

*République Algérienne Démocratique et Populaire*  
*Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche*  
*Scientifique*



**UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENAHAIA JIJEL**

**Faculté des sciences et de la Technologie**

**Département d'Electronique**

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

***Master***

En

« Systèmes de Télécommunications »

***Thème***

***Étude des transmissions***

***MIMO - CDMA***

***Présenté par :***

SLIMOUNE Ismail

***Encadré par :***

Mr. TEKKOUK Omar

***Jijel : Octobre 2020***

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## *Dédicace*

*D'emblée, je tiens à remercier mes cher parents pour m'avoir soutenu durant mon parcours scolaire (du primaire à l'université).*

*Ainsi que mon frère Ibrahim et ma sœur Fatima qui m'ont été d'un grand apport psychologique durant la préparation de ce travail.*

*Je n'oublie pas encore tous mes amis et les collègues qui m'ont encouragé.*

*Ismail*

## **Remerciement**

*Je remercie tout d'abord le Dieu puissant, qui m'a donné la patience, la volonté et le courage pour terminer ce travail.*

*Grand remerciement à Mr Tekkouk pour son encadrement, ses orientations, sa disponibilité et ses conseils.*

*Je remercie vivement les membres du jury d'avoir accepté d'examiner et de participer au jugement de ce travail.*

*J'adresse aussi mes vifs remerciements à tous mes professeurs qui m'ont pris en charge de la première année jusqu'à la cinquième année.*

## *Résumé*

Les systèmes de communications sans fil ont connu une évolution spectaculaire au cours de ces deux dernières décennies. Ces technologies radio sont engagées dans une quête sans fin de transmission haute débit couplée à un besoin constant d'amélioration de la qualité de transmission. Les réseaux locaux sans fil qui font partie intégrante de notre vie quotidienne offrent un accès Internet avec des très hauts débits d'information grâce aux techniques avancées mises en œuvre. Ces réseaux font face à une gestion d'un nombre croissant d'utilisateurs connectés avec une exigence de qualité de service comparable à celle des réseaux filaires.

Le schéma le plus couramment utilisé et recommandé pour les applications de communication sans fil actuelles et futures est le schéma d'accès multiple par répartition par code (CDMA). La raison en est sa capacité à offrir divers avantages tels que la capacité de prendre en charge de nombreux utilisateurs grâce à l'utilisation de la séquence d'étalement orthogonale, l'atténuation des interférences intercellulaires (CCI), l'atténuation de l'effet d'évanouissement sur plusieurs trajets.

Les systèmes de transmission Multiple Input – Multiple Output (MIMO), pourvus de plusieurs antennes en émission et en réception, permettent l'augmentation potentielle des performances des systèmes de communications sans fil. Ces systèmes permettent en particulier d'augmenter la portée et la fiabilité des liaisons quel que soit le canal de propagation.

Le MC-CDMA est une méthode efficace pour la communication sans fil de nouvelle génération car il offre une efficacité spectrale élevée, une capacité élevée, un débit de données élevé et une immunité contre les interférences à bande étroite, également avec un avantage supplémentaire de faible interférence de symboles (ISI). MC-CDMA est une technique combinant l'accès multiple par division de code (CDMA) et le multiplexage par division de fréquence orthogonale (OFDM) qui tire avantage et désavantage des deux régimes. OFDM a une efficacité spectrale élevée et un débit de données élevé.

Ce mémoire s'intéresse à l'étude des performances d'un système MIMO/CDMA et la modulation MC-CDMA sur un canal de Rayleigh. Les résultats de simulations obtenus sur le programme Matlab montrent que cette technique permet d'obtenir une meilleure diversité de fréquence à combattre, un évanouissement sélectif en fréquence et une performance dans des conditions de trajets multiples intenses. Ce que permet de dire que cette technique MC-CDMA est l'un des candidats les plus remarquables pour la couche physique en 5G et au-delà de la 4G.

---

**Mots clés :** CDMA ; MIMO ; MC-CDMA ; Canal de Rayleigh ; Canal multi trajet.

## ملخص

شهدت أنظمة الاتصالات اللاسلكية تطوراً جذرياً خلال العقد الماضي. تعمل هذه التقنيات الراديوية في مسعى لا نهاية له للإرسال عالي السرعة مقروناً بالحاجة المستمرة لتحسين جودة الإرسال. توفر الشبكات المحلية اللاسلكية، التي تعد جزءاً لا يتجزأ من حياتنا اليومية، الوصول إلى الإنترنت بمعدلات بيانات عالية جداً بفضل التقنيات المتقدمة المطبقة. تواجه هذه الشبكات إدارة عدد متزايد من المستخدمين المتصلين مع متطلبات جودة الخدمة مقارنة بالشبكات السلكية.

المخطط الأكثر استخداماً والموصى به لتطبيقات الاتصالات اللاسلكية الحالية والمستقبلية هو مخطط الوصول المتعدد بتقسيم الكود (CDMA). والسبب في ذلك هو قدرتها على توفير مزايا مختلفة مثل القدرة على دعم العديد من المستخدمين من خلال استخدام تسلسل الانتشار المتعامد، وتوهين التداخل بين الخلايا (ICC)، وتوهين يتلاشى تأثير على عدة مسارات.

المدخلات المتعددة - أنظمة الإرسال متعددة المخرجات (MIMO) ، المجهزة بهوائيات إرسال واستقبال متعددة ، من المحتمل أن تزيد من أداء أنظمة الاتصالات اللاسلكية. تتيح هذه الأنظمة على وجه الخصوص زيادة مدى وموثوقية الوصلات بغض النظر عن قناة الانتشار.

تعد MC-CDMA طريقة فعالة للجيل التالي من الاتصالات اللاسلكية لأنها توفر كفاءة طيفية عالية وسعة عالية ومعدل بيانات مرتفع ومناعة ضد التداخل ضيق النطاق، وأيضاً مع ميزة منخفضة تداخل الرمز MC-CDMA (ISI). هي تقنية تجمع بين النفاذ المتعدد بتقسيم الشفرة (CDMA) وتعدد الإرسال بتقسيم التردد المتعامد (OFDM) الذي يستفيد ويضرب كلا النظامين. يتميز OFDM بكفاءة طيفية عالية ومعدل بيانات مرتفع.

تهتم هذه الرسالة بدراسة أداء نظام MIMO / CDMA وتشكيل MC-CDMA على قناة Rayleigh. تظهر نتائج عمليات المحاكاة التي تم الحصول عليها في برنامج Matlab أن هذه التقنية تجعل من الممكن الحصول على تنوع تردد أفضل لمكافحة، وخبو التردد الانتقائي والأداء في ظل ظروف تعدد المسارات المكثفة. هذا يسمح لنا بالقول إن تقنية MC-CDMA هذه هي واحدة من أبرز المرشحين للطبقة المادية في G5 وما بعد G4.

## *Liste des abréviations*

<b>AMRC</b>	Accès Multiple à Répartition de Codes.
<b>BAM</b>	Bruit d'Accès Multiple.
<b>BBAG</b>	Bruit Blanc Additif Gaussien.
<b>BER</b>	Bit Error Rate.
<b>BS</b>	Base Station.
<b>CDMA</b>	Code Division Multiple Access.
<b>DS</b>	Direct Sequence.
<b>FDMA</b>	Frequency Division Multiple Access.
<b>FFT</b>	Fast Fourier Transform.
<b>GSM</b>	Global System for Mobile communications.
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers.
<b>IFFT</b>	Inverse Fast Fourier Transform.
<b>ISI</b>	Inter-Symbol-Interference.
<b>LAN</b>	Local Area Networks.
<b>LOS</b>	Line Of Sight.
<b>MAI</b>	Multiple Access Interférence.
<b>MC</b>	Multi-Carrier.
<b>MIMO</b>	Multiple Input Multiple Output.
<b>MISO</b>	Multiple-Input Single Output.
<b>OEM</b>	Onde Electromagnétique.
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency Division Multiplexing.
<b>OVSF</b>	Orthogonal Variable Spreading Factor.
<b>SB</b>	Station de Base.
<b>SIMO</b>	Single Input Multiple Output.
<b>SISO</b>	Single Input Single Output.
<b>STC</b>	Space-Time Coding.
<b>TDMA</b>	Time Division Multiple Access

# *Liste des figures*

## **Chapitre 1**

<b>Figure 1.1.</b> Représentation du canal radiomobile. Distinction entre canal de propagation et canal de transmission .....	4
<b>Figure 1.2.</b> Propagation radio-mobile (exemple d'une zone rurale) .....	6
<b>Figure 1.3.</b> Différents types d'atténuation en fonction de la distance du mobile.....	7
<b>Figure 1.4.</b> Fonction de transfert d'un canal comportant un retard .....	8
<b>Figure 1.5.</b> Fonction de densité de probabilité gaussienne.....	10

## **Chapitre 2**

<b>Figure 2.1.</b> Principe de FDMA (avec $N_c = 5$ sous-canaux) .....	13
<b>Figure 2.2.</b> Principe de TDMA (avec cinq intervalles de temps) .....	14
<b>Figure 2.3.</b> Étalement de spectre par séquence directe (ESSD).....	15
<b>Figure 2.4.</b> Principe de l'étalement de spectre.....	15
<b>Figure 2.5.</b> Comparaison signal bande étroite / signal étalé.....	16
<b>Figure 2.6.</b> Schéma synoptique des modulations CDMA .....	17

