

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL  
Faculté des sciences et de la technologie  
Département d'Electronique

N° :...../202

*Projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme de  
Master*

**Option : Systèmes des Télécommunications**

**Thème**

*Etude des systèmes CDMA multiporteuses basé sur les ondelettes*

**Présenté Par :**

BOUNAR Alima

HAINÉ Oussama

**Encadré par :**

KEMIH Karim

**Promotion : 2021 /2022**

## ***Remerciements***

Les travaux de recherche ont été conduits au département d'électronique de la Faculté des Sciences et Technologie de l'Université de Jijel. Merci donc aux responsables du département.

Nous souhaiterions en premier lieu, remercier Monsieur « ***K. Kemih*** », notre encadrant de mémoire, pour sa patience, son accompagnement. Ses judicieux conseils nous ont énormément aidés dans notre réflexion, et nous ont permis d'orienter encore plus facilement nos recherches. Sans compter sur sa disponibilité à suivre mes travaux, pendant toute la durée de notre mémoire.

Nous remercions les membres du jury, Monsieur « ***H. Bouridah*** », d'avoir l'amabilité de présider le jury, Mr « ***O. Tekkouk*** », d'avoir accepté d'examiner notre travail. Espérant que le trouve correspondant à leurs attentes avec nos sincères remerciements.

Nos sincères gratitude vont également vers l'équipe de l'université, pour la qualité de l'enseignement qu'ils prodiguent, les bons conseils durant nos années d'étude.

Enfin, nous voudrions exprimer notre profonde gratitude à toutes les autres personnes qui, même sans être citées personnellement, par leurs conseils et leurs diverses compétences, ont tout autant contribué à la réalisation de ce mémoire.

*Ce mémoire est dédié à*

*Nos Parents*

*Nos familles*

*Nos amis*

## ***Résumé***

La transmission des informations à hauts débits dans des systèmes de communication sans fil, nécessite une rigoureuse immunité au bruit et à tous les évanouissements pouvant être rencontrés lors d'une propagation. Le système CDMA multi-porteuse basé sur la transformée de Fourier (MC-CDMA) peut satisfaire les services multi-débits en utilisant des schémas Multicodes et des multi-porteurs utilisés pour la transmission à haut débit, où il a la capacité d'éliminer les interférences avec différentes techniques telles que l'addition du préfixe cyclique et l'égalisation du canal.

Dans ce travail, nous proposons le système de transmission sans fil MC CDMA basé sur la transformée en ondelettes discrète, qui est différent du système classique basé sur la transformée de Fourier. La transformée en ondelettes a un impact sur les performances du système ainsi que la qualité de l'information transmise où elle permet au système d'assurer une parfaite transmission des données à débits élevés robuste au bruit dans un canal d'évanouissements multi-trajets (canal de Rayleigh), et une efficacité spectrale élevée.

**Mots clés** : CDMA, Multi porteuses, Canal de Rayleigh, IFFT, Ondelettes, IDWT.

## ***Abstract***

The transmission of high data rates in wireless communication systems requires a high degree of protection from noise and any fading encountered in the wave propagation. The Fourier transform-based multi-carrier CDMA (MC-CDMA) system can satisfy multi-rate services by using multi-code schemes and multi-carrier services used for high-rate transmission, where it has the ability to remove interference with different techniques such as cyclic prefix addition and channel equalization.

In this study, we propose the discrete wavelet transform (DWT) based multi-carrier CDMA wireless transmission system, which is different from the conventional Fourier transform-based system. The wavelet transform has an effect on the performance of the system as well as the quality of the transmitted data, where it allows the system to provide perfect data transmission and robustness to noise and high spectral efficiency in a fading channel (Rayleigh channel).

**Keywords**: CDMA, Multicarrier, Rayleigh channel, IFFT, Wavelets, IDWT.

## ملخص

يتطلب نقل البيانات عالية السرعة في أنظمة الاتصالات اللاسلكية درجة عالية من الحماية من الضوضاء وأي تلاشي يمكن مصادفته أثناء انتشار الموجة. يمكن لنظام CDMA (MC-CDMA) القائم على تحويل Fourier أن يلبي هذه الاحتياجات بسرعات متعددة وذلك باستخدام رموز ونواقل متعددة في إرسال عالي السرعة، حيث لديها القدرة على إزالة التداخل مع تقنيات مختلفة مثل إضافة البادئة الدورية ومعادلة قناة نقل البيانات.

في هذه الدراسة، نقترح نظام نقل CDMA اللاسلكي القائم على تحويل الموجات المنفصلة (DWT)، والذي يختلف عن نظام تحويل Fourier التقليدي. تحويل الموجة له تأثير على أداء النظام وكذلك على جودة البيانات المرسل، حيث يسمح للنظام بتوفير نقل البيانات بشكل مثالي وحماية ضد الضوضاء والكفاءة الطيفية العالية في قناة Rayleigh.

# Table des matières

Remerciements	
Dédicaces	
Résumé	
Table des figures.....	10
Table des tableaux .....	11
Liste des acronymes.....	12
Introduction générale.....	1

## CHAPITRE 1

1. Introduction .....	5
2. Techniques d'accès multiple .....	5
3. L'étalement spectral ( <i>Spread Spectrum</i> ) .....	8
4. Code d'étalement.....	12
5. Avantages du CDMA .....	13
6. L'OFDM (orthogonal frequency-division multiplexing).....	13
7. Technique MC-CDMA .....	17
8. Conclusion.....	21

## CHAPITRE 2

1. Introduction .....	23
2. La transformée de Fourier .....	23
3. Les ondelettes .....	25
4. Conclusion.....	34

## CHAPITRE 3

1. Introduction .....	36
2. Chaîne de transmission numérique .....	36
3. Canal de transmission.....	37
4. Propriété d'un canal de transmission .....	37
5. Type de canaux.....	40
6. La sélectivité du canal .....	42
7. Conclusion.....	46

## CHAPITRE 4

1. Introduction .....	48
2. La modélisation du canal de Rayleigh .....	48
3. Séquences d'étalement .....	49
4. Simulations et Analyses .....	51

5. Conclusion générale .....	56
<b>Bibliographie</b> .....	59

## Table des figures

<i>Figure 1.1 : Répartitions des ressources en FDMA [12]</i> .....	6
<i>Figure 1.2 : Répartition des ressources en TDMA [12]</i> .....	7
<i>Figure 1.3 : Répartition des ressources en CDMA [12]</i> .....	8
<i>Figure 1.4 : Opération d'étalement spectral</i> .....	9
<i>Figure 1.5 : Schéma de Transmission CDMA</i> .....	10
<i>Figure 1.6 : Schéma de Réception CDMA</i> .....	11
<i>Figure 1.7 : Opération de dés-étalement spectral</i> .....	12
<i>Figure 1.8 : l'orthogonalité des sous-porteuses</i> .....	14
<i>Figure 1.9 : L'orthogonalité des sous-porteuses</i> .....	14
<i>Figure 1.10 : L'insertion du préfixe cyclique</i> .....	15
<i>Figure 1.11 : Le schéma du système d'émission d'OFDM</i> .....	16
<i>Figure 1.12 : Le schéma du système de réception d'OFDM</i> .....	17
<i>Figure 1.13 : Génération d'un signal MC-CDMA</i> .....	18
<i>Figure 1.14 : Transmission MC-CDMA</i> .....	19
<i>Figure 1.15 : Réception MCCDMA</i> .....	20
<i>Figure 2.1 : La transformée de Fourier</i> .....	23
<i>Figure 2.2 : La transformée de Fourier à court terme</i> .....	24
<i>Figure 2.3 : La transformée en ondelettes</i> .....	25
<i>Figure 2.4 : Un exemple d'une ondelette mère</i> .....	26
<i>Figure 2.5 : L'ondelette mère au centre, dilatée à gauche et contractée à droite</i> .....	26
<i>Figure 2.6 : Une analyse d'un signal avec une ondelette de Morlet</i> .....	26
<i>Figure 2.7 : Une décomposition 1D par DWT du signal <math>f(t)</math></i> .....	30
<i>Figure 2.8 : Décomposition d'un signal <math>s</math> par l'algorithme de Mallat</i> .....	30
<i>Figure 2.9 : Une reconstruction 1D par IDWT du signal <math>f(t)</math></i> .....	31
<i>Figure 2.10 : L'algorithme d'analyse et de synthèse multi résolution à l'échelle 3 d'un signal <math>S[n]</math></i> .....	31
<i>Figure 2.11 : Les coefficients d'approximations et détails à l'échelle 3</i> .....	32
<i>Figure 2.12 : L'ondelette de Haar</i> .....	33
<i>Figure 2.13 : La fonction d'échelle de l'ondelette de Haar</i> .....	34

<i>Figure 3.1 : Schéma de base d'une transmission numérique</i> .....	37
<i>Figure 3.2 : Interaction de l'onde électromagnétique avec le milieu de propagation</i> .....	40
<i>Figure 3.3 : Représentation d'un canal à bruit blanc additif gaussien</i> .....	41
<i>Figure 3.4 : Représentation d'un canal de Rayleigh</i> .....	42
<i>Figure 3.5 : Représentation du trajet NLOS</i> .....	42
<i>Figure 3.6 : Représente la réponse impulsionnelle du canal</i> .....	44
<i>Figure 3.7 : La sélectivité d'un canal</i> .....	45
<i>Figure 4.1 : La modélisation du canal de Rayleigh</i> .....	48
<i>Figure 4.2 : l'arbre d'étalement des codes OVSF</i> .....	510
<i>Figure 4.3 : influence du nombre d'utilisateurs sur la qualité de transmission dans un canal de Rayleigh.</i> .....	51
<i>Figure 4.4 Influence de la longueur de la séquence d'étalement sur la qualité de transmission.</i> .....	52
<i>Figure 4.5 : Comparaison entre code Walsh et code d'OVSF dans canal de Rayleigh</i> .....	53
<i>Figure 4.6 : Comparaison entre FFT-MC-CDMA et ondelette-MC-CDMA.</i> .....	54

## **Table des tableaux**

<i>Tableau 1 : Familles d'ondelettes [28]</i> .....	32
---	----



## Liste des Acronymes

<b>FDMA</b>	Frequency Division Multiple Access.
<b>TDMA</b>	Time Division Multiple Access.
<b>CDMA</b>	Code Division Multiple Access.
<b>FHSS</b>	Frequency Hopping Spread Spectrum.
<b>DFSS</b>	Directe Frequency Spread Spectrum.
<b>DSSS</b>	Directe Sequence Spread Spectrum.
<b>SF</b>	Spreading Factor.
<b>FSK</b>	Frequency Shift Keying.
<b>BPSK</b>	Binary Phase Shift Keying.
<b>QPSK</b>	Quadrature Phase Shift Keying.
<b>QAM</b>	Quadrature Amplitude Modulation.
<b>PSK</b>	Phase Shift Keying.
<b>OVSF</b>	Orthogonal Variable Spread Factor.
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing.
<b>TF</b>	Transformé De Fourier.
<b>FFT</b>	Fast Fourier Transform.
<b>IFFT</b>	Inverse Fast Fourier Transform.
<b>IEP</b>	Interférence Entre Porteuses.
<b>IES</b>	Interférence Entre Symboles.
<b>PAPR</b>	Peak-to-Average Power Ratio.
<b>PLC</b>	Power Line Communication.
<b>STFT</b>	Short-Time Fourier Transform.
<b><math>\Psi</math></b>	Ondelette Mère.
<b><math>\varphi</math></b>	Fonction D'Echelle.
<b>TOC</b>	Transformée en Ondelettes Continue.

<b>CWT</b>	Continuous Wavelet Transform.
<b>TOD</b>	Transformée en Ondelettes Discrète.
<b>DWT</b>	Discret Wavelet Transform.
<b>IDWT</b>	Inverse Discret Wavelet Transform.
<b>AMR</b>	Analyse Multi Résolution.
<b>AWGN</b>	Additive White Gaussian Noise.
<b>NLOS</b>	No-Line of Sight.
<b>BER</b>	Bit Error Rate.
<b>ISI</b>	Inter Symbole Interference.
<b>ICI</b>	Inter Carriers Interference.

# Introduction générale

### Introduction générale

Les futurs systèmes sans fil, tels que les systèmes cellulaires de la quatrième génération (4G) et la (5G), doivent offrir de manière flexible aux utilisateurs une variété de service, notamment la voix, les images, les vidéos et les données. Ces services ont des débits différents et des trajets très différents [1]. Les techniques d'accès multiples sont très efficaces pour les systèmes sans fil vocaux, lesquelles permettent à ces systèmes de s'adapter à la variété des débits de données ; nous avons plusieurs techniques d'accès multiples tels que l'accès multiples par répartition de fréquence FDMA, par répartition de temps TDMA et par répartition en code CDMA. Chacune de ces techniques se repose sur le partage d'un canal à bande limitée entre les différents utilisateurs pour une haute efficacité spectrale, il n'empêche que l'accès multiple par répartition en code CDMA s'adapte aux autres services non vocaux. Ce qui incite les chercheurs à concevoir un système qui s'adapte avec les conditions d'environnement en garantissant une interférence minimale ou au moins gérable aussi qu'une exploitation plus efficace de notre spectre pour tous les utilisateurs ; le système impressionnant dans ce cas et le système d'accès multiple CDMA avec une technique de modulation multi porteuses, dite MC CDMA, cette technique est capable d'accueillir un plus grand nombre d'utilisateurs que CDMA [2].

Le système d'accès multiple par répartition en code à porteuse multiples MC CDMA est une combinaison des avantages de la technique d'accès multiple CDMA et celle du multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence OFDM, tels que la robustesse aux interférences et le bruit d'environnement, en une grande mobilité et un canal sélectif en fréquence [3]. La technique de modulation multi porteuses consiste à envoyer des sous signaux orthogonaux pour limiter l'utilisation de notre bande passante et compenser l'effet des trajets multiples. Tentant à améliorer le débit de données de ce système avec des hautes performances et une faible consommation d'énergie, la technique MC CDMA est mise en œuvre par la transformée de Fourier IFFT ou la transformée en ondelettes IDWT [4, 5].

Le système MC CDMA classique est basé sur la transformée de Fourier inverse IFFT à l'émission et la transformée de Fourier FFT à la réception, où il présente un inconvénient lié à la transformée de Fourier à cause de la création des lobes secondaires puisqu'elle utilise une fenêtre rectangulaire tend vers l'infini en domaine fréquentiel pour moduler chaque sous-porteuses, ce qui réduit l'efficacité spectrale. Afin d'éviter la perte d'orthogonalité des sous porteuses dans les canaux à des trajets multiples [6] et les interférences entre symboles, en insérant un préfixe cyclique en tête de chaque symbole de sorte que l'étalement du délai du canal devienne plus long que la réponse impulsionnelle du canal, ce qui présente l'inconvénient

## **Introduction générale**

---

de réduire davantage l'efficacité spectrale [4]. Conformément aux inconvénients susnommés, une méthode a été proposée pour les pallier c'est la transformée en ondelettes discrètes (IDWT).

Les ondelettes sont un outil mathématique assez important dans plusieurs domaines d'application, en raison de leur capacité impressionnante à lutter contre les interférences entre sous porteuses (ICI) et interférences entre symbole (ISI). La transformée en ondelettes discrète est une transformée offerte une représentation temps/ fréquence d'un signal discrète dans le domaine temporel avec des signaux appels ondelettes ayant des propriétés spécifiques tel que l'orthogonalité entre les ondelettes et les fonctions d'échelles et une localisation appropriée à une longueur finie [7] qui les rendent outils pour le traitement de signal. Contrairement à la FFT, qui utilise une seule fenêtre d'analyse [8], la transformée en ondelettes utilise deux fenêtres courtes aux hautes fréquences et longue en basses fréquences. De ce fait, l'analyse par ondelettes décompose le signal en plusieurs résolutions en utilisant deux filtres, un filtre passe Bas qui donne les approximations et un filtre passe Haut qui donne les détails.

Dans le système MC CDMA basé sur la transformée en ondelettes discrètes, les ondelettes offrent une reconstruction parfaite à la réception et un abaissement du bruit. À l'issue de de plusieurs études de ce système [9], nous pouvons dire que le système basé sur les ondelettes est plus performant que celui basé sur la transformée de Fourier au terme d'efficacité spectrale, d'immunité aux interférences et de taux d'erreur par bit (BER) et d'efficacité du système.

Lors d'une propagation dans l'espace libre d'une communication sans fil, notre onde électromagnétique se propage dans plusieurs directions en une ligne droite. Elle peut rencontrer certain nombre d'obstacles qui constituent le milieu de propagation, provoquent des évanouissements où l'onde émise emprunte plusieurs trajets avant atteindre l'antenne réceptrice. Chaque trajet suit un chemin différent à un retard et une phase ; le signal reçu combine tous ces trajets. Lequel ce phénomène limite la qualité de Transmission d'information. Les chercheurs modélisent ce phénomène aussi que le bruit d'environnement en un seul canal modèle, dite canal de Rayleigh.

Le canal de Rayleigh est un canal sélectif en fréquence, en absence d'une vision directe entre l'antenne émettrice et l'antenne réceptrice. Ce canal inclut plusieurs canaux non sélectifs, il adjoint aussi un bruit, appelé bruit blanc gaussien. Ce canal limite l'efficacité spectrale et la qualité de transmission, réduisant ainsi les performances du système.

## Introduction générale

---

Le plan de notre travail de fin d'étude se présente ainsi :

Le premier chapitre consacré a mis en évidence du système MC CDMA classique, en passant par les deux techniques qui donnent naissance à ce système, la technique d'accès multiple par répartition en code CDMA et technique de modulation multi-porteuse OFDM, ainsi que les différentes techniques d'accès multiples connus FDMA et TDMA et leurs fonctionnements.

Le deuxième chapitre traitera en détail l'analyse d'un signal en temps et fréquence à l'aide de la transformée de Fourier et la transformée en ondelettes, en donnant une vue globale sur la théorie des ondelettes tel que sa définition, ses types et ses caractéristiques aussi que l'analyse multi-résolution la méthode la plus rentable en analyse par ondelettes.

Le chapitre trois fait l'objet d'une représentation générale des canaux de transmission, comme le canal gaussien et le canal de Rayleigh, et une mise au point sur le système de communication sans fil et ses différents phénomènes de la propagation.

Le quatrième chapitre et le dernier présentent les différents résultats de nos simulations en utilisant une programmation Matlab. Nous allons voir les performances du système MC CDMA classique et du système MC CDMA basé sur les ondelettes, et l'influence de nombre d'utilisateurs sur la qualité d'information transmise, ainsi que l'impact du nombre des sous porteuses et le choix du type de la séquence d'étalement en termes de taux d'erreur par bit (BER) en fonction du  $E_b/N_0$ .

# Chapitre 1

- *Etat de l'art sur MC-CDMA*

## **1. Introduction**

Ce chapitre est une synthèse bibliographique sur les techniques d'accès multiple avancés, nous y présentons un état de l'art sur les techniques CDMA, OFDM, ainsi que leurs combinaisons à savoir MC CDMA.

