters optimization for support vector machines," *Expert System swith Applications*, vol. 31, pp. 231-240, 2006.
- [69] D. E. Goldberg, "Gentic algoritms in search in Optimization and Machine Learning," *Reading, MA: Addison-Wesley*, 1989.