## **Chapitre 3**

<b>Figure 3.1.</b> Schéma d'un système de transmission sans fil MIMO .....	23
<b>Figure 3.2.</b> Principe de la technique MIMO.....	24
<b>Figure 3.3.</b> Système de communication SISO.....	24
<b>Figure 3.4.</b> Système de communication SIM.....	25
<b>Figure 3.5.</b> Système de communication MISO .....	25
<b>Figure 3.6.</b> Système de communication MIMO.....	26
<b>Figure 3.7.</b> Transmettre la diversité.....	27
<b>Figure 3.8.</b> Génération d'un signal MC-CDMA pour un utilisateur.....	29



<b>Figure 3.9.</b> Schéma du transmetteur MC-CDMA.....	30
<b>Figure 3.10.</b> Autre schéma du transmetteur MC-CDMA .....	31
<b>Figure 3.11.</b> Schéma du récepteur MC-CDMA .....	31
<b>Figure 3.12.</b> Schéma du récepteur MC-DS-CDMA .....	33

## Chapitre 4

<b>Figure 4.1.</b> Effet de la longueur du code sur le BER en une transmission en système CDM.....	36
<b>Figure 4.2.</b> Influence de types de codage sur le BER en fonction de SNR.....	37
<b>Figure 4.3.</b> Comparaison entre BER simulé et BER théorique d'une transmission MC-CDMA dans un canal de Rayleigh.....	38
<b>Figure 4.4.</b> Capacité d'un canal de Rayleigh de plusieurs usagers dans une transmission MC-CDMA.....	39
<b>Figure 4.5.</b> Comparaison entre l'effet des différentes valeurs de la longueur de contrainte N....	40

# *Table des matières*

<b>Dédicace</b> .....	I
<b>Remerciement</b> .....	II
<b>Résumé</b> .....	III
<b>Liste des abréviations</b> .....	V
<b>Liste des figures</b> .....	VI
<b>Introduction générale</b> .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>

## **Chapitre 1**

### **État de l'art sur les canaux de transmissions**

1.1 Introduction : .....	3
1.2. Généralités sur le canal de propagation radiomobile : .....	3
1.3. Caractéristiques d'un canal radio-mobile : .....	3
1.3.1. Description des phénomènes physiques à l'intérieur du canal : .....	3
1.3.2. Analyse physique : .....	4
1.3.2.1. Phénomènes à petite échelle : .....	4
1.3.2.2. Le bruit : .....	5
1.3.2.3. Les perturbations de propagation : .....	5
1.3.2.4. Les phénomènes à grande échelle : .....	5
a) L'atténuation moyenne « Path loss » : .....	6
b) La propagation par trajets multiples : .....	6
c) L'effet Doppler : .....	6
d) L'évanouissement à long terme « Shadowing » : .....	7
1.4. Caractéristique du canal multi-trajet : .....	8
1.4.1. Atténuation .....	9
1.4.2. Effet des trajets multiples : .....	9
1.5. Modélisation statistique du canal de propagation : .....	10
1.5.1. Modèle du canal gaussien : .....	10

1.5.2. Le modèle de Rayleigh :	10
1.6. Conclusion :	11

## **Chapitre 2**

### **État de l'art sur les transmissions CDMA**

2.1. Introduction :	12
2.2. Définition des méthodes d'accès multiples :	12
2.2.1. FDMA :	12
2.2.2. TDMA :	13
2.3. CDMA :	14
2.3.1 Modèle dans le cas d'un canal simple trajet :	18
2.3.2. Modèle dans le cas d'un canal multi-trajets :	19
2.4. Les codes d'étalement :	20
2.5. Conclusion :	21

## **Chapitre 3**

### **État de l'art sur les systèmes MIMO - CDMA**

3.1. Introduction :	22
3.2. Présentation général sur le système MIMO :	22
3.3. Principe MIMO :	23
3.4. Architecture MIMO :	24
a) SISO :	24
b) SIMO :	25
c) MISO :	25
d) MIMO :	25
3.5. Technique de diversité pour les transmissions multi-porteuses :	26
a) Principe de diversité :	26
b) Diversité temporelle :	26
c) Diversité fréquentielle :	27
d) Diversité spatiale :	27

3.6. Présentation du système MC- CDMA :	27
3.7. Description du système MC-CDMA :	28
3.8. Concept de fonctionnement :	28
a) Emetteur :	29
b) Récepteur :	31
3.9. Fonctionnement de la MC-DS-CDMA :	32
3.10. Avantage :	33
3.11. Limites :	33
3.12. Conclusion :	34

## Chapitre 4

### Résultats de simulations et discussions

4.1. Introduction :	35
4.2. Résultats de simulations :	35
4.2.1 Première partie : « CDMA » :	35
a) Effet de la longueur du code d'étalement sur la transmission dans le système CDMA :	36
b) Influence de types de codage sur le BER en fonction de SNR :	36
4.2.2. Deuxième partie : « MC CDMA » :	37
a) Comparaison entre le BER théorique et le BER simulé :	37
b) Capacité de canal de Rayleigh dans la transmission MC-CDMA :	38
c) Effet de la longueur des contraintes :	39
4.3. Conclusion :	40
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>Références bibliographiques</b> .....	<b>42</b>



# Introduction Générale

Ces dernières années, avec le développement rapide de la technologie de communication et la demande croissante de systèmes sans fil haut débit de données, les experts tentent de concevoir des systèmes de transmission à efficaces sur des canaux à évanouissements sélectifs en fréquence [1].

Les systèmes de communication sans fil ont gagné une énorme popularité par rapport aux systèmes câbles, principalement parce qu'ils sont dans de nombreuses applications beaucoup moins couteux à mettre en œuvre. Par ailleurs, dans des endroits où l'environnement entrave le d déploiement du câble, la connexion radio reste le seul moyen de communication. En gardant le meilleur pour la fin, les systèmes de communication sans fil permettent l'utilisation des mobiles. En revanche, il est plus difficile pour un système d'ingénierie de maintenir une communication fiable sur les canaux sans fil (transmission en radiofréquence) que sur les canaux avec câble. Le phénomène de propagation multi-trajet entraine le plus souvent des situations hostiles et imprévisibles avec le moindre petit changement dans l'environnement. Les techniques de traitement de signal jouent donc un rôle extrêmement important pour surmonter ces problèmes [2].

L'accès multiple à répartition de codes (AMRC), ou plus connu sous son abréviation anglaise CDMA, est apparu en 1980 pour les applications satellitaires militaires, puis il a été adapté dans le domaine civil au début des années 1990 notamment aux communications sans fil ; C'est une technique permettant d'augmenter la capacité des systèmes de communications ce qui se traduit par une augmentation du nombre d'utilisateurs, mais permet aussi une bonne gestion de la bande de fréquences disponible. Elle consiste à étaler en fréquence les spectres des signaux de tous les utilisateurs et à assigner à chacun d'entre eux un code propre, lui permettant d'être identifié. L'étalement est assuré par un signal appelé code d'étalement. Etant connu par le récepteur, ce code indépendant de l'information permet de récupérer le signal d'origine. Une fois étalé, le signal

devient difficilement intercepté par les autres usagers qui seront perçus par le récepteur comme étant du bruit [3].

Les systèmes multi-entrées et sorties multiples (MIMO) sont un moyen efficace d'obtenir des débits de données élevés et des communications spectrales efficaces. Le système MIMO a récemment prouvé qu'il offrait une capacité très élevée sans aucune augmentation de la bande passante et de la puissance de transmission. Il a été démontré que la capacité théorique d'information de ces canaux de sortie multiples à entrées multiples croît linéairement à mesure que le nombre d'antennes utilisées à l'émetteur et au récepteur augmente. Des réseaux d'antennes multi-éléments à la fois au niveau de l'émetteur et du récepteur, en conjonction avec une architecture de traitement appropriée, peuvent fournir une capacité énorme dans un environnement de diffusion riche [4].

Les modulations à porteuses multiples schéma de modulation multiplexage par répartition en fréquence orthogonale accès multiple par division de code trajets multiples techniques sont des méthodes appropriées pour les systèmes sans fil à haute capacité. Une forme importante de modulation multiporteuse est le MC-CDMA qui combine le (OFDM) et le (CDMA) pour obtenir une vitesse élevée, une large bande passante, une meilleure diversité de fréquence à combattre, un évanouissement sélectif en fréquence et une performance dans des conditions d'intenses. De plus, MC-CDMA est l'un des candidats les plus remarquables pour la couche physique en 5G et au-delà de la 4G [5].

L'objectif de ce mémoire est l'étude de système CDMA et les systèmes MIMO-CDMA et l'évaluation de leurs performances en utilisant le logiciel MATLAB.

Notre mémoire est divisé en quatre chapitres qui détaillent le déroulement de notre travail :

- Le premier chapitre présente des généralités sur les canaux de transmissions.
- Le deuxième chapitre présente les principes de base des systèmes CDMA.
- Le troisième chapitre est consacré à l'étude des systèmes MIMO et des systèmes MIMO-CDMA.
- Le quatrième chapitre présente les résultats des simulations des différents modèles traités.

Et on terminera par une conclusion générale et quelques perspectives

## CHAPITRE



# État d'art sur les canaux de transmission

## 1.1 Introduction :

Dans ce chapitre on va présenter une description du canal de propagation, nous allons étudier les phénomènes physiques affectant la propagation du signal radio, telles que la diffraction, la réflexion, la diffusion...qui entraînent un affaiblissement assez important. D'où la nécessité d'élaborer un modèle de propagation pour donner une estimation précise de cet affaiblissement qui détériore la qualité du signal reçu.