Nous commençons avec une présentation des différentes techniques d'accès multiple utiliser en télécommunication, pour ensuite détailler la technique d'accès multiple par répartition de code CDMA qui s'appuie sur le principe d'étalement de spectre où nous énoncerons son concept et les différents codes utilisés. Suivie d'une présentation des techniques OFDM et leurs principes de fonctionnement. Pour enfin finir sur la combinaison de ces deux techniques à savoir la MC CDMA en mettant en évidences ses avantages, ses inconvénients et leurs domaines d'applications.

## **2. Techniques d'accès multiple**

Etant des ressources rares, la demande en bande de fréquence se fait de plus en plus grandissante, elles sont donc de plus en plus précieuses, leurs utilisations doivent impérativement se faire de façon optimale afin d'en tirer le meilleur rendement possible [10]. Pour cela, la solution trouver est le partage de ces bandes entre différents utilisateurs, les techniques d'accès multiple furent développées à ces fins.

Le principe de cette technique consiste à partager un ensemble de canaux limité afin que différents utilisateurs puissent y avoir accès.

### **2.1. Les différentes techniques d'accès multiple**

On dénombre trois principales méthodes d'accès multiple :

#### **2.1.1. Accès multiple à division de fréquence FDMA (Frequency division multiple Access)**

Dans cette technique, la bande passante est divisée en plusieurs sous canaux et chaque utilisateur se voit attribuer une fréquence porteuse différente. L'attribution de cette dernière se fait à la demande sous base du premier arriver premier servie, une fois la bande de fréquence allouée, la connexion entre le mobile et la station de base se fait de façon continue et simultanée [11]. A noter que cette technique de multiplexage est purement analogique et est utilisé dans la 1G et qu'il ne peut y avoir qu'une seule communication par fréquence.



Etant dans l'incapacité de mettre en place un émetteur qui émet dans une bande strictement allouée, cette technique contient des bandes de gardes entre chaque bande de fréquence, réalisée grâce à des filtres passe bande, ceci pour éviter au maximum les interférences.

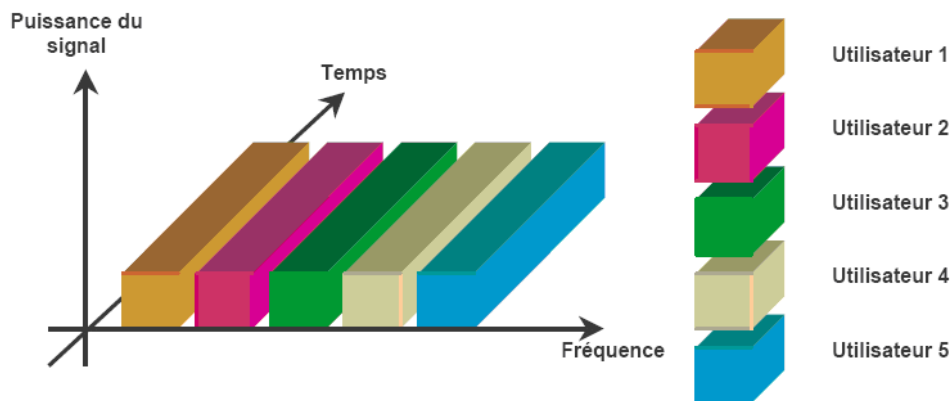


Figure 1.1 : Répartitions des ressources en FDMA [12]

L'inconvénient majeur de la technique de FDMA est son manque de souplesse dans la réalisation d'un débit variable, ainsi que la nécessité d'utiliser un grand nombre d'équipement pour desservir les utilisateurs (un émetteur, un récepteur, deux codecs, et deux modems pour chaque circuit) ce qui augmente considérablement le coût d'implémentation. Ainsi que la possible saturation du réseau au vu du nombre limité de canaux disponible.

### 2.1.2. Accès multiple à répartition de temps TDMA (Time Division Multiple Access)

Technique apparue lors du passage de l'analogique au numérique, elle est essentiellement utilisée dans le réseau 2G et GSM (*General System for Mobile*). Dans cette technique les utilisateurs utilisent intégralement la bande de fréquence et ceci durant un intervalle de temps restreint qu'on appelle « time slot », la bande passante étant généralement divisée en 8 « time slot » et l'attribution de chaque intervalle se fait appel par appel et ceci sous le contrôle de la station de base, le nombre d'utilisateur pouvant être servi est égale au nombre de ressources fréquentielles multiplié par le nombre de « time slot » [11].

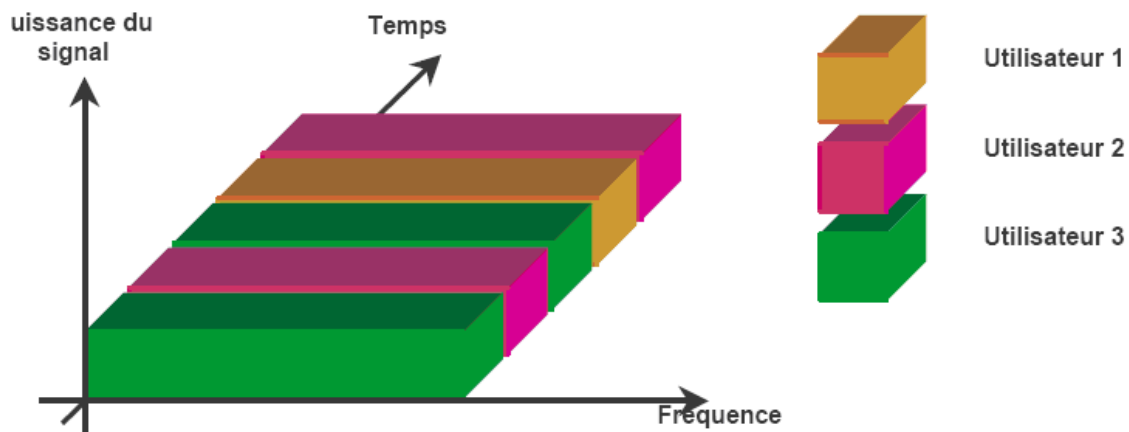


Figure 1.2 : Répartition des ressources en TDMA [12]

Pour éviter les collisions, il y a un temps de garde entre chaque intervalle de temps.

Son principal inconvénient est sa zone de couverture très limitée, cela est dû aux faits que son temps de garde entre les différentes communications multiplexées sur un seul canal ne peut dépasser une valeur donnée, dans le cas où l'émetteur et le récepteur sont très éloignés, le temps de garde dépassera la valeur limite et ainsi causé des chevauchements avec les communications voisines, il y aura donc une perte de connexion.

On note aussi qu'avec la numérisation du processus, les appareils utilisés sont devenus plus complexes et ne se résument plus qu'à un émetteur récepteur.

### 2.1.3. Accès multiple par répartition de code CDMA (Code Division Multiple Access)

Cette technique permet l'utilisation intégrale de la bande passante et transmet les informations sur le canal de façon continue. Chaque utilisateur possède un code unique, appelé code d'étalement, connu seulement de l'émetteur et du récepteur qui permet de différencier entre les différents usagers du canal et ainsi éviter les interférences entre chaque communication.

Ce code d'étalement est ajouté aux informations utiles avant la transmission afin de masquer l'information utile, c'est le principe de l'étalement spectral.

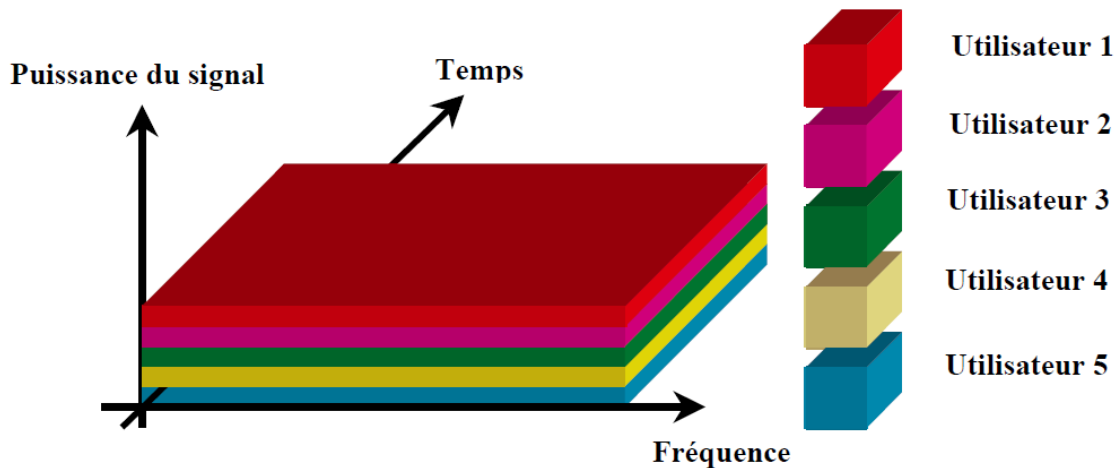


Figure 1.3 : Répartition des ressources en CDMA [12]

### 3. L'étalement spectral (*Spread Spectrum*)

Ayant une réputation de fournir une grande immunité contre les interférences et de permettre de cacher la transmission dans les bruits de fond, cette technique, initialement utilisé dans des applications militaires, fut ensuite adaptée pour les systèmes de téléphonie sans fil [13]. Son principe consiste à répartir l'énergie du signal à émettre sur une bande de fréquence beaucoup plus large que la bande requise à la transmission du signal utile.

#### 3.1.Principe de l'étalement spectral

Son principe [14] consiste à répartir l'énergie du signal à émettre sur une bande de fréquence beaucoup plus large que celle initialement requise. L'étalement se fait par un signal pseudo-aléatoire appelé code d'étalement. Différents codes sont générés au départ de la transmission, et chaque utilisateur se voit assigné une copie qui permet la modification du message de base, ce code permettra ensuite le décodage du signal lors de la réception et la récupération des données de chaque utilisateur, ainsi un signal ne possédant pas de code sera considéré comme un bruit.

L'étalement spectral permet l'augmentation de la capacité du système à une puissance d'émission constant. Il est aussi optimisé pour lutter contre les bruits interférents.

Trois types de systèmes à étalement spectral existent : système à saut de fréquence (*Frequency Hopping spread Spectrum*) FHSS, système à saut de temps et système à séquence directe (*Directe Frequency spread Spectrum*) DFSS.

Dans le cas de la CDMA, on utilise l'étalement spectral à séquence directe.

### 3.2.Étalement de spectre à séquence directe (*Directe Sequence spread spectrum*) DSSS

C'est une technique de modulation appliquée aux signaux numériques, elle consiste à étendre la largeur de bande du signal utile en le multipliant par une séquence d'étalement, suite d'éléments binaires condensés à un rythme supérieur au débit de données de l'information à envoyer, le signal issu de cet étalement est ensuite modulé puis envoyé dans le canal de transmission. Lors de la réception, l'opération inverse est réalisée afin de pouvoir extraire l'information utile [15] [16].

La figure montre l'opération d'étalement du spectre par séquence directe.

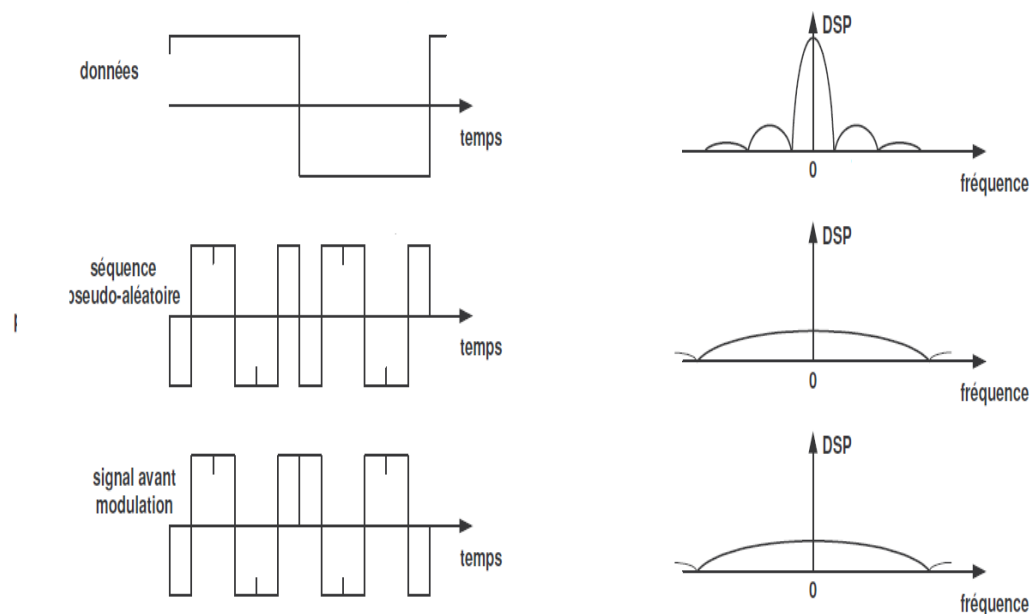


Figure 1.4 : Opération d'étalement spectral

Son principe consiste à multiplier chaque symbole constituant le signal de l'information  $s(t)$  de période  $T_s$ , par une séquence pseudo-aléatoire  $c(t)$  dont les éléments appelés « chips » sont de période  $T_c$  plus faible que  $T_s$ . Chaque utilisateur  $K$  possède un code d'étalement représenté par la séquence de chips  $C^k$ . Cette séquence est formée de  $SF$  chips dont  $C_j^k$  ( $j \in [1, SF]$ ) de durée  $T_c$ .

$SF$  (*Spreading Factor*) est le facteur d'étalement et est exprimé comme suit :

$$SF = \frac{B_{spr}}{B_s} = \frac{\frac{1}{T_c}}{\frac{1}{T_s}} = \frac{T_s}{T_c} \quad (1.1)$$

$B_{spr}$  : Le débit du signal étalé.

$B_s$  : Le débit du signal informatif.

En résultat de cet étalement la bande passante du signal utile se voit élargie et l'amplitude diminue. Le niveau du signal étant largement inférieur à celui du bruit (ce bruit s'ajoute au signal lors de sa transmission et n'est donc pas affecté par l'étalement) l'information sera considérer aussi comme un bruit.

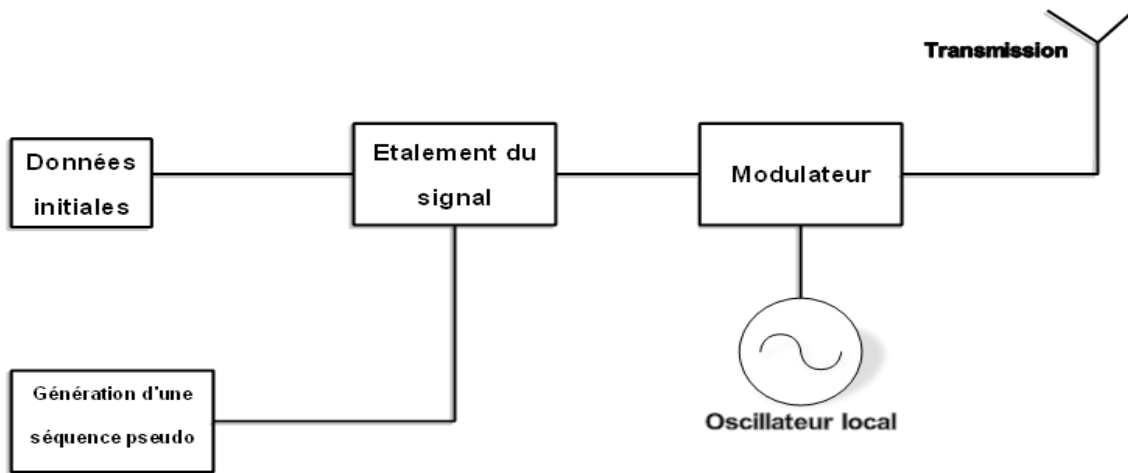


Figure 1.5 : Schéma de Transmission CDMA

On considère  $s(t)$  comme étant le signal d'information et  $c(t)$  contenant le code d'étalement.

Le signal d'information  $s(t)$  peut prendre les valeurs -1 et 1 et peut être exprimé comme suit :

$$s(t) = \sum_k S_k P_{T_s}(t - kT_s) \tag{1.2}$$

$k$ : Le nombre d'utilisateur.

$s_k$  : la valeur discrète de l'information  $s(t)$ .

$P_{T_s}(t)$  : Est la forme d'onde carrée et est donnée par :

$$P_{T_s}(t) : \begin{cases} 1 & \text{si } 0 \leq t \leq T_s \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

$c(t)$  Est quant à lui est exprimé par :

$$c(t) = \sum_k C_k P_{T_c}(t - kT_c) \tag{1.3}$$

Le signal  $u(t)$  issue de l'étalement est exprimé par :

$$u(t) = s(t)c(t) \tag{1.4}$$

Si plusieurs signaux sont émis simultanément alors [17]:

$$u(t) = \sum_k s(t)c(t) \tag{1.5}$$

C'est un signal binaire d'amplitude -1 et 1 de période égale à la séquence pseudo aléatoire  $c(t)$ . Après l'étalement, le signal  $u(t)$  est ensuite modulé en le multipliant par la porteuse en utilisant les différentes techniques de modulation (FSK, BPSK, QPSK) en résulte le signal à transmettre  $d(t)$  exprimé par :

$$d(t) = A u(t) \sin(2\pi f_c t + \theta) \tag{1.6}$$

$A$  : Est l'amplitude

$f_c$  : Fréquence de la porteuse

$\theta$  : Phase de la porteuse

Lors de sa transmission dans un canal spécifique, le signal modulé se voit affecter par des bruits  $n(t)$ .

Lors de la réception, l'objectif est d'extraire l'information  $s(t)$  du signal reçu additionner à un bruit  $n(t)$  après un délai de propagation de  $\tau$ .

$$d(t - \tau) + n(t) = A u(t - \tau) \sin(2\pi f_c(t - \tau) + \theta) + n(t) \tag{1.7}$$

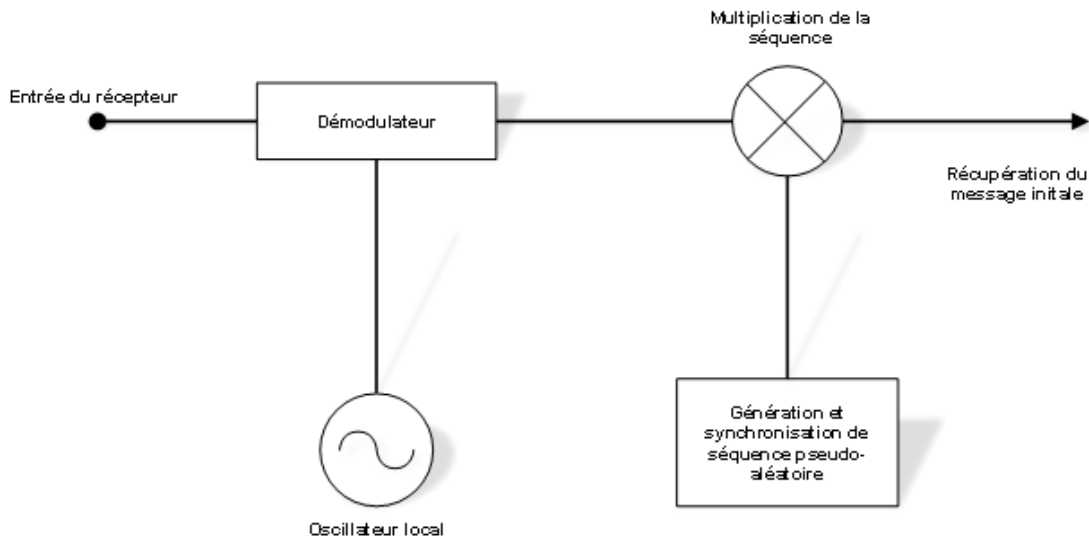


Figure 1.6 : Schéma de Réception CDMA

Avant le processus de récupération du signal utile,  $d(t)$  passe une étape de démodulation.

$$u(t - \tau) = s(t - \tau)(c(t - \tau) + n(t)) \tag{1.8}$$

La récupération de la séquence initiale se fait par une corrélation du signal reçu avec une réplique du code d'étalement appliquée lors de la transmission, cela permettra de ramener le signal dans la bande d'origine.

