

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université Djilali Bounaama – Khemis-Miliana**



**Faculté des Sciences et de la Technologie**  
**Département de la Technologie**

Mémoire du Projet de Fin d'Etudes  
Pour l'obtention de diplôme

**Master**

En

« Télécommunications »

Option :

« Systèmes de Télécommunications »

Titre :

**Etude et Simulations des performances des systèmes  
de communications à étalements de spectres dans les  
communications radio-mobiles**

Réalisé par :

Etudiante 1 : ZIANI Zineb  
Etudiante 2 : MELLAKHI Akila

Encadreur :

Dr. BENYAROU Mourad

Année Universitaire 2016/2017

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à*

*Ma famille que je tiens à remercier.*

*J'exprime ma profonde gratitude à mes parents et mes frères et sœurs de  
m'avoir soutenu non seulement durant ce travail mais tout au long de ma  
vie.*

*Ziani Zineb*

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à*

*Mes très chères parentes, pour leurs soutient moral et financier et d'être la  
lumière de ma vie, qui m'ont toujours encouragé pour terminer mes études, en leur  
espérant une longue vie et que Dieu les gardes.*

*À toute ma famille sans exception*

*À tous ceux et celles qui me sont chers ...*

*Mellakhi Akila*

# Remerciements

*Nous sommes reconnaissantes à grand Dieu pour la bonne santé et le bien-être qui nous a aidé à compléter ce travail.*

*Nous remercions messieurs les membres de jury d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.*

*Nous tenons à exprimer notre sincère gratitude à notre encadreur Dr BEMAROU Mourad pour le soutien continu, pour sa patience, de motivation et savoir immense. Ses conseils nous ont aidé dans tout le temps de la recherche et la rédaction de ce mémoire.*

*Nos sincères remerciements vont également à tous nos professeurs durant ces cinq années à l'université, pour leurs conseils, leur aide et leur soutien.*

*Enfin nous en profitons pour remercier tous nos collègues pour tout le plaisir que nous avons eu au cours des cinq dernières années.*

## Résumé

L'étalement de spectre est une technique très robuste pour combattre les interférences causées par les brouilleurs ou les interférences d'accès multiples. Cette technique est à la base des systèmes radio-mobiles de 3<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> génération.

Ce projet de fin d'étude est consacré à la mise en évidence des performances des systèmes à étalements de spectre dans une chaîne de communication multi-utilisateurs avec un canal multi-trajets.

**Mots clés :** Canal radio-mobile, étalement de spectre, communications numériques, accès multiples, brouilleurs.

---

## المخلص

النطاق الترددي العريض هي تقنية قوية جدا لمكافحة التداخلات التي تسببها اجهزة التشويش او تداخلات الوصول المتعدد بسبب تبادل الاتصالات بين المستخدمين في نفس الوقت. هذه التقنية هي التي كانت وراء تطور انظمة الاتصالات للجيل الثالث و الرابع.

مشروع نهاية الدراسة هذا يتمحور حول دراسة اداء و مدى كفاءة انظمة النطاق الترددي العريض في سلسلة اتصال متعددة المستخدمين عبر قناة اتصال متعددة المسالك.

**كلمات مفتاحية :** قناة الاتصال, نطاق ترددي عريض, اتصال رقمي, الوصول المتعدد, اجهزة التشويش.

---

## Abstract

The spread spectrum is a technique very efficient to combat the interference caused by the Jammers or the interference of multiple access. This technique is at the appearance of the mobile radio systems of 3<sup>rd</sup> and 4<sup>th</sup> generation.

This project is devoted to the highlighting of the performance of the spread spectrum systems multiuser communication chain via multiple paths channel.

**Keywords:** radio mobile channel, spread spectrum, digital communication, multiple access, jammers.

# Table de Matières

**Remerciements**

**Résumé**

**Introduction générale**.....1

**Chapitre I : Introduction aux systèmes de communications numériques à accès multiple**

I.1 Introduction.....3

I.2 Systèmes de communication numérique.....3

I.3 L'accès multiple (multiplexage).....4

I.3.1 L'accès multiple à répartition de fréquence FDMA.....5

I.3.1.1 Définition.....5

I.3.1.2 Principe de fonctionnement.....6

I.3.1.3 Avantages.....8

I.3.1.4 Inconvénients.....8

I.3.2 L'accès multiple à répartition du temps TDMA.....8

I.3.2.1 Définition.....8

I.3.2.2 Principe de fonctionnement.....9

I.3.2.3 Avantages.....11

I.3.2.4 Inconvénients.....11

I.3.3 L'accès multiple à répartition de codes CDMA.....11

I.3.3.1 Définition.....11

I.3.3.2 Principe de fonctionnement.....12

I.3.3.3 Les avantages du CDMA.....13

I.3.3.4 Inconvénients.....14

I.3.4 L'accès multiple à répartition spatiale (SDMA).....14

I.4 Conclusion.....16

## **Chapitre II : Les systèmes de communication à étalements de spectre dans un canal radio-mobile**

II.1 Introduction.....	17
II.2 La communication radio mobile.....	17
II.2.1 Le canal radio mobile.....	18
II.2.1.1 Analyse physique.....	18
II.3 L'étalement de spectre.....	19
II.3.1 Les techniques d'étalement.....	20
II.3.1.1 Étalement de spectre à saut de fréquence.....	21
II.3.1.2 Étalement de spectre avec saut de temps TH-SS (Time Hopping Spread Spectrum).....	22
II.3.1.3 Étalement de spectre par séquence directe.....	23
II.3.2 Les codes d'étalement.....	25
II.4 Les combinaisons entre la modulation OFDM et l'accès CDMA.....	26
II.4.1 La technique de MC-CDMA.....	27
II.4.2 La technique de MC-DS-CDMA.....	29
II.4.3 La technique MT-CDMA.....	32
II.5 Conclusion.....	33

## **Chapitre III : Simulations des performances des systèmes de communications à étalements de spectres dans les communications radio-mobiles.**

III.1 Introduction.....	34
III.2 Simulation de la technique d'étalement de spectre DS-CDMA en utilisant les séquences PN dans un canal AWGN.....	34
III.3 Simulation de la technique d'étalement de spectre MC-CDMA en utilisant les codes Hadamard dans un canal AWGN et Rayleigh avec les calculs des performances en termes de $BER=f(SNR)$ .....	39
III.3.1 Emission et réception des données pour la technique MC-CDMA.....	39
III.3.2 Taux d'erreur binaire en fonction de SNR pour la MC-CDMA.....	42
III.3.2.1 L'influence du nombre des sous porteuses sur les performances du système.....	42

III.3.2.2 L'influence du nombre des utilisateurs sur les performances du système.....	47
III.3.2.3 L'influence du nombre de bits envoyés sur les performances du système....	48
III.4 Conclusion.....	50
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>51</b>
<b>Bibliographie</b>	

## **LISTE DES ABREVIATIONS**

<b>3GPP</b>	3rd Generation Partnership Project
<b>AWGN</b>	Additive White Gaussian Noise
<b>AMRC</b>	Accès Multiple par Répartition de code
<b>AMRF</b>	Accès Multiple par Répartition de Fréquence
<b>AMRS</b>	Accès Multiple par Répartition Spatiale
<b>AMRT</b>	Accès Multiple par Répartition de Temps
<b>BBGA</b>	Bruit Blanc Gaussien Additif
<b>BER</b>	Bit Error Rate
<b>BPSK</b>	Binary Phase Shift Keying
<b>CDMA</b>	Code Division Multiple Access
<b>DS-CDMA</b>	Direct-Sequence Code Division Multiple Access
<b>DS-SS</b>	Direct Sequence Spread Spectrum
<b>FDMA</b>	Frequency Division Multiple Access
<b>FH-CDMA</b>	Frequency Hopping Code Division Multiple Access
<b>FH-SS</b>	Frequency Hopping Spread Spectrum
<b>FFT</b>	Fast Fourier Transform
<b>IES</b>	Interférences Entre Symboles
<b>IFFT</b>	Inverse Fast Fourier Transform
<b>ISI</b>	Inter Symbols Interference
<b>MC-CDMA</b>	Multi Carrier-Code Division Multiple Access

<b>MC-DS-CDMA</b>	Multi Carrier-Direct Sequence-Code Division Multiple Access
<b>MT-CDMA</b>	Multi Tone Code Division Multiple Access
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency Division Multiplex.
<b>PN</b>	Pseudo Noise
<b>RSB</b>	Rapport Signal sur Bruit
<b>SDMA</b>	Space Division Multiple Access
<b>SNR</b>	Signal to Noise Ratio.
<b>TDMA</b>	Time Division Multiple Access
<b>TEB</b>	Taux d'Erreur Binaire
<b>UMTS</b>	Universal Mobile Telecommunications System
<b>WDM</b>	Wavelength Division Multiplexing Access

## Liste des Figures

Figure (I.1) : Structure simplifiée d'un système de communication numérique.....	3
Figure (I.2) : Multiplexage des possibilités d'accès à un canal de transmission.....	4
Figure (I.3) : FDMA, accès multiple a répartition en fréquence.....	5
Figure (I.4) : Séparation des bandes de fréquences par une bande de garde.....	6
Figure (I.5) : Exemple de multiplexage fréquentiel pour 4 signaux différents.....	7
Figure (I.6) : TDMA, accès multiple à répartition du temps.....	8
Figure (I.7) : Exemple de multiplexage temporel pour 4 signaux différents.....	10
Figure (I.8) : Le CDMA , accès multiple à répartition de codes.....	11
Figure (I.9) : Principe d'utilisation des codes orthogonaux en CDMA.....	12
Figure (I.10) : SDMA , accès multiple à répartition spatiale.....	15
Figure (II.1) : Scénario typique de propagation radio-mobile.....	19
Figure (II.2) : Le saut de fréquences.....	21
Figure (II.3) : La technique d'étalement TH-SS.....	22
Figure (II.4) : Étalement de spectre par séquence directe.....	23
Figure (II.5) : Exemple d'étalement de spectre.....	24
Figure (II.6) : Génération d'un signal MC-CDMA pour un utilisateur .....	27
Figure (II.7) : Schéma de transmetteur MC-CDMA.....	28
Figure (II.8) : Schéma du récepteur MC-CDMA.....	29
Figure (II.9) : Modulateur MC-DS-CDMA.....	30
Figure (II.10) : Spectre des sous-porteuses du signal MC-DS-CDMA pour le $j^{ième}$ utilisateur.....	31
Figure (II.11) : Récepteur MC-DS-CDMA du $j^{ième}$ utilisateur.....	32
Figure (II.12) : Transmetteur MT-CDMA.....	32
Figure (II.13) : Spectre de fréquence pour la MT-CDMA.....	33
Figure (III.1) : Les données des 4 utilisateurs codées en NRZ puis modulées.....	35
Figure (III.2) : Les données des 4 utilisateurs étalées après multiplication par séquences PN.....	36
Figure (III.3) : Le spectre du signal d'un utilisateur avant et après étalement.....	36
Figure (III.4) : Le signal composite transmis dans le canal AWGN.....	37
Figure (III.5) : Les signaux des 4 utilisateurs à la réception désétalés et démodulés .....	38

Figure (III.6) : Les données des 4 utilisateurs en émission et réception.....	38
Figure (III.7) : Les codes d'étalement.....	39
Figure (III.8) : Les données émises étalées et moduleés par les sous porteuses.....	40
Figure (III.9) : Le spectre du signal émis d'un utilisateur avant et après étalement.....	40
Figure (III.10) : Les données reçues pour 4 utilisateurs.....	41
Figure (III.11) : Taux d'erreur binaire en fonction de SNR pour 4 utilisateurs en MC-CDMA avec bruit AWGN et un canal Rayleigh avec 4 sous-porteuses.....	43
Figure (III.12) : Taux d'erreur binaire en fonction de SNR pour 4 utilisateurs en MC-CDMA avec bruit AWGN et un canal Rayleigh avec 8 sous-porteuses.....	44
Figure (III.13) : Taux d'erreur binaire en fonction de SNR pour 4 utilisateurs en MC-CDMA avec bruit AWGN et un canal Rayleigh avec 16 sous-porteuses.....	44
Figure (III.14) : Taux d'erreur binaire en fonction de SNR pour 4 utilisateurs en MC-CDMA avec bruit AWGN et un canal Rayleigh avec 32 sous-porteuses.....	45
Figure (III.15) : Taux d'erreur binaire en fonction de SNR pour 4 utilisateurs en MC-CDMA avec bruit AWGN et un canal Rayleigh avec 64 sous-porteuses.....	46
Figure (III.16) : Taux d'erreur binaire en fonction de SNR pour 4 utilisateurs en MC-CDMA avec bruit AWGN et un canal Rayleigh avec 128 sous-porteuses.....	46
Figure (III.17) : Taux d'erreur binaire en fonction de SNR en MC-CDMA avec bruit AWGN dans un canal Rayleigh pour 8 utilisateurs avec 32 sous-porteuses.....	47
Figure (III.18) : Taux d'erreur binaire en fonction de SNR en MC-CDMA avec bruit AWGN dans un canal Rayleigh pour 16 utilisateurs avec 32 sous-porteuses.....	48
Figure (III.19) : Taux d'erreur binaire en fonction de $E_b/N_0$ pour 4 utilisateurs en MC-CDMA avec nombre de bits envoyé égal à $10^4$ , $10^3$ , $10^2$ et 10.....	49

# **Introduction générale**

## **Introduction générale**

Il y avait une utilisation intensive de la guerre de communication pendant la seconde guerre mondiale. Ce fait a exposé la capacité d'intercepter et d'interférer avec les communications hostiles. Par conséquent, cette procédure a beaucoup stimulé d'intérêt qui a conduit à l'élaboration des systèmes de communications. Les travaux ont démarré pour exploiter le développement d'une nouvelle technologie. Cette technologie est appelée les techniques d'étalement de spectre, qui échangent l'expansion de bande passante pour garantir la sécurité des communications et pour les applications militaires.

A la fin de la guerre, la théorie des techniques d'étalement de spectre s'est beaucoup développée et sa capacité antibrouillage a été reconnue. Et à la fin des années 70, les applications commerciales d'étalement de spectre sont devenues une réalité.

Ce mémoire se compose de trois chapitres.

Dans le premier chapitre nous allons entamer les notions de base d'un système de communication numérique, nous allons parler plus précisément sur les techniques d'accès multiple. Ces techniques sont utilisés afin de permettre à un grand nombre d'utilisateurs de partager le canal alloué dans la manière la plus efficace. On précise dans cette partie le principe ainsi que les avantages et inconvénients de chaque technique. En effet c'est la technique CDMA qui nous intéresse le plus puisqu'elle est basée sur l'étalement de spectre.

En second chapitre nous commencerons par le canal radio mobile, ces caractéristiques et les perturbations qu'il présente. Nous allons présenter les différentes techniques d'étalement de spectre et nous allons parler du principe de chaque technique, de plus nous mettrons en évidence les codes utilisés pour étaler le spectre d'un signal, enfin nous présenterons la combinaison entre la méthode d'accès CDMA et la modulation OFDM.

Dans le troisième chapitre consacré à la simulation nous allons présenter les performances deux techniques différentes employées dans les systèmes de radiocommunication par étalement de spectre, en utilisant un canal Gaussien et un canal Rayleigh.

La première technique à simuler c'est la DS-CDMA (Direct Séquence Code Division Multiple Access), nous allons décrire chaque étape de la simulation du système de communication ainsi que l'effet d'étalement de spectre sur la transmission.

La deuxième technique que nous allons simuler est la MC-CDMA (Multi Carrier Code Division Multiple Access), en mettant en évidence chaque partie du système. Nous présenterons les résultats des simulations, une analyse des résultats, les conclusions et enfin les perspectives.

# **Chapitre I**

## **Introduction aux systèmes de communications numériques à accès multiple**

## I.1 Introduction

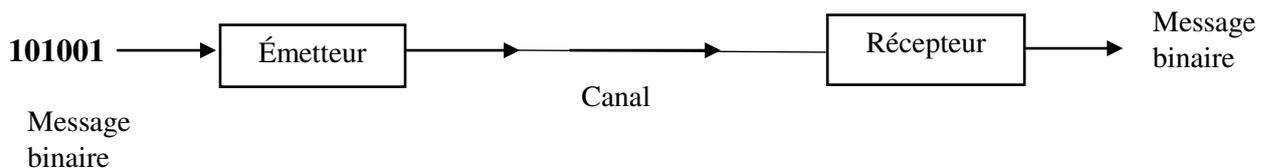
Ce premier chapitre a pour but de présenter les notions de base et les éléments indispensables pour bien comprendre la recherche menée au cadre de ce mémoire. D'abord nous allons rappeler les notions de base dans un système de communication numérique, nous décrivons ensuite les principes des techniques d'accès multiple qui sont très souvent employées dans les systèmes de communications numériques.

## I.2 Système de communication numérique

Un système de communication numérique est l'ensemble des moyens qui permettent la transmission des informations sous forme numérique d'une source vers un destinataire. Ces informations transmises peuvent être délivrées d'une manière numérique depuis la source (un ordinateur par exemple), ou être obtenues à partir d'une source analogique après discrétisation (parole, musique, image, . . .).

De plusieurs flux d'information sont souvent présents dans Les transmissions numériques. Le grand nombre de flux d'information simultanés est l'un des principales qualités de ce type de transmission. Considérons deux correspondants distants qui souhaitent échanger une information : des données, de la voix, des images, vidéo... etc.

Nous supposons que cette information peut être représentée sous forme d'un message Composé d'éléments binaires [1].



**Figure I.1** : Structure simplifiée d'un système de communication numérique.

Le message binaire, objet abstrait, doit traverser un canal de transmission Par exemple câble métallique, fibre optique, espace libre (air, vide, eau).

L'émetteur doit donc adapter le message au canal physique : en cas d'un câble métallique, l'information sera véhiculée via un courant électrique. Un bit 0 on peut le coder par un certain niveau de tension, un bit 1 par un autre niveau. La propagation dans une fibre optique, est l'émission de lumière ou son absence qui code un élément binaire.

Enfin, pour une propagation en espace libre, notre message est transmis par des ondes de nature adaptée à l'espace : ondes radio dans l'air et le vide, ondes acoustiques dans l'eau. Le signal transmis prend généralement la forme d'une sinusoïde, dont l'information est codée par son amplitude, sa fréquence ou sa phase. L'objectif d'un système de communication numérique est d'assurer, pour tous les utilisateurs, le débit maximum avec la probabilité d'erreur binaire (bit erronée) minimale.

Ces deux objectifs sont contradictoires, de sorte qu'il faut trouver un compromis entre débit et taux d'erreurs (la qualité) souhaitée pour l'application visée et les contraintes rencontrées au niveau du canal. Notons que le taux d'erreur acceptable dépend de l'application [2].

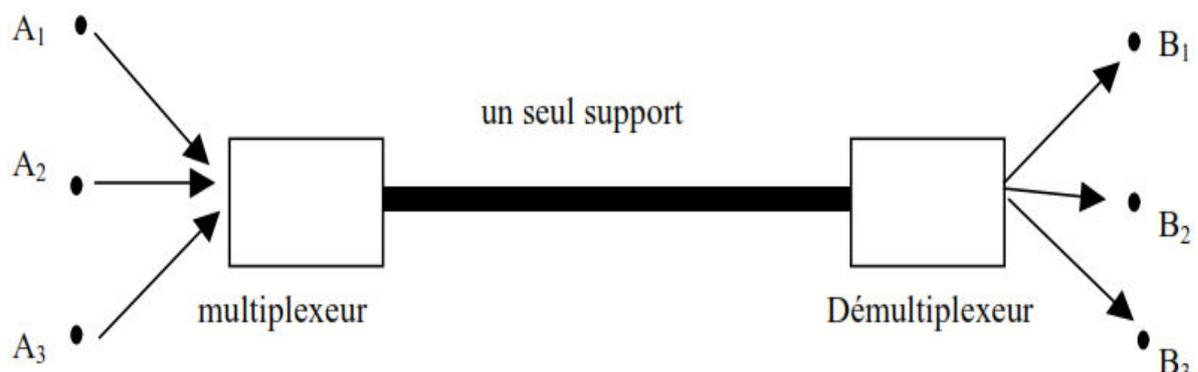
### I.3 L'accès multiple (multiplexage)

Au but de réduire les risques d'encombrement des canaux de transmission empreintés, il y a possibilité de rendre multiples l'accès d'utilisateurs au canal de transmission, ou les multiplexer.

Le multiplexage est l'opération de grouper plusieurs voies, dont chacune est attribuée à une communication, en leur permettant de transmettre simultanément sur le même support physique (câble, fréquence porteuse d'une liaison radioélectrique, satellite, ...) comme montré dans la **figure I.2** sans se mélanger ou se perturber mutuellement.

En réception, afin de séparer ces voies et d'assurer leur restitution sous leur forme initiale, l'opération de démultiplexage est nécessaire.

Ce partage des ressources disponibles nécessite que chacune d'entre elles soit isolée des autres, il faut donc assurer l'orthogonalité des ressources.



**Figure I.2 :** Multiplexage et démultiplexage des accès de multiples usagers à un canal de transmission.

Il existe essentiellement quatre formes d'accès multiple ou multiplexage :

FDMA : Frequency Division Multiple Access ou « AMRF » Accès multiple par répartition de fréquence ou multiplexage fréquentiel.

TDMA : Time Division Multiple Access ou « AMRT » Accès multiple par répartition du temps ou multiplexage temporel.

CDMA : Code Division Multiple Access ou « AMRC » Accès multiple par répartition de codes ou multiplexage de code.

SDMA : Space Division Multiple Access ou « AMRS » Accès multiple par répartition spatiale ou multiplexage spatial.

Enfin, une nouvelle technique d'accès multiple, spécifique à la transmission dans les fibres Optiques, s'est récemment apparue : le WDMA (Wavelength Division Multiple Access). On parle donc de propagation des fenêtres optiques disponibles sur la même fibre.

### I.3.1 L'accès multiple par répartition de fréquence FDMA

#### I.3.1.1 Définition

Les utilisateurs se partagent le canal en fréquence. Cette technique est marquée des plus anciennes : elle a été mise en œuvre depuis environ un siècle. Chaque utilisateur à qui on a alloué un canal de fréquence peut émettre et recevoir en continu, mais seulement dans la bande de fréquence qui lui est attribuée. A la réception, l'utilisation d'un filtre passe-bande sélectif est nécessaire pour démoduler le signal qui correspond à un unique usager tout en évitant les interférences avec les signaux présents dans d'autres domaines fréquentiels [3].