Mais avant d'entamer les notions de modèles de propagation nous allons faire une description d'un canal radio mobile et des modèles les plus utilisés et les perturbations de propagations dans le canal.

## 1.2. Généralités sur le canal de propagation radiomobile :

Le canal radiomobile est le canal qui nous intéresse pour les liaisons sans-fil. On le caractérise par un milieu de propagation, l'air, par des obstacles mobiles (personnes, véhicules) ou immobiles (relief, bâtiments). L'onde électromagnétique qui est le vecteur de l'information sur ce médium, est créée par le transducteur pour une transmission dans l'air. Le canal est visible pour l'onde EM qui va interférer avec cette dernière. Dans cette partie on va étudier les différents phénomènes physiques qui se produisent à l'intérieur du canal de propagation pour exprimer l'interférence entre l'onde EM et le canal de propagation [6].

## 1.3. Caractéristiques d'un canal radio-mobile :

### 1.3.1. Description des phénomènes physiques à l'intérieur du canal :

La connaissance du canal de propagation est primordiale pour dimensionner un système de communication et optimiser les algorithmes de traitement des signaux de communications numériques. Pour ceci, un certain nombre de modèles de canal de propagation a été développé

pour faciliter la simulation et un certain nombre de mesures a été réalisé dans différentes configurations de propagation [7].

L'onde EM se diffuse dans un milieu et perd une partie de son énergie au fur et mesure de sa propagation jusqu'à se disparaître complètement. La réception du signal ne peut se faire que si une partie de l'onde EM arrive à être captée par l'antenne du terminal en réception. En observant la puissance reçue, on s'aperçoit qu'elle peut varier fortement selon le moment et le lieu d'observation. Dans le canal de propagation, les phénomènes se produisent et causant des variations de la puissance reçue sont communément répartis en phénomènes de deux sortes : les phénomènes à grande échelle, et les phénomènes à petite échelle [6].

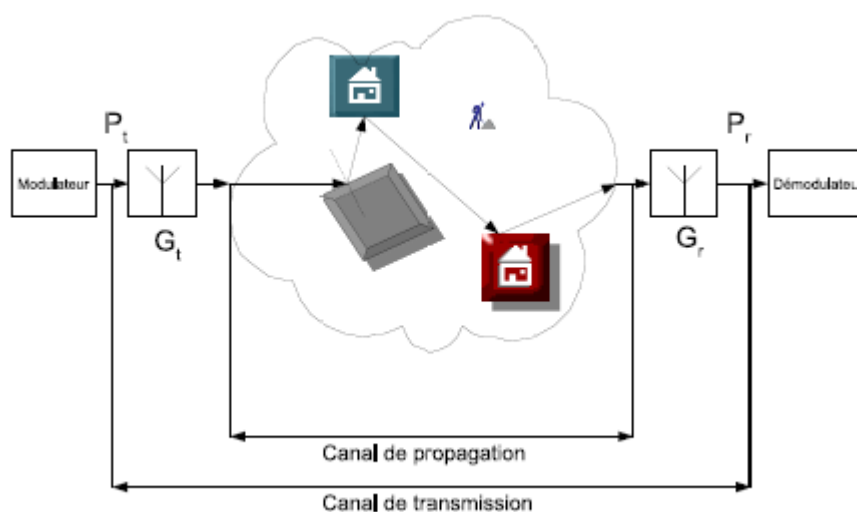


Figure 1.1 : Représentation du canal radiomobile. Distinction entre canal de propagation et canal de transmission [6].

### 1.3.2. Analyse physique :

#### 1.3.2.1. Phénomènes à petite échelle :

En effet, une multitude de trajets est créé par le canal au gré des phénomènes de propagation. Les mécanismes fondamentaux qui caractérisent les interférences de l'onde électromagnétique avec son environnement sont [8] :

- La réflexion : elle se produit lorsqu'une onde électromagnétique rencontre des surfaces lisses de très grandes dimensions par rapport à sa longueur d'onde ( $\lambda$ ), comme par exemple la surface de la terre, les bâtiments et les murs.
- La diffraction : elle se produit lorsqu'un obstacle épais et de grande dimension par rapport à sa longueur d'onde obstrue l'onde électromagnétique entre l'émetteur et le récepteur. Des ondes secondaires dans ce cas, sont produites et se propagent derrière l'obstacle « shadowing ».



- La diffusion : elle se produit lorsque l'onde rencontre un obstacle dont l'épaisseur est de l'ordre de sa longueur d'onde, comme par exemple les lampadaires et les feux de circulation. Donc l'énergie sera dispersée dans toutes les directions.
- La réfraction : elle se produit lorsque le signal traverse un mur, ou une surface et se retrouve dans un milieu ayant un indice de réfraction différent du premier milieu de propagation. Ce phénomène induit une déviation de la direction de propagation.
- Le guidage d'ondes : il se produit lorsque le signal traverse un tunnel, un couloir. Il se propage dans la direction du guide.

La liaison entre la station de base et le mobile dépend du canal radio mobile. Le signal d'information dans une communication sur un canal radio mobile transmis le signal transmis est soumis à deux types de perturbations : le bruit additif et les perturbations de propagation à travers le canal [9].

#### **1.3.2.2. Le bruit :**

Le premier type de perturbations provient directement de l'agitation thermique des électrons dans la matière qui ne sont pas à une température absolue nulle ( $T=0^{\circ}\text{K}$ ). Cette agitation provoque un mouvement chaotique ce qui produit des accélérations aléatoires des électrons dans toutes les directions. Ce bruit est nommé 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.

$$\gamma_b(f) = K_b T \quad (\text{exprimée en Watt/Hz}) \quad (1.1)$$

Où  $K_B$  représente la constante de Boltzmann et vaut à  $1.38 \times 10^{-23} \text{Joules.K}^{-1}$  et  $T$  c'est la température du corps qui émet le rayonnement exprimée en Kelvins [10].

#### **1.3.2.3. Les perturbations de propagation :**

#### **1.3.2.4. Les phénomènes à grande échelle :**

Les phénomènes à grande échelle se produisent dans le cas d'un seul trajet, direct ou non, pour évaluer la puissance reçue au niveau du récepteur.

En communications numériques, un autre type de perturbations pourrait apparaître. Il correspond aux atténuations dues à la propagation et à la superposition multiple et incohérente de signaux radioélectriques en réception. Ainsi, on distingue [11] :

### a) L'atténuation moyenne « Path loss » :

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 de  $n$  où  $n$  est un réel positif qui dépend de la liaison entre la station de base et le mobile. Lorsque la station de base et le mobile sont en vue directe « Line Of Sight LOS», une diminution de la puissance moyenne du signal en puissance de 2 en fonction de la distance ( $n=2$ ).

L'atténuation en puissance est alors donnée par  $Att(d) = \left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right)^2$  où est la longueur d'onde du signal transmis. Lorsque la station de base et le mobile ne sont pas en vue directe, la puissance du signal diminue avec une puissance plus grande de 2. Elle est alors comprise entre 3 et 5 suivant le type d'environnement.

### b) La propagation par trajets multiples :

Elle est dû aux réflexions, de diffractions et à la diffusion du signal transmis sous forme d'onde électromagnétique comme le montre la Figure 1.2. 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.

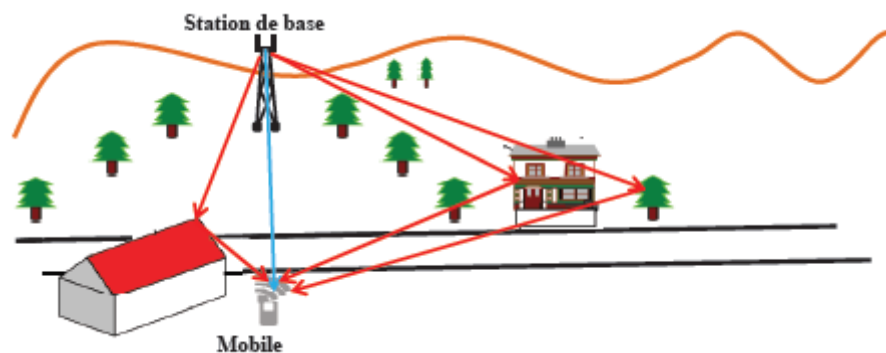


Figure 1.2 : Propagation radio-mobile (exemple d'une zone rurale) [11].

### c) L'effet Doppler :

Cet effet est dû à la mobilité du mobile et/ou des objets dans le canal radio mobile. Pour 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 ce qui 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.

#### d) L'évanouissement à long terme « Shadowing » :

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 par rapport 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.