Lors de la récupération, le bruit se verra quant à lui étaler et supprimer à l'aide d'un filtre passe bas.

Pour une réception optimale, la séquence pseudo aléatoire se doit d'avoir de bonnes propriétés d'autocorrélation, idéalement, la fonction d'autocorrélation doit d'être maximal en zéro et minimale ailleurs.

Pour un code d'étalement  $C_j^k$  on doit :

Avoir une moyenne approximativement nulle :  $\sum_j C_j^k \approx 0$

Une autocorrélation exprimée par :  $Ra(t) =: \sum_j C_j^k C_{j+1}^k \approx \begin{cases} 1 & \text{si } t = 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$

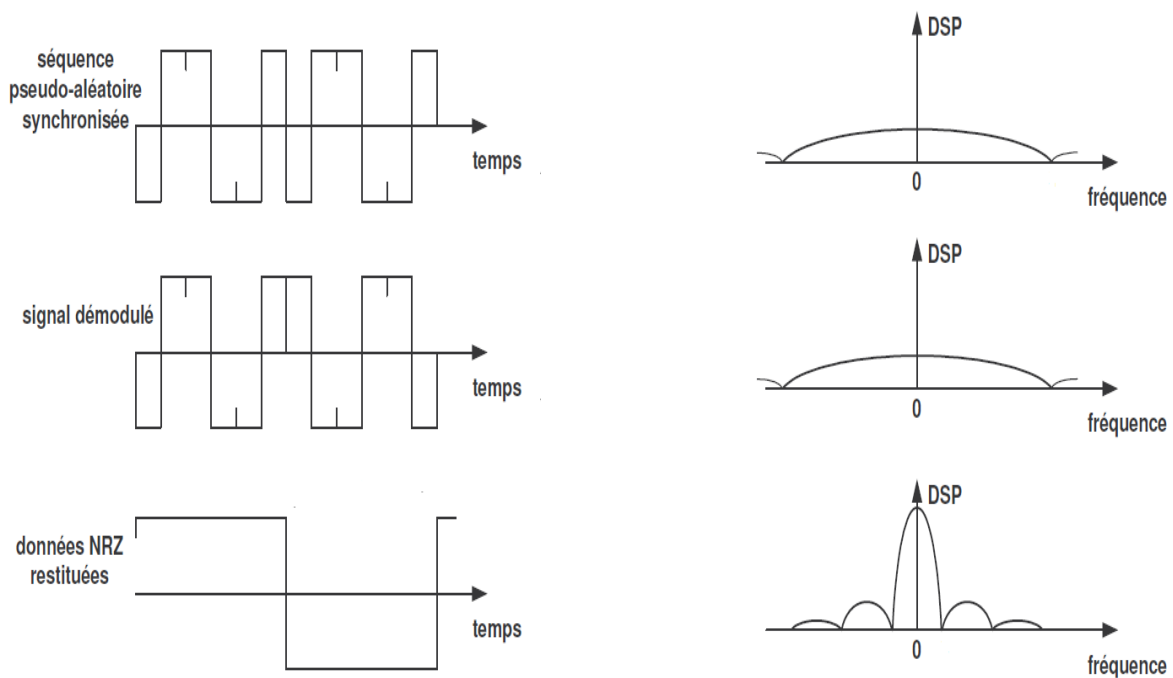


Figure 1.7 : Opération de dés-étalement spectral

#### 4. Code d'étalement

Lors de la réception du signal, le code d'étalement doit être caractérisé par certains paramètres afin de réussir le dés-étalement du signal et ainsi isoler la séquence parmi les autres. L'autocorrélation et l'intercorrélation sont les critères principaux dans le choix du code.

Le signal associé au code d'étalement  $C_k(t)$  se doit d'être différent avec lui-même décalé cela pour éviter tout changement statique du signal transmis. Ainsi le produit d'autocorrélation doit être nulle partout sauf en zéro [18].

$$Ra(t) =: \sum_j C_j^k C_{j+1}^k \approx \begin{cases} 1 & \text{si } t = 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (1.9)$$

Le produit d'intercorrélation des signaux associés doit être nul, cela pour éviter la collision des sources entre elle et d'assurer une transmission sécurisée. On parle d'orthogonalité des codes [18].

$$R_{cicj} = \int_{-\infty}^{+\infty} C_i(t) C_j(t - \tau) dt = 0 \quad (1.10)$$

Le dés-étalement exige une parfaite synchronisation entre l'émetteur et le récepteur, pour cela ils doivent posséder un pic d'autocorrélation le plus étroit possible [18].

$$R(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} C(t) C(t) dt = 1 \quad (1.11)$$

Il existe plusieurs codes d'étalement avec des propriétés d'autocorrélations et d'intercorrélations variables [19]:

Dans le cas d'une communication synchrone, où toutes les séquences sont envoyées aux mêmes moments, on privilégie l'utilisation de code orthogonaux comme le code de Walsh Hadamar, OVSF (*Orthogonal Variable Spread Factor*), séquence complémentaire de Golay.

A l'inverse pour une communication non synchrone, on utilise des codes non orthogonaux tels que le code de Gold et le code de Kasami.

## 5. Avantages du CDMA

- Sécurité de transmission et confidentialité des données émises.
- Faible densité spectrale de puissance du signal émis.
- Capacité élevée en nombre d'utilisateur.
- Haute résistance face aux interférences et aux bruits.

## 6. L'OFDM (orthogonal frequency-division multiplexing)

Multiplexage par division orthogonale de fréquence OFDM est une technique de modulation multi-porteuse consiste à transmettre des données à haut débit  $D$  en des différentes fréquences dite sous-porteuses avec un débit réduit.

L'OFDM limite le problème de sélectivité en fréquence (les interférences entre symboles) qui augmente avec le débit et provoque la dégradation des performances, ainsi que le problème de



trajets multiple, en ajoutant le préfix cyclique et l'orthogonalité des sous-porteuses aussi que l'égalisation.

### 6.1. Notion d'orthogonalité

Pour que ces fréquences soient les plus proches possible sans se chevaucher entre eux en transmettant le max d'informations possible, on doit utiliser des fréquences orthogonales à espacement régulier. L'orthogonalité de ces sous-porteuses limite les interférences entre symboles et économise la bande passante comme la représente la figure ci-dessous :

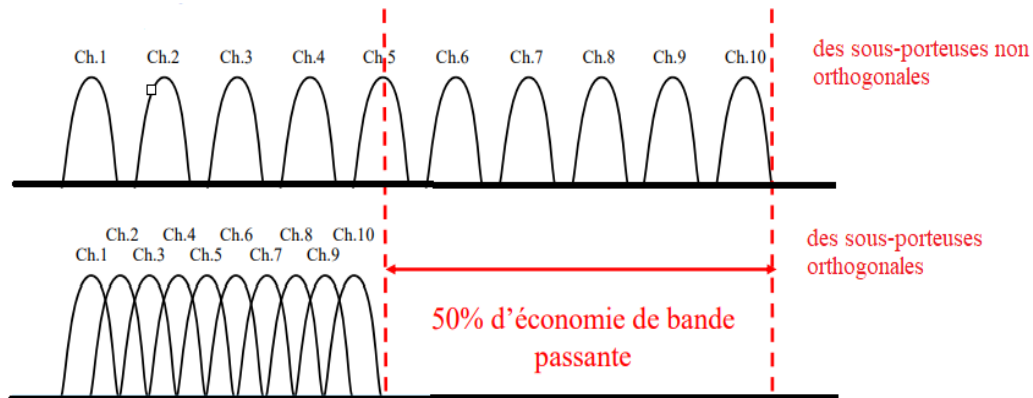


Figure 1.8 : l'orthogonalité des sous-porteuses

On dit que deux Les fréquences adjacentes  $f_i$  et  $f_{i+1}$  sont orthogonales si l'espacement entre eux est égale à  $1/T$ , où  $T$  est la durée d'un symbole. Les fréquences des sous-porteuses,  $f_i$  sont choisis tel que :

$$f_i = f_0 + \frac{i}{T} \quad 0 < i < N - 1$$

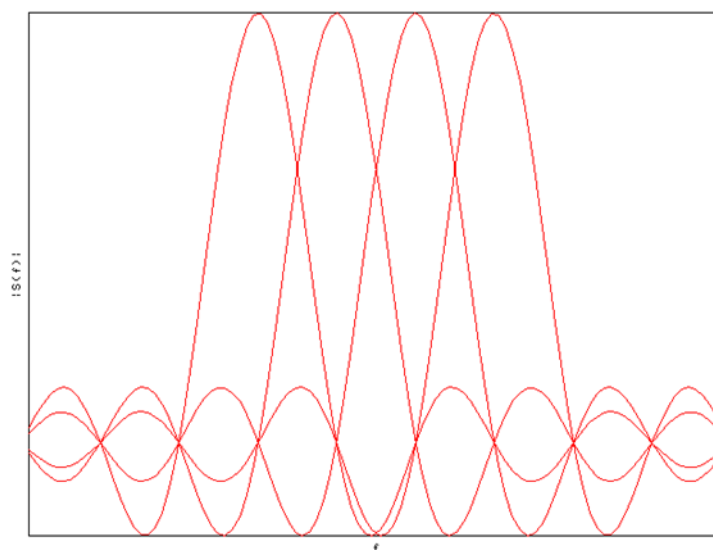


Figure 1.9 : L'orthogonalité des sous-porteuses

Il impératif de noter que l'échantillonnage à la fréquence  $f_i$  exacte de la sous-porteuse nous permet que la sous-porteuse n'interfère pas avec les autres sous-porteuses et obtenir une occupation spectrale optimale [20].

## 6.2. Le fonctionnement d'un système OFDM

En émission, une séquence de données numériques  $S(t)$  de débit  $D$  est divisée en flux de données parallèles sur  $N$  sous-porteuses avec un débit réduit  $d$  ( $d = D/N$ ).

Chaque sous-porteuse est modulée indépendamment à l'aide du bloc (BPSK ou QAM) pour transmettre les données à un débit similaire, le signal obtenu à la sortie de ce bloc est donné par :

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{j2\pi f_k t} \quad (1.12)$$

Où :  $C_k$  est nombre complexe définis à partir des éléments binaires par une constellation souvent de la modulation PSK ou QAM.

Les sous-porteuses sont modulées en les transformant en signaux sinusoïdaux orthogonaux à travers le bloc IFFT, en sortie de ce bloc on obtient le signal  $s(t)$  discrétisé :

$$S_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{j2\pi \frac{kn}{N}} \quad (1.13)$$

En choisissant le nombre de porteuses  $N$  dont  $N = 2n$ .

Par la suite, les sous-porteuses sont regroupées pour être transmises sur le même canal, tout en ajoutant un intervalle de garde (préfixe cyclique) au début du symbole pour supprimer les interférences entre les symboles.

Ce préfixe cyclique est une copie des échantillons de la fin du symbole, sa longueur est choisie de manière qu'elle soit supérieure à la valeur maximale de l'effet du trajet multiple.

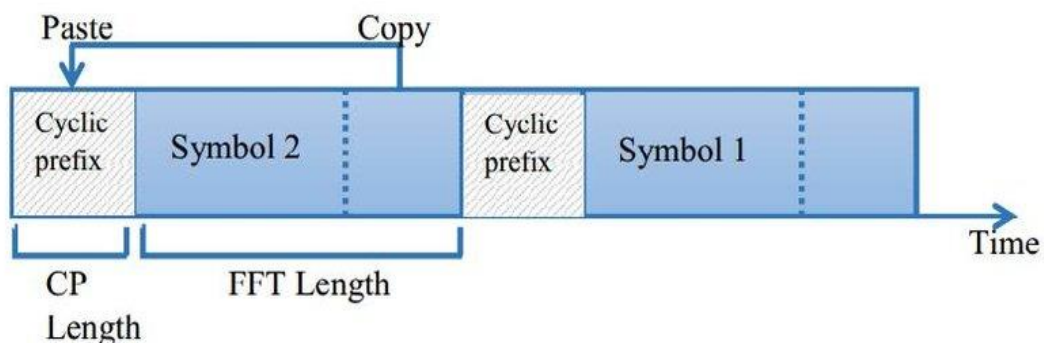


Figure 1.10 : L'insertion du préfixe cyclique

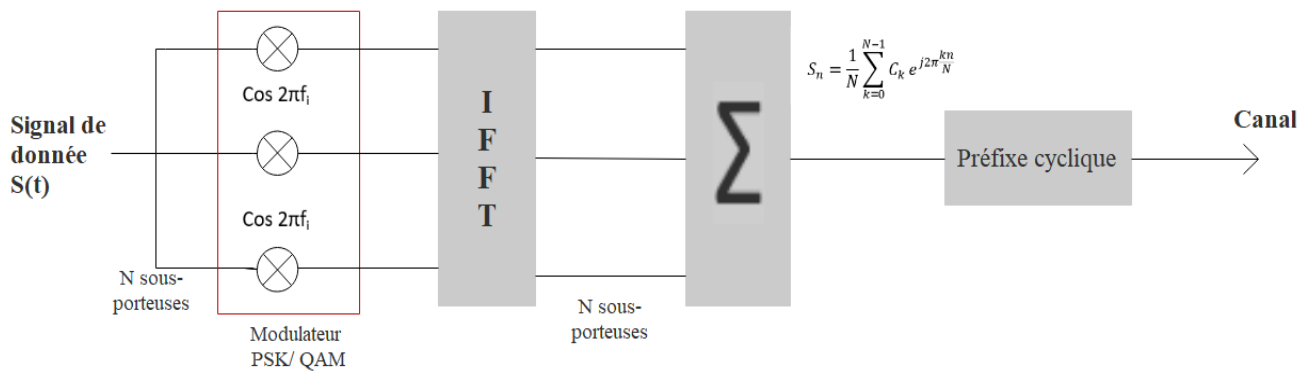


Figure 1.11 : Le schéma du système d'émission d'OFDM

En réception, on reçoit le signal  $y(t)$  suivant :

$$y(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k H_k(t) e^{2j\pi(f_0 + \frac{k}{T})t} \tag{1.14}$$

Où :  $H_k(t)$  Est la fonction de transfert du canal autour de la fréquence  $f_k$  et à l'instant  $t$ .

Ensuite on a le bloc de la suppression du préfix cyclique qui permet de reconstruire l'orthogonalité entre sous-porteuses, après on a le signal  $Z_n$  reçu au niveau du bloc FFT sous la forme, dont Le nombre de sous-porteuses ayant été choisi tel que  $N = 2n$  :

$$Z_n = \sum_{k=0}^{N-1} C_k H_k e^{2j\pi \frac{kn}{N}} \tag{1.15}$$

En passant par un démodulateur (BPSK ou QAM), puis pour une bonne récupération des données on ajout un filtre pour l'égalisation du canal.

### 6.3.L'égalisation du canal

L'orthogonalité entre les sous-porteuses est assurée tant que le canal de propagation est constant dans le temps. En cas de variation du canal, à cause du déplacement du mobile, de l'émetteur, ou de l'environnement, l'orthogonalité entre sous-porteuses est rompue, créant de l'interférence entre porteuses (IEP). Par conséquent on insère un filtre de réponse impulsionnelle  $H_e$ , pour éliminer les l'interférence entre porteuses causée par le canal.

$$H_e(f) = \frac{1}{H(f)} \tag{1.16}$$

Où :  $H$  est la fonction de transfert du canal.

A la fin, on rejoint les flux de données parallèles pour reconstituer les données initiales.

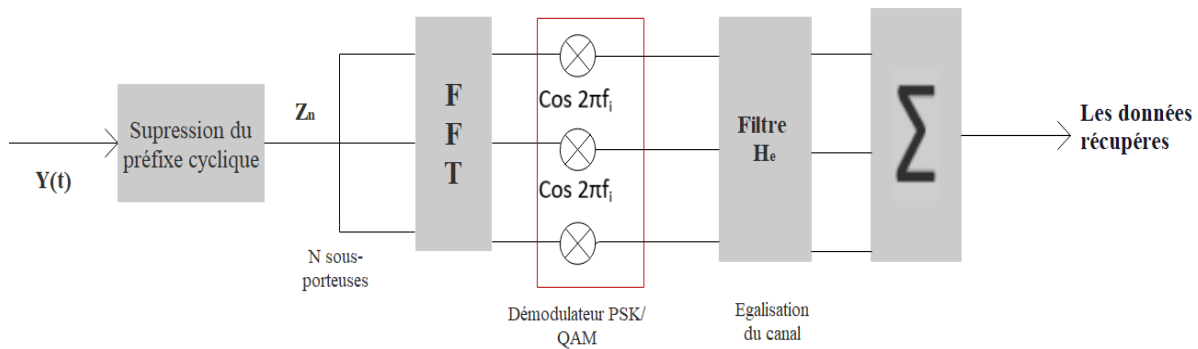


Figure 1.12 : Le schéma du système de réception d'OFDM

#### 6.4. Les avantages de l'OFDM

- L'OFDM résout l'évanouissement sélectif en fréquence et les distorsions multi-trajets dans les canaux large bande ;
- Elle permet de réaliser l'estimation et l'égalisation du canal de façon indépendante sur chaque sous-porteuse ;
- Elle évite le chevauchement et les IES ;
- Moins sensible au trajet multiple et la sélectivité en fréquence ;
- L'OFDM présente une grande efficacité spectrale globale.

#### 6.5. Les inconvénients de l'OFDM

- Une parfaite synchronisation du temps et de la fréquence est nécessaire ;
- Plus grande sensibilité aux effets Doppler que les systèmes de modulation mono-porteuse ;
- Perte d'efficacité spectrale due à l'augmentation de l'intervalle de garde.

### 7. Technique MC-CDMA

Au vu des avantages indéniables que proposent l'OFDM et la CDMA, et dans le but de proposer une approche offrant de meilleures performances, différentes équipes de chercheurs ont proposé une combinaison entre la technique d'étalement de spectre et la modulation à porteuse multiple donnant ainsi naissance à la MC-CDMA [21] .

#### 7.1. Fonctionnement de la MC-CDMA

Cette technique est basée sur une concaténation en série de l'étalement de spectre à séquence directe comme utiliser dans les techniques CDMA ainsi suivit d'une modulation multi-porteuse utilisé dans les techniques OFDM, de ce faite, l'étalement spectral du signal

d'information sera appliqué non plus dans le domaine temporel mais dans le domaine fréquentiel, ceci en modulant les différentes chips du code d'étalement avec les sous porteuse OFDM [22].