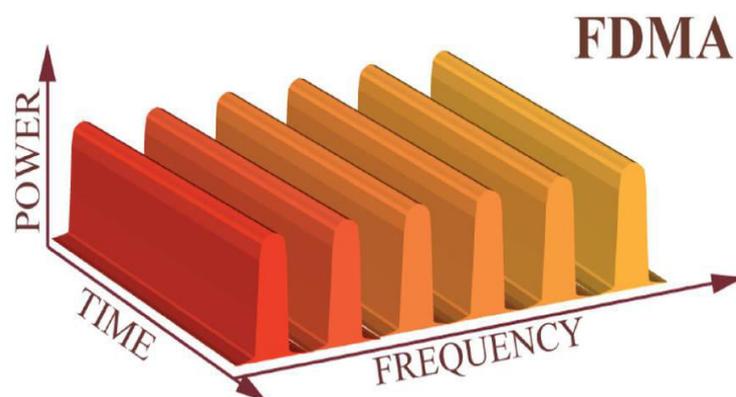
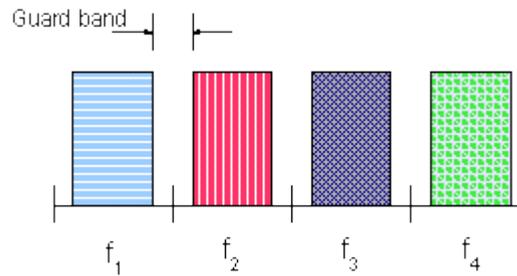


Figure I.3 : FDMA, accès multiple à répartition en fréquence.

Pour éviter des interférences entre les différentes sous-bandes, en particulier si le canal n'est pas parfait, on sépare les bandes voisines par des bandes (intervalles de fréquence) de garde (guard band) comme l'illustre la **figure I.4**. Ces bandes de gardes dégradent l'efficacité spectrale d'un système d'accès multiple FDMA [4].



**Figure I.4** : Les bandes de fréquences séparées par des bandes de garde.

### I.3.1.2 Principe de fonctionnement

**MULTIPLEXAGE** : On commence par générer  $N$  porteuses espacées fréquentiellement de 2 fois la bande utile des signaux à multiplexer (au moins). On multiplie ensuite une porteuse avec un signal, afin de transposer les signaux à des fréquences différentes. On somme le tout, le résultat obtenu d'opération de la somme est appelé « signal composite ».

**DEMULTIPLEXAGE** : On multiplie chaque porteuse par le signal composite, puis on filtre passe bas autour des bandes de fréquence utile pour restituer le signal démultiplexé.

Il faut générer précisément les porteuses et assurer la bonne modulation car ces deux éléments sont indispensables dans la technique FDMA. Un problème important est également l'accroissement de la dynamique du signal composite par rapport à celle d'un des signaux [5]. La **figure I.5** présente un exemple où on va multiplexer fréquentiellement quatre signaux indépendants qui occupent des largeurs de bandes de fréquences distinctes dans le signal composite.

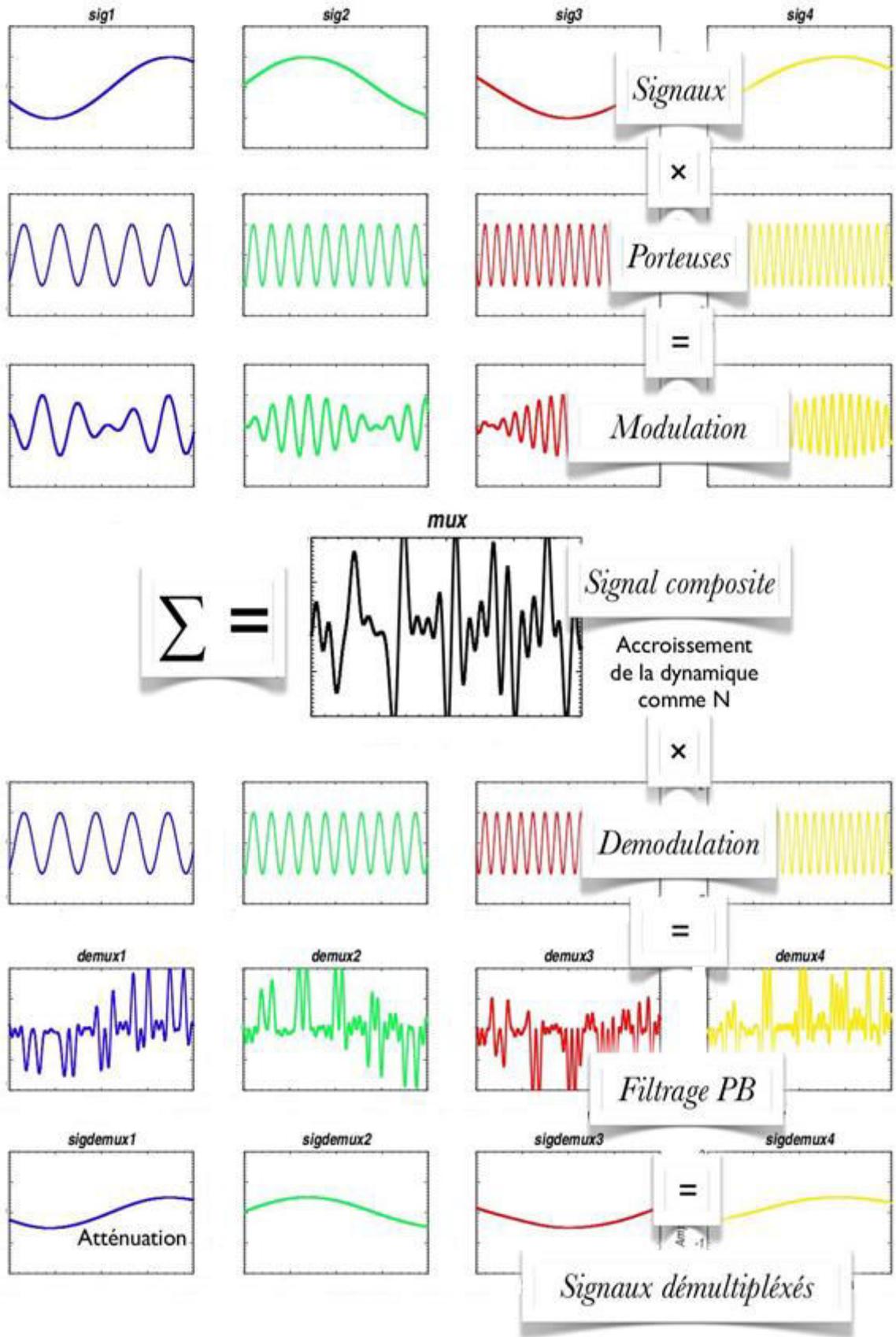


Figure I.5 : Exemple de multiplexage fréquentiel pour 4 signaux différents [5].

### I.3.1.3 Avantages

La technique FDMA présente plusieurs inconvénients mais elle a également des avantages dont le principal est que les techniques et les équipements qu'elle utilise sont bien rodés.

Le FDMA fut donc la 1<sup>ère</sup> technique d'accès multiple utilisée dans la téléphonie mobile de première génération.

### I.3.1.4 Inconvénients

Un des principaux inconvénients de cette technique est la chute de la capacité du système due à l'existence de distorsion d'intermodulation.

L'émetteur et récepteur reçoivent et réémettent plusieurs porteuses dont les fréquences sont différentes. Elles resteraient parfaitement séparées à la sortie si la caractéristique entrée sortie des appareils était parfaitement linéaire. Les produits d'intermodulation ont une consommation importante de l'énergie et augmentent avec le nombre de porteuses.

En plus, et surtout, ceux qui sont impairs font brouiller les signaux utiles. On a donc besoin d'insérer des intervalles de garde et donc réduire la largeur de la bande de fréquence utile afin d'éviter le problème de l'intermodulation et le recouvrement spectral [6].

## I.3.2 L'accès multiple à répartition du temps TDMA

### I.3.2.1 Définition

Les utilisateurs se partagent le canal en temps. Celui-ci on le découpe en intervalles de longueur fixe. Un émetteur n'émet pas d'une façon continue, mais uniquement à son propre intervalle de temps, et ceci de manière périodique [3].

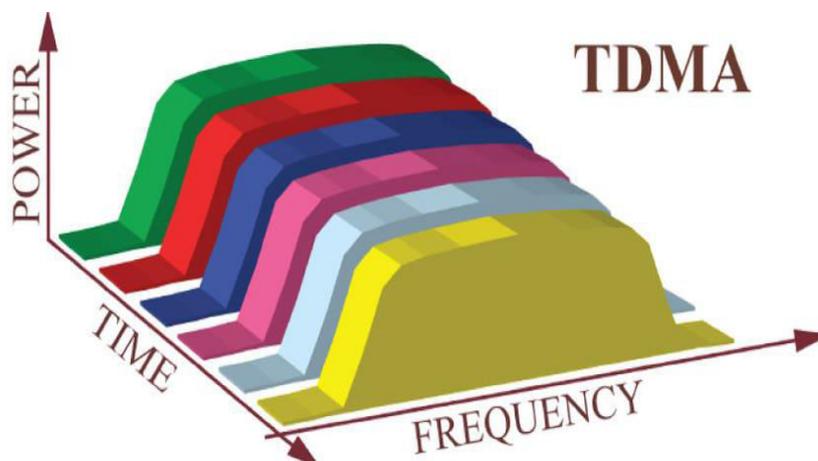


Figure I.6 : TDMA, accès multiple à répartition du temps.

### I.3.2.2 Principe de fonctionnement

Le multiplexage temporel répartit des signaux indépendants dans des créneaux temporels distincts.

**MULTIPLEXAGE** : tout d'abord des signaux de synchronisation doivent être générés. Ces signaux permettent de faire un échantillonnage. Les échantillons de chaque signal sont pris successivement : c'est au fait de la répartition temporelle que revient le nom de ce multiplexage.

Une fois échantillonnés, les signaux sont sommés, d'une manière à former le signal composite qui est le résultat du multiplexage temporel.

**DEMULTIPLEXAGE** : afin de retrouver les signaux initiaux on doit les démultiplexer, on multiplie notre signal composite par les différents signaux de synchronisation. On récupère ainsi les signaux échantillonnés.

Pour retrouver l'énergie du signal initial, nous devons bloquer leurs amplitudes entre chaque échantillon (Sample & hold). Un filtrage passe bas permet enfin de récupérer le signal initial [5].

Ces opérations sont illustrées dans la **figure I.7** pour le multiplexage de quatre signaux.

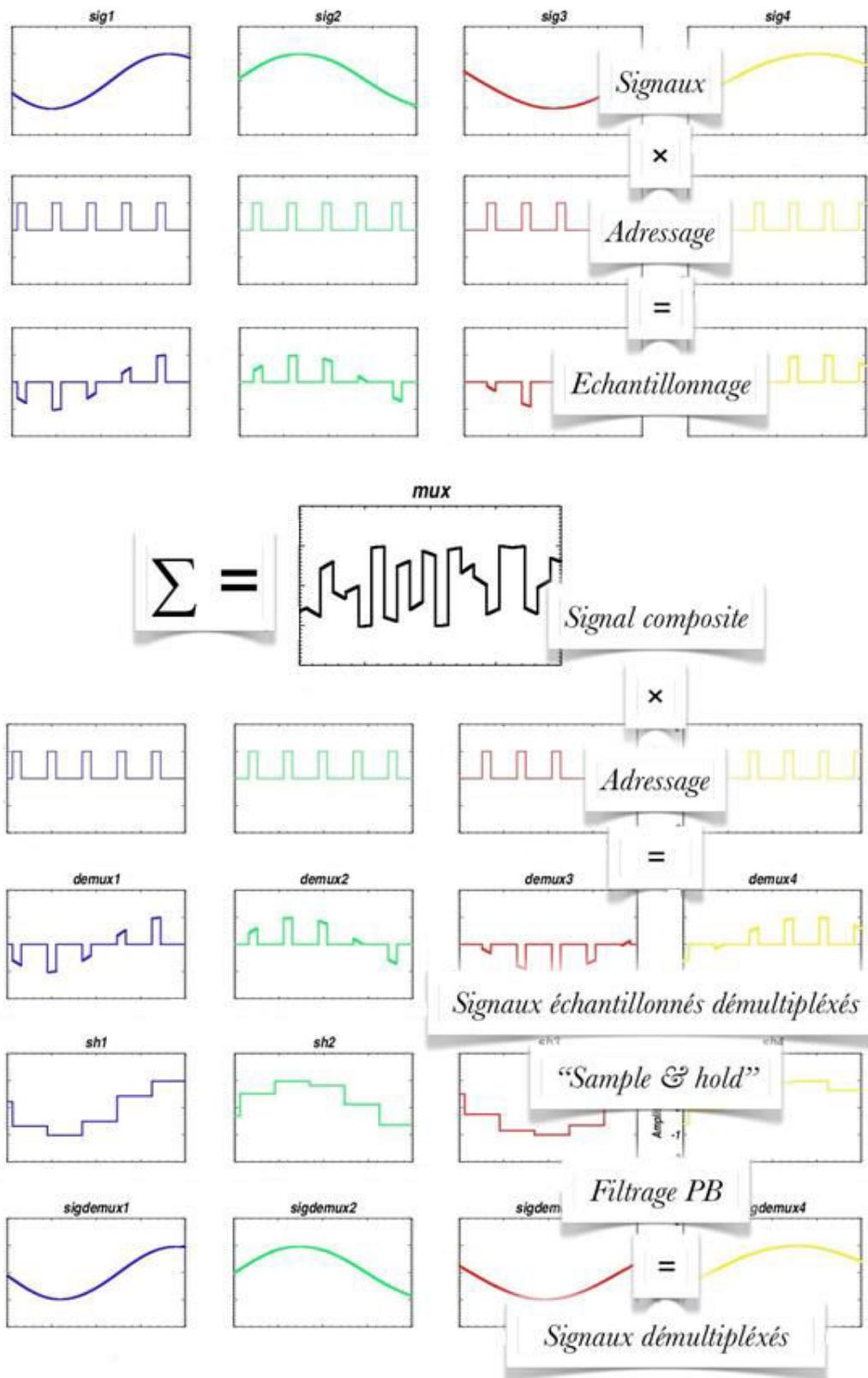


Figure I.7 : Exemple de multiplexage temporel pour 4 signaux différents [5].

### I.3.2.3 Avantages

Le principal avantage est la diminution du nombre de fréquences porteuses à une seule porteuse qui traverse l'émetteur, cela permet d'éliminer les produits d'intermodulation comme il permet l'utilisation de l'émetteur d'une manière optimale. En plus la technique TDMA ouvre la porte aux systèmes de communications, pour profiter des immenses progrès réalisés par les technologies numériques, principalement dans le domaine du codage et de modulation grâce à sa grande flexibilité. Et présente un plan de fréquence simplifié.

### I.3.2.4 Inconvénients

Les principaux inconvénients sont la nécessité d'employer un dispositif de synchronisation du réseau et une légère perte de capacité due à l'indispensable utilisation des temps de garde et des informations de services. Ces caractéristiques se traduisent aussi par les équipements de grande complexité. Enfin un autre principal inconvénient pour le TDMA c'est les interférences inter-symbole (ISI) [6].

## I.3.3 L'accès multiple par répartition de codes CDMA

### I.3.3.1 Définition

Le CDMA est classé parmi les techniques d'accès multiple par étalement de spectre. En effet, comme nous allons le voir, chaque utilisateur peut émettre et recevoir tout le long de la bande de fréquence du canal de transmission. Le principe est le suivant : une clé (ou code) correspond à chaque utilisateur, à l'aide de cette clé son message est codé avant d'être émis [7].

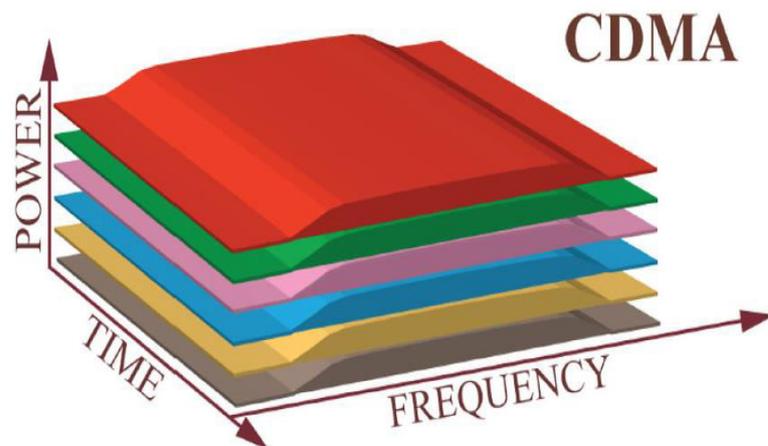


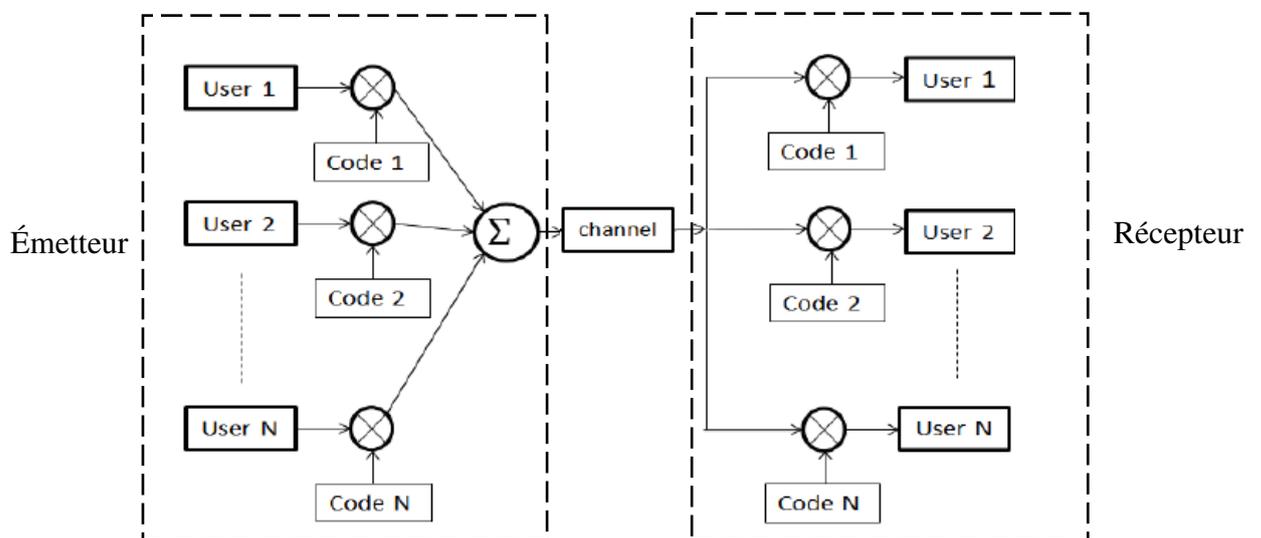
Figure I.8 : Le CDMA, accès multiple à répartition de codes.

### I.3.3.2 Principe de fonctionnement

Pour une transmission numérique, c'est possible d'envisager de permettre à N voies d'effectuer la transmission de leur information d'une manière simultanée et sur la même bande passante.

Les usagers qui ont accès au système peuvent échanger de données en continu sur toute la bande de fréquence disponible. La distinction des N voies doit donc être effectuée par l'utilisation des codes orthogonaux entre eux (codes dont l'inter corrélation est nulle), on appelle les éléments de ces codes chips ou bribes.

On obtient ainsi un multiplexage de codes par "étalement de spectre" : chaque usager émet et reçoit à l'aide d'un code qui lui est propre, le code étale les données à transmettre. Le débit du code est supérieur à celui des données.



**Figure I.9 :** Principe d'utilisation des codes orthogonaux en CDMA.

Chaque récepteur fait l'opération de corrélérer les signaux multiplexés qu'il reçoit avec la séquence convenue. De ce fait Il reconstitue donc les données qui lui sont destinées, la corrélation de tous les autres signaux résultant du multiplexage est nulle.

Les émissions résultantes aux autres utilisateurs sont considérées étant un pseudo-bruit à large bande [3].

Il existe deux principaux types de CDMA

#### a) FH-CDMA (Frequency Hop)

Dans ce système, on fait de l'évasion de fréquence : le saut de fréquence revient au fait que la fréquence porteuse de la transmission saute entre les canaux disponibles dans la bande

passante du spectre étalé. Ce système est similaire à un multiplexage fréquentiel dans lequel l'attribution des fréquences varierait rapidement.

### **b) DS-CDMA (Direct Séquence)**

C'est à ce type de CDMA qu'on fait généralement appel quand on parle d'étalement de spectre le message à transmettre est multiplié directement par un code de nature pseudo aléatoire (pseudo-noise séquence).

L'étalement de spectre du signal codé vient du fait que la fréquence du code est largement supérieure à la fréquence d'envoi des données.

### **I.3.3.3 Les avantages du CDMA**

#### **A) Résistance aux interférences**

Historiquement, le CDMA est issu des programmes de recherche militaires qui avaient pour but de protéger les transmissions d'information contre le brouillage, c'est littéralement une forme d'interférence volontaire.

Dans les applications civiles, la lutte contre un brouillage intentionnel n'est pas un critère déterminant dans le choix de la technologie de multiplexage. Cependant On cherche à immuniser le système de communication contre les interférences non intentionnelles : les interférences entre utilisateurs, les interférences liées à la propagation et le bruit additif.

Le premier type d'interférences est bien toléré par le CDMA, par construction, puisque les codes employés sont faiblement corrélés. La résistance face au deuxième type d'interférences est également assurée.

#### **B) Confidentialité (faible probabilité d'interception)**

Concernant les applications militaires comme civiles, la confidentialité des informations transmises est un atout précieux dans un système de communication. Dans le cas du CDMA, le signal émis a des caractéristiques similaires à celles d'un bruit, et c'est dû à l'utilisation des codes pseudo-aléatoires.

Le spectre du signal est étalé uniformément sur une large bande : aucun pic en amplitude n'est détecté pour une fréquence donnée. Ceci permet de masquer la présence ou l'absence d'une communication. Et même en cas où l'on détecterait l'existence d'une communication, il est extrêmement difficile de l'intercepter si on n'a pas accès aux codes utilisés.