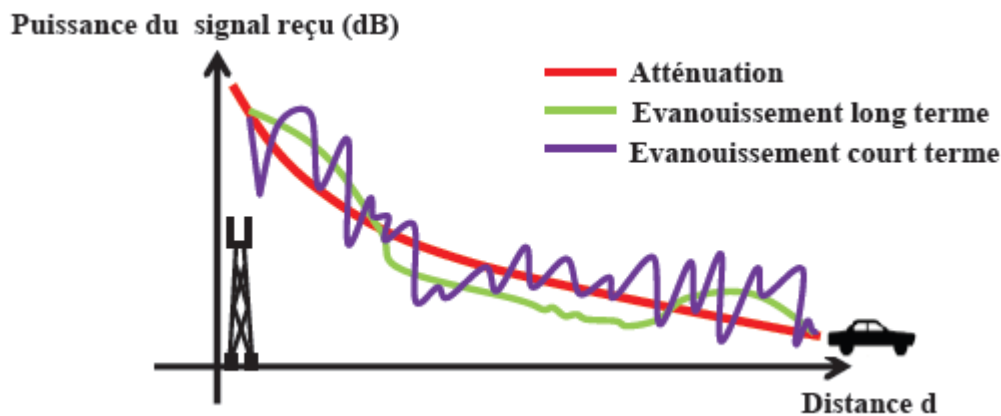


Figure 1.3 : Différents types d'atténuation en fonction de la distance du mobile [11].

La Figure 1.3 récapitule les différentes sources de perturbations. Généralement, les variations de la puissance reçue dues aux effets de l'évanouissement à long terme et l'atténuation moyenne sont compensées par un contrôle de puissance au niveau de l'émetteur. On s'intéressera particulièrement à l'effet Doppler et à la propagation par trajets multiples. En large bande, le canal de propagation est souvent décrit par la réponse Impulsionnelle (RI) d'un filtre sélectif en fréquence et variable en temps. La RI représente ainsi les différents échos que subit le signal en transmission. En raison du mouvement du mobile ou bien des objets environnants, chaque version retardée du signal émis subit une modulation supplémentaire correspondant à l'effet Doppler. On va voir que cette modulation parasite sera d'autant plus grande que la vitesse du mobile et/ou la fréquence porteuse sont plus grandes.

#### 1.4. Caractéristique du canal multi-trajet :

Considérons un modèle simple de canal à l'issue duquel le récepteur reçoit la somme du signal émis et de signaux ayant subi des échos donc retardés de  $\tau_i$  d'amplitude  $h_i$ . La réponse impulsionnelle s'écrit [12] :

$$h(t) = \sum_i h_i \delta(t - \tau_i) \quad (1.2)$$

Sa fonction de transfert est donc :

$$H(f) = \sum_i h_i e^{-2j\pi f \tau_i} \quad (1.3)$$

Prenons l'exemple encore plus simple de 2 trajets, le direct et un retardé de  $\tau$ .

$$h(t) = 1 + \alpha\delta(t - \tau) \text{ et } |H(f)|^2 = 1 + \alpha^2 + 2\alpha\cos 2\pi f\tau \quad (1.4)$$

La fonction de transfert a l'allure suivant :

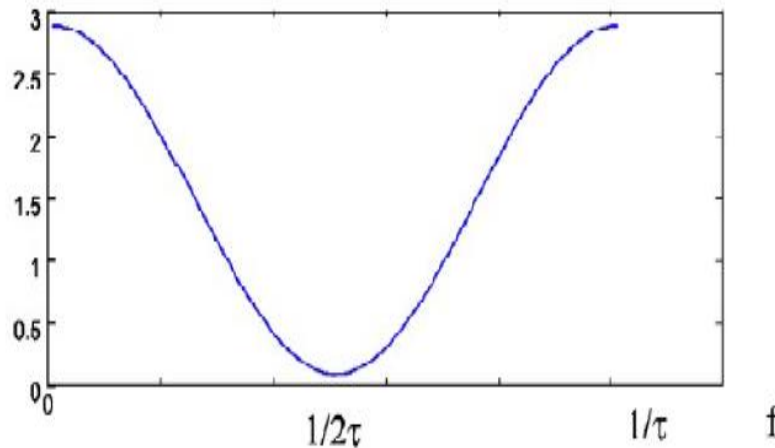


Figure 1.4 : Fonction de transfert d'un canal comportant un retard [12].

On remarque que la fonction de transfert figure 1.4 comporte des zones où le signal sera très affaibli ( $H(f) < 1$ ) (zone d'évanouissement ou « fading »). Sa période de variation est de l'ordre de  $1/\tau$ ,  $\tau$  étant l'étalement des retards.

Suivant la valeur de la bande occupée  $B$  par le signal, deux cas peuvent se présenter :

- $B \ll 1/\tau$  :  $H(f)$  peut être considéré constant sur la bande  $B$ , le signal ne subit pas de distorsion, mais il peut être très affaibli si la fréquence de modulation se situe près de  $1/2\tau$  (Les signaux issus du trajet direct et du trajet retardé sont en opposition de phase). Mais il peut aussi être amplifié (signaux en phase).
- $B \gg 1/\tau$  :  $H(f)$  n'est pas constant sur la bande de fréquence et le signal subit des distorsions qu'il faut corriger à l'aide d'un égaliseur.

### 1.4.1. Atténuation

C'est la baisse dans la puissance du signal lors de sa transmission d'un point à un autre elle peut être provoquée par [12] :

- La longueur du chemin de transmission.
- L'obstruction dans le chemin et les effets par trajets multiples. Tous les objets qui obstruent la visibilité directe du signal (LOS: Line Of Sight ) de l'émetteur au récepteur peuvent causer de l'atténuation.
- Masquage du signal peut se produire quand il y a une obstruction entre l'émetteur et le récepteur. Il est généralement provoqué par des bâtiments et des collines. C'est le facteur environnemental le plus important de l'atténuation.

Les signaux radio se diffractent en dehors des frontières des obstructions ce qui va empêcher le masquage derrière les collines et les bâtiments.

Les émetteurs sont habituellement élevés aussi haut que possible afin de réduire au minimum le nombre des obstructions.

### 1.4.2. Effet des trajets multiples :

De façon générale, supposons que le signal émis s'écrive [12] :

$$s(t) = R_e [S_1(t)e^{2j\pi f_c t}] \quad (1.5)$$

$f_c$  Étant la fréquence porteuse.

Le signal reçu est la somme des signaux issus des différents chemins :

$$r(t) = \sum \alpha_n(t) s(t - \tau_n(t)) \quad (1.6)$$

Chaque chemin provoque une atténuation  $\alpha_n$  et un retard  $\tau_n$  qui varient en fonction du temps. Le signal  $x(t)$  peut aussi s'écrire :

$$r(t) = R_e \{ \sum [\alpha_n(t) e^{-2j\pi f_c \tau_n(t)} S_1(t - \tau_n(t))] e^{2j\pi f_c t} \} \quad (1.7)$$

L'expression entre crochets montre que le signal en bande de base subit des atténuations  $\alpha_n$ , des retards  $\tau_n$  et des déphasages ( $2\pi f_c \tau_n$ ) qui dépend tous du temps.

A partir de cette formule on peut définir la fonction de transfert en bande de base :

$$H(t, \tau) = \sum \alpha_n(t) e^{-2j\pi f_c \tau_n(t)} \delta(\tau - \tau_n(t)) \quad (1.8)$$

Le canal de transmission constitue le problème central auquel il faut faire face dans les différentes solutions de transmission proposées. Lorsqu'on envoie un symbole à travers le canal, celui-ci sera reçu sous forme de versions superposées retardées et atténuées ce qui peut générer de l'interférence entre les symboles transmis. Un remède serait alors d'augmenter l'intervalle de temps entre ces symboles mais au détriment du débit souhaité. Afin de maintenir des débits élevés et annuler l'interférence entre symboles, un remède plus sophistiqué consiste en une transmission

parallèle des données ayant des durées suffisamment longues comme le réalise l'OFDM « Orthogonal Frequency Division Multiplexing » [11].

### 1.5. Modélisation statistique du canal de propagation :

La modélisation du canal est un domaine très vaste ; beaucoup de méthodes existent pour représenter avec plus ou moins de finesse l'environnement de propagation. Certaines utilisent une description géographique et des méthodes géométriques pour modéliser finement la propagation des ondes (méthodes déterministes). D'autres se basent sur des campagnes de mesures pour extraire des valeurs d'atténuation (causées par les obstacles) pour établir des bilans de liaison, comme Okumura-Hata ou Ikegami (méthodes statistiques) établit un panorama des techniques existantes de modélisation du canal [13].

#### 1.5.1. Modèle du canal gaussien :

Du point de vue de la mise en œuvre le canal gaussien est le canal statistique le plus simple pour les communications sans fil, mais pas forcément le plus réaliste. Il modélise uniquement le bruit thermique du récepteur comme une variable aléatoire gaussienne de densité de probabilité  $PX(x)$  et s'ajoute au signal utile. cette variable aléatoire est nommé le bruit blanc additif gaussien (BBAG). Le bruit est dit blanc car il perturbe de façon identique tout le spectre avec une densité spectrale de puissance mono-latérale constante  $N_0$  (W/Hz). Le bruit est alors défini carrément statistiquement par sa moyenne  $\mu_b$  nulle et sa variance  $\sigma_b^2$  [14].

$$PX(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_b^2}} \exp\left[-\frac{(x-\mu_b)^2}{2\sigma_b^2}\right] \quad (1.9)$$

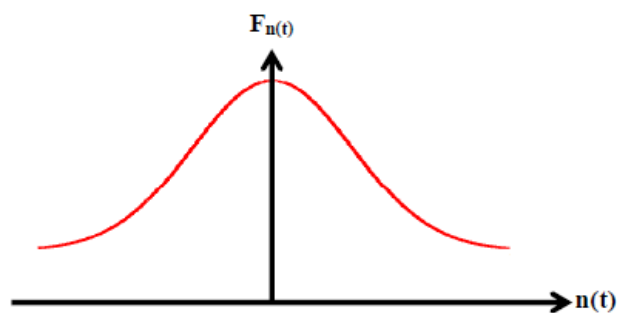


Figure 1.5 : Fonction de densité de probabilité gaussienne [11].