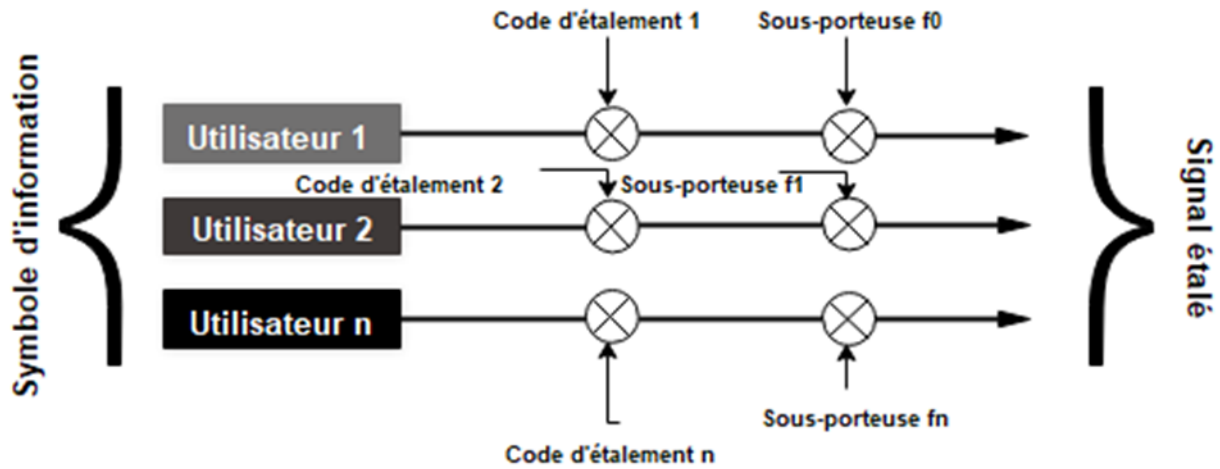


Figure 1.13 : Génération d'un signal MC-CDMA

### 7.1.1. Emission du signal

Au début de la transmission, le codage de l'information se fait par multiplication des données de chaque utilisateur par différentes séquences d'étalement générées au préalable parmi les codes orthogonaux (les codes de Walsh Hadamard par exemple). Le code d'étalement est appliqué directement en parallèle au même bit d'entrée. Le résultat de cet étalement alimente un bloc où une IFFT est appliquée sur les N chip de la séquence de chaque utilisateur. A la sortie du block, on obtient des valeurs échantillonnées dans le temps. L'ensemble des séquences sont ensuite additionnées pour obtenir des données en série, le signal obtenu est passé dans un filtre passe bas pour obtenir un signal continu dans le temps, il sera enfin modulé par la fréquence porteuse principale  $f_0$  et ainsi transmis dans le canal.

Le spectre fréquentiel principal du signal émis est un spectre OFDM avec un espace entre les sous porteuses de  $f_{d=\frac{N}{T}}$  [22]

Donc le signal à transmettre pour le  $i^{i\grave{e}m}$  symbole de données de l'utilisateur numéroté  $j$ , est sous la forme :

$$s_i^j(t) = \sum_{k=0}^{N-1} b_i^j C_k^j e^{2\pi(f_0+kf_d)t} P(t - iT) \tag{1.17}$$

Avec :

$N$  : Le nombre de sous porteuse.

$b_i^j$  : Le  $i^{i\grave{e}m}$  symbole du message pour l'utilisateur  $j$ .

$C_k^j$ : Représente le  $k^{i\text{em}}$  chip,  $k$

$= 0, 1, 2, \dots, N - 1$ , du code d'étalement pour l'utilisateur  $j$ .

$f_0$ : La fréquence de la porteuse principal.

$f_d$ : L'espace entre les sous - porteuse.

$P(t)$ : Est la forme d'onde carrée et est donnée par :

$$P(t) : \begin{cases} 1 & \text{si } 0 \leq t \leq T \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

Lorsque  $f_d = \frac{1}{T}$ , la génération du signal  $s(t)$  peut se faire avec une IFFT.

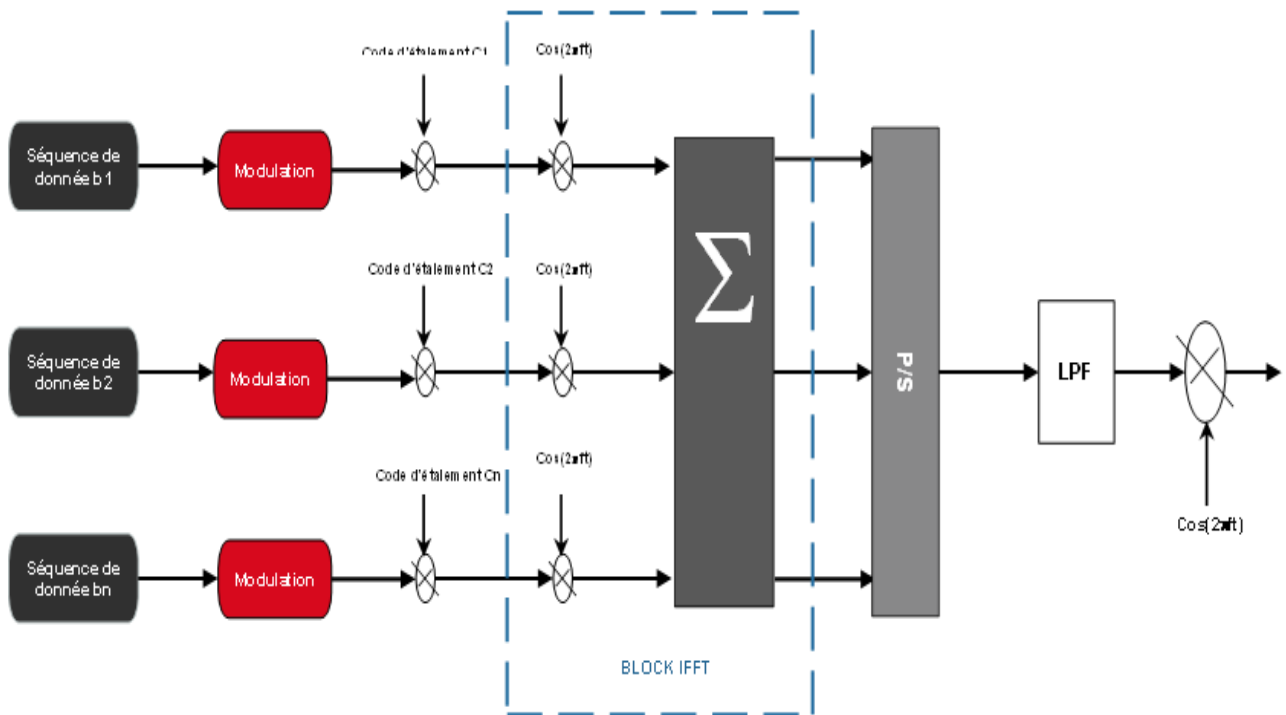


Figure 1.14 : Transmission MC-CDMA

### 7.1.2. Réception du signal

Lors de la réception, et après le passage du signal émis dans un canal de transmission, après la réception du signal, des opérations réciproques à celles de l'émetteur y sont appliquées, le signal reçu est échantillonné à la fréquence  $\frac{N}{T}$ , le signal obtenu passe dans un bloc FFT pour récupérer les chips  $C_k$  sous forme de série. La récupération des séquences initiales pour chaque utilisateur se fait par corrélation de la séquence obtenu à la sortie du bloc avec une réplique du

code d'étalement relatif à chaque usagés et multiplier au préalable par le gain qui servira d'égalisation du canal.

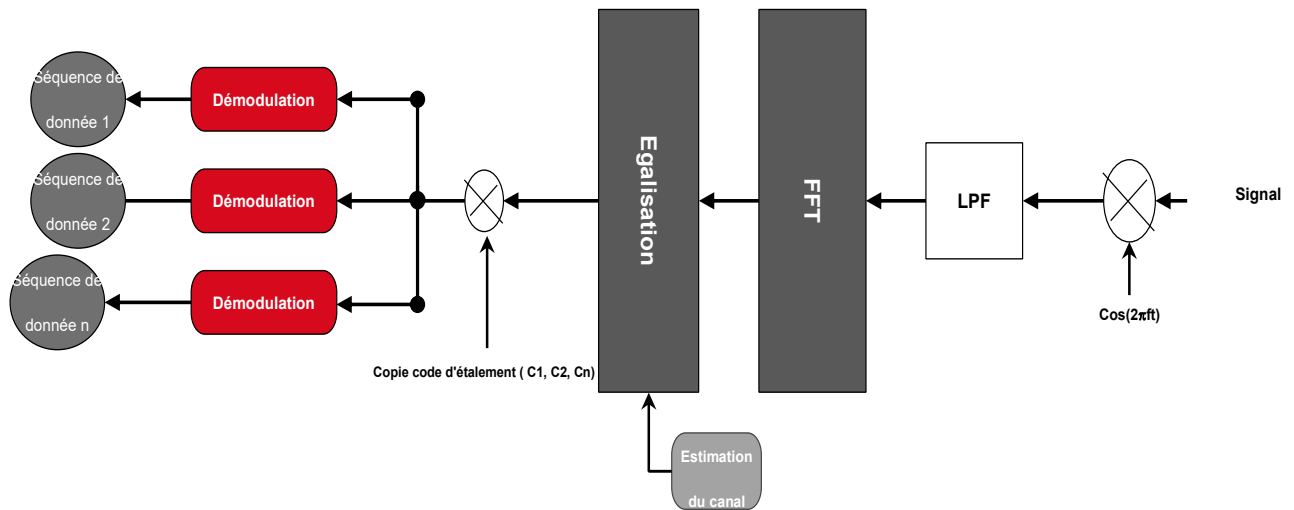


Figure 1.15 : Réception MCCDMA

Pour chaque sous porteuse  $k$ , le  $i^{i\text{em}}$  signal reçu au niveau du récepteur est de la forme :

$$r_{ki} = \sum_{j=0}^{j-1} H_k b_i^j C_j^k + n_{ki} \tag{1.18}$$

$j$  : le nombre d'utilisateur.

$H_k$  : La réponse fréquentiel pour le  $k$  utilisateur.

$n_{ki}$  : Les échantillons du bruit.

Pour un utilisateur  $j$ , le signal  $r_{ki}$  est multiplié par les chips de la séquence d'étalement  $C_j^k$  ainsi que par le gain  $g_k$  calculé par une estimation du canal de transmission de la sous porteuse  $k$  pour chaque symbole reçu.

La somme de tous les produits donne :

$$d_i^j(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k g_k r_{ki} \tag{1.19}$$

La longueur du code d'étalement est choisie égale au nombre de sous porteuse.

### 7.2. Avantages MC-CDMA [23]

- Présente un gain de diversité fréquentiel conséquent.
- Facilité de mise en œuvre de service haut débit.
- Haute résistance aux évanouissements.
- Grande flexibilité d'étalement en temps ou en fréquence.

**7.3.Limites MCCDMA**

- Un rapport PAPR (Peak-to-Average Power Ratio) élevé.
- Sensible à la fréquence porteuse décalée.
- Sensible au bruit de phase.

**7.4.Application MC-CDMA**

- S'avère prometteuse dans les futures générations de système de communication radio mobile.
- Le canal PLC (power line communication).
- L'environnement sans fil d'intérieur (indoor Wireless Environment).
- La radio cognitive.

**8. Conclusion**

Lors de ce chapitre, nous avons détaillé le fonctionnement de la technique MC CDMA et détailler les différentes étapes qui la compose (en l'occurrence CDMA et OFDM) en expliquant lors de chaque étape les différentes techniques et manipulation nécessaire à l'exécution correcte du MC CDMA ainsi que les modifications que subissait le signal relatif à l'information initiale jusqu'à sa récupération finale. Nous avons clôturé chaque étape par les avantages que proposait chaque technique ainsi que les avantages qui motivait l'utilisation du MC CDMA ainsi que quelques applications de cette technique.



## Chapitre 2

- *Etat de l'art sur les Ondelettes*

## 1. Introduction

La transformée en ondelettes est un outil mathématique pour analyser des données où les caractéristiques varient sur différentes échelles. Pour les signaux, les caractéristiques peuvent être des fréquences variant dans le temps. Cette transformée a été principalement créée pour répondre aux limitations de la transformée de Fourier.

Alors que l'analyse de Fourier consiste à décomposer un signal en ondes sinusoïdales de fréquences spécifiques, l'analyse en ondelettes est basée sur la décomposition des signaux en translation et dilatation d'une ondelette. Une ondelette, contrairement à une onde sinusoïdale, est une oscillation ondulatoire qui décroît rapidement. Cela permet aux ondelettes de représenter les données sur plusieurs échelles. Il existe différentes ondelettes peuvent être utilisées dans différentes applications.

## 2. La transformée de Fourier

La transformée de Fourier est une opération mathématique qui permet de représenter en fréquence des signaux apériodiques, dont les décompose en une sinusoïde et fournit ainsi une autre façon de représenter les signaux.

### 2.1. Fonctionnement de la transformée de Fourier

La transformée de Fourier d'un signal  $f(t)$  est donnée par :

$$F(\omega) = TF\{f(t)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (2.1)$$

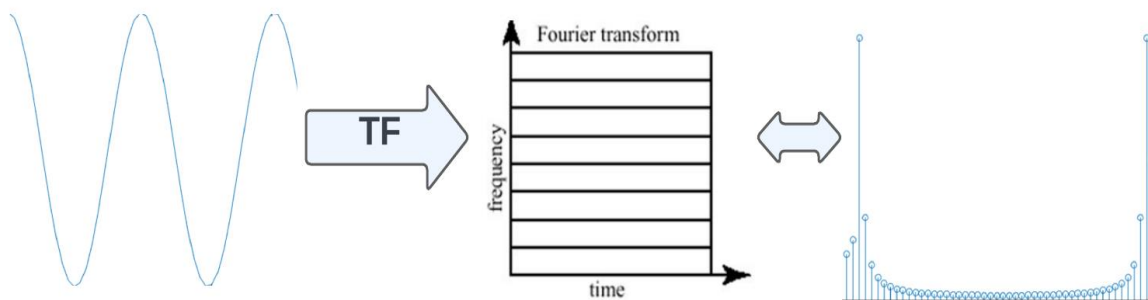


Figure 2.1 : La transformée de Fourier

Cette transformation fait explicitement ressortir les informations fréquentielles d'un signal mais ne permet pas nettement de localiser temporellement les événements qui se produisent dans le signal. Autrement dit que même si nous pouvons réellement détecter toutes les

fréquences qui apparaissent dans le signal, nous ne pouvons pas détecter quand elles apparaissent dans le signal.

Pour pallier les limitations de la TF, une transformation à fenêtre glissante a été proposée « STFT ».

## 2.2. La transformée de Fourier à court terme

L'analyse temps-fréquence repose sur une idée très simple. Puisque la TF n'est pas localisée en temps, il suffit d'introduire une fenêtre d'observation glissante  $g(t)$  bien localisée, au signal  $f(t)$  le long de l'axe du temps, on définit la transformée de Fourier à court terme « STFT », également connue sous le nom de transformée de Fourier fenêtrée :

$$F(t, f) = \int f(t)g(\tau - t)e^{-j\omega t} dt \quad (2.2)$$



Figure 2.2 : La transformée de Fourier à court terme

La STFT nous permet les fréquences sur des intervalles de temps déterminés par une fenêtre de taille fixe. Cette dernière limite résolution temps/fréquence, ce qui signifie qu'une bonne résolution temporelle nécessite une fenêtre d'observation plus courte, ce qui rend la résolution fréquentielle mauvaise et vice versa. Plus simplement, une petite fenêtre favorisera la résolution fréquentielle au détriment de la résolution temporelle.

Nous avons donc besoin d'une fenêtre variable de telle manière qu'elle puisse dilater pour les basses fréquences (une bonne résolution temporelle) et la contracter pour les hautes fréquences (une bonne résolution fréquentielle) à volonté, nous parlons d'une « ondelette ».

### 3. Les ondelettes

Une ondelette est une fonction oscillatoire localisée et adaptative, de moyenne nulle (2.3) et d'énergie finie, de support compact (2.4), c'est-à-dire que cette fonction est nulle en dehors d'un intervalle fini (c'est ce qui explique le mot « ondelette »), appelé  $\psi$ .

$$\int \psi(x) dx = 0 \quad (2.3)$$

$$\int |\psi(t)|^2 dt < \infty \quad (2.4)$$

Elle est utilisée pour l'analyse des phénomènes non stationnaire dont les caractéristiques statistiques varient dans le temps [24].

#### 3.1. L'analyse par ondelettes

La transformée en ondelettes peut résoudre les problèmes de STFT qui sont : la faible résolution temps-fréquence, et la taille de fenêtre constante, ainsi qu'une ondelette permet la détection plus facile des détails localisés que la TF et la STFT [25].



Figure 2.3 : La transformée en ondelettes

L'idée de l'analyse ondelettes est de décomposer un signal sur une base fonctionnelle (ondelette) pour s'adapter à la fréquence du signal à analyser, en recherchant une représentation plus compacte qui soit colocalisée en temps et en fréquence. Plus précisément, il ne s'agit pas d'une fonction, mais, d'une famille de fonctions, dont  $\psi$  est la génératrice est appelée *l'ondelette mère* est ses filles,  $\psi_{b,a}$ , sont des versions modifiées par les paramètres  $a$  et  $b$  :

$$\psi_{b,a}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2.5)$$

Le paramètre  $b$  indique un facteur de *translation* de l'ondelette mère. Et le paramètre  $a$ , appelé le facteur *d'échelle*.

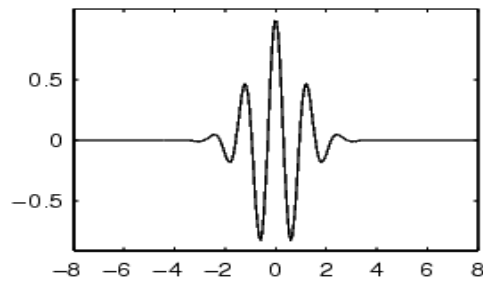


Figure 2.4 : Un exemple d'une ondelette mère

Une ondelette fille a deux aspects à la fois :

- Un aspect de translation dans le temps généré par le paramètre  $b$  ;
- Un aspect de dilatation ou contraction par le paramètre  $a$ .

Donc on peut dire que l'ondelette est :

- Dilatée si  $a > 1$  où elle est destinée à être utilisée pour capturer des informations dans des basses fréquences,
- Contractée si  $a < 1$  lequel cette ondelette utilise pour capturer des informations dans les hautes fréquences,
- Ou bien conservée si  $a = 1$ .