C'est l'une des raisons que cette méthode est utilisée par l'armée, ainsi que les opérateurs de téléphonie.

### C) Multiplexage adapté aux systèmes cellulaires

Les réseaux de téléphonie mobile actuels sont fondés sur le concept cellulaire. Une cellule correspond à une zone géographique délimitée dans laquelle les utilisateurs transitent tous par le même relais. Il se pose deux problèmes : le premier concernant la réutilisation des fréquences et l'autre le passage d'utilisateur entre cellules. Concernant la réutilisation des fréquences, le CDMA dépasse le problème puisqu'il s'agit de codes et non plus de fréquences.

Il semblerait que le CDMA soit la méthode la plus performante parmi les méthodes d'accès multiple au niveau des zones de recouvrement des cellules. La qualité de transmission en CDMA n'est que faiblement affectée par les différences d'amplitude des signaux des différents utilisateurs. Ceci permet en pratique d'augmenter la taille des cellules. On réduit alors la fréquence de passage d'une cellule à l'autre (pour des utilisateurs en mouvement) et on réduit d'autant les risques de décrochage [7].

### D) Une faible consommation

La technique CDMA ne consomme pas trop de puissance par rapport aux techniques concurrentes. Ce gain de puissance est présent en présence d'une communication ou non. Ceci permet l'augmentation de l'autonomie des téléphones mobiles ou bien de minimiser la taille des batteries donc des combinés [7].

### E) Capacité d'utilisation

Le système CDMA a une capacité d'utilisation importante. On l'utilise en téléphonie mobile de troisième génération UMTS, l'internet à haut débit via la technologie EV-DO (Evolution-Data Optimized), ainsi dans les systèmes de navigation par satellites comme le GPS (Global Positioning System) [8].

#### I.3.3.4 Inconvénients

L'inconvénient major du CDMA est qu'il nécessite un contrôle de puissance très strict pour qu'un utilisateur qui serait le plus proche de la base n'interfère pas abusivement avec les autres. Idéalement la puissance reçue doit être la même pour tous les utilisateurs [6].

### I.3.4 L'accès multiple par répartition spatiale (SDMA)

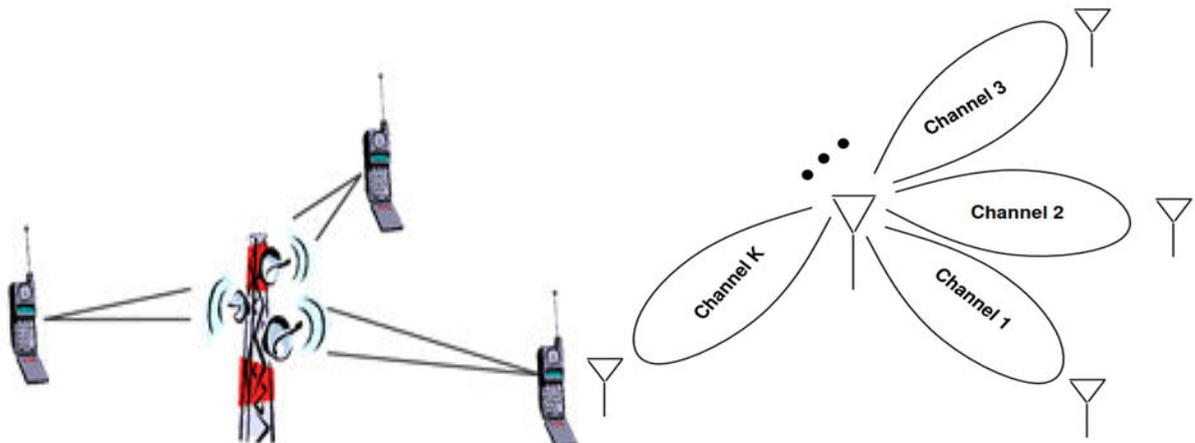
Lorsque le nombre d'interfaces communicantes devient important, l'accès au support devient difficile (nombre de communications à gérer, bande passante...), d'où l'idée d'organiser le partage de l'espace géographique, cette méthode est fortement présente dans les réseaux cellulaires (réseaux locaux sans fils, et réseaux de téléphonie mobile). L'espace est

répartie en cellules, une fréquence ou bande de fréquences est attribuée à chaque utilisateur telle que celle-ci n'ait pas d'interférence avec les fréquences des cellules proches [9].

L'accès multiple par répartition spatiale (SDMA) utilise la direction (angle) comme une autre dimension, qui peut être canalisé et affectés à différents utilisateurs.

Ceci est généralement fait avec des antennes directionnelles, comme illustré dans la **figure I.10**.

Les canaux orthogonaux peuvent uniquement être affectés si la séparation angulaire entre utilisateurs dépasse la résolution angulaire de l'antenne directionnelle. Si l'orientation est obtenue à l'aide d'un réseau d'antennes, une résolution angulaire précise nécessite un énorme tableau, qui peut être peu pratique pour la station de base ou point d'accès et est certainement impossible à petits utilisateurs terminaux. En pratique SDMA est souvent mis en œuvre à l'aide d'antennes sectorisées. Dans ces tableaux la  $360^\circ$  gamme angulaire est divisée en  $N$  secteurs. Il y a un gain directionnel élevé dans chaque secteur et peu d'interférence entre les secteurs. FDMA ou TDMA est utilisé pour canaliser les utilisateurs au sein d'un même secteur. Pour les utilisateurs mobiles SDMA doit s'adapter aux changements des angles des utilisateurs ou, si la directivité est réalisée via les antennes sectorisées, alors un utilisateur doit être confiée à un nouveau secteur lorsqu'il se déplace hors de son secteur d'origine [10].



**Figure I.10** : SDMA , accès multiple à répartition spatiale.

Le principe du multiplexage spatial est l'organisation en espace sans redondance d'une série d'informations.

Le système transmet alors  $M$  fois plus de symboles utiles à chaque instant. Les antennes émettrices utilisent la même modulation et la même fréquence porteuse pour transmettre les symboles différents et indépendants sur les différentes antennes [11].

## **I.4 Conclusion**

Ce premier chapitre nous a permis dans un premier temps de rappeler les notions de base d'un système de communication numérique, ensuite les différents systèmes d'accès multiple qui sont derrière l'évolution des communications sans fil.

La première le FDMA alloue à chaque usager une bande de fréquence pour communiquer sur tout l'intervalle du temps.

La seconde TDMA divise l'intervalle de temps permettant à chaque usager d'utiliser toute la largeur de la bande de fréquence sur son intervalle de temps.

La troisième CDMA permet à plusieurs utilisateurs l'échange d'informations simultanément sur la même plage de fréquence et le même intervalle temporel en attribuant à chaque utilisateur un code qui lui est propre.

La dernière SDMA (Space Division Multiple Access) est basée sur l'utilisation des antennes directionnelles, chaque antenne est orientée selon un angle spécifique. Cette technique est généralement combinée avec les autres techniques d'accès.

Dans le chapitre suivant nous allons présenter la technique d'étalement de spectre qui est la base de CDMA.

## **Chapitre II**

# **Les systèmes de communications à étalements de spectres dans un canal radio-mobile**

## II.1 Introduction

L'étalement de spectre (Spread Spectrum) est l'une des techniques de transmission très utilisée. C'est à l'usage des militaires et des services de renseignements qu'elle a été développée initialement. L'idée de départ était de répartir ou d'« étaler » le message d'information sur une plus large bande passante pour rendre plus difficile son brouillage et son interception.

Nous commençons ce chapitre par une brève description de la communication radio-mobile, nous décrivons par la suite le principe et les techniques à spectre étalé dans un canal radio-mobile.

## II.2 La communication radio-mobile

Dans la communication radio-mobile, La zone géométrique à couvrir est répartie en cellules possédant chacune une station de base. Les liens entre les différents mobiles et la station de base assurent l'établissement d'une communication entre deux mobiles. Elle est assurée par allocation d'un canal à chaque mobile. Un canal utilise généralement deux fréquences de transmission : l'une s'appelle voie descendante et permet de communiquer l'information de la station de base vers le mobile, l'autre s'appelle voie montante et permet de communiquer l'information du mobile vers la station de base.

Dans un réseau cellulaire, chaque utilisateur veut pouvoir détecter sa propre information et annuler au mieux les signaux des autres utilisateurs. Trois techniques différentes d'accès multiple sont généralement envisagées pour établir une communication simultanée entre plusieurs utilisateurs. Les deux grands principes d'Accès Multiple par Répartition de Temps TDMA ou bien l'Accès Multiple par Répartition de Fréquence FDMA représentent les techniques les plus classiques. Afin de permettre une flexibilité de transmission plus grande, la combinaison de ces deux types d'accès multiple peut être envisagée, c'est le cas d'Accès Multiple par Répartition de Codes CDMA (étalement de spectre), toutes les ressources en temps et en fréquence sont allouées à tous les utilisateurs simultanément. La distinction entre différents usagers est assurée par les codes qui leur sont associés ce qui entraîne quelques contraintes sur les codes d'étalement. La solution développée par la 3GPP pour l'UMTS est basée sur cette technique, et elle est largement utilisée dans les propositions de transmission de la 4<sup>ème</sup> génération (4G) [12].

## II.2.1 Le canal radio mobile

### II.2.1.1 Analyse physique

Le canal radio-mobile est un canal fluctuant à trajets multiples [13]. L'information transmise est soumise à deux types de perturbations : les perturbations de propagation à travers le canal et le bruit additif [12,14].

✚ **Le bruit :** Le premier type de perturbations provient directement de l'agitation thermique des électrons dans la matière dont la température absolue n'est pas nulle ( $T \neq 0^0 K$ ). Cette agitation provoque un mouvement chaotique et donc des accélérations aléatoires des électrons dans toutes les directions. Ce bruit est appelé bruit thermique et possède une distribution normale. La densité spectrale de puissance de rayonnement moyenne (mono latérale notée  $N_0$ ) de la distribution du bruit thermique émise par un corps porté à une certaine température a été modélisée par la loi de Planck. Aux fréquences radio, elle est approximée par  $\gamma_b(f) = K_b T$  (exprimée en Watt/Hz) où  $K_b$  est la constante de Boltzmann et vaut  $1.38 \times 10^{-23}$  Joules.  $K^{-1}$  et T c'est la température du corps qui émet le rayonnement exprimé en Kelvins.

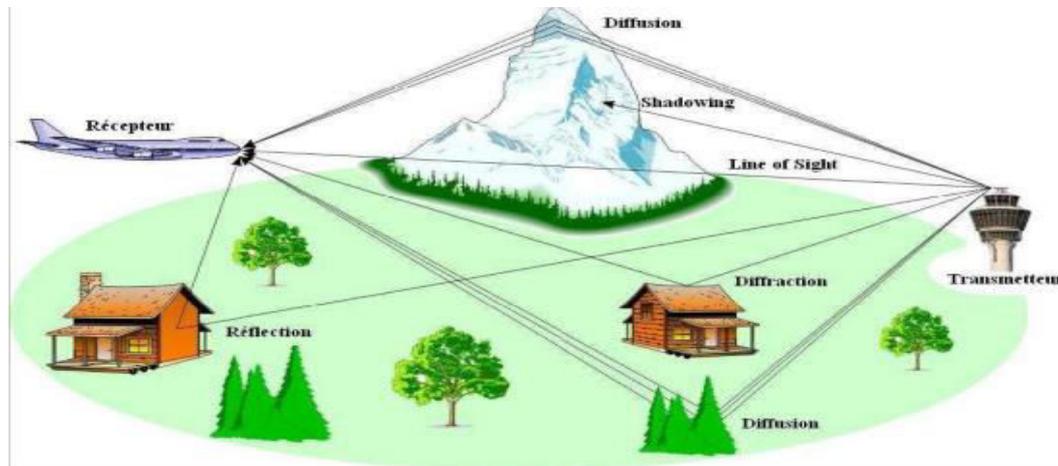
✚ **Les perturbations de propagation :** Ils correspondent aux atténuations causées par la propagation et la superposition multiple et incohérente de signaux radioélectriques en réception. Ainsi, on distingue :

➤ **L'atténuation moyenne (« Path loss » en anglais) :** La puissance du signal reçue diminue globalement en moyenne en fonction de la distance  $d$  parcourue par l'onde électromagnétique avec une atténuation donnée sous forme  $d^n$  où  $n$  est un réel positif qui dépend de la liaison entre le mobile et la station de base. Lorsque le mobile et la station de base sont en vue directe (« Line Of Sight LOS » en anglais), la puissance moyenne du signal diminue en puissance de 2 en fonction de la distance ( $n = 2$ ). L'atténuation en puissance est alors donnée par [12] :  $Att(d) = \left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right)^2$  où  $\lambda$  est la longueur d'onde du signal transmis. La puissance du signal diminue avec une puissance plus grande de 2 lorsque le mobile et la station de base ne sont pas en vue directe. Elle est alors située entre 3 et 5 suivant le type d'environnement.

➤ **La propagation par trajets multiples :** Elle est due aux réflexions, de diffractions et à la diffusion du signal transmis sous forme d'onde électromagnétique. Ainsi, on reçoit au niveau du récepteur une multitude d'ondes arrivant avec des amplitudes, des phases et des délais différents dont l'énergie est difficile à récupérer entièrement. Cette multitude d'ondes se traduit par une sélectivité fréquentielle du canal c.à.d. ses composantes fréquentielles ne

sont pas soumises au même niveau d'atténuation. Bien que cette sélectivité présente un gain de diversité fréquentiel, elle introduit une perte des propriétés du signal transmis.

- **L'effet Doppler :** Cet effet est causé par la mobilité du mobile et/ou des objets au niveau du canal radio mobile. Concernant les systèmes à ondes stationnaires travaillant à une fréquence porteuse autour de quelques GHz, la distance entre un nœud et un ventre sera de quelques centimètres ce qui induit un changement rapide des amplitudes et des phases pour le moindre mouvement, cela fait varier le canal au cours du temps. Ces fluctuations caractérisées généralement par un évanouissement rapide du canal introduisent une sélectivité temporelle du signal transmis mais dégradent aussi la communication.
- **L'évanouissement à long terme (« Shadowing » en anglais) :** Il est généralement causé par l'obstruction des ondes par les obstacles (immeubles, forêts, collines...) ce qui résulte en une atténuation plus ou moins prononcée. Contrairement aux fluctuations dues aux trajets multiples, on qualifie ce type de fluctuations comme étant fluctuations à long terme comparativement à la longueur d'onde. De nombreuses études modélisent cet évanouissement comme une variable aléatoire de loi log-normale qui vient apporter une certaine incertitude à l'atténuation.



**Figure II.1 :** Scénario typique de propagation radio-mobile.

La **figure II.1** représente un scénario typique de propagation radio mobile dans un milieu rural, de la station de base vers le mobile [15].

### II.3 L'étalement de spectre

Les techniques d'étalement de spectre ont tout d'abord été utilisées par les militaires depuis les années 40, grâce à de leur faible probabilité d'interception. Cette technique est

issue des travaux réalisés par N. Wiener et C. E. Shannon. Le principe de base de l'étalement de spectre est très simple, il repose sur la relation de C. E. Shannon qui exprime la capacité maximale  $C$  du canal perturbée par un bruit additif gaussien [16]:

$$C = B_s \cdot \log \left( 1 + \frac{P_s}{P_b} \right) \quad (\text{II.1})$$

Où :  $C$  : est la capacité maximale du canal en bit/s.

$B_s$  : La bande occupée par le signal émis en Hertz (Hz).

$P_s$  : La puissance du signal émis en Watt (W).

$P_b$  : La puissance du bruit en W.

Cette relation nous montre que pour transmettre sans erreur une quantité d'information  $C$  donnée, on peut utiliser soit une bande  $B_s$  étroite et un fort rapport  $P_s/P_b$ , soit une bande large  $B_s$  et un faible rapport  $P_s/P_b$ . L'idée d'étalement de spectre consiste à émettre un signal dont la bande est largement supérieure à celle du signal utile. C'est le faible rapport  $P_s/P_b$  qui a, en partie, séduit les militaires. Un message peut être transmis alors qu'il est noyé dans le bruit.

L'étalement de spectre en apparence procure en réalité plusieurs avantages [17] :

- Il offre une immunité contre différents types de bruits et contre distorsion due à la propagation multi trajet. Les premières applications de l'étalement de spectre étaient militaires et assuraient une protection contre le brouillage (jamming).
- Il peut servir à dissimuler et à chiffrer des signaux. Seul un récepteur qui connaît le code d'étalement peut récupérer les informations codées.
- Plusieurs utilisateurs peuvent exploiter simultanément la même bande passante ainsi étalée en n'interférant que très peu mutuellement. Cette propriété est employée dans les applications de téléphonie cellulaire à l'aide de la technique de multiplexage par répartition en code CDM (Code Division Multiplexing), ou CDMA (Code Division Multiple Access).

### II.3.1 Les techniques d'étalement

Plusieurs techniques peuvent être utilisées pour répondre aux besoins d'étalement du spectre pour un système de communication à spectre étendu [18] :

- Technique d'étalement à saut de fréquence.
- Technique d'étalement à saut temporel.
- Technique d'étalement à séquence directe.

### II.3.1.1 Étalement de spectre à saut de fréquence

L'étalement de spectre avec saut de fréquence FH-SS (Frequency Hopping Spread Spectrum) est basé sur le saut de fréquence, dans cette technique la bande est divisée en canaux ayant chacun une largeur de bande fixe. Pour transmettre des données, l'émetteur et récepteur doivent s'accorder sur une séquence de sauts précise qui sera effectuée sur ces sous-canaux. En fait, les sauts de fréquence ont lieu dans une région spectrale finie. Le message à transmettre à une période  $T_s$  est mis sur une fréquence porteuse  $f_c$  dont la valeur se situe dans la région spectrale finie. Tous les intervalles de temps  $T_s$ , la fréquence porteuse prend une nouvelle valeur (toujours comprise dans la région spectrale finie). Un code « pseudo-aléatoire » détermine la valeur de la nouvelle fréquence porteuse. Si le code est de longueur  $L_c$ , le synthétiseur devra fournir  $2L_c$  fréquences différentes. Les utilisateurs dans un réseau FH-SS transmettent de façon simultanée et on doit faire en sorte que leurs sauts respectifs ne se fassent pas vers la même fréquence afin d'éviter autant que possible les collisions. Le gain de traitement dans un système FH-SS dépend du nombre total de sauts de fréquences sur la région spectrale finie et du nombre de sauts de fréquence pendant la durée d'un symbole d'information [11].

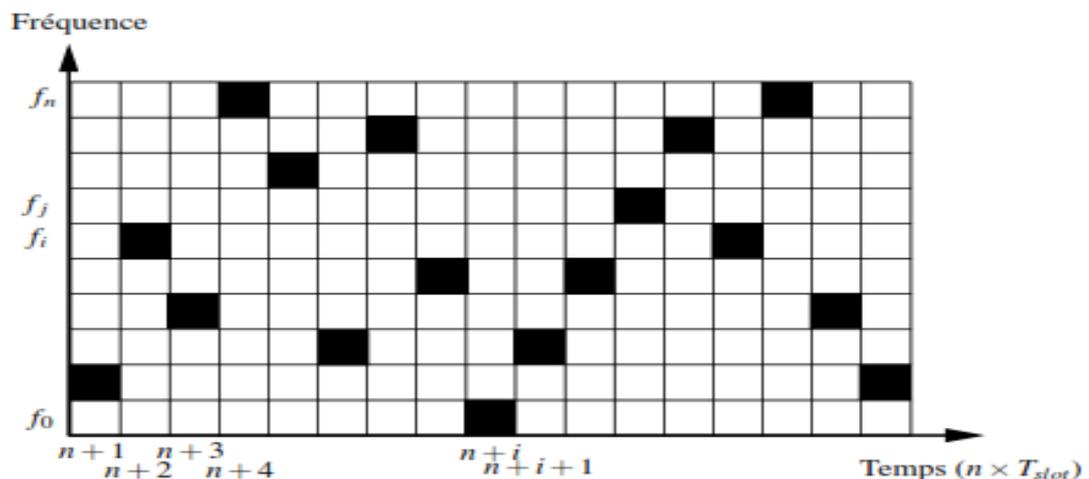


Figure II.2 : Le saut de fréquences.

Dans la **figure II.2**,  $T_{slot}$  désigne le temps d'émission sur une fréquence parmi l'ensemble des fréquences disponibles. On distingue alors la technique par sauts de fréquences lents ( $T_{slot} \gg T_{symbole}$ ) et l'étalement de spectre par sauts de fréquences rapides pour lequel au contraire  $T_{slot} \ll T_{symbole}$  [19].

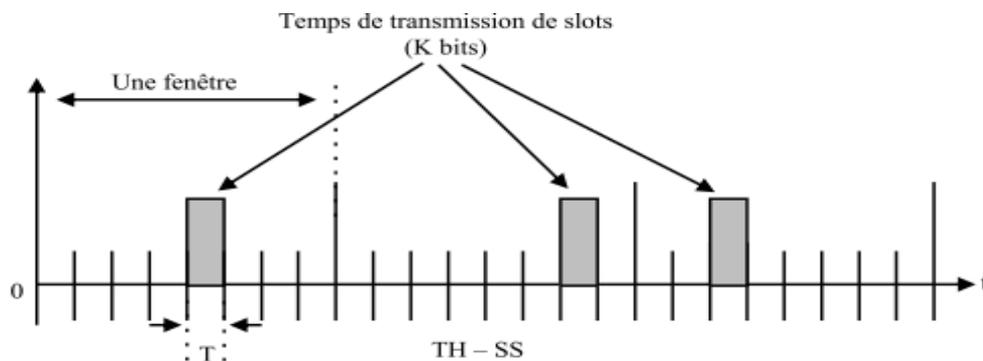
Le saut de fréquences lent revient à changer de fréquence porteuse à chaque transmission d'une nouvelle trame, essentiellement pour limiter le brouillage par interférences avec des émetteurs à fréquence localisée. Plusieurs bits d'informations sont ainsi émis sur chaque porteuse.

Le saut de fréquences rapide consiste à changer plusieurs fois de fréquences porteuses pendant le temps d'un bit. L'information modulante est ainsi « étalée » sur plusieurs porteuses donc sur une plage de fréquences étendue. La puissance est émise sur plusieurs porteuses en parallèle. Peu de signal est émis sur chaque porteuse, ce qui limite la puissance crête au niveau du canal de communication.