#### 1.5.2. Le modèle de Rayleigh :

Le modèle de Rayleigh est utilisé dans la simulation de systèmes de type indoor car il tient compte des trajets multiples et permet donc de modéliser les phénomènes à petite échelle.

Le modèle de Rayleigh représente les trajets multiples comme un unique coefficient complexe (une atténuation et un déphasage), variant dans le temps.

L'atténuation du canal  $\beta = |h|$  est alors représentée comme une variable aléatoire (V.A) suivant une loi de Rayleigh définie par sa densité de probabilité  $P_B(\beta)$  de paramètre  $\sigma$  [15].

$$P_B(\beta) = \frac{\beta}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{\beta^2}{2\sigma^2}\right], \forall \beta \geq 0 \quad (1.10)$$

### 1.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié le canal radiomobile qui est le canal de propagation pour les liaisons sans-fil. Nous avons détaillé les différents phénomènes physiques affectant la propagation du signal radio. Ensuite nous avons fait une étude mathématique du trajet multiple et nous avons conclu avec une modélisation de principaux canaux de transmission radio mobile.

## CHAPITRE

## 2

*État de l'art sur les transmissions CDMA***2.1. Introduction :**

Les méthodes d'accès sont des techniques de multiplexage qui fournissent des services de communication à plusieurs utilisateurs sur un support câblé ou sans fil à bande passante unique. Les canaux de communication, qu'il s'agisse de segments de spectre sans fil ou de connexions par câble, sont coûteux. Les fournisseurs de services de communication doivent engager plusieurs utilisateurs payants sur des ressources limitées pour réaliser un profit. Les méthodes d'accès permettent à de nombreux utilisateurs de partager ces canaux limités pour fournir l'économie d'échelle nécessaire au succès d'une entreprise de communications [16].

**2.2. Définition des méthodes d'accès multiples :**

Le principal problème de transmission en téléphonie mobile est le partage de l'espace des canaux de transmission. En effet, l'environnement est le même pour tous les utilisateurs, l'espace des fréquences disponibles est restreint. Des techniques d'accès multiple sont alors mises en place pour permettre à plusieurs utilisateurs de partager efficacement la bande radio disponible et à y accéder en même temps. Ces principales techniques sont divisées en [16] :

- Accès multiple par répartition en fréquence (FDMA : **F**requency **D**ivision **M**ultiple **A**ccess).
- Accès multiple par répartition dans le temps (TDMA : **T**ime **D**ivision **M**ultiple **A**ccess).
- Accès multiple par répartition en code (CDMA : **C**ode **D**ivision **M**ultiple **A**ccess).

**2.2.1. FDMA :**

Basée sur la technique de multiplexage, largement utilisée dans les systèmes de communication de 1G, par satellite, câble et terrestre réseaux radio.



FDMA subdivise la bande passante totale en  $N_c$  sous-canaux à bande étroite disponibles pendant toute la durée de transmission (Figure 2.1). Cela nécessite un filtre passe-bande avec une atténuation de bande d'arrêt suffisante. En outre, une bande de garde suffisante est laissée entre deux spectres adjacents afin de faire face aux écarts de fréquence de local oscillateurs et pour minimiser les interférences des canaux adjacents.

Les principaux avantages de FDMA sont dans sa faible puissance d'émission requise et dans l'égalisation de canal qui est soit pas nécessaire ou beaucoup plus simple qu'avec d'autres techniques d'accès multiple. Cependant, son inconvénient dans un système cellulaire pourrait être la mise en œuvre de modulateurs  $N_c$  et démodulateurs à la station de base (BS) [17].

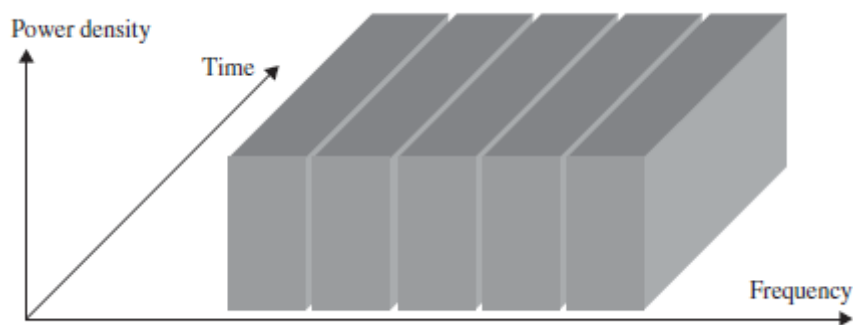


Figure 2.1 : Principe de FDMA (avec  $N_c = 5$  sous-canaux) [17].

### 2.2.2. TDMA :

TDMA est une technique d'accès multiple populaire, Beaucoup de systèmes de communication numérique comme le *GSM* européen utilisent cette technique. Dans un système TDMA, tous les utilisateurs emploient la même bande et sont séparés en allouant intervalles de temps courts et distincts, un ou plusieurs attribués à un utilisateur (Figure 2.2). Dans TDMA, en négligeant la surcharge due au cadrage et au formatage en rafale, le multiplexé la bande passante du signal sera environ  $N_c$  fois plus élevée que dans un système FDMA, d'où conduisant à une égalisation assez complexe, en particulier pour les applications à haut débit. La séparation des canaux de TDMA et FDMA est basée sur l'orthogonalité des signaux. Par conséquent, dans un système cellulaire, l'interférence dans le même canal n'est présente que par la réutilisation de la fréquence [17].

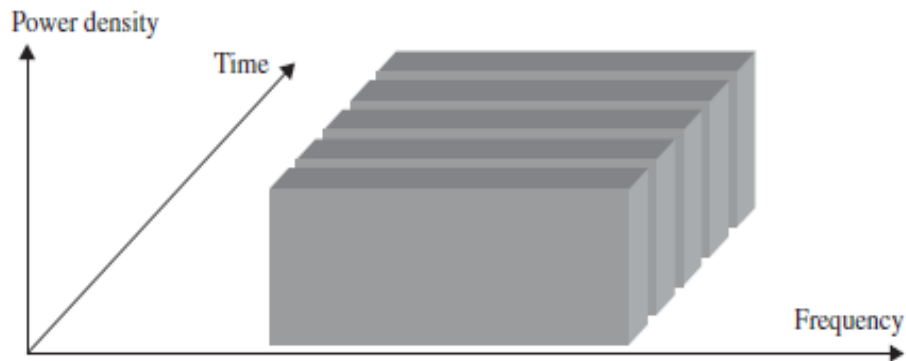


Figure 2.2 : Principe de TDMA (avec cinq intervalles de temps) [17].

### 2.3. CDMA :

L'AMRC connu en anglais sous le nom « Code Division Multiple Access : CDMA » est une technique de transmission dans laquelle une séquence pseudo aléatoire indépendante des données est utilisée pour étaler l'énergie du signal sur une bande de fréquence plus grande que celle des données.

En réception, le signal est désétalé en utilisant une réplique synchronisée de la séquence aléatoire. La présentation traditionnelle du CDMA consiste en la multiplication des symboles de données par séquence pseudo aléatoire comme le montre la Figure 2.3.

L'étalement de spectre a fait son apparition vers les années 1940. En effet, grâce à sa résistance aux interférences, il permet de combattre des brouilleurs. Cependant, aucune information n'a été dévoilée à cette époque à cause de son utilisation en domaine militaire. Le brevet d'invention a été déposé par les deux acteurs de Hollywood « Hedy Lamarr » et « George Antheil » en juin 1941 [18].

Dans une liaison descendante, la station de base émet d'une façon synchrone des données à  $N$  utilisateurs communicants. Chaque symbole de donnée d'un utilisateur  $m$  à l'instant  $lt_s$  est tout d'abord étalé par la séquence d'étalement  $C_m$  de longueur  $N_c$  choisie généralement à partir d'un ensemble de codes orthogonaux. Les symboles escales des différents utilisateurs sont alors additionnés pour permettre une liaison d'un point en multi-point.

Les séquences pseudo-aléatoires utilisées sont généralement périodiques de période [19] :

$$t_s = N_c \times T_c \quad (2.1)$$

Où :  $T_c$  est la période des chips.

Le signal numérique étalé d'un utilisateur  $m$  s'écrit après sa mise en forme comme :

$$d_m(t) = \sum_l \sum_{k=0}^{N_c-1} \sqrt{P_m} a_{l,m} c_m[k] v(t - lt_s - kT_c) \quad (2.2)$$

Où :  $P_m$  est la puissance de l'utilisateur m,  $v(t)$  est la fonction de mise en forme du symbole transmis,  $C_m[k]$  est le  $k^{\text{ème}}$  chip de durée  $T_c$  de la séquence  $C_m$  de l'utilisateur m supposé a énergie normalisée.