Figure 2.5 : L'ondelette mère au centre, dilatée à gauche et contractée à droite

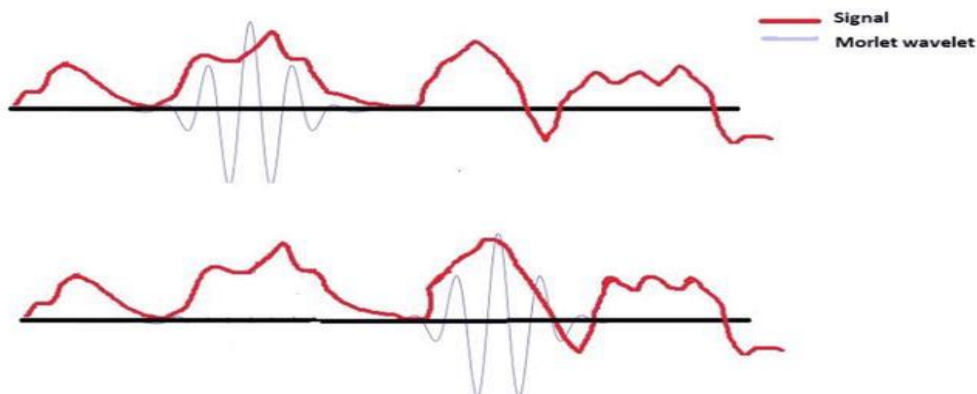


Figure 2.5 : Une analyse d'un signal avec une ondelette de Morlet

### 3.2. Types de transformée en ondelettes

Il existe deux types de transformée en ondelettes :

#### 3.2.1. Transformée en Ondelettes Continue TOC (CWT)

Le principe de la transformation en ondelettes continue se repose sur les propriétés de la transformée en ondelettes (la translation et la dilation), bien que les ondelettes utilisées ne soient pas orthogonales et les données obtenues soient hautement corrélées.

Soit  $f(t)$  un signal de  $\mathbb{R}$ , en appliquant les propriétés de translation et de dilation :

$$(T^b f)(t) = f(t - b) \quad (2.6)$$

$$(D^a f)(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} f\left(\frac{t}{a}\right) \quad (2.7)$$

Où  $a$  est le paramètre de dilation et  $b$  est le paramètre de translation.

La transformée en ondelettes continue est le produit scalaire du signal  $f(t)$  et la famille des ondelettes ce qui fournit un ensemble de coefficients  $C_f$  :

$$C_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int f(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2.8)$$

Cette expression est équivalent à un produit de convolution directe du signal  $f(t)$  par l'ondelette mise à l'échelle  $\psi_a(t)$  ou par une convolution réalisée par une multiplication dans l'espace de Fourier (aussi appelée transformée en ondelettes rapide),

$$C_f(a, b) = f(t) * \bar{\psi}_a(t) \quad (2.9) \quad \text{Avec : } \psi_a(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \bar{\psi}\left(\frac{t}{a}\right)$$

Ce calcul correspond à l'intercorrélation qui permet de mesurer le degré de similitude entre les signaux, alors on utilise en pratique l'ondelette qui a un coefficient le plus grand possible pour observer plus d'informations portées par le signal [26].

La Transformée en ondelette inverse continue est donnée par :

$$f(t) = \frac{1}{c_\psi} \iint C(a, b) \psi_{a,b}(t) \frac{da db}{a^2} \quad (2.10)$$

#### 3.2.2. Transformée en Ondelettes Discrète TOD (DWT)

Étant donné que la transformée en ondelettes continue utilise un ensemble d'ondelettes non orthogonales, les données sont fortement corrélées, il existe donc un degré élevé de redondance

dans ce cas. Dans de nombreuses applications, il est préférable de minimiser la redondance ; nous utilisons alors des transformées en ondelettes discrètes. Bien que la TOD soit une discrétisation du facteur de translation  $b$  et d'échelle  $a$  de la transformée en ondelettes continue TOC en utilisant des ondelettes orthogonales.

La discrétisation des paramètres  $a$  et  $b$  donne :

$$a = a_0^j \quad (2.11)$$

$$b = k b_0 a_0^j \quad (2.12)$$

Où  $(j, k) \in \mathbb{Z}^2$  et  $(a, b) \in \mathbb{R}^2$

Le choix de paramètre courant est  $a_0 = 2$  et  $b_0 = 1$ .

Par conséquent, la famille d'ondelettes discrètes décrite par l'équation :

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-\frac{j}{2}} \psi(2^{-j}t - k) \quad (2.13)$$

La transformée discrète en ondelettes du signal  $f(t)$  de  $\mathbb{R}$  est donnée par :

$$d_x(j, k) = \int f(t) \overline{\psi_{j,k}(t)} dt \quad (2.14)$$

L'inversion de la transformée peut être réalisée par la somme :

$$f(t) = \sum_{j,k} \langle f, \overline{\psi_{j,k}(t)} \rangle \psi_{j,k}(t) = \sum_{j,k} TOD [f(t)] \psi_{j,k}(t) \quad (2.15)$$

### 3.3. Analyse multi résolution :

L'analyse multi résolution (AMR) est un outil mathématique utilisé pour calculer des approximations successives d'un signal à différentes résolutions, d'où le nom de multi résolution. Ainsi, l'AMR d'un signal consiste à le décomposer continûment avec la fonction d'échelle  $\varphi(t)$  et la fonction d'ondelettes  $\psi(t)$  à des coefficients d'approximations et des coefficients de détails.

Les coefficients d'approximations sont obtenus par projections du signal sur la fonction d'échelle  $\varphi(t)$  :

$$A_{j,k}(f(t)) = \int f(t) \varphi_{j,k}(t) dt \quad (2.16)$$

La différence d'informations existant entre deux approximations successives de la même fonction « les détails » décrite par :

$$D_{j,k}(f(t)) = \int f(t)\psi_{j,k}(t)dt \quad (2.17)$$

### 3.3.1. L'algorithme de Mallat [27]

Stéphane Mallat a eu l'idée de considérer l'analyse par ondelettes comme une décomposition du signal par une cascade de filtres. Où ces deux filtres (l'un passe-haut et l'autre passe-bas) sont liés à la fonction d'échelle  $\varphi(t)$  et la fonction ondelette  $\psi(t)$ . Dans cet algorithme nous décomposons le signal en approximations ( $A_{j,k}$ ) correspondant aux basses fréquences et les détails ( $D_{j,k}$ ) correspondant aux hautes fréquences puis nous décomposons successivement les approximations ( $A_i$ ) à des approximations et des détails.

Les filtres associés à cet algorithme sont définis comme suit :

- Un filtre passe bas (discret) **H** de réponse impulsionnelle **h** définie par :

$$h_n = \int \varphi(t)\varphi(2t - n)dt \quad (2.18)$$

Et l'équation du filtre est donnée par :  $H(\omega) = \sum h_n e^{-i\omega n}$

- Un filtre passe Haut (discret) **G** de réponse impulsionnelle **g** définie par :

$$g_n = \int \psi(t)\varphi(2t - n)dt \quad (2.19)$$

Et l'équation du filtre est donnée par :  $G(\omega) = \sum g_n e^{-i\omega n}$

#### *A un seul niveau de décomposition*

A la décomposition du signal  $f(t)$ , on applique deux filtres : un filtre passe bas « H », dont sera issue une approximation et un filtre passe haut « G », dont on obtiendra les détails ; chaque filtre, suivi d'un sous-échantillonneur de second ordre qui supprimera un échantillon sur deux.



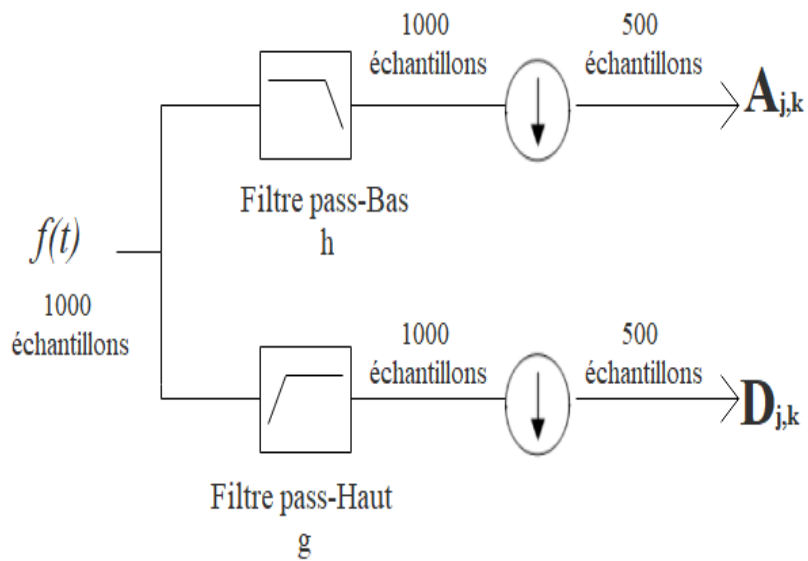


Figure 2.7 : Une décomposition 1D par DWT du signal  $f(t)$

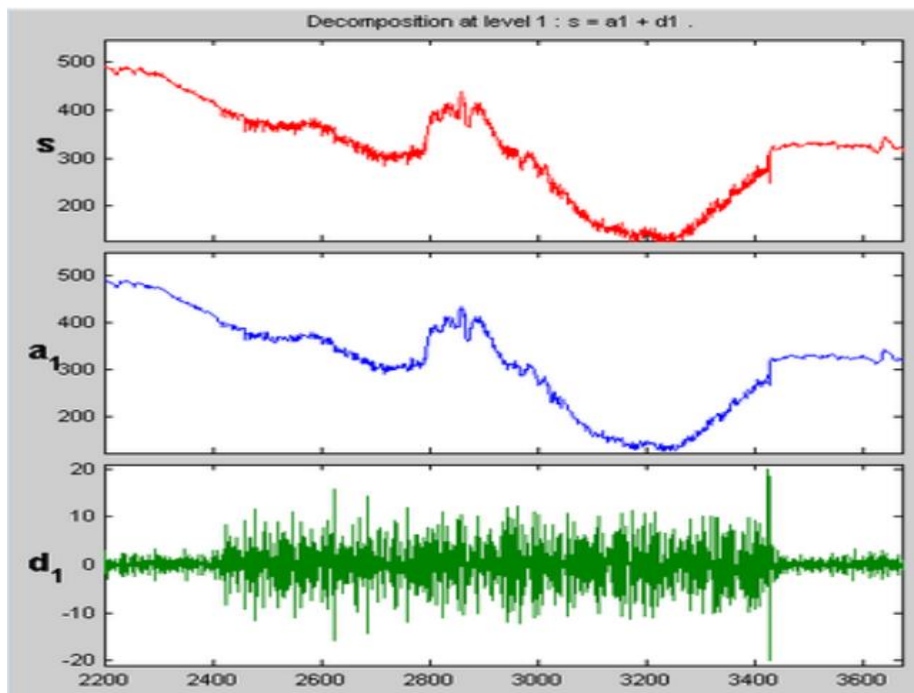


Figure 2.8 : Décomposition d'un signal  $s$  par l'algorithme de Mallat

A la reconstruction, la transformée en ondelettes inverse (IDWT) permet parfaitement de reconstruire le signal  $f(t)$  à partir d'approximation  $(A_{j,k})$  et des détails  $(D_{j,k})$  de la manière suivante :

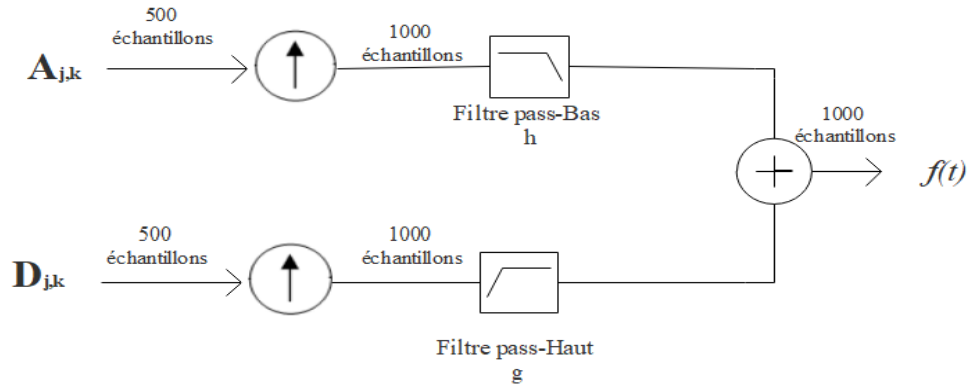


Figure 2.9 : Une reconstruction 1D par IDWT du signal  $f(t)$

Le signal  $f(t)$  est obtenu en sommant les produits des coefficients d'approximations et de détails par les filtres **H** et **G** passent par un sur échantillonneur qu'entrelacer un zéro entre chaque deux échantillons.

**A plusieurs niveaux de décompositions**

Le principe de décomposer un signal à plusieurs niveaux (l'analyse), c'est qu'on décompose au premier niveau notre signal ensuite on décompose dans les niveaux suivants l'approximation du niveau auparavant. Et à la reconstruction (la synthèse) on essayer de récupérer le signal décomposé sans pertes à partir du coefficient d'approximation du dernier niveau et tous les coefficients de détails. La figure ci-dessous explique le principe de l'analyse et la synthèse multi résolution à 3niveaux d'un signal  $S[n]$  :

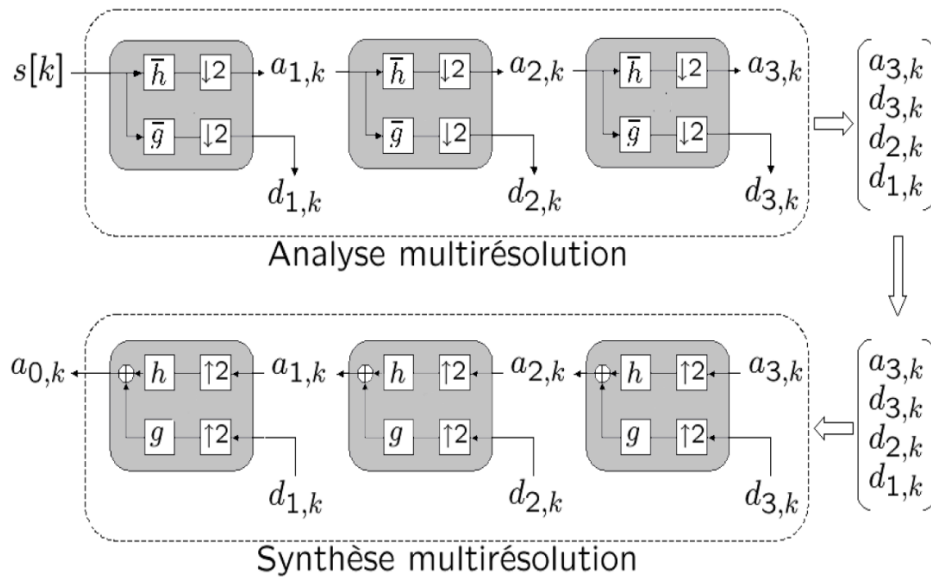


Figure 2.10 : L'algorithmme d'analyse et de synthèse multi résolution à l'échelle 3 d'un signal  $S[n]$

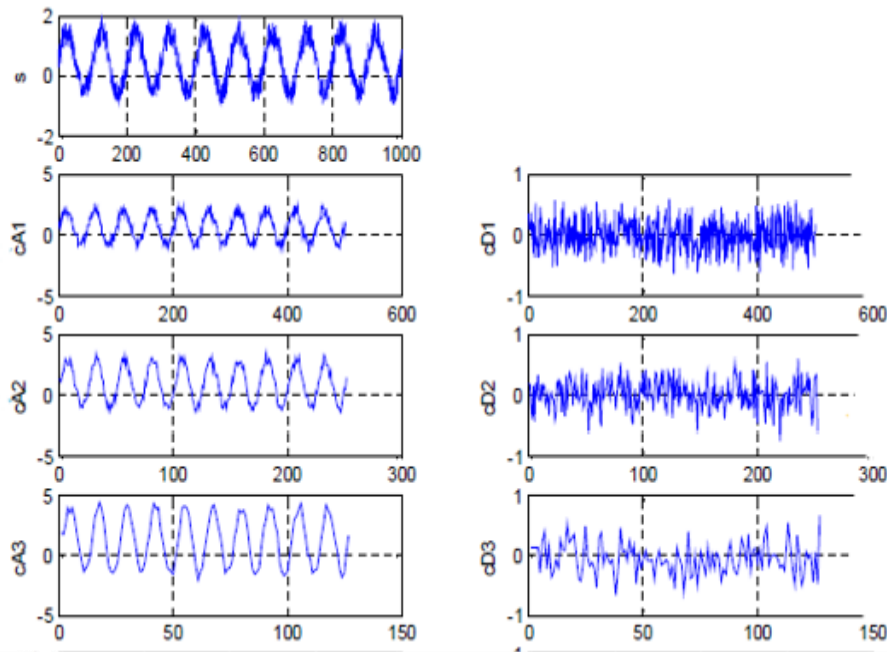


Figure 2.11 : Les coefficients d'approximations et détails à l'échelle 3

- Cette figure représente les approximations et les détails obtenus d'une analyse du signal s.

### 3.4. Famille d'ondelettes

Il existe de nombreuses familles d'ondelettes, résumé dans le tableau suivant :

<i>Nom des familles d'ondelettes</i>	<i>Abréviations</i>
Ondelette de Haar	Haar
Ondelettes gaussiennes complexes	Cgau
Ondelettes gaussiennes	Gaus
Ondelette de Demystified	dmey
Ondelettes Coiflets	Coif
Ondelettes biorthogonales	Bior
Ondelettes de Daubechies	Db
Ondelettes Symlets	Sym
Chapeau mexicain	Mexh
Ondelette de Morlet	Morl
Ondelette de Morlet complexe	Cmor
Ondelettes de Shannon complexes	Shan

Tableau 1 : Familles d'ondelettes [28]

Dans notre travail nous allons utiliser les ondelettes à la décomposition du signal en utilisant une transformée en ondelettes discrètes dans le but d'une modulation, donc on a choisi l'ondelette de « Haar » à cause de sa simplicité et s'orthogonalité, ce qui assure une analyse rapide et une reconstruction parfaite du signal tout en évitant la redondance.

### ❖ *Ondelette de Haar*

L'ondelette de Haar est l'ondelette la plus ancienne et la plus simple des bases d'ondelettes. C'est une ondelette orthogonale, discontinue à filtre et à support compact. Elle représente la même ondelette que Daubechies db1.