### II.3.1.2 Étalement de spectre avec saut de temps TH-SS (Time Hopping Spread Spectrum)

Cette technique consiste à affecter à un usager donné toute la bande de fréquence pendant une durée de temps déterminée  $T$  [20]. La transmission de données est réalisée par l'intermédiaire de sauts de temps, où le message est transmis de manière discontinue sous forme de salves brèves. En fait, c'est le code qui détermine les durées des salves d'étalement. Pour transmettre des données, l'émetteur et récepteur doivent s'accorder sur un temps de saut précis. Les signaux de sauts de temps sont considérés comme des signaux à large bande puisque le taux de transmission pendant les salves doit être considérablement élevé pour obtenir un taux de transmission globale équivalent à celui d'une transmission continue [21].

La **figure II.3** montre la technique d'étalement de spectre avec saut de temps TH-SS.



**Figure II.3 :** La technique d'étalement TH-SS.

### II.2.1.3 Étalement de spectre par séquence directe

Dans la CDMA à séquence directe (DS-SS-CDMA), les données associées à un utilisateur sont modulées en phase, en fréquence ou en amplitude. Le signal résultant est ensuite codé en utilisant une séquence de code, par exemple une séquence pseudo aléatoire, puis superposé aux autres signaux traités de la même manière [22].

Considérons un système DS-SS-CDMA avec  $N_u$  utilisateurs. Le symbole du  $m$ -ième utilisateur est indiqué par  $a_m(k)$ , dont la période est égale à  $T$ . Ces symboles sont étalés en utilisant une séquence qui est propre à chaque usager  $c_m(n)$ , où chaque chip possède une durée  $T_c$ .

Le signal étalé est donné par [23] :

$$x_m(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_m \left( \left\lfloor \frac{n}{N} \right\rfloor \right) c_m(t) \delta(t - nT_c) \quad (\text{II.2})$$

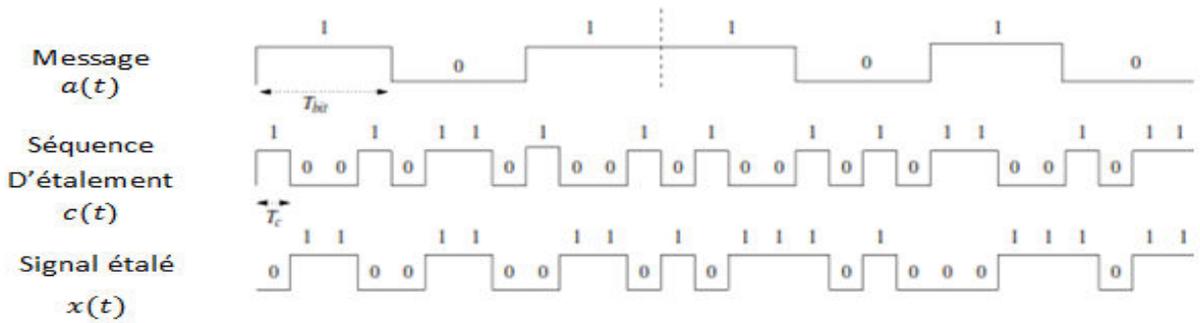


Figure II.4 : Étalement de spectre par séquence directe.

Où le facteur d'étalement est  $N = T/T_c$  et  $\delta(\cdot)$  est la fonction impulsion de Dirac. Le signal  $x_m(t)$  est appliqué à un filtre demi Nyquist  $g(t)$  avant d'être transmis et au filtre adapté  $g(-t)$  à la réception. On considère un modèle de canal à multi trajets  $h'_m(t)$  qui est décrit par [23] :

$$h'_m(t) = \sum_{p=0}^{P-1} \gamma_{m,p} \delta(t - \tau_{m,p}) \quad (\text{II.3})$$

Où  $p$  est l'indice du trajet,  $\gamma_{m,p}$  est une variable complexe, avec une distribution Rayleigh pour l'amplitude et uniforme pour la phase, et  $\tau_{m,p}$  est le retard du  $p$ -ième trajet du canal du  $m$ -ième utilisateur.

Alors le signal reçu s'écrit [23] :

$$r(t) = \sum_{m=0}^{N_u-1} x_m(t) * g(t) * h'_m(t) * g(-t) + b(t) \quad (\text{II.4})$$

Où  $b(t) = b'(t) * g(-t)$ ,  $b'(t)$  étant le bruit additif.

Pour simplifier les notations, on groupe les filtres en un seul filtre  $h_m(t)$  [23] :

$$h_m(t) = h'_m(t) * s(t) = \sum_{p=0}^{P-1} \gamma_{m,p} s(t - \tau_{m,p}) \quad (II.5)$$

Où  $s(t) = g(t) * g(-t)$ .

On obtient finalement [23] :

$$r(t) = \sum_{m=0}^{N_u-1} x_m(t) * h_m(t) + b(t) \quad (II.6)$$

$$= \sum_{m=0}^{N_u-1} \sum_{p=0}^{P-1} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \gamma_{m,p} a_m\left(\left\lfloor \frac{n}{N} \right\rfloor\right) c_m(n) s(t - nT_c - \tau_{m,p}) + b(t) \quad (II.7)$$

Tout d'abord, considérons le cas le plus simple où  $N_u = 1$ , le canal a un seul trajet  $P = 1$  de phase égale à zéro et un gain unitaire, et le récepteur est calé sur ce trajet, c'est-à-dire,  $h(t) = \delta(t)$ . Le signal en réception échantillonné à la cadence chip s'écrit [23] :

$$r(n) = a\left(\left\lfloor \frac{n}{N} \right\rfloor\right) c(n) + b(n) \quad (II.8)$$

En posant :  $r(n) = r(nT_c)$ .

Le symbole reçu  $\tilde{a}(k)$  est obtenu par le désétalement du signal reçu, réalisé en multipliant par le conjugué du code d'étalement convenablement calé [23] :

$$\tilde{a}(k) = \sum_{n=kN}^{N(k+1)-1} r(n) * c^*(n) \quad (II.9)$$

$$= a(k) \sum_{n=kN}^{N(k+1)-1} |c(n)|^2 + \sum_{n=kN}^{N(k+1)-1} b(n) c^*(n) \quad (II.10)$$

Dans cette expression, le premier terme est le signal d'intérêt et le deuxième est le bruit. Pour obtenir un bon désétalement du signal, il est nécessaire que le code dans le récepteur soit parfaitement calé avec le trajet, car des erreurs de l'ordre d'une période chip peuvent se traduire par l'impossibilité de récupérer le symbole étalé.

### Principes du DS-CDMA

Dans la **Figure II.5** nous décrivons un exemple simple pour expliquer les principes de l'étalement de spectre.

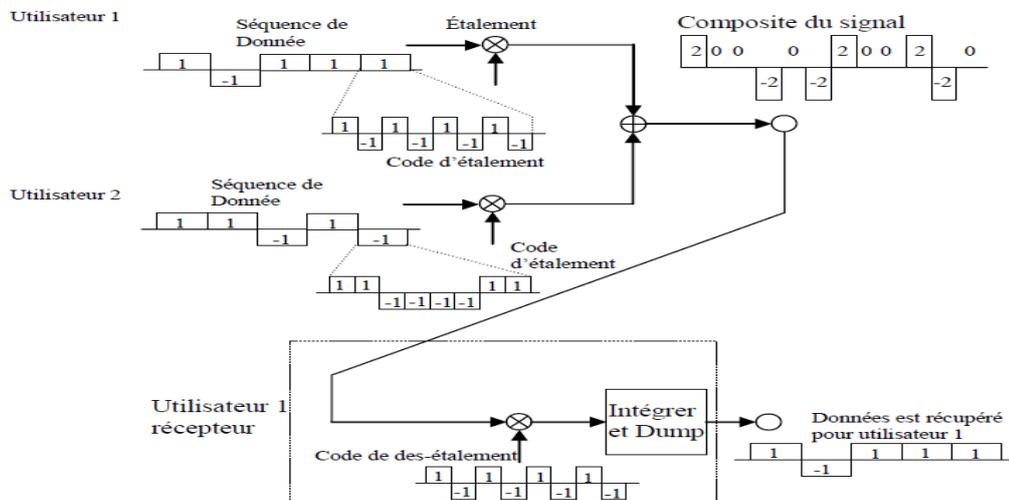


Figure II.5 : Exemple d'étalement de spectre [21].

Nous supposons que le code d'étalement est de longueur huit. Comme la **Figure II.5** l'indique, dans l'émetteur le signal d'information des utilisateurs 1 et 2 est étalée avec un code d'étalement unique pour chaque utilisateur (nous appelons « débit symbole » le débit du signal d'information et « débit *chip* » le débit du signal étalé). En fait, la séquence de données après l'étalement a un débit très supérieur à celui du débit avant l'étalement. Le débit *chip* est équivalent au débit symbole du signal d'information multiplié par la longueur du code d'étalement. Après étalement, les *chips* des utilisateurs 1 et 2 sont additionnées pour générer un signal mixte (multiplexage) et transmis sur le canal radio. Dans le récepteur, on multiplie le signal par le même code d'étalement utilisé dans l'émetteur. Multiplier le signal reçu par la même séquence permet de garder uniquement le signal d'information. Cette procédure de désétalement n'est possible que si le récepteur est parfaitement synchronisé temporellement avec l'émetteur. Après la multiplication, les signaux sont intégrés sur la durée du symbole pour récupérer le signal d'information [21].

### II.3.2 Les codes d'étalement

Les communications qui nous intéressent sont des communications radio mobiles. Le canal affecté de trajets multiples est multiutilisateur. Suivant les caractéristiques de la communication un choix sur les codes doit être fait. Ce choix résulte d'un compromis entre la suppression des interférences d'accès multiple, obtenue avec des codes orthogonaux, et le traitement de la diversité, facilité par l'usage de codes ayant de bonnes propriétés d'autocorrélation [24].

En communication synchrone, la séparation des utilisateurs peut être faite en employant des codes orthogonaux les codes de Walsh-Hadamard sont dans ce cas les codes les plus utilisés.

#### a) Les codes de Walsh-Hadamard

Les codes de Walsh-Hadamard sont générés à partir de la matrice de transformation de Sylvester-Hadamard. Plus exactement, ils correspondent aux lignes ou aux colonnes orthogonales de cette matrice composée de  $\pm 1$ . La matrice de transformation de Sylvester-Hadamard de taille 2 satisfait la condition suivante [14] :

$$H_m H_m^T = m I_m \quad (\text{II.11})$$

Où  $H_m^T$  est la matrice transposée de la matrice de Sylvester-Hadamard de taille  $m \times m$  et  $I_m$  est la matrice identité de taille  $m \times m$ . ainsi, d'après cette définition, les propriétés d'une telle matrice ne sont affectées en rien par les lignes ou les colonnes.

La matrice de transformation de Sylvester-Hadamard de taille  $L_c \times L_c$  peut être construite récursivement de la manière suivante [14] :

$$\left\{ \begin{array}{l} H_1 = +1 \\ H_{L_c} = \begin{bmatrix} H_{L_c/2} & H_{L_c/2} \\ H_{L_c/2} & -H_{L_c/2} \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (\text{II.12})$$

**b) Les caractéristiques des codes d'étalement**

Les codes d'étalement  $C(t)$  ont des propriétés mathématiques particulières. Tout d'abord, afin de ne pas modifier les propriétés statistiques du signal transmis (et par conséquent son spectre), elles doivent être le plus faiblement auto-corrélées [25] :

$$R_c(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} C(t)C(t - \tau)dt = 0 \quad \text{pour } \tau \neq 0 \quad (\text{II.13})$$

Où  $R_c(\tau)$  représente la fonction d'autocorrélation de  $C(t)$ . Afin d'assurer la sécurité et d'éviter le brouillage des sources entre-elles, les séquences doivent être le plus faiblement intercorrélées [25] :

$$R_{C_i C_j}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} C_i(t)C_j(t - \tau)dt = 0 \quad (\text{II.14})$$

Où  $C_i$  et  $C_j$  représentant deux séquences différentes.

Enfin, pour permettre la synchronisation, elles doivent posséder un pic d'autocorrélation le plus étroit possible [25] :

$$R_c(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} C(t)C(t)dt = 1 \quad (\text{II.15})$$

Comme ces propriétés sont celles d'un processus stochastique proche du bruit, elles sont nommées séquences pseudo-aléatoire (Pseudo-Noise séquences).

Au vu de ces propriétés mathématiques, il semble important que la synchronisation, entre le code à la réception et le code à l'émission, se fasse correctement. Dans le cas d'un écart temporel entre les deux codes, seul le bruit étalé pourra être récupéré à la réception.

**II.4 Les combinaisons entre la modulation OFDM et l'accès CDMA**

Généralement il existe trois types de combinaisons [26], la combinaison CDMA-OFDM qui donne la technique MC-CDMA (Multi Carrier Code Division Multiple Access), la combinaison DS-CDMA-OFDM donnant la technique MC-DS-CDMA (Multi Carrier Direct Sequences Code Division Multiple Access), et la technique MT-CDMA (Multi Carrier Tone Code Division Multiple Access) qui utilise un étalement du spectre dans le domaine temporel après le bloc IFFT.

### II.4.1 La technique de MC-CDMA

Au lieu d'appliquer la technique d'étalement du spectre dans le domaine temporel, nous l'appliquons dans le domaine fréquentiel, en modulant les différents chips du code d'étalement avec les sous-porteuses OFDM [22].

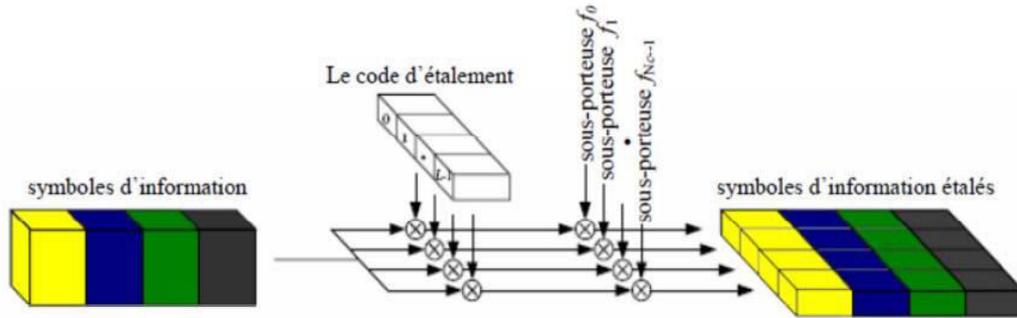


Figure II.6 : Génération d'un signal MC-CDMA pour un utilisateur.

Le code d'étalement est appliqué directement en parallèle au même bit d'entrée. Donc le signal à transmettre pour le  $i^{\text{ème}}$  symbole de données de l'utilisateur numéro  $j$ , est sous la forme [22]:

$$s_i^j(t) = \sum_{k=0}^{N-1} b_i^j c_k^j e^{2\pi(f_0 + kf_d)t} p(t - iT) \quad (\text{II.16})$$

Où :

$N$  : Le nombre de sous-porteuses.

$b_i^j$  : Le  $i^{\text{ème}}$  symbole du message pour l'utilisateur  $j$ .

$c_k^j$  : représente le  $k^{\text{ème}}$  chip,  $k=0, 1, \dots, N-1$  du code d'étalement pour l'utilisateur  $j$ .

$f_0$  : La fréquence de la porteuse principale.

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

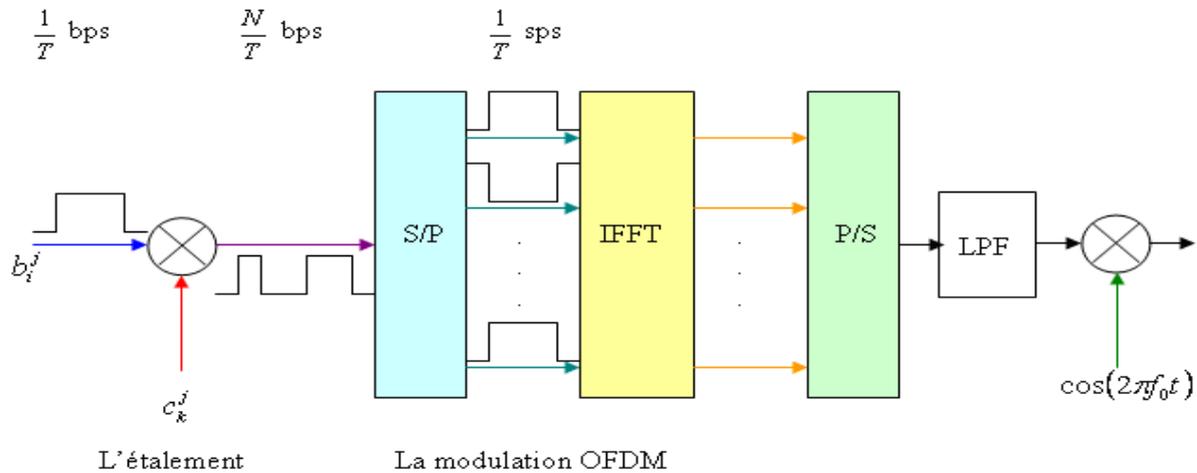
$p(t)$  : L'impulsion rectangulaire décalée dans le temps :

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

En cas où  $f_d = \frac{1}{T}$ , le signal à transmettre peut être généré en employant l'IFFT. La structure globale du transmetteur peut être implantée par concaténation de l'étalement DS-CDMA et la modulation OFDM comme le montre la **figure II.7**.

Dans la **figure II.7**, on génère  $N$  copies du même symbole d'entrée  $b_i$  de l'utilisateur  $j$ , chaque copie  $b_{i,k}$  est multipliée par un chip du code d'étalement  $c_k$  avec  $k=0, 1, \dots, N-1$ , et l'IFFT est appliqué pour les  $N$  chips en parallèle.

Il est nécessaire d'avoir autant de sous porteuses que de copies du symbole ( $N$  sous porteuses). Les valeurs à la sortie du bloc « IFFT » sont en parallèle et échantillonnées dans le temps.



**Figure II.7 :** Schéma de transmetteur MC-CDMA [22].

Après la conversion parallèle/série, le filtrage passe-bas (LPF) est nécessaire pour avoir une forme continue du signal. Le signal ainsi obtenu est modulé par la fréquence principale  $f_c$  et transmis vers le récepteur. Le signal émis a un spectre fréquentiel OFDM avec des sous-porteuses espacées de  $f_d = \frac{N}{T}$ .

A la réception montré dans la **figure II.8** pour chaque porteuse, le signal correspondant au chip  $c_k$  est récupéré à l'aide du block « FFT » après un échantillonnage à la fréquence  $N/T$ . ensuite le chip récupéré est corrélé avec le code local de l'utilisateur  $j$  dans le but de récupérer l'information originale  $b_i$ .

Le signal du  $i^{\text{ème}}$  symbole reçu au niveau du récepteur pour la sous porteuse numéros  $k$  est sous la forme [22] :

$$r_{k,i} = \sum_{j=0}^{J-1} H_k b_i^j c_k^j + n_{k,i} \quad (\text{II.17})$$

$J$  : Le nombre des utilisateurs.

$H_k$  : La réponse fréquentielle du canal pour la  $k^{\text{ème}}$  sous-porteuse.

$n_{k,i}$  : Les échantillons du bruit.

Pour l'utilisateur numéro 0, le récepteur MC-CDMA multiplie le signal  $r_{k,i}$  de l'équation II.17 par les chips de la séquence d'étalement,  $c_k^0$ , ainsi que par le gain  $g_k$  qui est calculé à travers une estimation du canal de transmission de la  $k^{\text{ème}}$  sous-porteuse, pour

chaque symbole de sous porteuse reçu,  $k=0,1,\dots,N-1$ , et la somme de tous ces produits donne,  $d_i^0$ , illustré par [22] :  $d_i^0 = \sum_{k=0}^{N-1} c_k^0 g_k r_{k,i}$  (II.18)

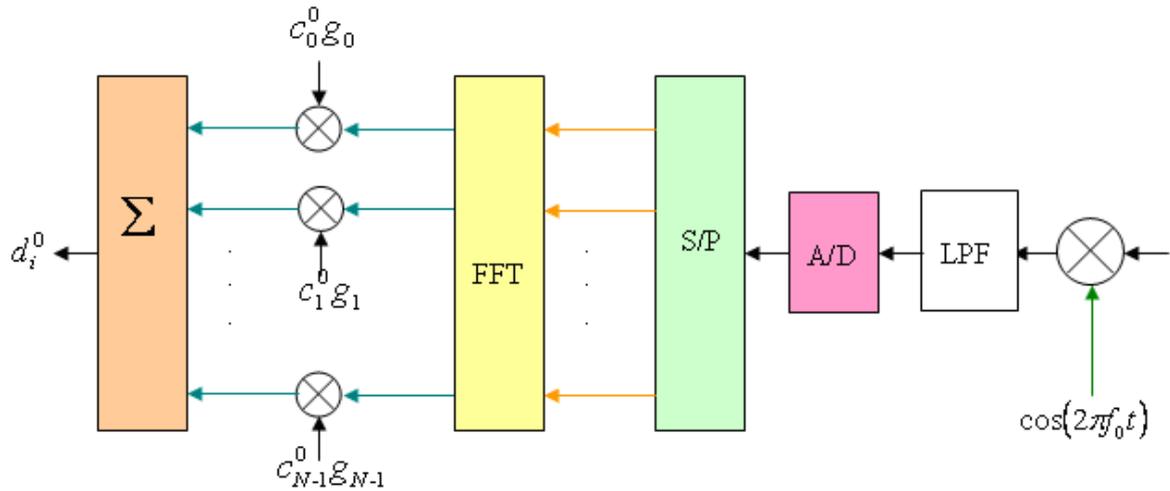


Figure II.8 : Schéma du récepteur MC-CDMA [22].

Généralement, le code d'étalement est de longueur égale au nombre de sous porteuses, mais des variantes sont possibles pour une meilleure adaptation de signal au canal.

L'avantage de cette technique d'accès multiple est d'introduire de la diversité fréquentielle puisqu'une fraction de chaque symbole est transmise sur chacune des N sous porteuses.