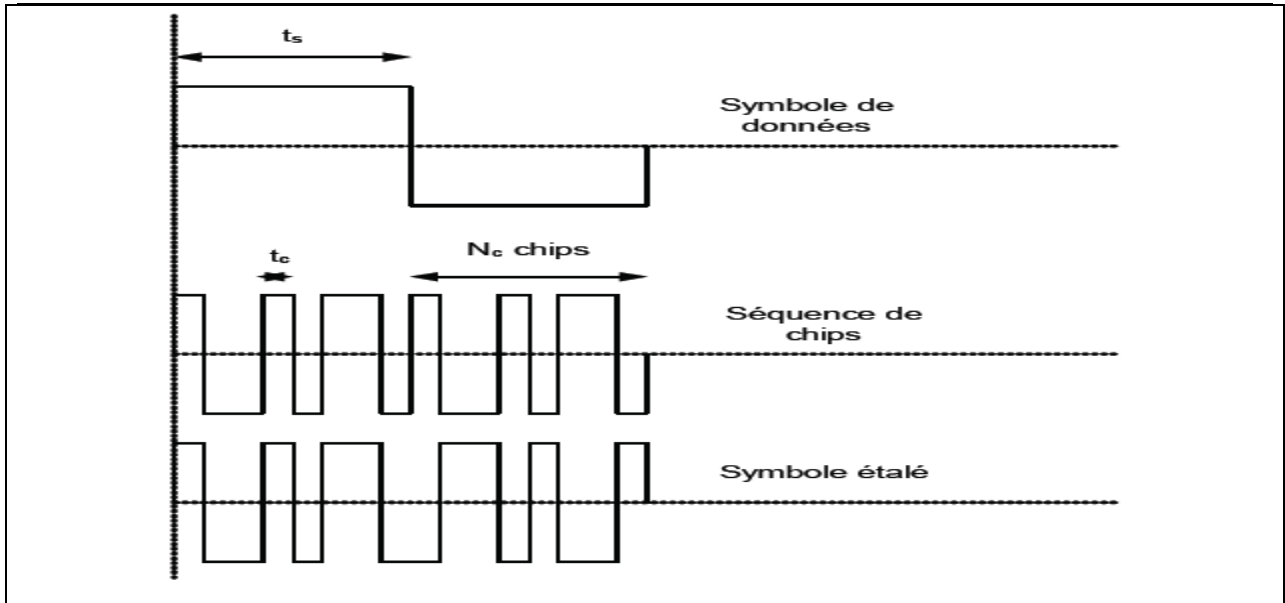


Figure 2.3 : Etalement de spectre par séquence directe (ESSD).

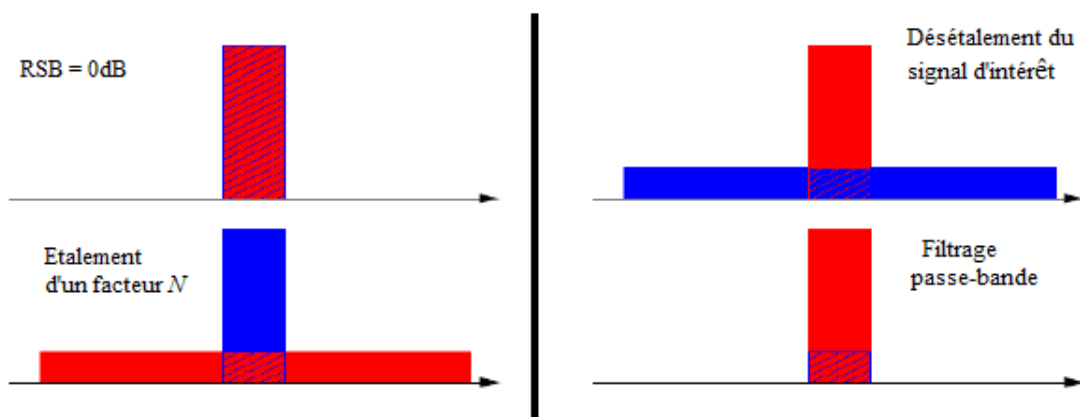


Figure 2.4 : Principe de l'étalement de spectre.

Dans le domaine fréquentiel, la notion d'étalement de spectre est représentée par la figure 2.4 et la figure 2.5. La puissance du signal étalé, émis par étalement de spectre, est la même que celle du

signal non étalé, émis sans étalement de spectre. Toutefois, elle n'est pas répartie sur la même largeur de bande de fréquence. On appelle alors un signal non étalé un signal bande étroite, et un signal étalé, un signal large bande [20].

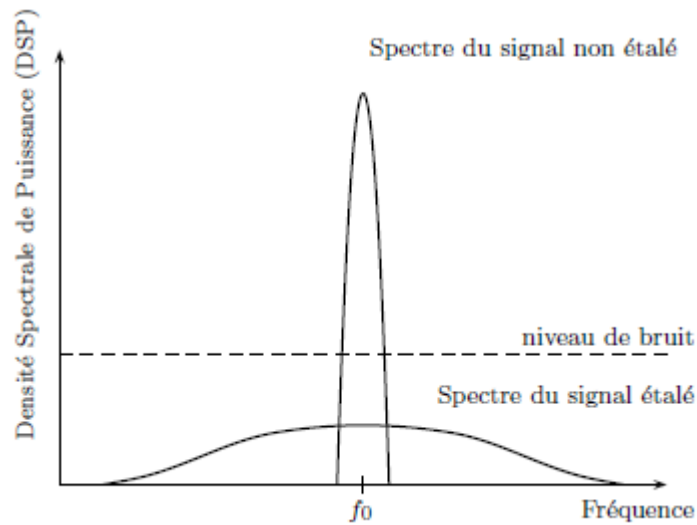


Figure 2.5 : Comparaison signal bande étroite / signal étalé [20].

En réception, le signal est reconstruit en multipliant, dans un synchronisme parfait, le signal reçu par une séquence PN locale identique à celle utilisée à l'émission. La synchronisation de ces deux signaux est plus ou moins délicate suivant la technique utilisée pour le calcul de la corrélation.

Le signal émis à travers le canal de transmission en liaison descendante s'écrit alors comme une superposition des signaux des différents utilisateurs

$$s(t) = \sum_l \sum_{m=0}^{N_u-1} \sum_{k=0}^{N_c-1} \sqrt{P_m} a_{l,m} c_m[k] v(t - lt_s - kT_c) \quad (2.3)$$

En réception, le synoptique simplifié du récepteur élémentaire en CDMA d'un utilisateur  $m$  comprend principalement la fonction de désétalement. Celle-ci consiste à multiplier le signal reçu par le code conjugué synchronisé et d'intégrer ce produit sur une durée symbole pour former la variable de décision nécessaire pour la détection de chaque symbole.

Le filtre adapté est le détecteur le plus simple à mettre en œuvre dans un système AMRC (CDMA). Il consiste à réaliser en réception une opération de désétalement comme si l'utilisateur en question était seul sur le canal. En d'autres termes, il s'agit de considérer le bruit provenant des utilisateurs interférents appelé Bruit d'Accès Multiple (BAM) comme un bruit additif. Après désétalement, le signal est alors échantillonné d'une manière synchrone au temps symbole. En supposant que le signal transmis passe à travers un canal à trajets multiples du type Rayleigh et

qu'il est entaché par un bruit additif gaussien de variance  $\sigma_b^2$ , le symbole à l'entrée de l'unité de décision peut s'écrire [21] :

$$a = \sqrt{P_0} a_{i,0} \sum_{l=0}^{L-1} a_l \gamma_{00} [l t_s - \tau_l] + \sum_{m=0}^{N_u-1} \sqrt{P_m} a_{l,m} \sum_{l=0}^{L-1} a_l \gamma_{0m} [l t_s - \tau_l] + \sum_{l=0}^{N_c-1} \int_0^{T_c} c_0^*[k] \nu(\tau) n(k T_c + \tau_l - \tau) d\tau \quad (2.4)$$

**Signal utile**

**BAM**

**BBAG**

Où  $\gamma_{0m}(\tau) = (\nu^H * c_0^H * c_m^H * \nu)(\tau)$  est la fonction d'intercorrélation entre les codes d'étalement des utilisateurs 0 et m avec les fonctions de mise en forme d'émission et de réception.

Lorsque le nombre d'utilisateurs est important, le temps du BAM peut être assimilé à du bruit additif gaussien. Cependant, si ce terme est négligé, il dégrade la détection ce qui explique les performances médiocres du détecteur adapté. En outre, si la puissance des différents utilisateurs est augmentée et les performances se dégradent. Un système CDMA est alors limité par le BAM. Une détection Multi-Utilisateurs exploitant la connaissance à priori des codes des utilisateurs interférents permet d'améliorer très sensiblement les performances. On se limitera à donner la référence pour plus de détails sur les types de récepteurs en CDMA.