La fonction ondelette (ondelette mère) est donnée par :

$$\psi(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t \leq 1/2 \\ -1 & 1/2 \leq t \leq 1 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

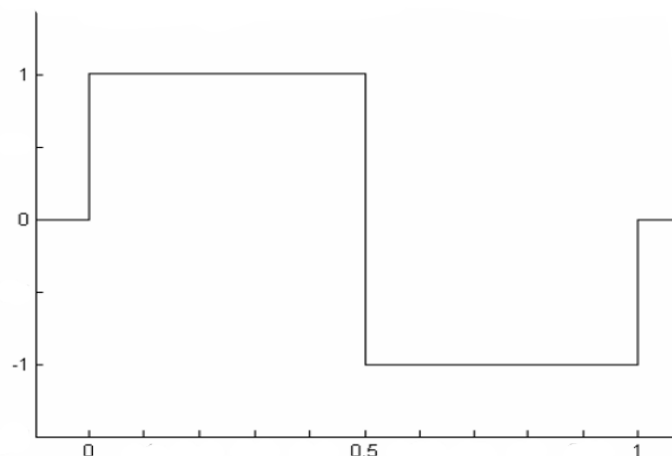


Figure 2.12 : L'ondelette de Haar

La fonction échelle (ondelette fille) utilisée dans la construction de l'ondelette est donnée par :

$$\varphi(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq T \leq 1 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

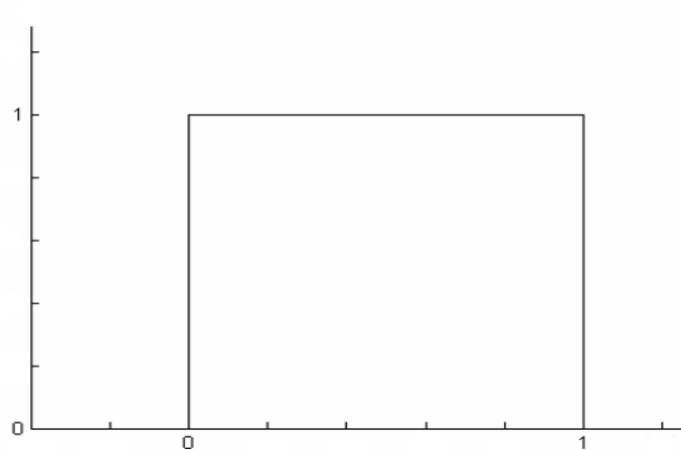


Figure 2.13 : La fonction d'échelle de l'ondelette de Haar

#### 4. Conclusion

A travers ce chapitre nous avons donné une idée globale sur la transformée en ondelettes, qui présente un outil mathématique permettant de donner une autre représentation d'un signal plus localisées et performant que celle donnée par l'analyse de Fourier.

La transformée en Ondelettes permet une analyse complète du signal stationnaire ou pas, sans pertes de localité et sans l'inconvénient des largeurs des fenêtres analysantes. Il est impératif de noter que le choix d'une ondelette analysante par rapport à une autre ne dépend que sur la base du problème à résoudre.

## Chapitre 3

- *Généralité sur les canaux de transmission*

## 1. Introduction

La transmission d'une information d'un point à un autre sous forme d'une onde électromagnétique suit, une chaîne de transmission commençant d'un émetteur, un canal jusqu'à atteindre le récepteur, Chaque partie de cette chaîne est indispensable. Lors de la propagation de cette onde dans le canal s'affecte par les phénomènes physiques passant à l'intérieur du canal, dégradant ainsi la qualité d'information et les performances de la transmission.

Donc dans ce chapitre, nous présentons une brève introduction sur la chaîne de transmission numérique, ensuite nous expliquerons la notion d'un canal et ses phénomènes physiques (des variations en temps et en fréquence) et la modélisation des problèmes couramment affrontés pendant la propagation dans l'espace libre.

## 2. Chaîne de transmission numérique

Les systèmes de transmission numérique ont pour but l'acheminement des informations d'une source vers un ou plusieurs destinataires via une variété de supports physiques tels que des câbles, des fibres optiques ou via des supports sans fil. Le signal transféré peut être d'origine numérique, tel qu'un réseau de données, ou d'origine analogique (voix, image, séquence vidéo etc.) qui, par la suite, est converti au format numérique. Les systèmes de transmission ont pour tâche d'envoyer les informations de la source au destinataire avec la plus grande fiabilité possible [29].

La figure suivante nous démontre le schéma synoptique des fonctions de base d'une transmission numérique :

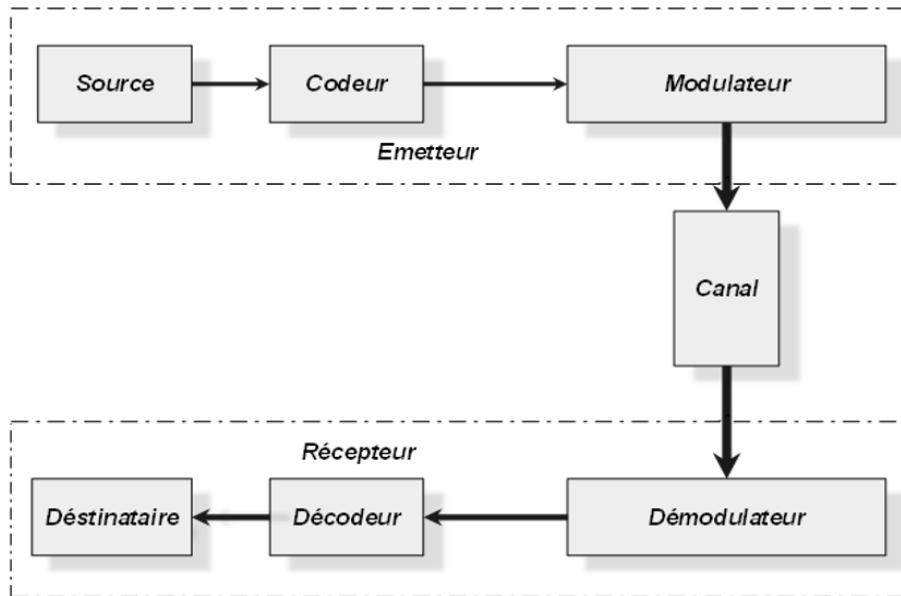


Figure 3.1 : Schéma de base d'une transmission numérique

### 3. Canal de transmission

Un canal de transmission est un médium physique permettant de transmettre des informations d'un expéditeur à un destinataire, dans le cas des communications sans fil, l'atmosphère est considérée comme le canal de propagation. Le travail d'un système de transmission sans fil est de convertir un signal électrique émis en un signal électrique reçu via des ondes électromagnétiques. Par contre, quels que soient les moyens physiques utilisés, le signal transmis est indubitablement altéré par diverses perturbations de nature aléatoires et imprévisibles.

### 4. Propriété d'un canal de transmission

Les systèmes de transmission numérique présentent des limitations de performances et de capacité en raison de deux facteurs associés au canal de transmission [30]:

#### 4.1. Bruit additif

Le bruit est défini comme les signaux qui interfèrent avec la communication, ce brouillage résulte d'un signal parasite de puissance non négligeable qui émet à la même fréquence que le signal utile provoquant une baisse ou une distorsion du rapport signal sur bruit. Le bruit peut être généré par des perturbations aléatoires dans le milieu de propagation (bruit externe) ou par des dispositifs électroniques dans les deux parties de communication. Le bruit externe est fondé sur des propriétés terrestres ou extraterrestres, tandis que le bruit interne provient du



mouvement brownien des électrons présents sur l'appareil, il est modélisé par un bruit blanc gaussien additif à puissance constante (AWGN) [31].

Le bruit qui constitue le bruit interne est appelé "blanc" et est modélisé par un processus aléatoire gaussien moyen en régime permanent nul avec une densité spectrale de puissance bilatérale uniforme :

$$\gamma(f) = N_0/2 \quad \forall f < 10^{13} \text{HZ} \quad (3.1)$$

$N_0$  : La densité de puissance monolatérale du bruit.

## 4.2. L'évanouissement

Le signal rayonné par l'antenne radio se propage soit dans toutes les directions (si l'antenne est omnidirectionnelle), soit dans un ensemble spécifique si l'antenne est directionnelle. Ce signal émis subit une réflexion, une réfraction et une diffusion autour des obstacles dans l'environnement de propagation entre la source et la cible. Les exemples d'obstacles incluent les bâtiments pour les environnements extérieurs, les arbres, les voitures, les meubles pour les environnements intérieurs et les murs. Par conséquent, le récepteur reçoit une version du signal transmis avec une puissance réduite et un retard constant.

L'évanouissement des communications sans fil est en fait une diminution significative de la puissance du signal due à diverses causes, selon le type d'évanouissement qui se produit.

Celles-ci peuvent être divisées en trois catégories : perte de puissance en propagation libre, ombrage et évanouissement.

La perte de puissance représente la perte de force du signal au fur et à mesure que le signal électromagnétique se propage dans l'espace

L'ombrage est dû à la présence d'obstacles fixes dans le chemin de propagation du signal radio

Enfin l'évanouissement se compose d'effets combinés de multiples parcours de propagation, de mouvements rapides des unités émettrices et réceptrices, et enfin, des obstacles. La dernière catégorie énoncée est celle qui nous intéresse.

Cet évanouissement représente une variation rapide de l'amplitude du signal reçu sur une courte période de temps. Ce phénomène est causé par l'interférence de deux versions du signal transmis ou plus qui arrivent au récepteur avec un léger décalage temporel. Les résultantes peuvent varier considérablement en amplitude et en phase, en fonction de plusieurs facteurs tels que l'intensité et le délai entre les ondes par conséquent, les performances du système peuvent être gravement affectées par les fondus, mais heureusement, certaines techniques peuvent aider à contrer cela.

Il existe différents types d'évanouissements et ils sont définis comme suit :

### 4.2.1. Les évanouissements à grande échelle

Cette classe contient deux effets : l'atténuation de distance et les effets de masquage [23]. La première cause de perte de puissance est due à la propagation des ondes électromagnétiques dans l'espace libre. Cela s'explique par la dispersion isotropique de l'énergie transmise selon trois dimensions spatiales. Les pertes en espace libre augmentent avec la fréquence et la distance. L'effet de masquage est dû à la présence d'obstacles entre l'émetteur et le récepteur, aux fréquences auxquelles fonctionnent les systèmes de communication, les ondes électromagnétiques traversent ces obstacles et subissent une atténuation de puissance en fonction de la nature du matériau qui les traverse, ce phénomène est appelé « Shadowing ».

### 4.2.2. Les évanouissements à petite échelle

Ils sont mesurés à des intervalles de temps suffisamment courts pour ignorer les variations des phénomènes à grande échelle. Les fluctuations de puissance observées sont dues à la présence d'objets dans l'environnement qui font de multiples copies du signal d'émission qui peuvent être ajoutées de manière constructive ou destructive au niveau du récepteur. Les principaux mécanismes qui caractérisent l'interaction des ondes avec leur environnement sont :

**La Réflexion** : Ce phénomène se produit lorsqu'une onde rencontre un obstacle dont les dimensions sont supérieures à sa longueur d'onde. Une partie de l'onde est réfléchiée par cet obstacle sous un angle égal à l'angle d'incidence, et l'autre partie de l'énergie est absorbée par l'obstacle du fait du phénomène de réfraction.

**La Diffraction** : Ce phénomène se produit lorsque le chemin de propagation est obstrué par des obstacles de dimensions d'ordre de grandeur de l'onde ou lorsque les obstacles présentent des arêtes vives. Selon le principe "Huygens", chaque point du bord se comporte comme une source secondaire qui rayonne à nouveau l'onde dans toutes les directions.

**La Diffusion** : La diffusion est communément définie par le terme "Scattering", ce phénomène se produit lorsque le trajet des ondes est rempli d'obstacles inférieurs ou égaux à l'ordre de la longueur d'onde alors l'énergie se répand dans toutes les directions.

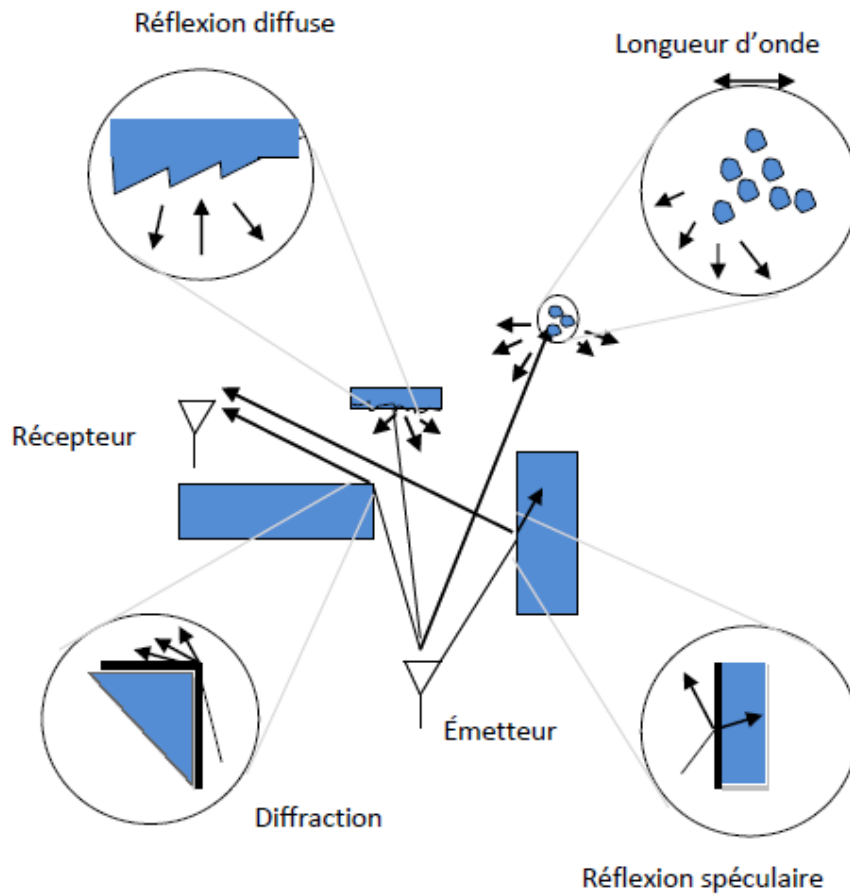


Figure 3.2 : Interaction de l'onde électromagnétique avec le milieu de propagation

## 5. Type de canaux

Plusieurs types de canaux sont à dénombrer, nous citons :

### 5.1. Canal Gaussien: (Additive White Gaussian Noise AWGN)

Le canal à bruit blanc additif est un modèle simplifié pour les signaux néfastes générés par les éléments de la chaîne de transmission ainsi que l'environnement de propagation dont le signal atteint à l'antenne réceptrice  $y(t)$  est égale au signal d'émission  $s(t)$  plus un bruit  $n(t)$  statiquement indépendant du signal.

$$y(t) = s(t) + n(t)$$

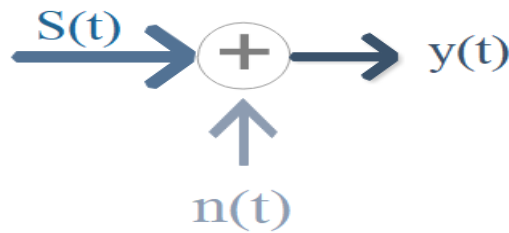


Figure 3.3 : Représentation d'un canal à bruit blanc additif gaussien

On dit que c'est un bruit blanc car il perturbe tout le spectre du signal émis  $s(t)$  pareillement, donc il limite la capacité de la reconstitution convenable de l'information reçue. Théoriquement, on peut modéliser ce canal avec une variable aléatoire gaussienne (une distribution gaussienne) de moyenne nulle  $\mu_b$  et densité spectrale de puissance  $P(x)$  constante et sa variance  $\sigma_b^2$ .

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_b^2}} e^{-\frac{(x-\mu_b)^2}{2\sigma_b^2}} \quad (3.2)$$

## 5.2. Canal de Rayleigh : (Canal à évanouissement)

Dans un système sans fil, un signal transmis dans le canal interagit avec l'évanouissement de manière complexe. En rebondissant sur diverses surfaces tout au long de son trajet vers le récepteur. Il y a des réflexions sur de gros obstacles la diffraction des ondes autour des obstacles et la diffusion du signal aussi que la mobilité d'émetteur et le récepteur. Le canal qui modélise tous ces événements c'est le canal de Rayleigh [32].

Le modèle de Rayleigh est un canal sélectif en fréquence regroupe à la fois les évanouissements et le bruit blanc gaussien, décrit par l'équation suivante :

$$r(t) = h(t) \times s(t) + n(t) \quad (3.3)$$

Où :  $h(t, T_i)$  est la réponse impulsionnelle du canal de Rayleigh, d'un retard  $T_i$ .

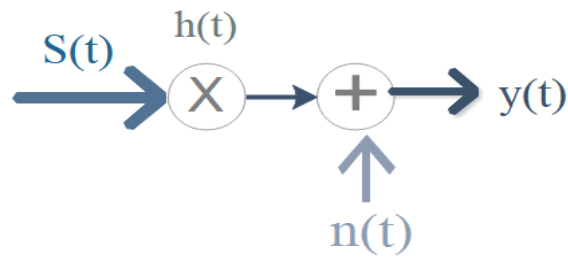


Figure 3.4 : Représentation d'un canal de Rayleigh

La distribution Rayleigh décrit statistiquement la variation de l'enveloppe du signal lorsque le canal transmet au récepteur un grand nombre de trajets multiples, ou il n'y a pas de trajet direct entre l'émetteur et le récepteur NLOS (No-Line Of Sight) ; comme le représente dans la figure ci-dessous :

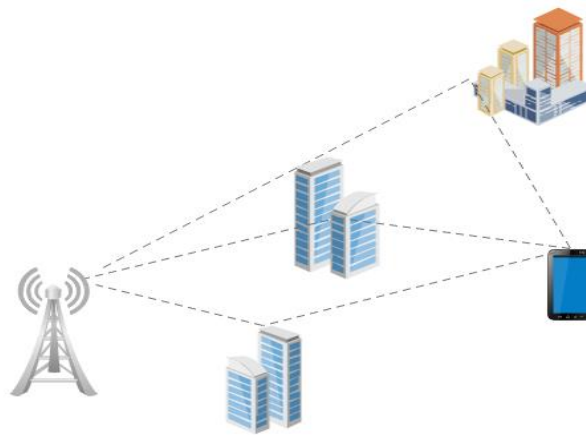


Figure 3.5 : Représentation du trajet NLOS

Cette distribution est caractérisée avec une moyenne nulle de  $h(t)$ , une variance  $\sigma^2$  et une densité de probabilité donnée par :

$$P(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad r > 0 \quad (3.4)$$

## 6. La sélectivité du canal

En premier, on définit la bande et le temps de cohérence :

### 6.1. La bande de cohérence [33]

La bande de cohérence correspond à la gamme de fréquence sur laquelle les caractéristiques de propagation sont fortement corrélées, approximativement c'est l'inverse de son étalement spectrale  $T_{max}$  :

$$B_c = \frac{1}{T_{max}} \quad (3.5)$$

### 6.2. Le temps de cohérence [33]

C'est l'intervalle où les caractéristiques du canal de propagation demeurent quasiment constantes, donné par :

$$T_c = \frac{1}{2 f_{max}} \quad (3.6)$$

### 6.3. La sélectivité fréquentielle

La sélectivité en fréquence se réfère au changement d'amplitude du canal par rapport à la fréquence, néanmoins, dépend essentiellement de la bande de cohérence  $B_c$  et la bande occupée par le signal  $B_s$ .

**Un canal non sélectif en fréquence :** C'est un canal ne génère pas les interférences entre symboles car il comporte un seul trajet.

**Un canal sélectif en fréquence :** C'est un canal multi trajets, chaque trajet étant un canal non sélectif d'atténuation, associé à un retard  $T_i$ . Quand les trajets retardés des symboles précédents interfèrent avec les symboles qui les suivent.