#### II.4.2 La technique MC-DS-CDMA

Le principe de cette technique consiste à étaler les données dans le domaine temporel avec un code attribué à chaque utilisateur, puis à transmettre ces données étalées sur plusieurs sous-porteuses orthogonales. On obtient ainsi un système qui est robuste face aux trajets multiples et qui permet de supprimer les interférences à bande étroite [26].

##### a) L'émetteur :

Le schéma de principe d'un modulateur Mc-DS-CDMA d'un utilisateur  $j$  (avec  $j \in [0, N_u - 1]$ ) est représenté sur la **figure II.9**. Nous considérons que la longueur  $L_c$  du code d'étalement est égal au nombre  $N_p$  de sous-porteuses. Le flot de données de chaque utilisateur de période  $T_d$  est tout d'abord converti en  $N_p$  flot de période  $N_p T_d$  par la conversion série-parallèle. Ensuite chacun des  $N_p$  flots est étalé dans le domaine temporel par le même code d'étalement noté  $SC_j$  de longueur  $L_c$  attribué au  $j^{\text{ième}}$  utilisateur. Afin de garantir l'orthogonalité entre les sous-porteuses après la fonction d'étalement, l'espacement

entre deux sous-porteuses consécutives  $\Delta f$  est alors proportionnel à l'inverse de la durée  $T_c$  d'un chip du code d'étalement [26].

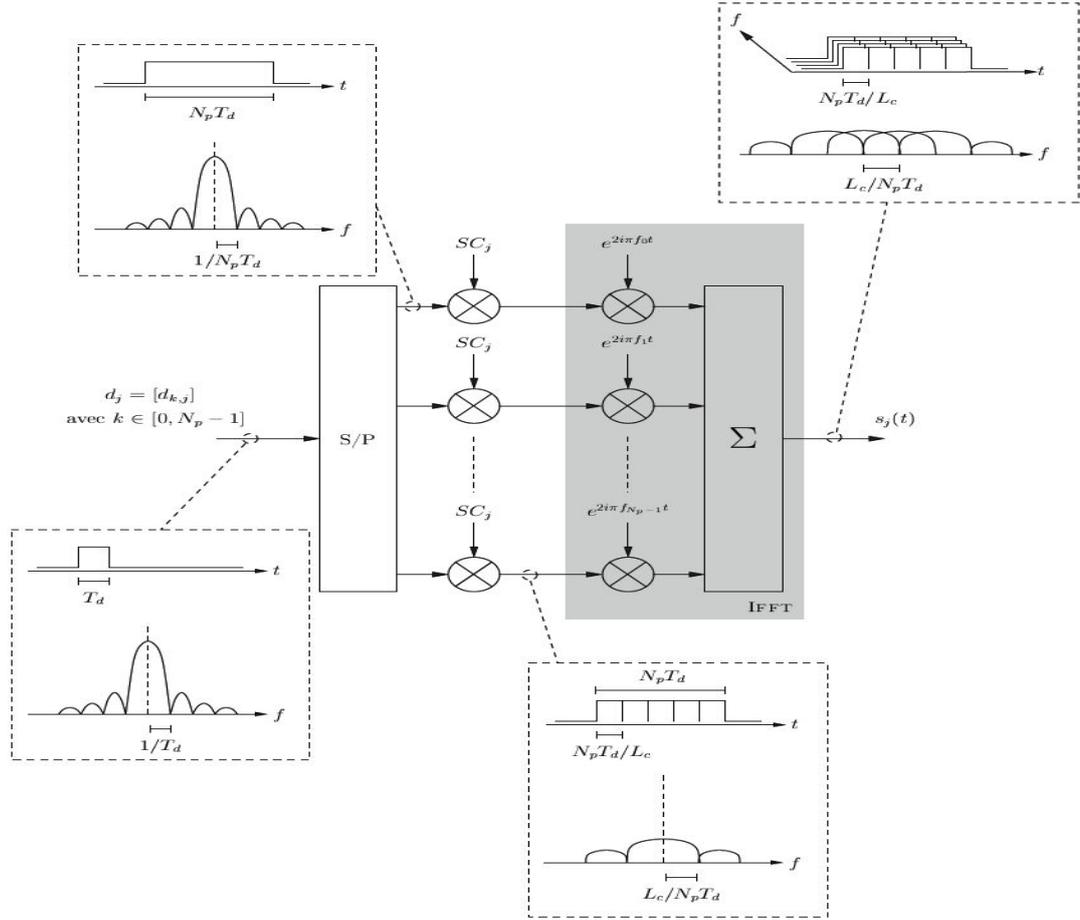


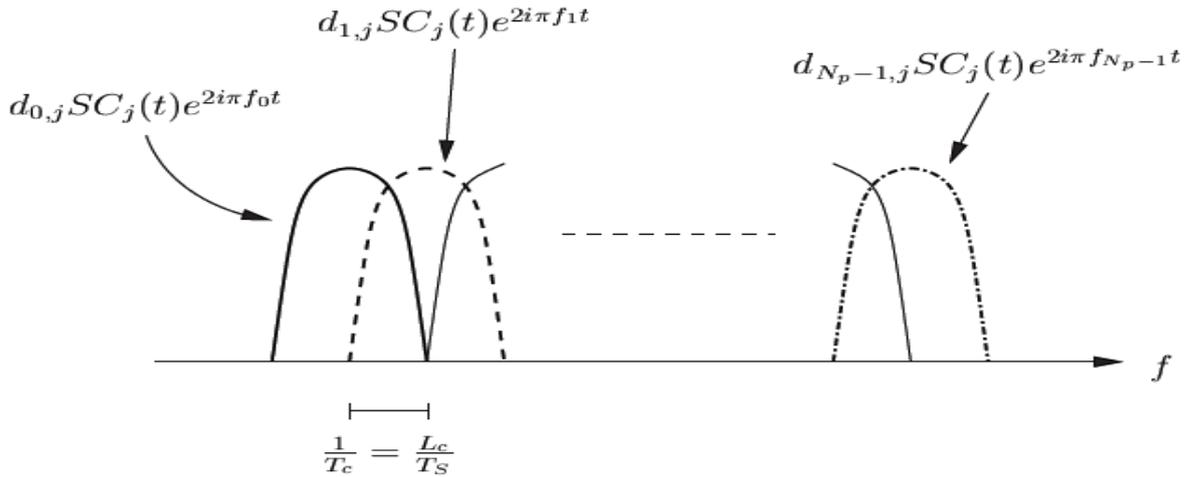
Figure II.9 : Modulateur MC-DS-CDMA [26].

Ainsi, la durée d'un symbole MC-DS-CDMA sur chaque sous-porteuse est égale à  $T_s = N_p T_d = L_c T_c$ . D'où [26] :

$$\Delta f = \frac{1}{T_c} = \frac{L_c}{N_p T_d} = \frac{L_c}{T_s} \quad (\text{II.19})$$

La figure II.10 représente le spectre du signal MC-DS-CDMA transmis pour l'utilisateur  $j$ .  $N_p$  symboles  $d_{k,j}$  sont émis sur l'intervalle  $[0, T_s[$  et l'expression du signal  $S_j(t)$  est donnée par [26] :

$$S_j(t) = \frac{1}{\sqrt{N_p}} \sum_{k=0}^{N_p-1} \mathcal{R}\{d_{k,j} SC_j(t) \Pi(t) e^{2j\pi f_k t}\} \quad \text{Avec } f_k = f_0 + \frac{kL_c}{N_p T_d}. \quad (\text{II.20})$$



**Figure II.10 :** Spectre des sous-porteuses du signal MC-DS-CDMA pour le  $j^{\text{ème}}$  utilisateur .

La bande  $B$  occupée par les lobes principaux des sous-porteuses est égale à [26]:

$$B = \frac{(N_p+1)L_c}{T_s} = \frac{(N_p+1)L_c}{N_p T_d} \quad (\text{II.21})$$

Ainsi, un signal MC-DS-CDMA peut être généré à l'aide d'une transformation de Fourier inverse effectuée sur les symboles  $d_{k,j}$ .

L'utilisation d'une conversion série-parallèle dans le modulateur Mc-DS-CDMA permet d'augmenter la durée du symbole émis, passant de  $T_d$  à  $N_p T_d$ .

Comme pour les modulations à porteuses multiples, l'insertion d'un intervalle de garde de durée supérieure à l'étalement  $\tau_{max}$  de la réponse impulsionnelle du canal permettant d'absorber les différents échos du canal est souhaitable.

### b) Le récepteur

La **figure II.11** représente le récepteur habituellement proposé pour les systèmes MC-DS-CDMA. Les données transmises étant différentes sur chaque sous-porteuse, la détection est effectuée sous-porteuse par sous-porteuse après l'opération désétalement. En sortie du démodulateur, les estimations  $d_{kj}$  des  $N_p$  données émises  $d_{kj}$  sont récupérées sur chacune des sous-porteuses.

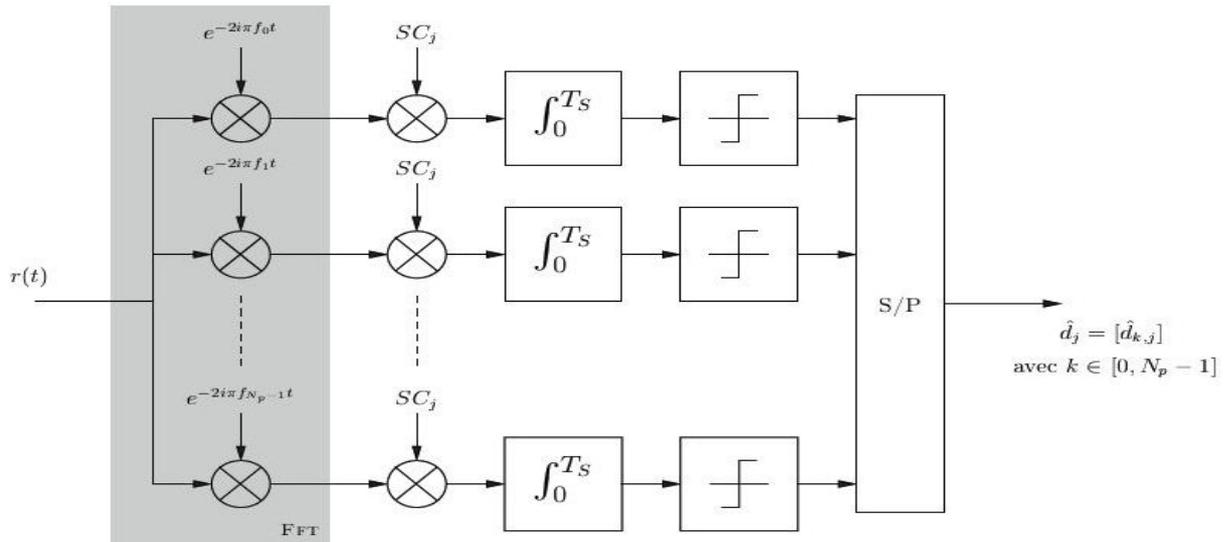


Figure II.11 : Récepteur MC-DS-CDMA du  $j^{i\grave{e}me}$  utilisateur [26].

### II.4.3 La technique MT-CDMA

La technique MT-CDMA est une combinaison entre l'étalement du spectre dans le domaine temporel et les transmissions multi-porteuses. L'étalement est appliqué, dans ce cas, après le bloc « IFFT ». La **figure II.12** représente un simple diagramme en bloc du transmetteur. Les opérations requises sont identiques à l'OFDM, mais l'étalement s'effectue après le block « IFFT ». Dans ce cas le système est en mode de transmission multi-accès. Le spectre de fréquence correspondant est visualisé dans la **figure II.13**, où le spectre de chaque sous-porteuse chevauche avec le spectre des autres sous-porteuses. L'espace entre les sous-porteuses  $f_d = \frac{R_b}{M}$  [4].

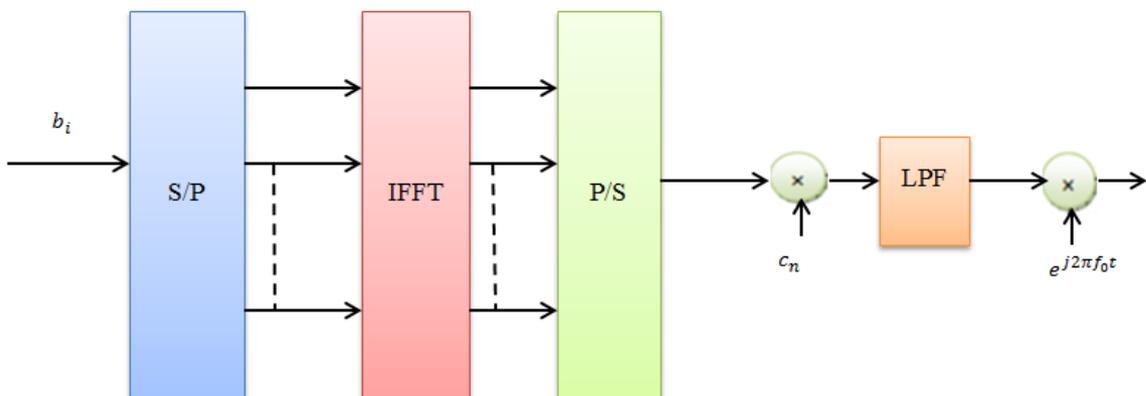


Figure II.12 : Transmetteur MT-CDMA [4].

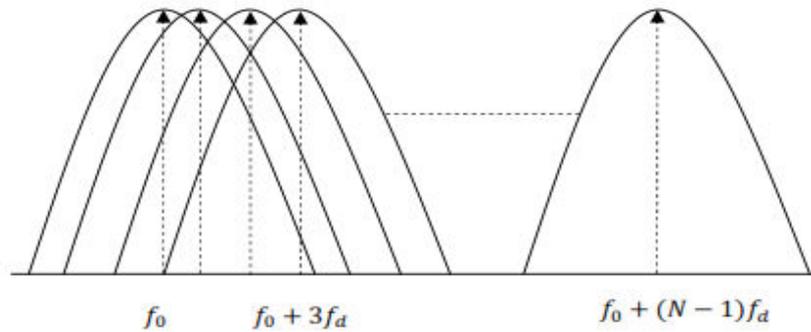


Figure II.13 : Spectre de fréquence pour la MT-CDMA [4].

## II.5 Conclusion

L'étalement de spectre offre une immunité contre les différents types de bruits et contre la distorsion due à la propagation multi-trajet.

Nous avons vu dans ce chapitre les différentes techniques d'étalement de spectre dans un canal radio mobile, FH-SS, TH-SS et DS-SS.

Nous avons ensuite présenté le code d'étalement le plus utilisé (les codes de Walsh-Hadamard).

Nous avons enfin présenté la combinaison entre la modulation multi-porteuse OFDM et l'accès multiple CDMA.

Dans le chapitre suivant nous allons faire des simulations par programmes sous l'environnement Matlab des techniques d'étalements de spectres.

# **Chapitre III**

## **Simulations des performances des systèmes de communications à étalements de spectres dans les communications radio-mobiles**

### **III.1. Introduction**

Dans ce dernier chapitre, nous allons faire des simulations sous l'environnement Matlab qui nous permettra de se familiariser avec les techniques de communications radio mobile à étalement de spectre employées dans les télécommunications modernes. L'objectif est d'illustrer le plus simplement possible la technique d'étalement de spectre et les performances des systèmes de radiocommunications basés sur la technique CDMA. Ils sont fortement liés aux choix techniques qui permettent à des utilisateurs multiples d'accéder simultanément à un canal de transmission. La démarche consiste à commenter des résultats obtenus de la simulation des codes sous Matlab pour les systèmes à étalement de spectre DS-CDMA et MC-CDMA. Ce qui permet de visualiser relativement bien les effets du bruit sur le taux d'erreur binaire (TEB).

Dans la première partie de ce chapitre nous allons entamer la technique d'étalement de spectre DS-CDMA. Dans le système DS-CDMA.

La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à l'autre technique d'étalement de spectre MC-CDMA.

### **III.2 Simulation de la technique d'étalement de spectre DS-CDMA en utilisant les séquences PN dans un canal AWGN**

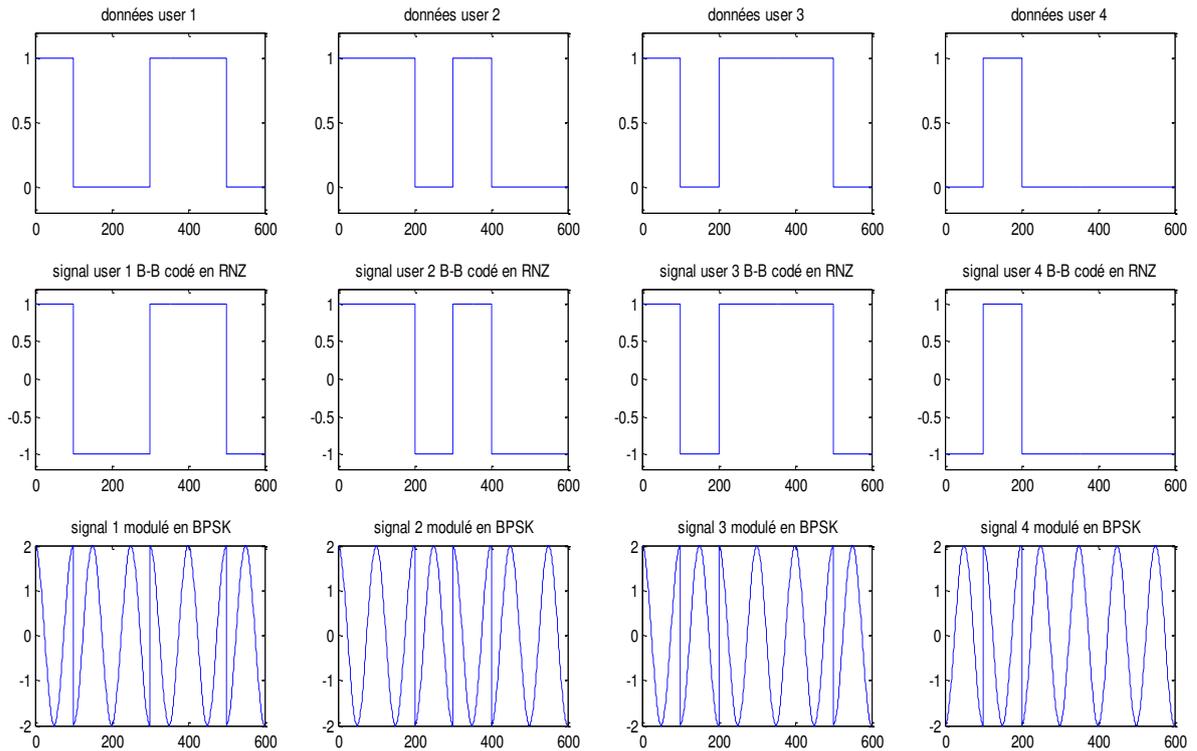
Nous réalisons la technique d'étalement de spectre DS-CDMA pour 4 utilisateurs.

#### **L'émission :**

Chaque utilisateur envoie 6 bits de données. Les bits sont par la suite codés en NRZ pour obtenir des symboles de valeurs -1 et 1 (le bit 0 codé par -1 et le bit 1 codé par 1).

Après le codage NRZ vient l'étape de modulation BPSK, le signal change de phase à chaque changement de bit.

La figure ci-dessous présente ces trois premières étapes de l'émission des données pour nos 4 utilisateurs.



**Figure III.1 :** Les données des 4 utilisateurs codées en NRZ puis modulées.

Pour étaler les signaux émis on effectue l'opération de multiplication des données de chaque utilisateur par la séquence PN qui lui a été attribuée, on note que  $T_b = 10T_c$ .

Les séquences d'étalement pseudo-aléatoires (pseudo-random ou pseudo-noise : PN) répondent aux propriétés de corrélation et d'orthogonalité que doivent valider les codes utilisables dans les systèmes CDMA.

La figure ci-dessous présente l'étape d'étalement de spectre.

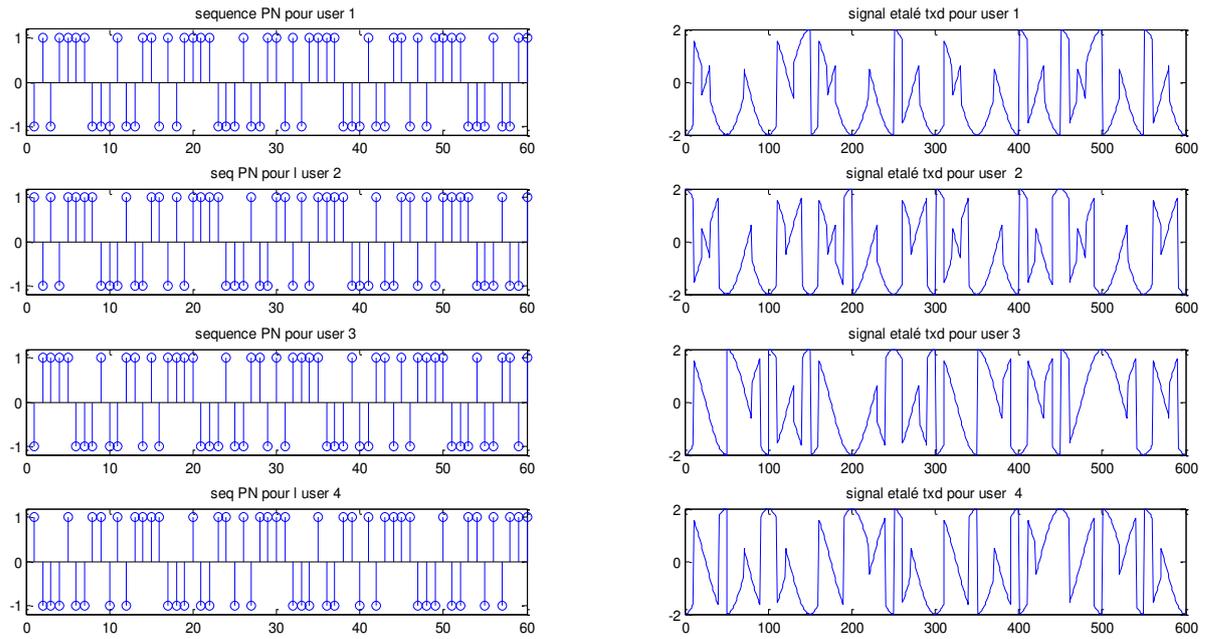


Figure III.2 : Les données des 4 utilisateurs étalées après multiplication par séquences PN.