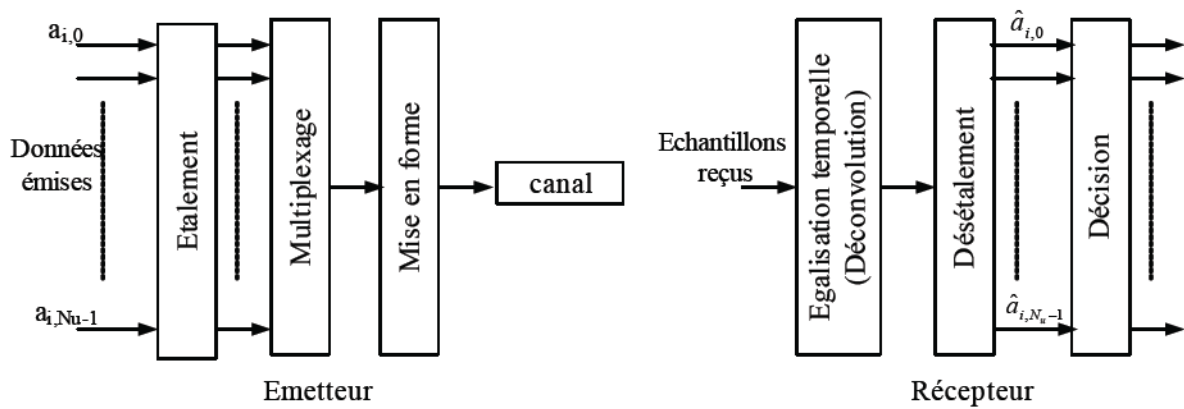


Figure 2.6 : Schéma synoptique des modulations CDMA

D'une manière générale, le signal reçu d'une communication de type DS-CDMA en bande de base peut être modélisé par :

$$r(t) = s(t) + n(t) \quad (2.5)$$

$$S(t) = \sum_{k=1}^K A_k \sum_{i=-M}^M b_k(i) S_k(t - iT_S - \tau_k) * h_k(t) \quad (2.6)$$

Avec :

$$S_k(t) = \frac{1}{\sqrt{Q}} \sum_{j=0}^{Q-1} a_{jk} \varphi(t - jT_c)$$

Dans le cas de la modulation BPSK les symboles  $b_k(i) = \pm 1$ , ils sont modélisés comme la réalisation d'une variable aléatoire binaire équiprobable.

$$r(t) = \sum_{k=1}^K A_k \sum_{i=-M}^M b_k(i) S_k(t - iT_s) * h(t) + n(t) \quad (2.7) \quad \text{Où}$$

le canal  $h(t)$  est en général à coefficients complexes. Dans le cas d'un canal idéal on a  $h(t) = \delta(t)$ , on parle dans ce cas d'un canal BBAG (Bruit Blanc Additif Gaussien) ou d'un canal simple-trajet en référence au canal multi-trajets, l'équation (3.3) se simplifie à :

$$r(t) = \sum_{k=1}^K A_k \sum_{i=-M}^M b_k(i) S_k(t - iT_s) + n(t) \quad (2.8)$$

Dans ce cas, il est plus approprié de considérer un bruit  $n(t)$  réel. Le modèle (2.9) sera adopté pour le cas d'un canal idéal, tandis que ce lui dans (2.8) sera utilisé pour le cas d'un canal multi-trajet.

### 2.3.1 Modèle dans le cas d'un canal simple trajet :

Pour l'étude d'un système synchrone, reprenons l'équation précédente du modèle en bande de base [23] :

$$r(t) = \sum_{k=1}^K A_k \sum_{i=-M}^M b_k(i) S_k(t - iT_s) + n(t) \quad (2.9)$$

Où  $n(t)$  est un bruit (réel) gaussien, blanc, centré de variance  $\sigma_n^2$  et indépendant du signal transmis et  $\{b_k(i), i = 0, \pm 1, \dots, \pm M\}$  représente la séquence de symboles transmis par l'utilisateur K. Les symboles  $b(i) = \{-1, +1\}$  sont supposés indépendants et équiprobables. La forme d'onde pour l'utilisateur K s'écrit sous la forme :

$$S_k(t) = \frac{1}{\sqrt{Q}} \sum_{j=0}^{Q-1} a_{jk} \varphi(t - jT_c) \quad (2.10)$$

Où  $(a_{0k}, a_{1k}, \dots, a_{Q-1k})$  est une séquence de  $\pm 1$  représentant le code associé à cet utilisateur et  $\varphi(t)$  est l'impulsion de mise en forme (demi-Nyquist) normalisée, caractérisée par le temps-chip  $T_c$  avec  $QT_c = Ts$ . Le reste des paramètres figurants dans (2.10) et (2.11) sont définis comme au (2.8).

En vertu du critère de Nyquist, l'utilisation d'une impulsion de mise en forme de type cosinus-sur-élevé assure l'absence d'Interférence entre chips et donc Entre Symboles (IES). Ainsi, les

signaux dus aux symboles  $\{b_k(i), i = 0, \pm 1, \dots, \pm M\}$  peuvent être traités indépendamment les uns des autres. Après l'omission de l'indice  $i$  pour ne pas alourdir les notations, l'équation (3.5) s'écrit :

$$r(t) = \sum_{k=1}^K A_k b_k S_k(t) + n(t). \quad (2.11)$$

La version discrète de cette équation est obtenue par application du filtre adapté à l'impulsion de mise en forme suivie d'un échantillonnage au rythme chip  $T_c$  :

$$r = \sum_{k=1}^K A_k b_k S_k(t) + n \quad (2.12)$$

Avec  $S_k = \frac{1}{\sqrt{Q}} [a_{0k}, a_{1k}, \dots, a_{Q-1k}]$ ,

Le code normalisé, associé à l'utilisateur  $K$  n'est qu'un vecteur de bruit gaussien, centré de matrice de covariance  $\sigma_n^2 I_Q$ . L'équation (3.8) s'écrit sous forme matricielle :

$$r = SAb + n \quad (2.13)$$

Avec :  $S = [s_1, s_2, \dots, s_k]$  ,  $A = \text{diag}(A_1, A_2, \dots, A_k)$  et  $b = [b_1, b_2, \dots, b_k]^T$ .

### 2.3.2. Modèle dans le cas d'un canal multi-trajets :

Dans le cas d'un système DS-CDMA asynchrone le signal reçu peut être modélisé comme suit :

$$r(t) = \sum_{k=1}^K A_k \sum_{i=-M}^M b_k(i) S_k(t - iT_s) * h(t) + n(t) \quad (2.14)$$

Où  $h(t) = \sum_{l=1}^L h_l \cdot \delta(t - (l-1)T_c)$  (2.5)

Le canal  $h(t)$  est supposé déterministe et comportant  $L$  trajets, les  $h_l$  sont les coefficients complexes du gain du canal. Les trajets sont supposés se produire à des instants correspondants à des multiples du temps chip  $T_c$  (hypothèse couramment utilisée dans la littérature spécialisée). Les autres quantités figurants à l'équation (2.15) ont la même signification pour (2.8) et (2.12), par contre le bruit  $n(t)$  est supposé dans ce cas être gaussien complexe circulaire, blanc, centré de variance  $\sigma_n^2$  et indépendant de  $\{b_k(i), i = 0, \pm 1, \dots, \pm M\}$ .

En utilisant un canal peu dispersif ( $L=Q$ ), toute forme d'IES introduite par le canal peut être négligée. Ainsi les signaux dus aux symboles  $\{b_k(i), i = 0, \pm 1, \dots, \pm M\}$  peuvent être traités

indépendamment (tout se passe comme si le critère de Nyquist était vérifié). Donc, en s'intéressant à un symbole par utilisateur et après omission de l'indice  $i$ , l'équation (2.15) devient :

$$r(t) = \sum_{k=1}^K A_k b_k S_k(t) * h(t) + n(t) \quad (2.16)$$

En considérant (2.12) et (2.13), elle devient :

$$r(t) = \sum_{k=1}^K A_k b_k \sum_{l=1}^L h_l S_k(t - (l-1)T_c) + n(t) \quad (2.17)$$

#### 2.4. Les codes d'étalement :

Le choix du code est critique : il doit disposer de propriétés spécifiques pour isoler une séquence parmi plusieurs. Il doit donc posséder de bonnes propriétés d'autocorrélation et une intercorrélacion idéalement nulle. L'orthogonalité du code permet également d'améliorer ces propriétés.

Le code est un ensemble de séquences (les mots du code) dont la longueur  $L_c$  influe sur les performances. Toute séquence du code est donc composée de  $L_c$  éléments appelés chips. La séquence de code attribuée au  $j$  utilisateur est notée  $c_j = [c_0^j \dots c_{L_c}^j - 1]^t$  et on définit la matrice de codage multiutilisateurs  $C = [c^1 \dots c^{N_u}]$ , avec  $N_u$  le nombre maximal d'utilisateurs admissible par le système.

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 [23].

$$R_c(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} C(t)C(t-\tau)dt = 0 \text{ Pour } \tau \neq 0 \quad (2.18)$$

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 inters corrélés [23].

$$R_{C_i C_j}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} C_i(t) C_j(t-\tau)dt = 0 \quad (2.19)$$

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

Enfin, pour permettre la synchronisation, elles doivent posséder un pic d'autocorrélation le plus étroit possible.



$$R_c(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} c(t)c(t)dt = 1 \quad (2.20)$$

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.

La littérature met à disposition une grande variété de familles de codes d'étalement ayant de bonnes propriétés d'intercorrélacion et d'autocorrélacion. Dans le cas de communications synchrones, c'est-à-dire lorsque l'ensemble des séquences d'étalement sont émises en même temps, les performances optimales peuvent être obtenues par l'utilisation de codes orthogonaux, tels que les codes de type OVSF (Orthogonal Variable Spreading Factor), les codes de Walsh-Hadamard, ou encore les séquences complémentaires de Golay. Pour des communications asynchrones, on a recours à l'utilisation de séquences non orthogonales présentant un bon compromis entre de bonnes propriétés d'autocorrélacion et d'intercorrélacion. On peut notamment citer les codes de Gold et Kasami [24].

## 2.5. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons abordé la technique d'accès multiple CDMA et son principe de fonctionnement d'une façon générale tout en détaillant son modèle dans un canal à simple trajet et à trajet multiple. Comme les codes sont des éléments fondamentaux dans n'importe quel système CDMA, nous avons présenté aussi dans ce chapitre leurs caractéristiques ainsi que leurs différentes propriétés.