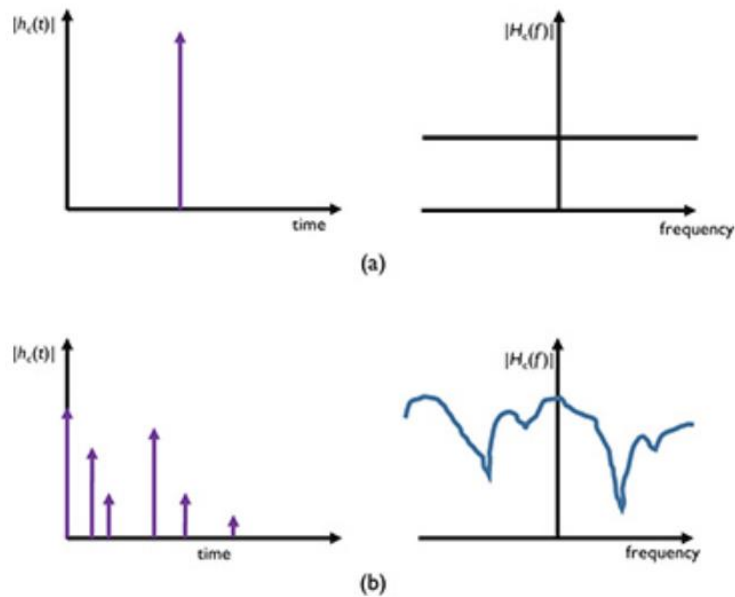


Figure 3.6 : Représente la réponse impulsionnelle du canal pour :

- (a) Un canal à un seul trajet (non sélectif)
- (b) Un canal à trajets multiples (sélectif)

Pour diminuer ces interférences, on utilise l'égalisation du canal au niveau du récepteur.

#### 6.4. La sélectivité temporelle

La sélectivité en temps fait référence à la variation d'amplitude du canal par rapport au temps, dépend de la mobilité d'émetteur/ récepteur aussi que les changements de fréquence due à l'effet du doppler qui dépend ainsi de mouvement d'émetteur et récepteur et la vitesse de propagation, caractérisé par le temps de cohérence  $T_c$ .

On résume la sélectivité dans le schéma ci-dessous et la figure :

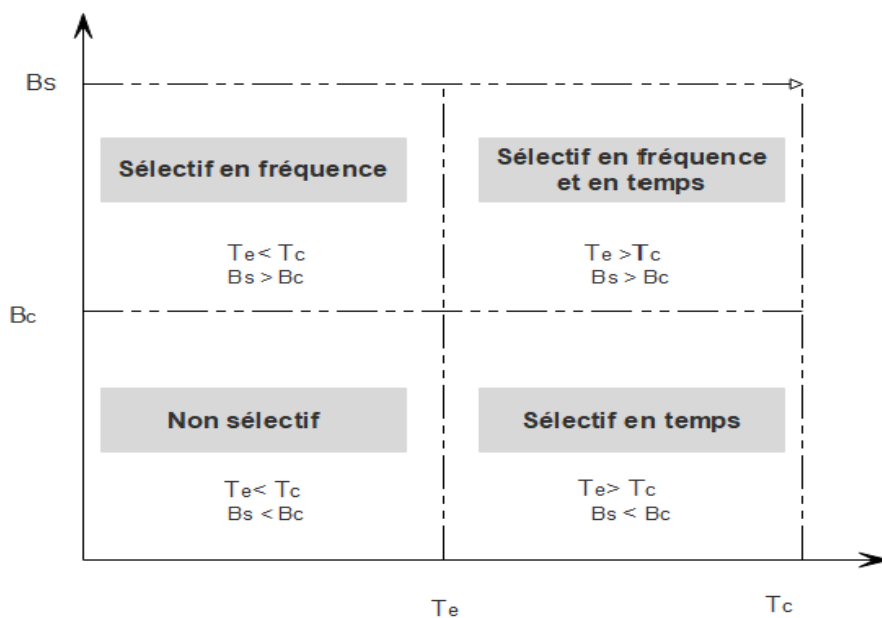
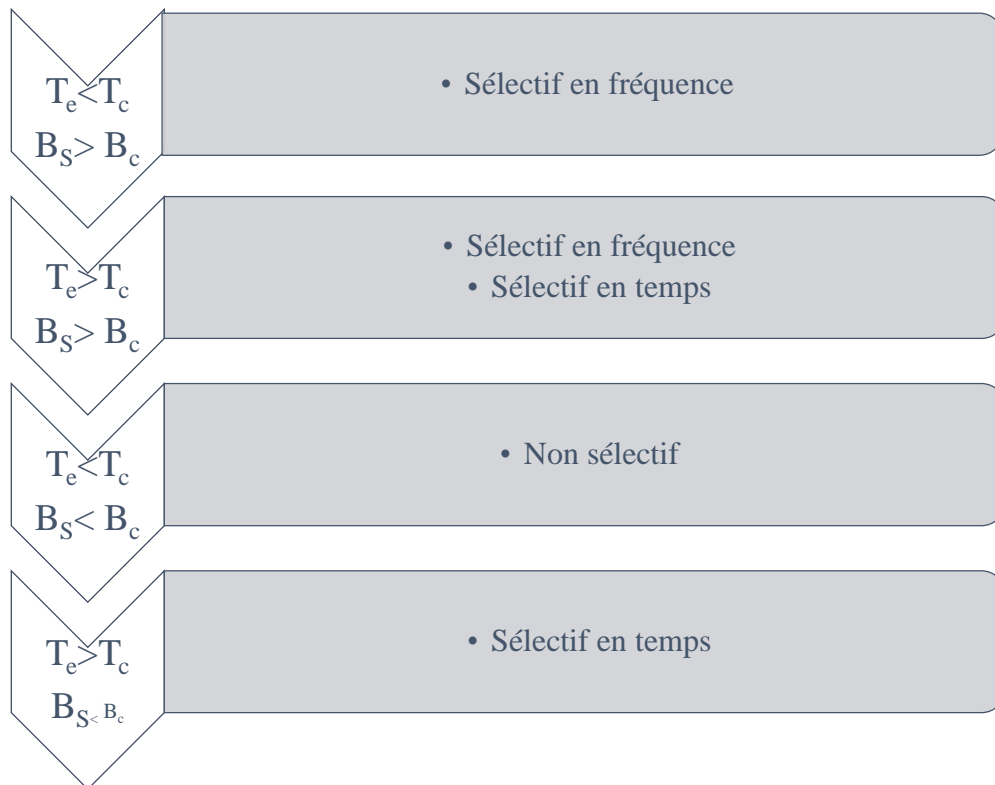


Figure 3.7 : La sélectivité d'un canal



**7. Conclusion**

Au cours de ce chapitre, nous expliquons un système de communication numérique sans fil et les problèmes qui peuvent être affrontés lors de la transmission dans l'espace libre tels que les différents types d'évanouissement et le bruit causés par les composants du système, ou bien les obstacles dans le milieu de propagation qui limitent la vitesse de propagation ; en passant par une généralité sur les canaux et leurs types où nous utiliserons dans notre travail le canal de Rayleigh qui modélise le trajet multiple et le bruit blanc gaussien.

# Chapitre 4

- *Résultats de simulation*

## 1. Introduction

Ce chapitre explore les performances d'un système CDMA multi-porteuses « MC CDMA » en utilisant les ondelettes (IDWT) par rapport au système MC CDMA classique basé sur IFFT, sur des canaux d'évanouissement sélectif en fréquence « canal de Rayleigh ». Tout en analysant la qualité de transmission d'information à partir de la variation du taux d'erreur par bit (BER) en fonction de  $E_b/N_0$ .

En premier, on va voir l'influence d'augmentation du nombre d'utilisateurs et le nombre des sous-porteuses, et à la troisième simulation, on compare le système MC CDMA classique avec le système basé sur les ondelettes, et à la fin, on étudie l'impact du choix du type de la séquence de code (Walsh Hadamard et OVSF) sur la qualité de transmission.

## 2. La modélisation du canal de Rayleigh

Le canal de Rayleigh est un canal que l'on utilise pour modéliser les évanouissements dus au trajet multiple quand il n'y a pas de visibilité directe entre l'émetteur et le récepteur. C'est l'un des canaux les plus difficiles, mais il utilise fréquemment dans les systèmes radiocommunication car il modélise tous les problèmes qui peuvent être rencontrés lors de la propagation tels que l'étalement temporel (le retard  $\tau$ ) et le déphasage dus aux différents trajets et le bruit du milieu de propagation (AWGN) [34] ; comme le représente la figure ci-dessous :

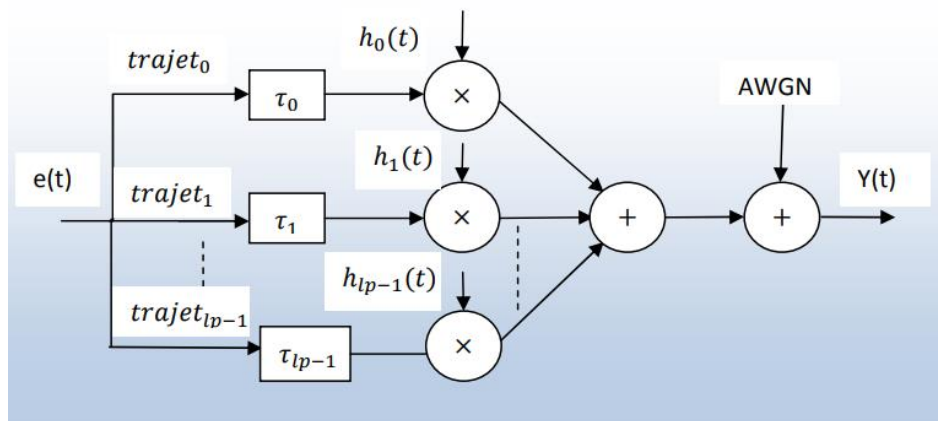


Figure 4.1 : La modélisation du canal de Rayleigh

Où :  $e(t)$  est le signal émis ;

$y(t)$  est le signal reçu ;

$h(t)$  est la réponse impulsionnelle du canal.

Le signal émis  $e(t)$  se propage sur des différents chemins (trajet0 ... lp-1), lequel chaque trajets subit à un retard ( $\tau_0 \dots \tau_{lp-1}$ ) et convole avec la réponse impulsionnelle du canal ( $h_0 \dots h_{lp-1}$ ), en sommant tous les trajets et en ajoutant un bruit blanc gaussien nous obtenons finalement le signal  $y(t)$  atteignant le récepteur.

Dans notre travail, nous modélisons un canal de Rayleigh de quatre (4) trajets (trajet0, 1, 2, 3) avec des différents retards, ainsi qu'un bruit blanc gaussien variant de 0 à 30 dB.

### 3. Séquences d'étalement

Lors de nos travaux, deux séquences d'étalement ont été utilisés : la séquence de Walsh Hadamard ainsi que celle d'OVSF

Voici une courte synthèse sur chaque séquence d'étalement :

#### 3.1. Séquence de Walsh Hadamard

Cette technique fournit un ensemble de codes orthogonaux générés à partir d'une matrice de transformation de Hadamard qui permettent dans un système multi-utilisateur de minimiser les interférences

Cette matrice correspond aux lignes ou aux colonnes orthogonales de la matrice ( $L \times L$ ) construite récursivement de la manière suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} H_1 = +1 \\ H_L = \begin{bmatrix} H_{L/2} & H_{L/2} \\ H_{L/2} & -H_{L/2} \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (4.1)$$

Par exemple, pour l'obtention de quatre codes d'étalement  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  et  $c_4$ , la génération d'une matrice d'Hadamard d'ordre 4 est nécessaire et est de la forme :

$$H_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Les quatre codes seront de la forme :

$$c_1 = [0 \ 0 \ 0 \ 0]; \quad c_2 = [0 \ 1 \ 0 \ 1]; \quad c_3 = [0 \ 0 \ 1 \ 1]; \quad c_4 = [0 \ 1 \ 1 \ 0]$$

La représentation bipolaire de ces codes consiste à remplacer les valeurs [0,1] par les valeurs [-1,1].

### 3.2. Sequence de OVSF (Orthogonal Variable Spreading Factor)

Cette famille des codes sont principalement utilisés pour préserver l'orthogonalité entre les différents utilisateurs d'un système de communication.

Les codes OVSF sont définis sous forme d'une matrice, des lignes N par N, où  $C_N$  est un code d'un facteur d'étalement et l'indice spécifiés, et notons  $C_N(k)$  la kième ligne de  $C_N$ . La matrice des codes est définie comme suit :

$$C_N = \begin{pmatrix} C_N(0) & C_N(0) \\ C_N(0) & -C_N(0) \\ C_N(1) & C_N(1) \\ C_N(1) & -C_N(1) \\ \vdots & \vdots \\ C_N(N) & C_N(N) \\ C_N(1N) & -C_N(N) \end{pmatrix} \tag{4.3}$$

Les codes OVSF sont des codes orthogonaux génères à partir d'un code de Walsh-Hadamard utiliser pour varier le facteur d'étalement selon le premier utilisateur et de multiplexer les différentes informations à transmettent.

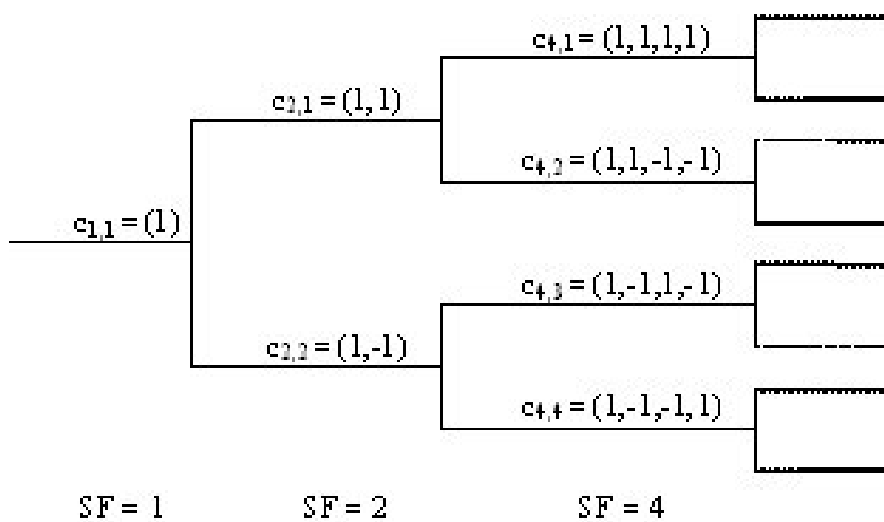


Figure 4.2 : l'arbre d'étalement des codes OVSF.

## 4. Simulations et Analyses

### 4.1. Evaluation de l'influence du nombre d'utilisateur sur le taux d'erreur par bits BER en fonction de $E_b/N_0$

Cette première simulation MATLAB, consiste à évaluer la qualité de la transmission MC CDMA basé sur la technique classique FFT et ce avec l'utilisation de la séquence d'étalement de Walsh Hadamard de longueur 8.

Notre étude consiste en l'évaluation de l'influence de la variation du nombre d'utilisateur sur le taux d'erreur par bits, synonyme de bonne ou mauvaise transmission. Nous procédant ainsi à deux transmissions, une première avec un (1) utilisateur et une seconde avec cinq (5) utilisateurs. En résulte les courbes ci-dessous démontrant la variation du taux d'erreurs par bits en fonction de  $E_b/N_0$  et ce pour chaque transmission :

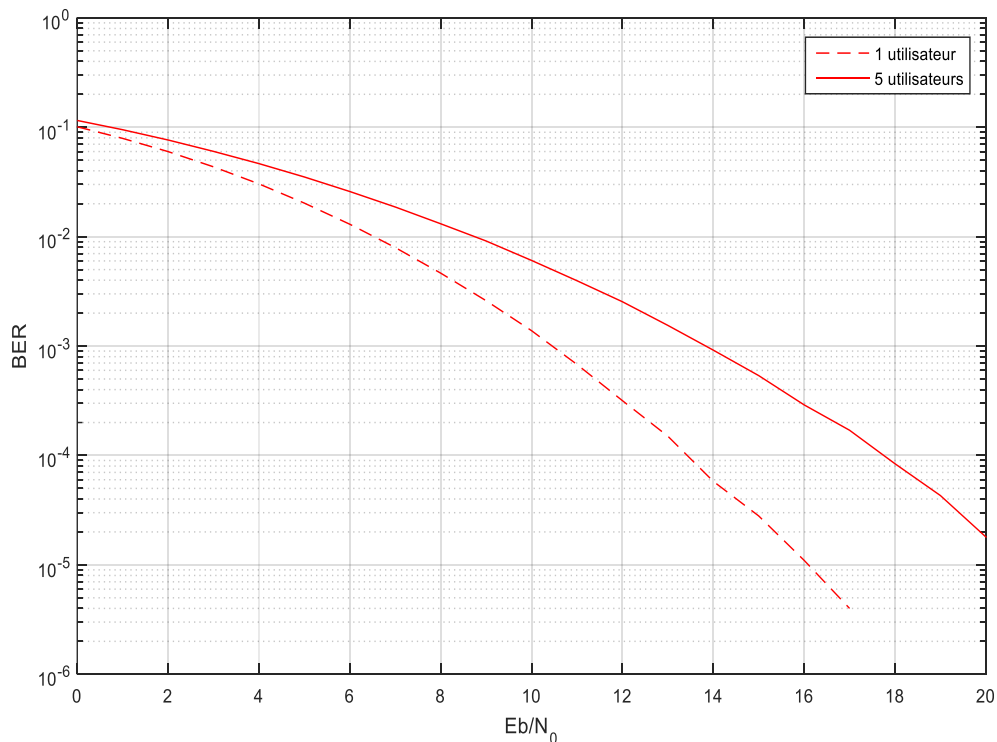


Figure 4.3 : influence du nombre d'utilisateurs sur la qualité de transmission dans un canal de Rayleigh.

Suite à l'analyse de la figure, nous constatons que la transmission avec un (1) utilisateur, en comparaison avec une transmission avec cinq (5) utilisateurs, offre un meilleur rapport BER sur  $E_b/N_0$ , ce qui est synonyme d'une meilleure qualité de transmission.

Le nombre d'utilisateur a donc un impact direct sur la qualité de transmission.

## 4.2. Evaluation de l'influence du nombre de sous porteuses sur les taux d'erreur par bits BER en fonction de $E_b/N_0$

Lors de cette deuxième simulation, nous procédons à une transmission MC CDMA à base d'IFFT classique à travers un canal de Rayleigh de deux (2) séquences de données différentes en nombre de sous porteuses N utiliser lors de la modulations (N=8, N=64).

Le but de notre étude est l'évaluation de l'influence de la variation du nombre de sous porteuse utilisé lors de la transmission sur le rapport de BER sur  $E_b/N_0$  et ainsi déduire son impact sur la qualité de la transmission.