La figure suivante présente le spectre du signal émis par l'un des utilisateurs avant et après étalement.

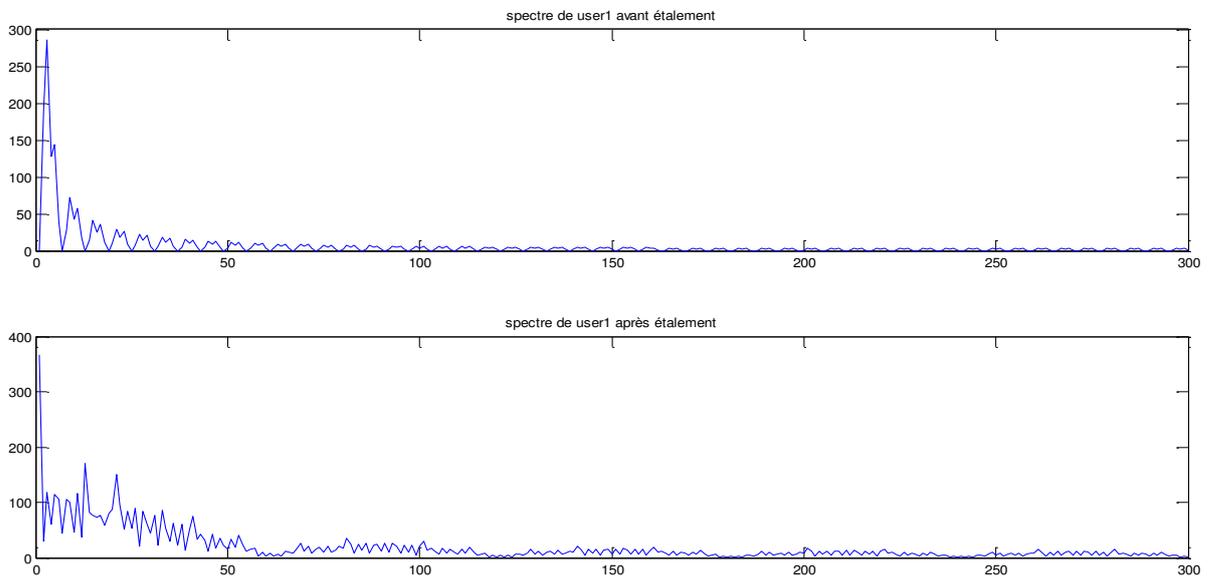
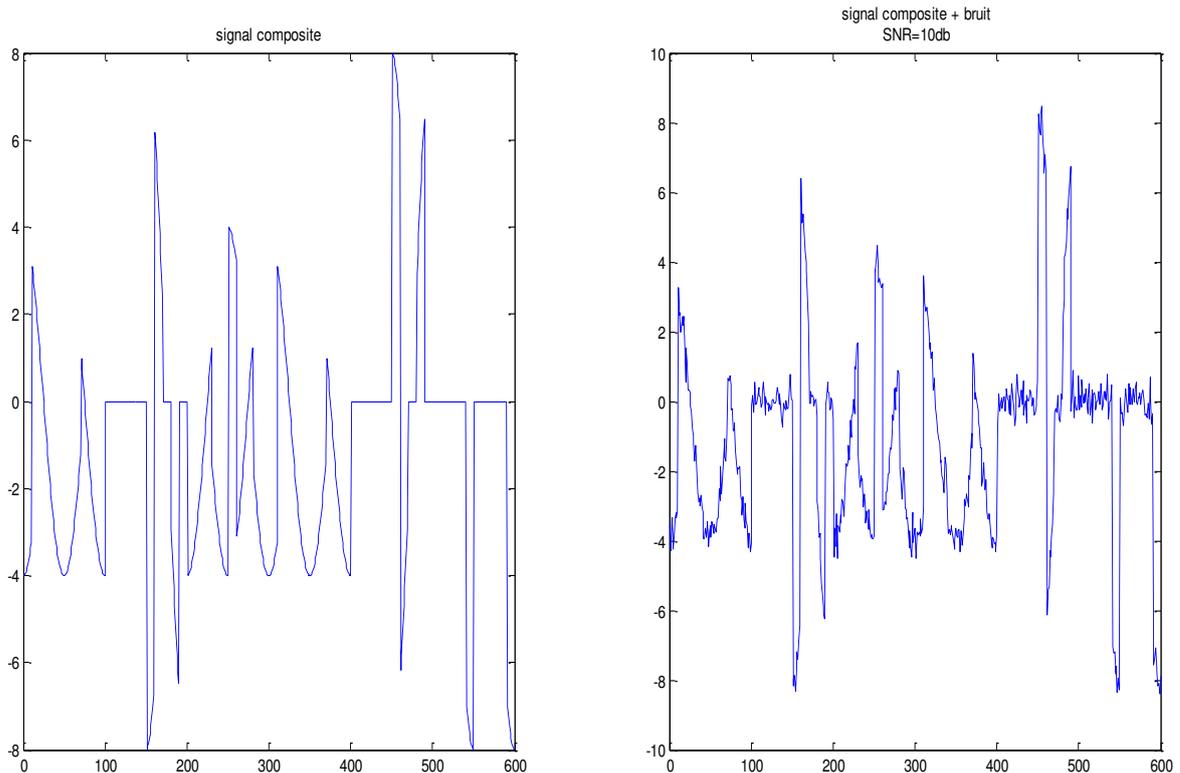


Figure III.3 : Le spectre du signal d'un utilisateur avant et après étalement.

On peut observer clairement l'effet d'étalement de spectre dans le signal, avant étalement les pics de fréquences de l'information étaient clairs séparés et donc détectables facilement mais après étalement le spectre est devenu similaire à un bruit.

Après avoir étalé les signaux des 4 utilisateurs on les somme afin d'obtenir un seul signal appelé signal composite, ce signal va traverser le canal de transmission AWGN et va être affecté par le bruit blanc gaussien additif, on note que nos signaux sont transmis avec un SNR de 10 dB.

La figure ci-dessous représente le signal composite avant et après passage dans le canal AWGN.



**Figure III.4 :** Le signal composite transmis dans le canal AWGN.

### La réception :

Une fois le signal composite atteint le récepteur il passe par plusieurs opérations afin de restituer les données propres à chaque utilisateur.

Dans la première étape on le multiplie par les séquences PN des 4 utilisateurs afin d'extraire le signal utile de chaque usager, on note que l'émetteur et le récepteur doivent être synchronisé au niveau du générateur des séquences PN est cela a pour but d'assurer la génération de la même séquence PN à l'émission et en réception.

Après désétalement chaque signal obtenu est démodulé en le multipliant par la même fréquence porteuse d'émission.

La figure ci-dessous montre l'opération de désétalement et démodulation des signaux.

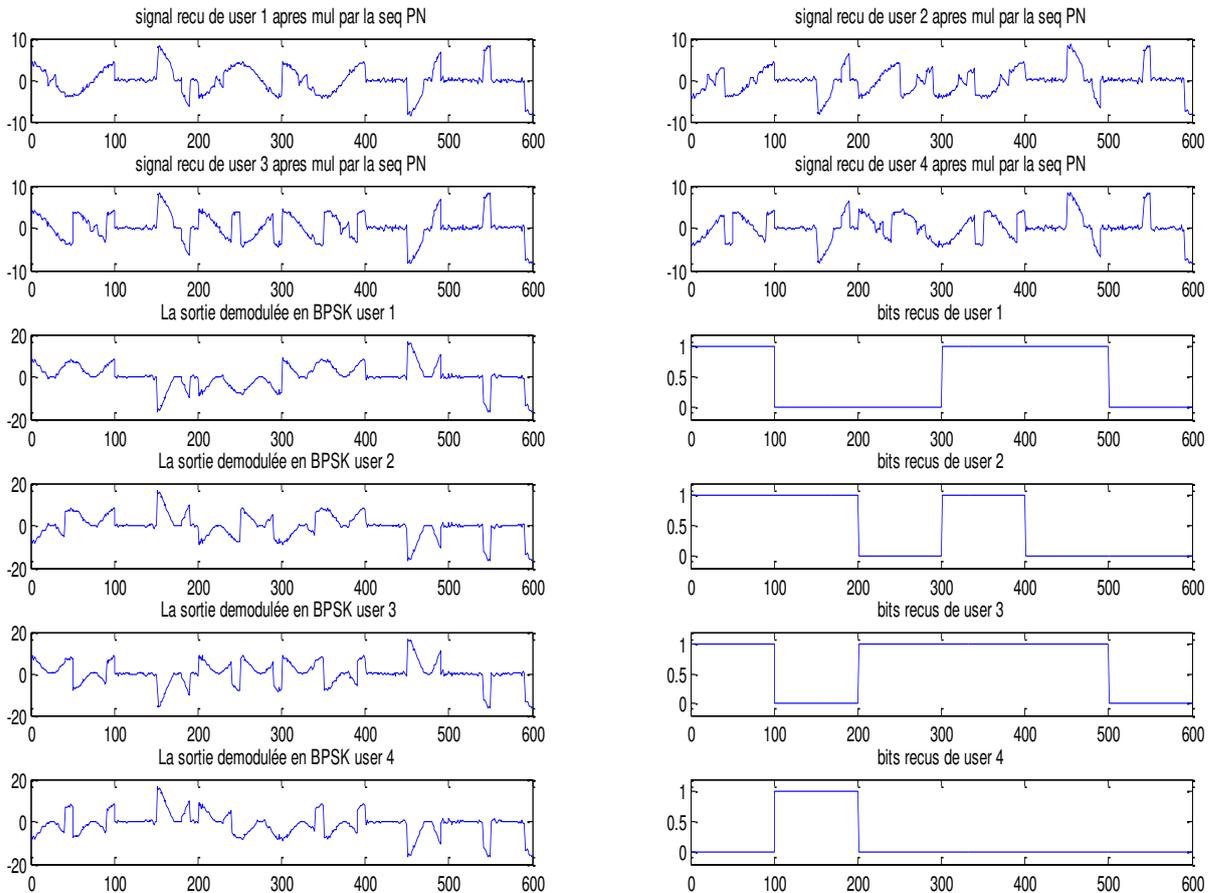


Figure III.5 : les signaux des 4 utilisateurs à la réception désétales et démodulés.

A la réception et après désétalement puis démodulation on retrouve les mêmes données émises sans erreurs comme montré dans la figure suivante.

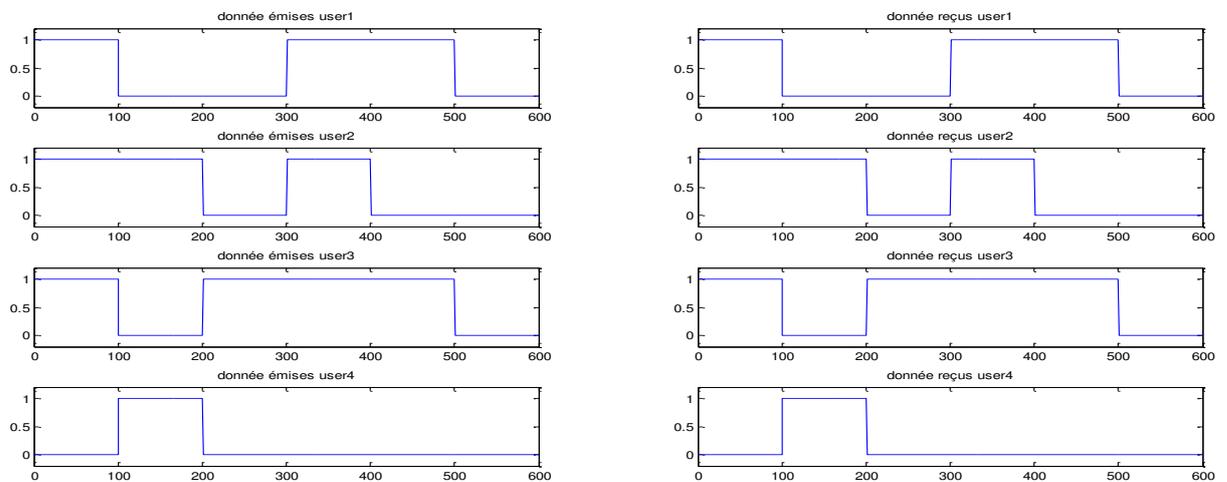


Figure III.6 : Les données des 4 utilisateurs en émission et réception.

### III.3 Simulation de la technique d'étalement de spectre MC-CDMA en utilisant les codes Hadamard dans un canal AWGN et Rayleigh avec les calculs des performances en termes de $BER=f(SNR)$

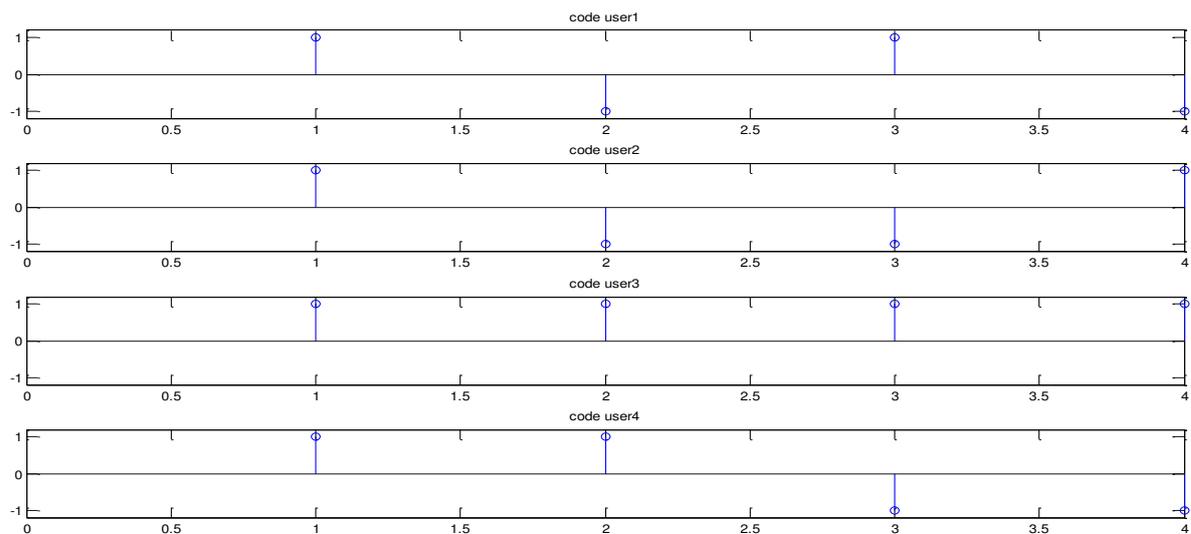
#### III.3.1 Emission et réception des données pour la technique MC-CDMA

Nous présentons la simulation de notre deuxième technique d'étalement de spectre sous MATLAB, il s'agit de la technique MC-CDMA, c'est la combinaison entre les modulations à porteuses multiples et l'étalement de spectre.

##### Emission :

Le programme utilisé est pour 4 utilisateurs. Nous avons choisi d'abord d'utiliser 4 sous porteuse, donc automatiquement la matrice Hadamard va être de dimensions  $4 \times 4$ .

La première étape est de générer les codes d'étalement montrés dans la figure ci-dessous :



**Figure III.7** : les codes d'étalement.

On génère des séquences binaire aléatoires de  $10^4$  bits comme données à transmettre pour chaque utilisateur, les données sont codées en codage NRZ ensuite chaque donnée est étalée par le code d'une manière à créer 4 copies de chaque symbole dans la donnée, et chaque copie est multipliée par un chip du code d'étalement.

Après multiplication par le code les données sont soumises à la transformée de Fourier inverse IFFT qui est appliquée pour les 4 chips en parallèles, on parle ici de l'OFDM.

Pour remédier le signal OFDM aux interférences entre symboles dues au comportement

du canal Rayleigh, on ajoute entre deux trames OFDM, un préfixe ou intervalle de garde.

L'insertion de l'intervalle de garde, se fait au début du symbole OFDM et est une copie de la fin de ce même symbole. Le préfixe est ajouté à l'émission après la IFFT, puis enlevé à la réception avant le module de la FFT.

Les résultats sont présentés dans la figure ci-dessous.

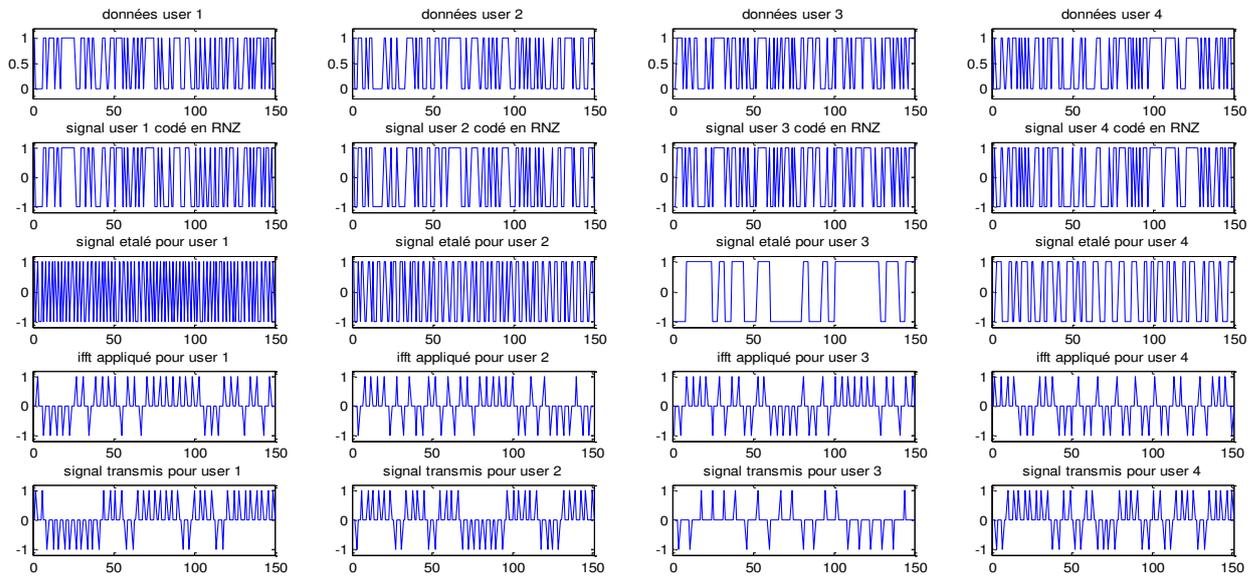


Figure III.8 : les données émises étalées et modulés par les sous porteuses.

Dans la figure ci-dessous on peut observer l'effet de l'étalement de spectre sur le spectre du signal transmis.

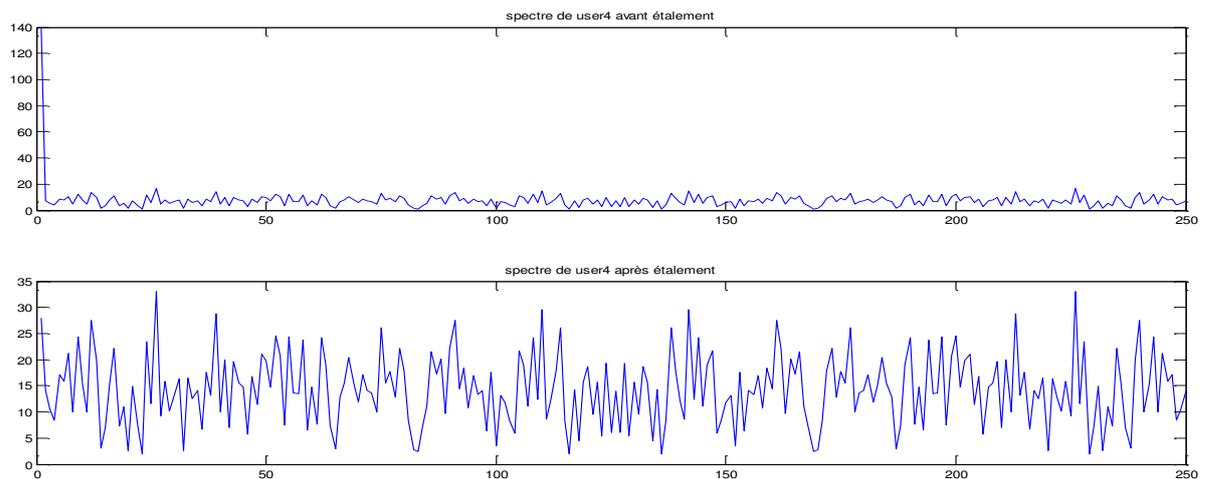


Figure III.9 : le spectre du signal émis d'un utilisateur avant et après étalement.

Après étalement le spectre du signal est similaire à un bruit, donc il est impossible de le détecter ou d'extraire l'information utile sans savoir le code utilisé pour l'étalement.