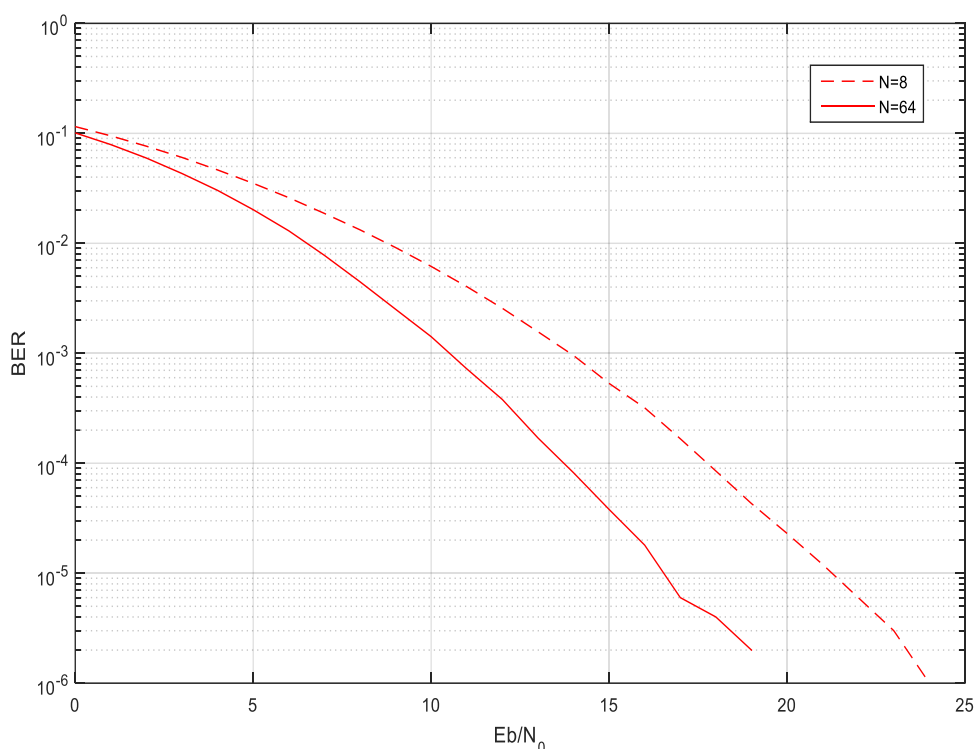


Figure 4.4 : Influence de la longueur de la séquence d'étalement sur la qualité de transmission.

Suite à l'analyse des deux courbes, nous constatons que la transmission contenant le plus grand nombre de sous porteuses (N=64) offre un meilleur taux d'erreur par bits en fonction d' $E_b/N_0$  en comparaison d'une transmission contenant N=8 sous porteuses.

Nous déduisons que l'augmentation du nombre de sous porteuse améliore de façon conséquente la qualité de la transmission.

### 4.3. Evaluation de l'influence de la séquence d'étalement utilisé sur le taux d'erreur par bits BER en fonction de $E_b/N_0$

Lors de cette troisième simulation MATLAB, nous procédant à la transmission MC CDMA de deux (2) séquences de données qui diffèrent dans le choix de la séquence d'étalement utilisée, la première se fait avec l'utilisation du code d'étalement de Walsh Hadamard, tandis que la deuxième se fait avec l'utilisation du code d'OVSF

Le but de cette étude est d'évaluer l'impact de chaque séquence sur le taux d'erreur par bits en fonction de  $E_b/N_0$  dans l'optique de connaître les performances de chaque code et ainsi déduire la séquence d'étalement la plus fiable.

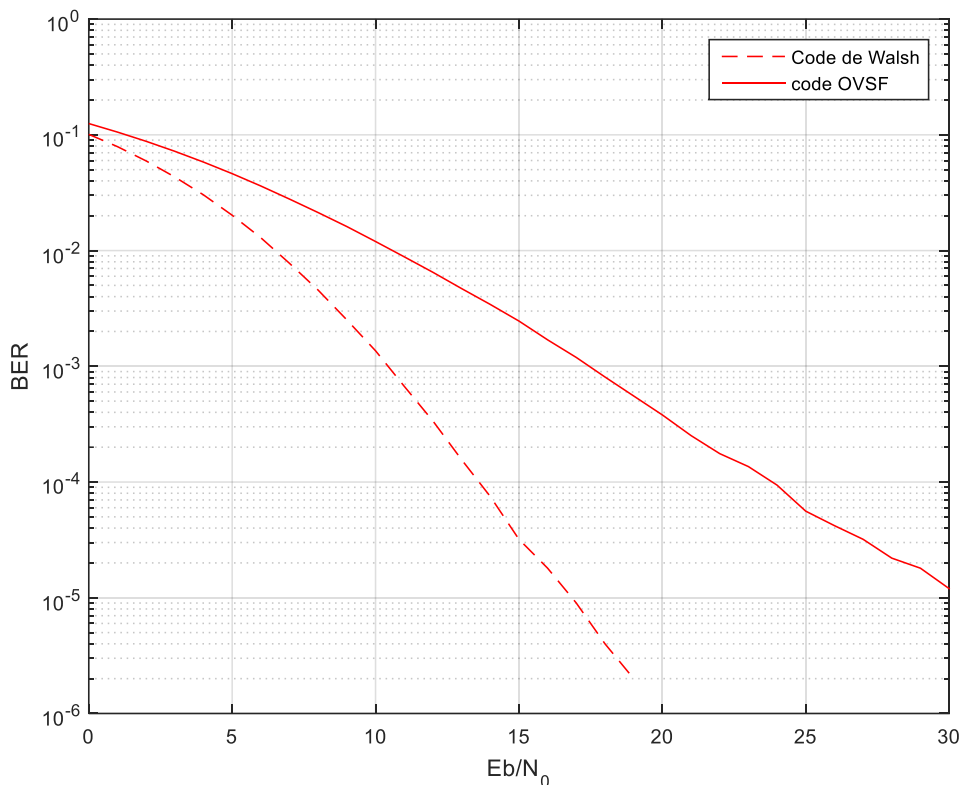


Figure 4.5 : Comparaison entre code Walsh et code d'OVSF dans canal de Rayleigh

Après analyse des deux courbes, nous remarquons une supériorité notable en termes de rapport BER en fonction de  $E_b/N_0$  du code de Walsh Hadamard en comparaison du code d'OVSF ce qui traduit une meilleure qualité de transmission et une plus grande fiabilité.

Nous pouvons donc déduire que le choix de la séquence d'étalement a un impact conséquent sur la qualité de la transmission, ainsi certain code offre de meilleures performances que d'autre.



#### 4.4. Evaluation de l'influence du type de modulation utiliser sur le taux d'erreur par bits BER en fonction de $E_b/N_0$

Lors de cette dernière simulation MATLAB, nous procédons à la transmission MC CDMA de trois (3) séquence de données en variant lors de chaque transmission la technique de modulation utiliser. Les trois techniques de modulation sont :

- MC CDMA classique à base de FFT.
- MC CDMA à base d'ondelette de Haar.
- MC CDMA à base d'ondelette de Morlet.

Le but de cette étude est l'évaluation des performances de chaque technique tout en faisant une comparaison entre chacune afin de déduire celle ayant la plus grande fiabilité lors de la transmission de données

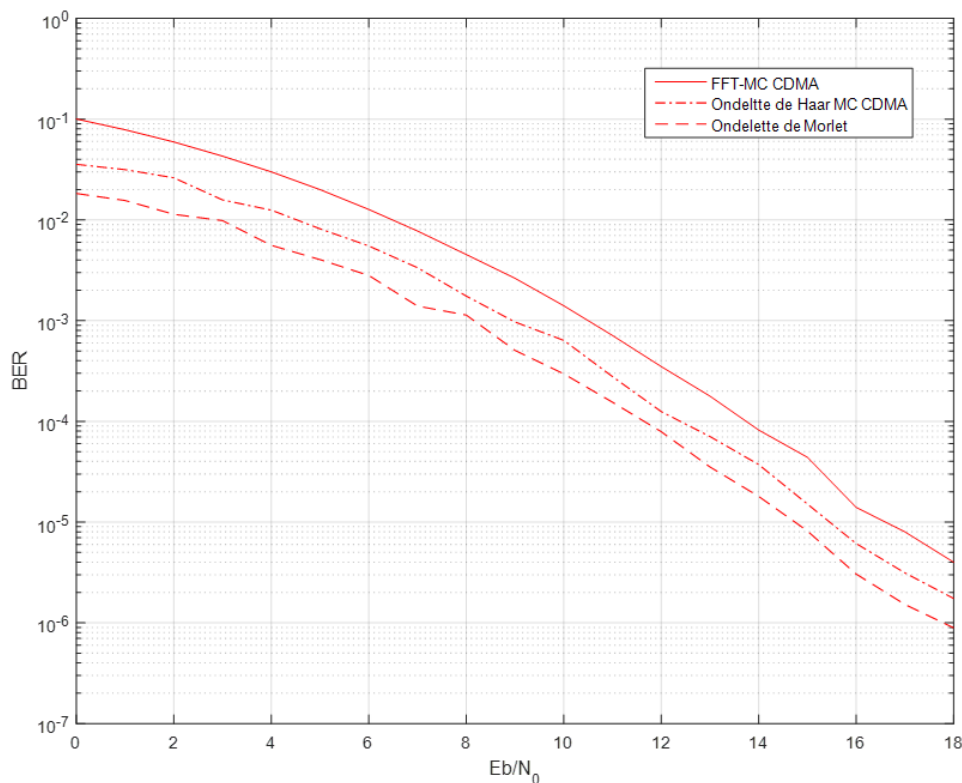


Figure 4.6 : Comparaison entre FFT-MC-CDMA et ondelette-MC-CDMA.

Suite à l'analyse des trois courbes, nous remarquons que les techniques MC CDMA à bases d'ondelettes offre de meilleurs performances BER en comparaison de la technique MC CDMA à base d'FFT. Néanmoins, ces performances diffèrent avec l'utilisation de chaque famille d'ondelettes car les ondelettes de type Morlet présente de meilleurs résultats que les ondelettes de Haar.

Le choix de la technique de modulation a un impact sur le taux d'erreur par bits par rapport au  $E_b/N_0$  et a donc une influence directe sur la qualité et la fiabilité de la transmission.

# Conclusion générale

### Conclusion générale

Dans ce travail, on a proposé et évalué un système de communication sans fil « Système MC CDMA basé sur la transformée en ondelettes » en répondant à la demande émergente d'une transmission supportant des débits élevés et une excellente qualité d'information, qui soit résistif au bruit avec une faible consommation d'énergie.

Le premier chapitre présente les différentes techniques d'accès multiple où on a détaillé la technique d'OFDM permettant de traiter les interférences ISI et ICI avec l'orthogonalité des sous signaux et l'ajout d'intervalle de garde après d'enchaîner sur la technique d'accès multiple à réparation de code CDMA où on y présente son principe de fonctionnement à base d'étalement de spectrale en s'attardant sur le type de code utilisé ainsi que son avantages et inconvénients. Avant de présenter la technique MC-CDMA classique basé sur l'IFFT en combinant les avantages de l'OFDM et CDMA et donnant naissance à un système CDMA multi porteuses plus robuste et performant.

Durant le deuxième chapitre nous faisant un état de l'art général sur les ondelettes, à commencer par une définition de la transformée de Fourier sur laquelle est basé le MC CDMA classique ainsi qu'une synthèse sur son principe de fonctionnement, avant de présenter la technique des ondelettes et l'analyse multi-résolution qui représente la méthode d'analyse de cette technique, pour enfin citer les principales familles d'ondelette développées en mettant l'accent sur l'ondelette de Haar utiliser lors de notre simulation. Ce chapitre met en évidence la différence entre la transformée de Fourier et la transformée en ondelettes qui peuvent être tous les deux implémentés dans une transmission MC CDMA.

Lors du troisième chapitre, on a conclu que dans un système radio mobile, la propagation d'onde émise peut rencontrer des différents obstacles qui provoquent sa distorsion et son évanouissement. Ces phénomènes sont modélisés dans le canal de Rayleigh qu'on a adopté à notre simulation, lequel la sélectivité fréquentielle de ce canal provoque des interférences entre les signaux émis qui dégrade la qualité du service fourni aux utilisateurs.

Le dernier chapitre a été consacré pour une simulation et une évaluation sous MATLAB, du système proposé, lequel on a montré la variation des différents paramètres qui composent cette technique, à savoir le nombre d'utilisateurs, le nombre des sous porteuses utilisées lors de la modulation ou le code d'étalement utilisé à un impact sur la qualité et la fiabilité de la transmission. Pour enfin finir par une comparaison entre le système MC-CDMA classique et le système proposé basé ondelettes, on a pris comme famille l'ondelette de Haar et l'ondelette de Morlet dans le but de déduire la transmission offrant les meilleures performances.

## Conclusion générale

---

Nous pouvons conclure dans un premier temps que chaque paramètre (nombre d'utilisateurs, nombre de sous porteuse, type de code utilisé) à un impact conséquent sur la qualité de transmission et sa fiabilité.

En second ordre, nous concluons que la transmission MC-CDMA à base d'ondelette offre de bien meilleure performance en termes de qualité et de fiabilité que son équivalente à base de transformée de Fourier. En revanche, les performances diffèrent entre chaque famille d'ondelettes, l'ondelette de Haar étant plus performante que celle de Morlet.

Enfin, nous concluons que le système MC CDMA proposé basé sur la transformée en ondelette discrète réduit le taux d'erreur en améliorant la qualité des informations transmises, mais le seul inconvénient de ce système est qu'il n'est pas efficace dans le cas du multi utilisateurs.

Le travail effectué dans ce projet de fin d'étude peut être étendu dans les cas suivants :

- Adaptation aux images de haute résolution.
- Amélioration des performances dans le cas de multi utilisateurs.
- Recherche de codes spécifiques permettant de diminuer voir d'éliminer les interférences entre les utilisateurs.

## Bibliographie

- [1] S. H. Abbas, «Performance of discret wavelet transform based on MC MC CDMA in frequency selective channel,» *European International journal of science and technology*, vol. 4, n° %11, January 2015.
- [2] D. SHAHBAZTABAR, S. ALIREZAEI, M. AHMADI et R. Heydari, «A MC-CDMA system based on orthogonal filter banks of wavelet transforms and partial combining,» *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 94, pp. 128-138, 2018.
- [3] S. C. YANG, OFDMA system analysis and design, Artech House, 2010.
- [4] N. HAMAD, «OFDMA Performance Measurements in WiMAX Physical Layer Network,» *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 10, n° %124, pp. 44393-44398, 2015.
- [5] N. HAMAD, « A New Proposal of Handover Algorithm between Cellular Mobile and Mobile WiMAX Systems,» *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 11, n° %124, pp. 11894-11900, 2016.
- [6] M. Gerami , «A Survey on WiMax,» *International Journal of Computer Science and Information Security ( IJCSIS )*, vol. 8, n° %12, pp. 352-357 , 2010.
- [7] J. H. Choi et H. S. Kwak, «CDMA multi - porteuse sans fil utilisant des ondelettes,» *Telecommunication review 1996*, vol. 6, n° %15, pp. 577-584.
- [8] S. Jajula et P. V. Ramana, «Effects of Nonlinearity on DFT - OFDM and DWT - OFDM Systems,» *International Journal of Eng . Trends and Technology*, vol. 4, n° %16, pp. 2603- 2607, 2013.
- [9] W. H. Zayer et A. K. Amara, «OFDM based FFT compared with OFDM based wavelet transform,» Technical Institute/ Southern Technical University, Iraq, 2019.
- [10] J. Toledano, «UNE GESTION DYNAMIQUE DU SPECTRE,» Gouvernement Francais, Paris, 2014.
- [11] G. T. Peeters et B. Van Houdt, «TDMA, FDMA, and CDMA,» University of Rome La Sapienza, Italy, 2008.

- [12] C. M. Sekkal, «Télé-opération d'un bras manipulateur via les réseaux IP et Mobile,» Université Mohamed Boudiaf des sciences et de la technologi., 2011.
- [13] H. Schulze et C. Luders, *Theory and Applications of OFDM and CDMA*. John Wiley & Sons Ltd, 2005.
- [14] P. Viland, «Etude et optimisation de nouvelles méthodes de construction de codes temps-espace en treillis pour des constellations PSK et QAM,» INSA de Rennes, 2010.
- [15] A. Goldsmith, «Wireless communications,» Cambridge university press, 2005.
- [16] J. GARCIA et R. CUMPLIDO, «On the design of an FPGA Based OFDM modulator for IEEE 802.11a,» chez *2nd international conference on electrical and electronics engineering*, Mexico, 2005.
- [17] M. Thériault, «Etude des performances d'un système DS-SS avec récepteur RAKE dans le contexte UWB,» Faculté Des Sciences et Génie Université Laval, Québec, 2006.
- [18] S. Lee, *Spread Spectrum CDMA : IS-95 and IS-2000 for RF Communications*, McGraw Hill, 2002.
- [19] H.-H. CHEN, *The next generation CDMA technologie*, John Wiley & Sons, 2007.
- [20] F. SOUHILA, «Etude de la capacité du canal de propagation dans un système MIMO,» Université ABOU-BEKR BELKAÏD, Tlemcen, 2007.
- [21] N. YEE, J.-P. LINNARTZ et G. FETTWEIS, «Multi-carrier CDMA in indoor wireless radio networks,» *IEICE Transactions on Communications*, vol. 77, n° 17, pp. 900-904, 1994.
- [22] M. MOHAISEN, Y. WANG et K. CHANG, *Multiple antenna technologies*, 2009, arXiv preprint arXiv:0909.3342.
- [23] Y. NASSER, «Sensibilité des systèmes OFDM-SS aux erreurs de synchronisation en réception radio-mobile,» Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2006.
- [24] Y. LUO, *AMSC 662 Project Progress Report Image Denoising by Wavelet Thresholding..*
- [25] S. Paris, *LE MULTIMÉDIA ET LA COMPRESSION*, Hermes Science Publications , 2009.

- [26] I. Mahieddine et Y. Hammou, «Détection et localisation dans le temps des différentes porteuses à l'aide d'un passe bande RIF / Ondelette continue,» Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, 2021.
- [27] BABOURI, M. Khemissi et N. OUELAA, «Application de l'Analyse Multirésolution en Ondelettes Pour la Prédiction de l'Usure des Outils de Coupe,» chez *10ème Congrès Français d'Acoustique*, 2010.
- [28] M. YOUNSI et Y. MEDJTOUH, «Développement d'un système biométrique pour la reconnaissance de visages basé sur les ondelettes,» UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2016.
- [29] O. BERDER, «Optimisation et stratégies d'allocation de puissance des systèmes de transmission multi-antennes,» Université de Bretagne occidentale, Brest, 2002.
- [30] H. BOEGLIN, C. CHATELLIER, C. OLIVIER et O. Haeberle, «Un système de transmission d'images fixes robuste pour canaux radiomobiles sélectifs en temps et en fréquence,» chez *12èmes journées d'étude et d'échange Compression et Représentation des Signaux Audiovisuels*, CORESA, 2007.
- [31] J. G. Proakis, *Digital communications*, 1995.
- [32] S. RAMASWAMY et V. Raghavan, «A comparative study of Rayleigh fading wireless channel simulators,» Texas A&M University, 2006.
- [33] M. Sofiane, «Évaluation des performances des images compressées par l'algorithme TOD-SPIHT, et transmises via le système MC-CDMA ,» L'Université Djillali Liabes de Sidi- Bel-Abbes BENDELHOUM.
- [34] A. Saadani, «Méthodes de simulations rapides du lien radio pour les systèmes 3G,» Télécom ParisTech, 2003.