## Réception

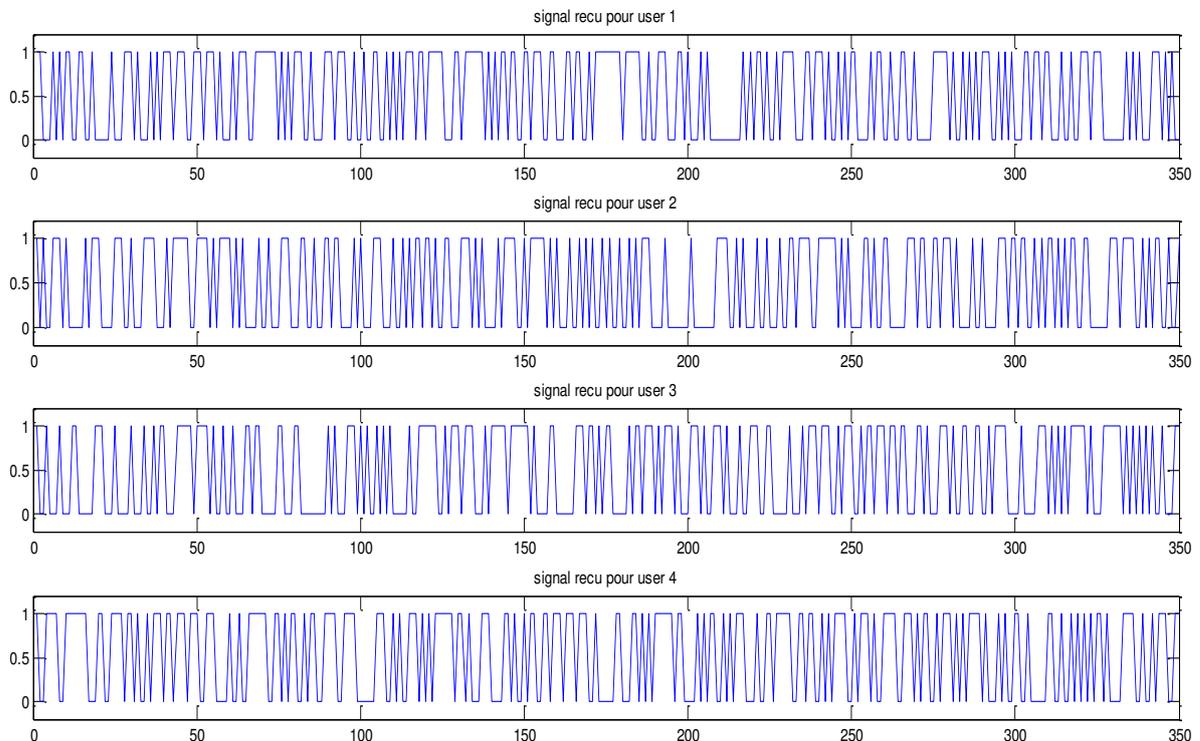
Tout d'abord on supprime l'intervalle de garde, la suppression de l'intervalle de garde permet de restituer l'orthogonalité entre les sous-porteuses. De plus, comme l'intervalle de garde est la recopie des échantillons de fin de symbole OFDM, cet intervalle peut également être exploité en réception pour la synchronisation temporelle du signal OFDM.

Ensuite la transformée de Fourier FFT est implémentée pour démoduler le signal reçu.

Afin de palier le mieux possible les déformations apportées par le canal de transmission après démodulation on effectue une égalisation du canal, le canal de transmission est caractérisé par sa réponse impulsionnelle (la manière dont le canal déforme une impulsion émise) et aussi par sa réponse en fréquence (transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle), c'est à dire la manière dont une composante fréquentielle est modifiée en amplitude et en phase, donc on multiplie le signal obtenu après FFT par le conjugué de la réponse du canal.

Enfin on multiplie le signal obtenu après égalisation par le code d'étalement de chaque utilisateur afin d'extraire les données émises.

La figure ci-dessous présente les données reçues par le récepteur.



**Figure III.10** : les données reçues pour les 4 utilisateurs.

### III.3.2 Taux d'erreur binaire en fonction de SNR pour la MC-CDMA

Pour atteindre le haut débit, la grande capacité et les services multimédias les nouvelles générations de système de communication sans fil utilisent les techniques d'accès multiples tels que MC-CDMA (Multi Carrier Code Division Multiple Access). C'est en fait la combinaison de deux techniques efficaces CDMA et OFDM. La partie CDMA améliore l'utilisation du spectre tandis que la partie OFDM réduit le fading du au multi trajet et ISI. La technique OFDM utilise le signal à bande étroite pour réduire l'évanouissement sélectif en fréquence parce que le signal à bande étroite est moins sensible à l'ISI et à l'évanouissement. Les séquences d'étalements utilisés dans un système CDMA ont un rôle efficace dans la réduction de l'ingérence et l'utilisation du spectre. Avec l'utilisation de la séquence d'étalement efficace le système bénéficie de la réduction d'interférences. La performance du système dépendra de la longueur des codes d'étalement utilisées et les propriétés de corrélation.

La qualité d'un signal numérique ne se mesure pas à la distorsion du signal, mais à la capacité d'un récepteur d'interpréter correctement l'état binaire transmis. La principale contrainte est le BER (Bit Error Rate) et qui se définit de la manière suivante :

$$\text{BER} = \frac{\text{Nbre\_d'éléments\_binaire\_faux}}{\text{Nbre\_d'éléments\_binaire\_émis}}$$

Dans cette section, nous présentons plusieurs simulations pour évaluer les performances de la technique d'étalement MC-CDMA.

L'objectif de ces simulations est d'étudier le taux d'erreur binaire (BER) en fonction de  $E_b/N_0$  (SNR) avec  $E_b$  est l'énergie par bit émis et  $N_0$  la densité spectrale de bruit.

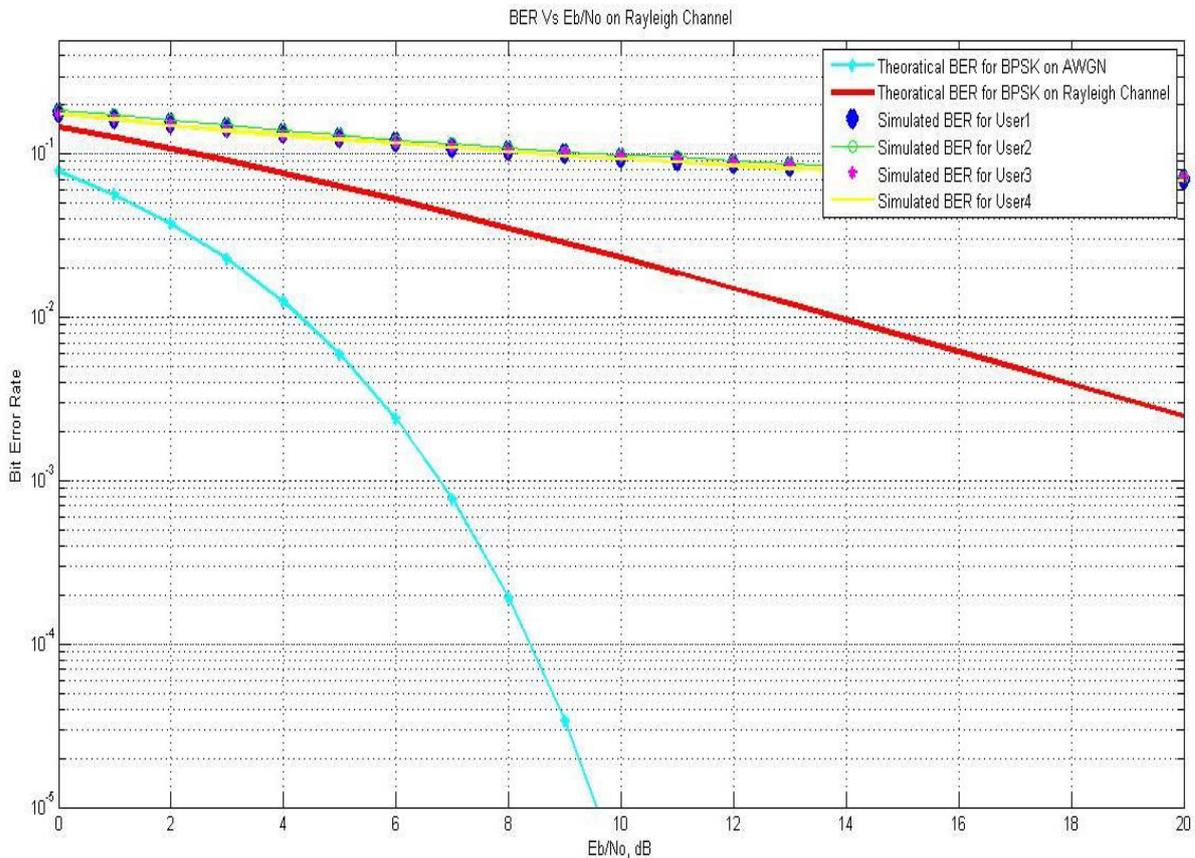
#### III.3.2.1 L'influence du nombre des sous porteuses sur les performances du système

Afin de savoir l'influence des sous porteuses sur le taux d'erreur binaire de chaque utilisateur en MC-CDMA avec bruit AWGN et le canal Rayleigh, On va varier le nombre de sous porteuses. On prend les valeurs suivantes : 4,8,16,32,64,128 pour 4 utilisateurs avec  $10^4$  bits d'information pour chaque utilisateur.

On fixe le nombre des utilisateurs à 4 et le nombre de sous porteuses à 4. Les bits de chaque utilisateur sont d'abord étalés en utilisant une séquence d'Hadamard. Ces bits étalés sont regroupés suivant une constellation pour former différents symboles, et les différents

symboles sont alors envoyés sur les différentes sous-porteuses d'une modulation OFDM.

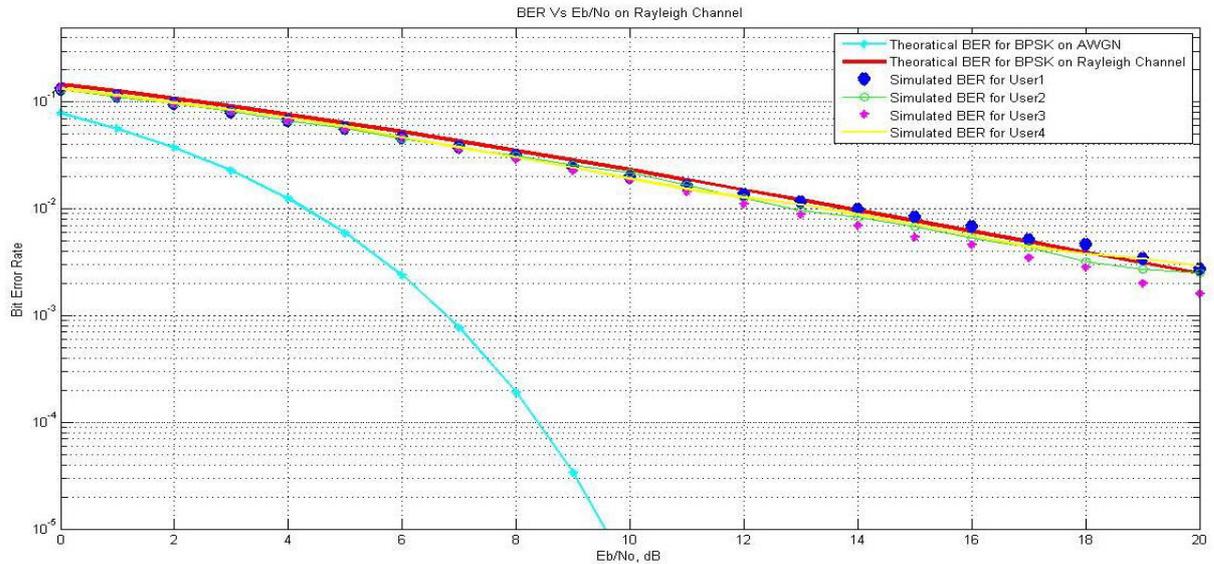
Les résultats sont illustrés dans la figure ci-dessous.



**Figure III.11** : Taux d'erreur binaire en fonction de SNR pour 4 utilisateurs en MC-CDMA avec bruit AWGN et un canal Rayleigh avec 4 sous-porteuses.

La **figure III.11** montre le Taux d'erreur binaire en fonction de  $E_b/N_0$  pour 4 utilisateurs en MC-CDMA. Pour  $E_b/N_0$  égale 0 dB, nous observons un max de taux d'erreur binaire théorique pour le canal AWGN et même pour le canal de Rayleigh, il est environ de  $10^{-1}$ , ensuite le BER pour ces deux canaux commence à diminuer jusqu'à atteindre la valeur minimale  $10^{-5}$  qui correspond à une valeur de  $E_b/N_0$  égale 9.5 dB pour le canal AWGN et une valeur de  $2.4 \cdot 10^{-3}$  pour un  $E_b/N_0$  égale 20 dB pour le canal de Rayleigh. Pour les 4 utilisateurs on remarque une diminution lente du BER, il devient environ  $10^{-1}$  pour une valeur de SNR correspondant à 10 dB.

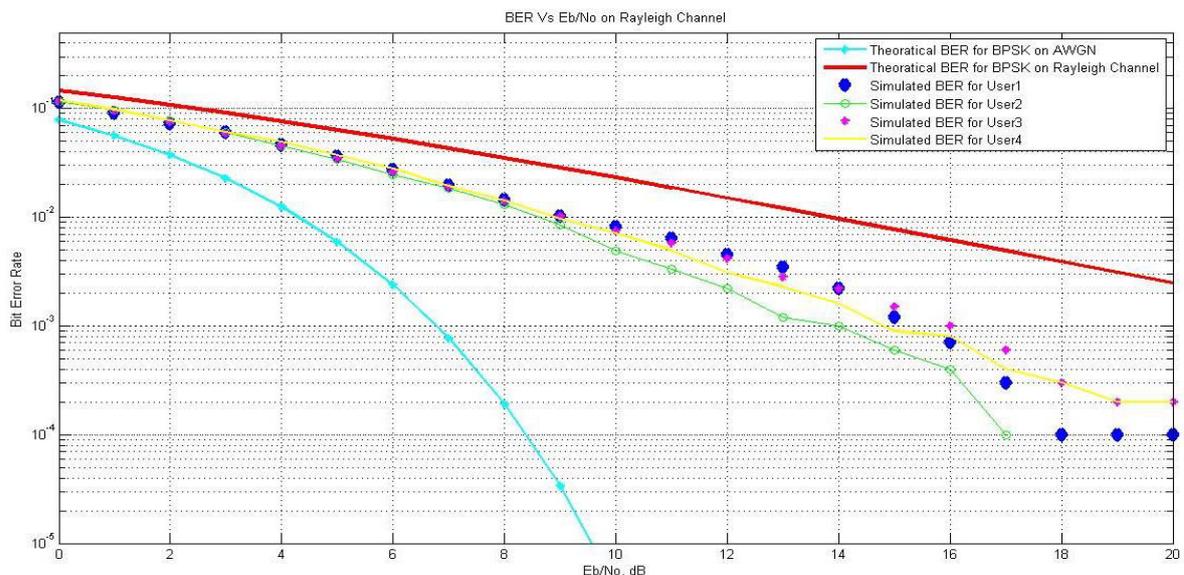
On change le nombre des sous porteuses à 8 pour 4 utilisateurs, la figure suivante montre les résultats.



**Figure III.12 :** Taux d’erreur binaire en fonction de SNR pour 4 utilisateurs en MC-CDMA avec bruit AWGN et un canal Rayleigh avec 8 sous-porteuses.

On constate que l’augmentation du nombre des sous porteuses implique la diminution du taux d’erreur binaire pour les utilisateurs jusqu’à atteindre une valeur environ de  $1.5 \cdot 10^{-3}$  pour un SNR de 20 dB, c’est très proche de la courbe du BER théorique pour BPSK dans un canal Rayleigh.

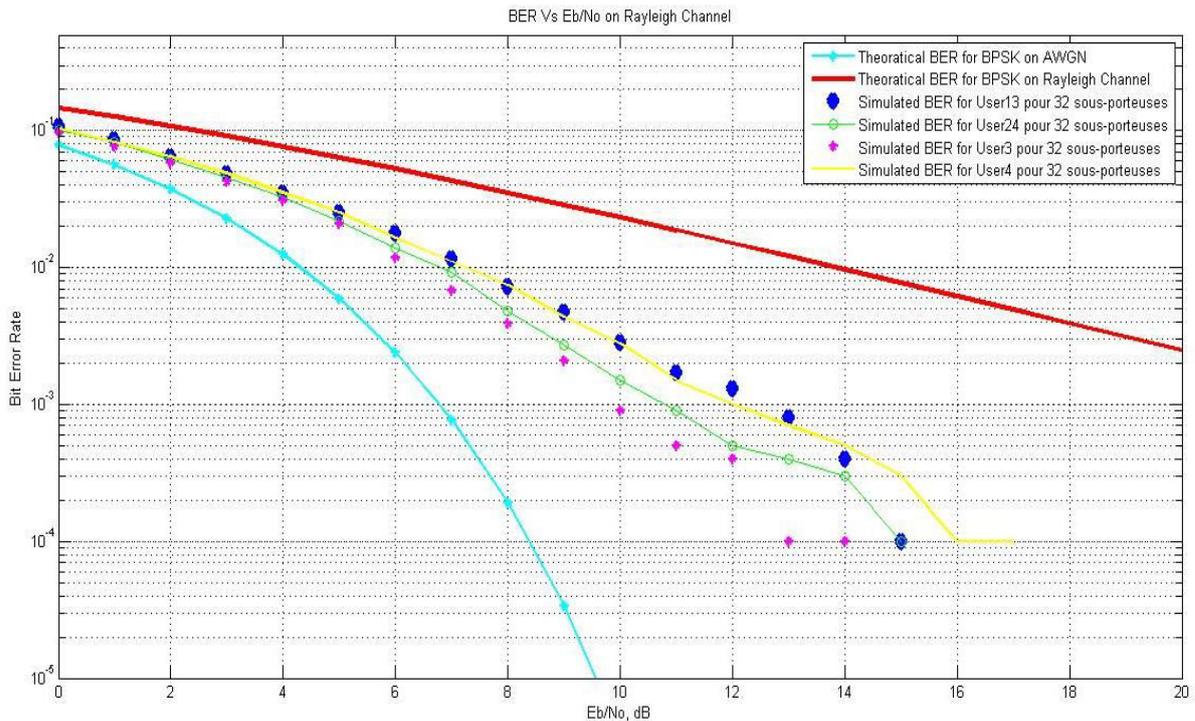
Cette fois on choisit le nombre des sous porteuses égale 16 pour 4 utilisateurs.



**Figure III.13 :** Taux d’erreur binaire en fonction de SNR pour 4 utilisateurs en MC-CDMA avec bruit AWGN et un canal Rayleigh avec 16 sous-porteuses.

En augmentant le nombre des sous porteuses à 16 on remarque que les graphes de BER des 4 utilisateurs sont séparés donc une meilleure détection et le taux d'erreur diminue d'une façon rapide, il atteint une valeur  $10^{-2}$  pour SNR de 10 dB et  $10^{-4}$  pour SNR égale 17-20 dB

On augmente le nombre des sous porteuses à 32 et on maintient le nombre des utilisateurs à 4, les résultats sont montrés dans la figure suivante.



**Figure III.14** : Taux d'erreur binaire en fonction de SNR pour 4 utilisateurs en MC-CDMA avec bruit AWGN et un canal Rayleigh avec 32 sous-porteuses.

Cette fois ci le BER diminue d'une façon rapide pour les 4 utilisateurs par rapport aux fois passées, on remarque le max du taux d'erreur  $10^{-1}$  binaire pour une valeur de SNR égale à 0 dB, ensuite il diminue jusqu'à la valeur minimale de  $10^{-4}$  qui correspond à une valeur du SNR entre 13 et 17 dB.

On augmente le nombre des sous porteuse à 64 puis à 128 pour 4 utilisateurs, les résultats sont présentés dans les 2 figures ci-dessous.

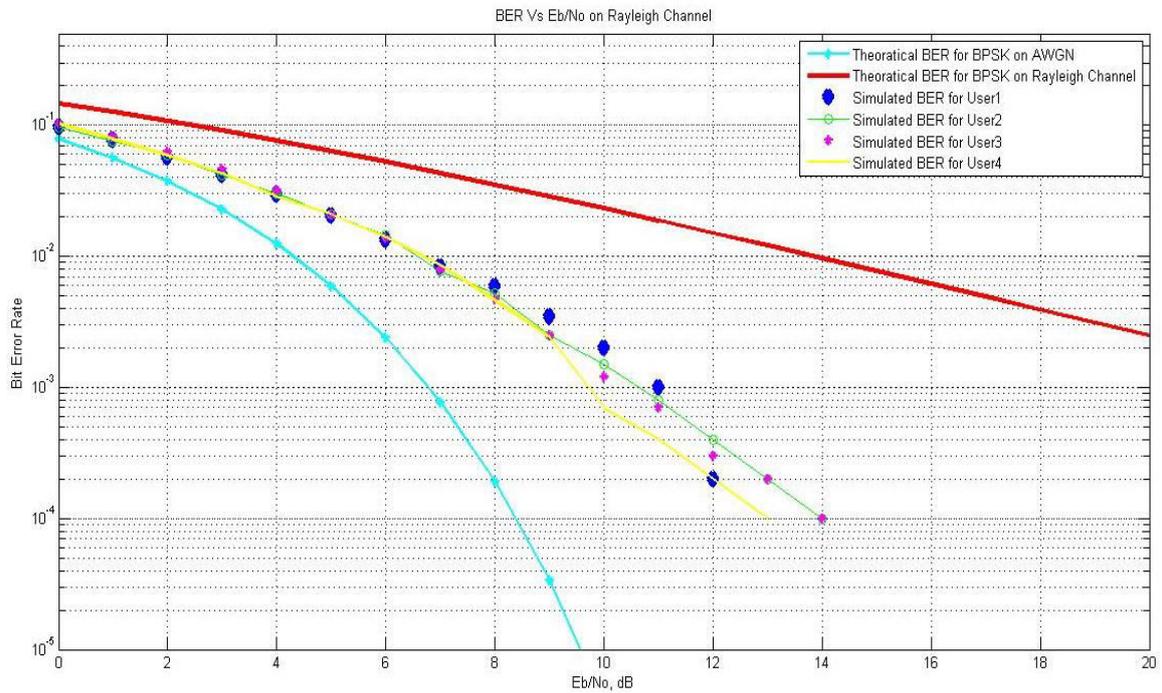


Figure III.15 : Taux d'erreur binaire en fonction de SNR pour 4 utilisateurs en MC-CDMA avec bruit AWGN et un canal Rayleigh avec 64 sous-porteuses.

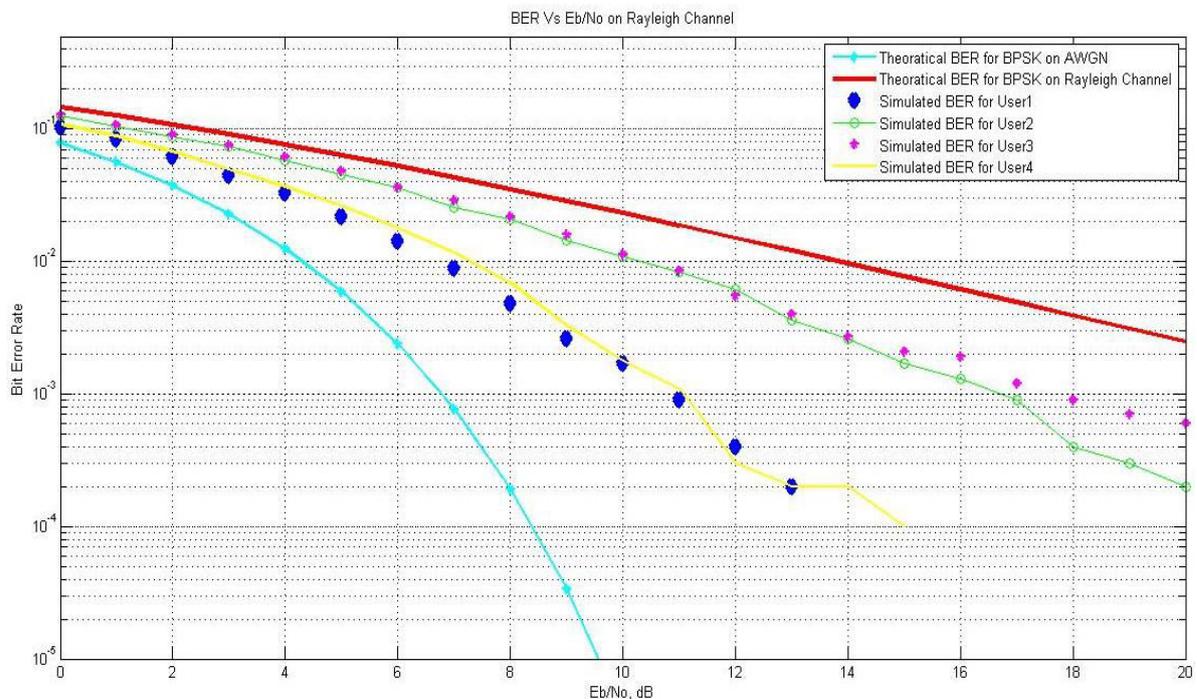


Figure III.16 : Taux d'erreur binaire en fonction de SNR pour 4 utilisateurs en MC-CDMA avec bruit AWGN et un canal Rayleigh avec 128 sous-porteuses.

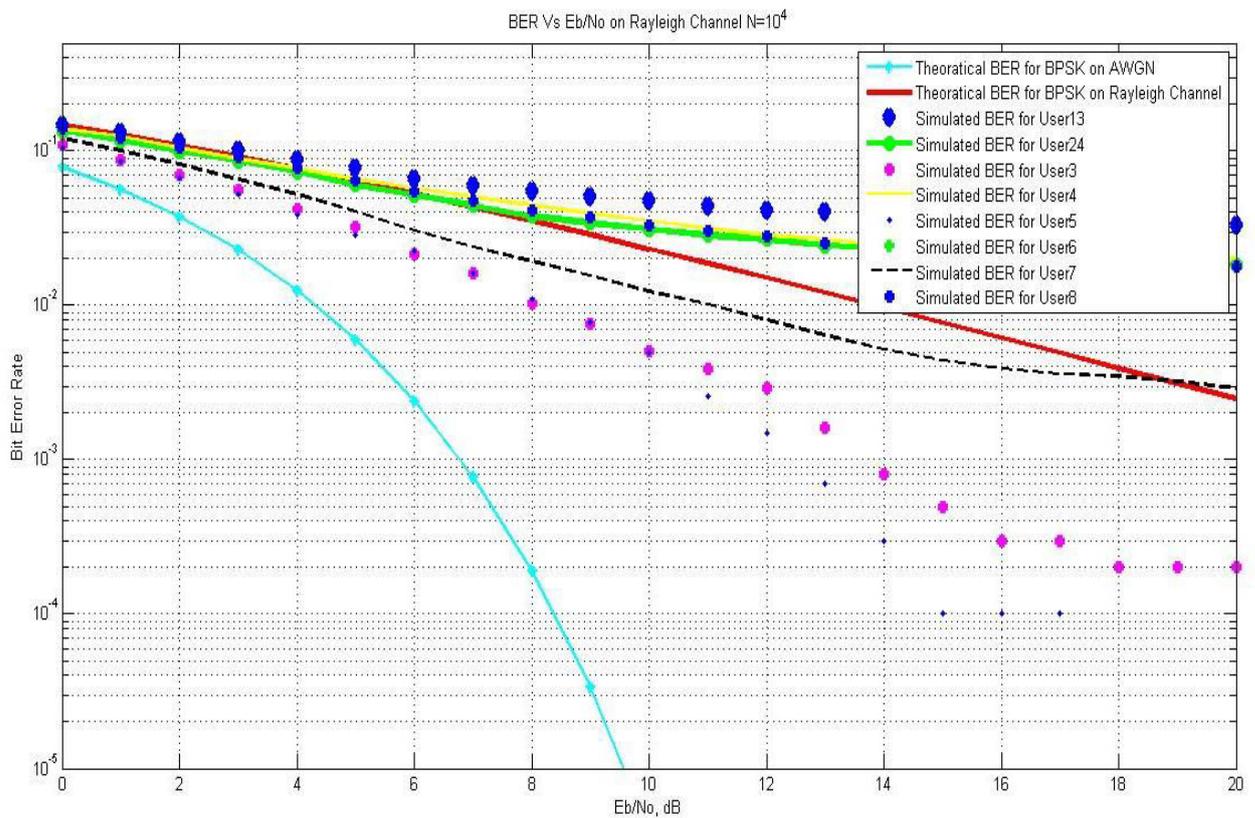
Quand le nombre des sous porteuses est augmenté à 64 nous observons que le taux d'erreur binaire pour les 4 utilisateurs diminue de  $10^{-1}$  à  $10^{-4}$  pour une valeur de SNR comprise entre 0 et 14 dB mais d'une façon plus lente que pour 32 sous porteuses, ensuite pour 128 sous porteuses le taux d'erreur binaire commence à remonter cette fois surtout pour les utilisateurs 2 (vert) et 3 (magenta).

Les résultats obtenus ont montré que le nombre des sous-porteuses et le Taux d'erreur binaire en fonction de SNR en MC-CDMA sont liés directement comme le cas pour les 32 sous-porteuses qui donnent une meilleure performance et de bons résultats par rapport aux autres résultats.

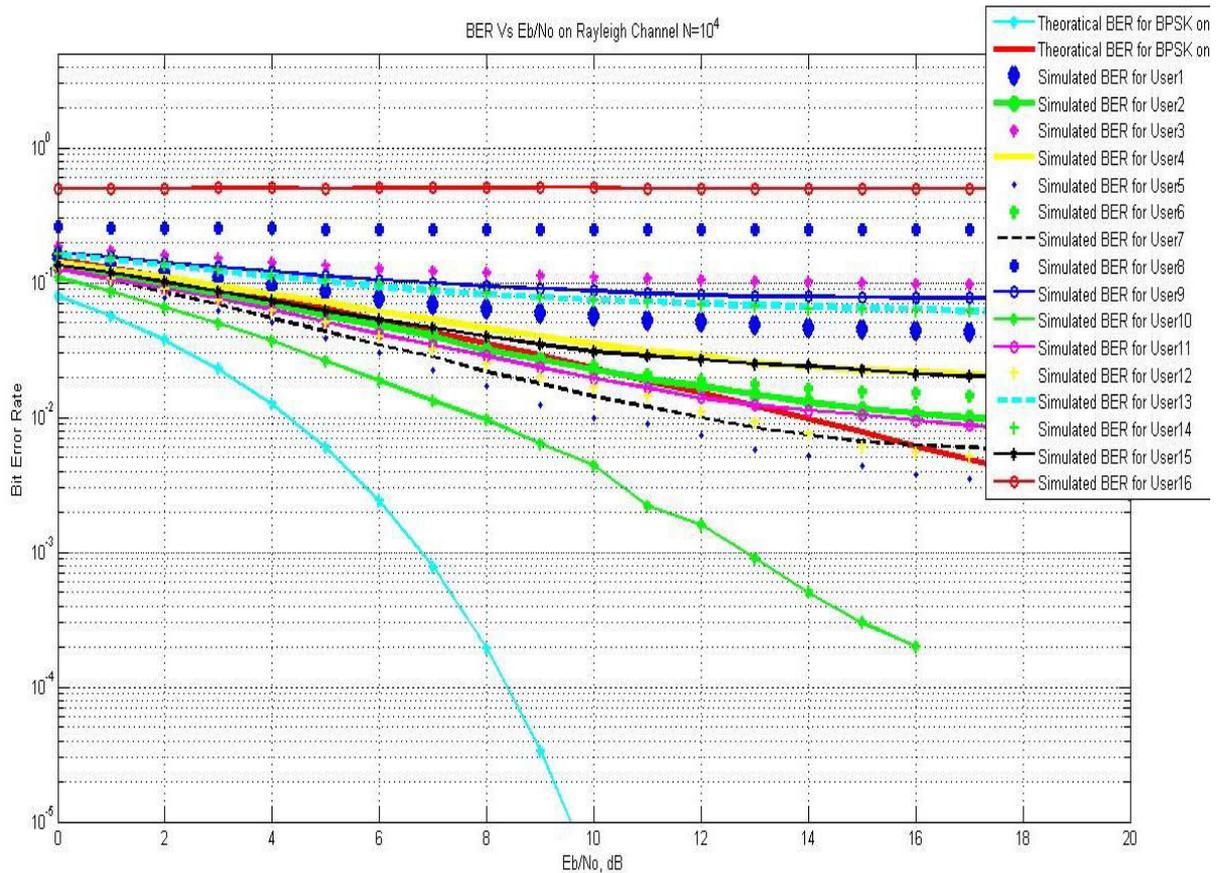
### III.3.2.2 L'influence du nombre des utilisateurs sur les performances du système

Cette fois on va faire varier le nombre d'utilisateurs pour la technique MC-CDMA en fixant le nombre des sous porteuses à 32, afin de savoir l'effet d'augmenter ou diminuer le nombre d'utilisateurs sur les performances du système.

On commence par un nombre d'utilisateurs égal à 8, la figure ci-dessous présente les résultats.



**Figure III.17 :** Taux d'erreur binaire en fonction de SNR en MC-CDMA avec bruit AWGN dans un canal Rayleigh pour 8 utilisateurs avec 32 sous-porteuses.



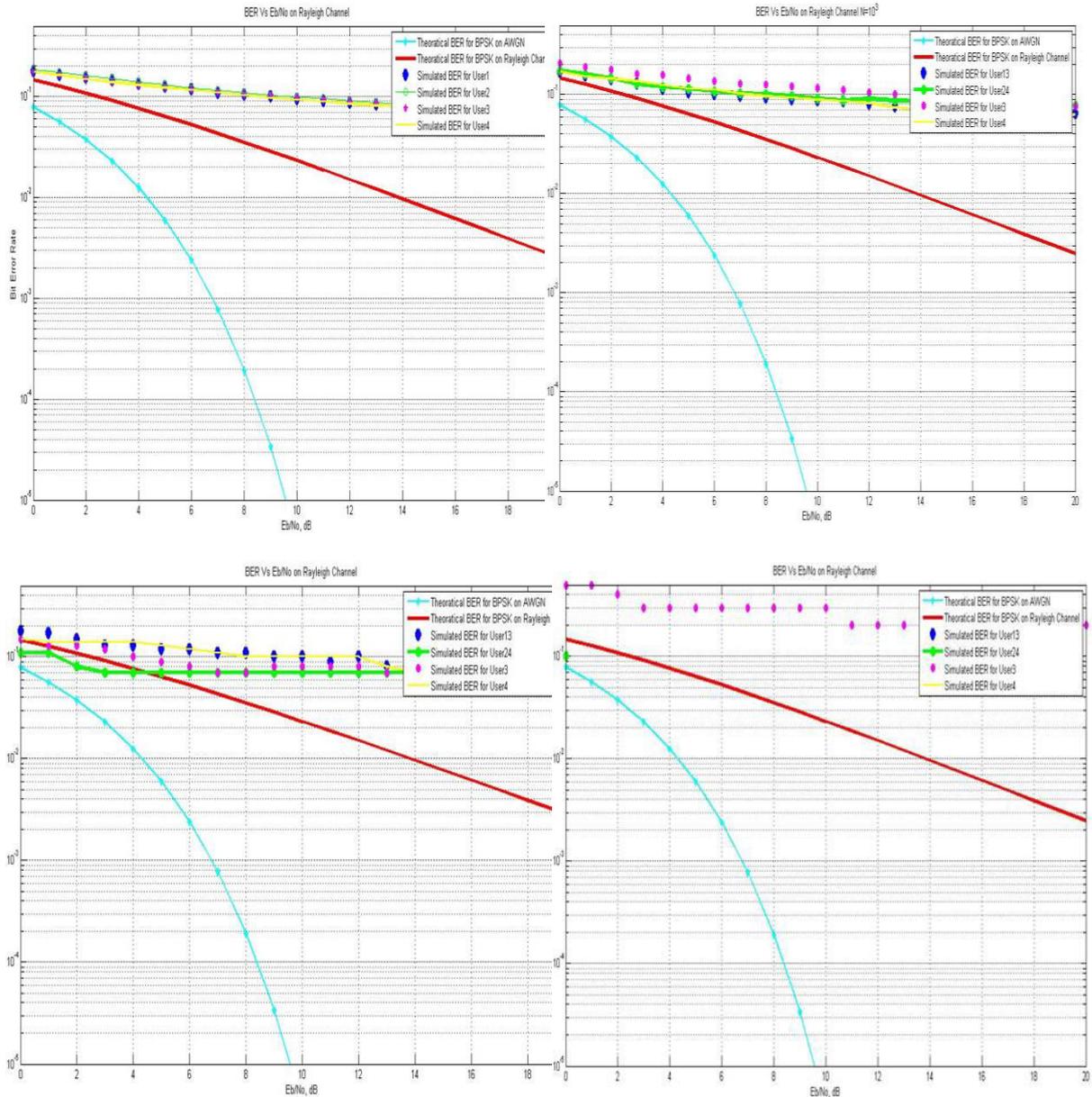
**Figure III.18** : Taux d'erreur binaire en fonction de SNR en MC-CDMA avec bruit AWGN dans un canal Rayleigh pour 16 utilisateurs avec 32 sous-porteuses.

L'augmentation du nombre d'utilisateurs affecte les performances du système en augmentant le taux d'erreurs binaire.

### III.2.3 L'influence du nombre de bits envoyés sur les performances du système

Afin d'observer l'influence du nombre de bits pour l'information transmise sur les performances du système on fait varier le nombre de bits envoyé en le diminuant et en l'augmentant pour le MC-CDMA.

Les 4 figures suivantes présentent les résultats pour un nombre de bits envoyés égale à 10<sup>4</sup>, 10<sup>3</sup>, 10<sup>2</sup> et 10.



**Figure III.19** : Taux d'erreur binaire en fonction de  $E_b/N_0$  pour 4 utilisateurs en MC-CDMA avec nombre de bits envoyé égal à  $10^4$ ,  $10^3$ ,  $10^2$  et 10.

Le taux d'erreur binaire augmente proportionnellement à la diminution du nombre de bits envoyés, on observe un BER qui augmente à plus de  $10^{-1}$  à chaque fois que l'on diminue le nombre de bits, c'est logique car l'énergie du signal diminue avec la diminution des bits émis.

D'après les résultats obtenus on constate que les performances du système MC-CDMA dans un canal Rayleigh sont affectées par le nombre des sous porteuses, le nombre de bits transmis et le nombre des utilisateurs.

### **III.4 conclusion**

Nous avons réalisé dans ce dernier chapitre des simulations de deux techniques d'étalement de spectre afin de tester les performances de ces systèmes.

La première technique que nous avons simulée est la DS-CDMA (Direct Sequence Code Division Multiple Access) pour 4 utilisateurs dans un canal AWGN en utilisant les codes PN (Pseudo Noise), nous avons présenté les différentes étapes d'émission et de réception pour ce système.

La deuxième technique que nous avons simulé est la technique MC-CDMA (Multi Carrier Code Division Multiple Access), cette technique est basée sur la combinaison entre l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) et l'étalement de spectre, Nous avons fait varier le nombre des sous porteuses et les bits des données transmises à chaque fois afin d'observer leur effet sur les courbes de performances des  $BER = f(SNR)$ , d'après ces courbes obtenues nous avons fait des comparaisons et des commentaires.

D'après les résultats obtenus de la simulation des deux techniques on constate que la technique MC-CDMA offre des meilleures performances comparées à la DS-CDMA, de ce fait elle est employée par les nouvelles générations de téléphonie mobile.

# **Conclusion générale**

## **Conclusion générale**

Les communications sans fil connaissent une croissance vertigineuse pratiquement partout dans le monde ces dernières années. Pour cela, les études sont devenues axées sur l'amélioration de la qualité des communications radio afin d'assurer une meilleure qualité de transmission, un haut débit et la confidentialité des utilisateurs.

L'apparence de la technique d'étalement de spectre a offert plusieurs avantages aux communications radio mobile.

Ce travail de mémoire, développé dans ce contexte, a porté sur l'étude et l'analyse des performances des systèmes d'étalements de spectres dans un canal radio mobile.

La première partie de ce travail a été consacrée à l'étude théorique, nous avons commencé par des généralités sur la chaîne de transmission numérique et les techniques d'accès multiple notamment la technique d'accès multiple par répartition des codes CDMA. Ensuite nous avons présenté les différentes techniques d'étalement de spectre.

Dans la deuxième partie, nous avons présenté et discuté les résultats obtenus lors des simulations. Nous sommes passés d'une technique d'étalement simple mono porteuse à une autre technique multi porteuses basée sur la modulation OFDM. La première technique DS-CDMA présente une grande résistance aux trajets multiples grâce aux bonnes propriétés d'autocorrélation de ses codes d'étalement. Par ailleurs, la deuxième technique MC-CDMA est une combinaison entre la modulation OFDM et l'étalement de spectre, cela permet d'offrir une meilleure performance contre les interférences entre symboles et entre sous porteuses.

Ce travail nous a permis de renforcer et enrichir nos connaissances dans le domaine des communications radio mobile, et de se familiariser avec les techniques d'étalement de spectre qui ont changé le monde des télécommunications.

## Bibliographie

- [1] Ianis Aliferis, « Transmissions numériques en bande de base », cours de 4<sup>ème</sup> année, département d'électronique, École Polytechnique de l'UNSA, le 29 Octobre 2013.
- [2] Mahé Gael, « systèmes de communications numérique », ellipses, 2012.
- [3] Arnaud Bournel, « Introduction aux systèmes de télécommunications », Université PARIS XI, 2001-2002.
- [4] Billel Bouchemal, « Synchronisation du code PN dans les systèmes à accès multiple MC-DS-CDMA avec modulation multi porteuses », Mémoire de Magister Université Mentouri Constantine, 2012.
- [5] Damien Prêle, « Squids et méthodes de multiplexage », Université Paris 7, 2009.
- [6] Guillaume Boillet, « Analyse comparative des performances du MC-DS-CDMA dans un réseau cellulaire de troisième génération », Mémoire de Magister, école polytechnique de Montréal, 1999.
- [7] Jeremy Laine et Philippe Vigneron, « Télécommunications numériques le CDMA », 2000-2001.
- [8] Ali Khoudja Merouane et Ben Chohra Mohamed, « Etude comparative des techniques TDMA, FDMA, CDMA : application en radio mobile », Mémoire de Licence en Télécom, Université Fares Yahia-Medea, 2009.
- [9] Claud Servin, « Réseaux et télécoms », Dunod, Paris, 2003.
- [10] Andrea Goldsmith, « Sample chapters from wireless communication », Cambridge university press, 2005.
- [11] Benyarou Mourad, « Optimisation des systèmes multi-antennes appliqués aux systèmes MC-CDMA », Thèse de doctorat, Université Abou Bakr Belkaid-Tlemcen, 2012-2013.
- [12] Youssef Nasser, « Sensibilité des Systèmes OFDM-CDMA aux Erreurs de synchronisation en Réception Radio Mobile », Thèse pour obtenir le grade de docteur de L'INP Grenoble, Institut National Polytechnique de Grenoble, le 04 Octobre 2006.
- [13] Réda Bekhakhecha, « Détection Adaptative pour les systèmes de communication DS-CDMA », mémoire de Magister, Université Mentouri Constantine.

- [14] Merah Hocine, « Conception d'un Modem de la quatrième génération (4G) des réseaux de mobiles à la base de la technologie MC-CDMA », Université Ferhat Abbas-Sétif, le 01/09/2012.
- [15] Baouni Abdelkhalek, « Estimation du Canal et Elimination des Interférences ICI dans les Communications Mobiles avec Modulation OFDM », Université Mentouri Constantine.
- [16] Arnaud Massiani, « Prototypage de systèmes Haut Débit combinant Etalement de spectre, Multi-porteuses et Multi-antennes », thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, le 25 Novembre 2005.
- [17] William Stalling, « Réseaux et communication sans fils », Pearson Education France, 2005.
- [18] Ikhlef Ismahene, « L'analyse du système D'acquisition Multi-Porteuse à séquence Directe (MC-DS-CDMA) Dans un canal Rayleigh », thèse de doctorat, Université Montouri Constantine.
- [19] Emmanuel Geron, « Télécommunications avancées option 1 de troisième Année », université Paris Tech, le 06 mars 2015.
- [20] Belgacem Bekkar, « contrôle de puissance dans les systèmes de télécommunications mobiles », Mémoire de Magister en Automatique, Université Mohamed Kheider-Biskra.
- [21] Belarbi Mohamed El Amin, « La technologie W-CDMA étendue dans les systèmes multi-antenne », Mémoire de Magister en Automatique, Université Abou Bakr Belkaid-Tlemcen, 2012-2013.
- [22] LARBI Nacéra, « Détection multi-utilisateurs dans le contexte de communication mobile : Exploitation de la combinaison OFDM/CDMA », Thèse de Doctorat en Science, Université des sciences et de technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2015.
- [23] Cristiano PANAZIO, « Etude fréquentielle de l'étalement de spectre et impact sur la conception d'un récepteur de radiocommunications universel », thèse de doctorat, 24/05/2005.
- [24] Krim Khadidja, « Etude comparative des performances accrues de schémas de transmission CDMA et OFDM pour des communications par satellite », mémoire de magister en télécommunications, Université Abou Bakr Belkaid – Tlemcen, 2010.

[25] Latifa Hacini, « Schémas hybrides d'acquisition adaptative de codes PN pour des communications DS-CDMA dans un canal Rayleigh », thèse de doctorat, Université Mentouri Constantine, Juin 2012.

[26] Bouchou Abdel Aziz, Taleb Amine, « Evaluation des performances du système MC-CDMA », mémoire de master, Université Dr. Yahia Farès de Médéa, 2010/2011.