## CHAPITRE

## 3



État de l'art sur les systèmes  
MIMO - CDMA

**3.1. Introduction :**

Pour répondre à la demande toujours croissante d'accès au réseau sans fil, les systèmes de communication sans fil sont devenues des technologies prometteuses pour fournir un service à haut débit avec un large spectre, et une faible consommation d'énergie [25]. À cette fin, plusieurs méthodes ont été proposées ces dernières années pour résoudre le problème de pénurie de spectre et augmenter à la fois la capacité du canal et l'utilisation spectrale. Les systèmes MIMO (Multiple-Input Multiple-Output), ont été développés par les laboratoires **Bell** en 1997, ont apporté une solution à ce problème [26].

**3.2. Présentation général sur le système MIMO :**

Les systèmes MIMO , qui reposent sur la transmission et la réception intelligentes de signaux sur plusieurs antennes, pour la transmission et la réception du signal, devrait jouer un rôle clé dans l'amélioration des performances des futurs systèmes de communication sans fil. Ça a été montré que si le signal passant entre les paires de transmission et les éléments d'antenne de réception sont indépendants et identiques distribués, la capacité des systèmes MIMO peut augmenter linéairement avec le nombre d'antennes (Figure 3.1) [27].

Ils ont été développés pour augmenter le débit (débit binaire) et la fiabilité des communications sur les canaux à évanouissement grâce au multiplexage spatial et au codage spatio-temporel (STC) à la transmission, sans avoir besoin d'augmenter la bande passante du récepteur [28].

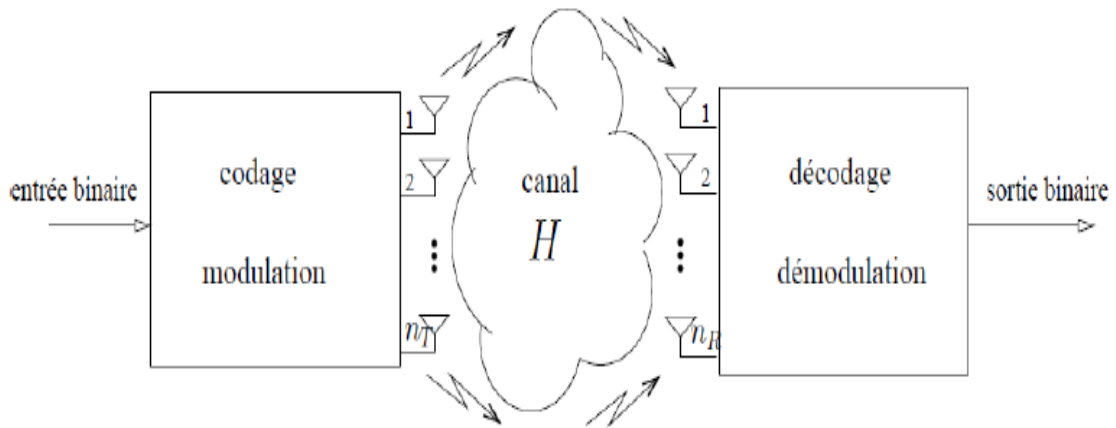


Figure 3.1 : Schéma d'un système de transmission sans fil MIMO [29].

L'équation peut être écrite sous forme de matrice comme suit :

$$y = Hx + n \quad (2.1)$$

Soit la matrice du canal MIMO  $\mathbf{H}$  de dimension  $N_R * N_t$ , suivante :

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1NT} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{NR1} & \cdots & h_{NRNT} \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

Où :  $y$  et  $n$  sont les vecteurs de réception et de bruit de dimension  $N_R * 1$  respectivement.

Les avantages des systèmes MIMO vont cependant bien au-delà de ceux des antennes intelligentes. Le fait de placer des antennes des deux côtés de la liaison crée une matrice de canal et donne la possibilité de transmettre de l'information par plusieurs modes spatiaux de cette matrice sur le même créneau spatiotemporel et sans puissance supplémentaire. L'autre avantage des systèmes MIMO est leurs grandes capacités qui sont dues principalement à l'exploitation des trajets multiples. Tout d'abord, ils permettent au détecteur de différencier les différentes antennes d'émission, et donc d'émettre plusieurs symboles simultanément. Ensuite, chaque trajet est une réplique du signal émis, et est donc porteur d'information utile.

Nous pouvons aussi dire que chaque trajet est l'équivalent du signal direct émis par une antenne virtuelle, ce qui augmente virtuellement le nombre d'antennes émettrices [30].

### 3.3. Principe MIMO :

Le principe de la technologie MIMO consiste à émettre dans un même canal des signaux transmis sur des antennes différentes. A la réception aussi et avec un certain nombre d'antennes et

des traitements adéquats, il s'agit de simuler cette réception dans une même bande de canaux différents comme le représente la figure 3.2 [31].

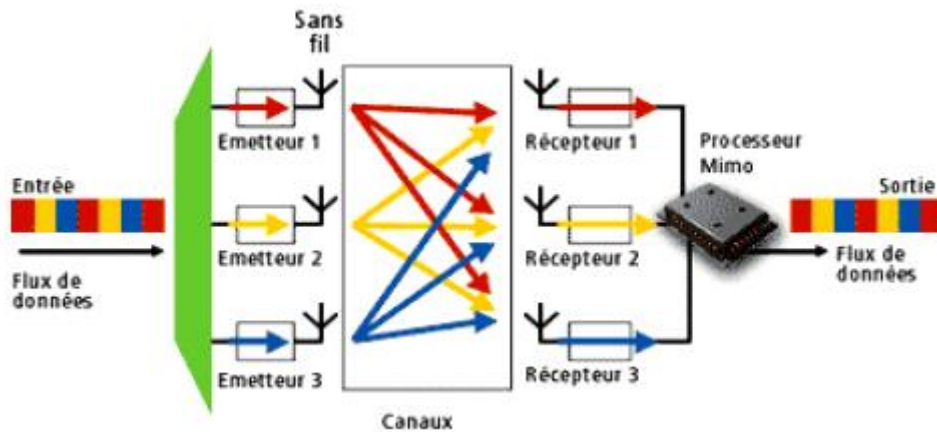


Figure 3.2 : principe de la technique MIMO.

### 3.4. Architecture MIMO :

Il existe de nombreux formats de MIMO pouvant être utilisés à partir de SISO, via SIMO et MISO aux systèmes MIMO complets. Ils sont tous en mesure d'apporter des améliorations performances, mais généralement au prix de traitement et le nombre d'antennes utilisées [32].

#### a) SISO :

Systèmes SISO ou entrée unique, sortie unique est la forme la plus simple de système de communication sur les quatre dans lequel il est une seule antenne d'émission et antenne de réception unique à destination (figure 3.3). Ils sont utilisés dans plusieurs systèmes comme Bluetooth, Wi-Fi, radiodiffusion, télévision, etc [33].

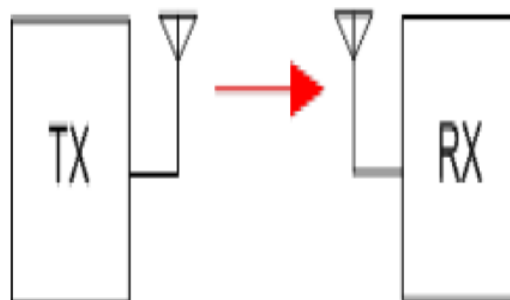


Figure 3.3 : Système de communication SISO [34].

**b) SIMO :**

SIMO ou la forme Entrée unique et sortie multiple est l'utilisation de plusieurs antennes est présentes sur le récepteur et il y a une antenne d'émission unique à la source (figure 3.4) [33].

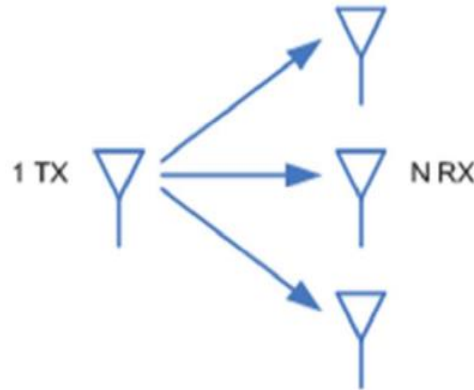


Figure 3.4 : Système de communication SIMO [34].

**c) MISO :**

MISO ou l'entrée multiple et la sortie unique est l'utilisation de plusieurs antennes d'émission au Source et une antenne de réception unique sur le système comme SIMO mais à destination, le récepteur n'a qu'une seule antenne (figure 3.5) [33].

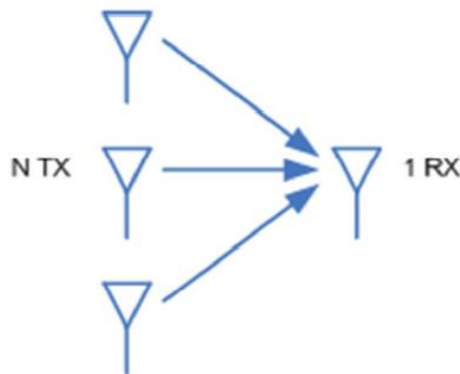


Figure 3.5 : Système de communication MISO [34].

**d) MIMO :**

L'utilisation de plusieurs antennes au niveau de l'émetteur et récepteur pour améliorer les performances de communication (figure 3.6) [35].

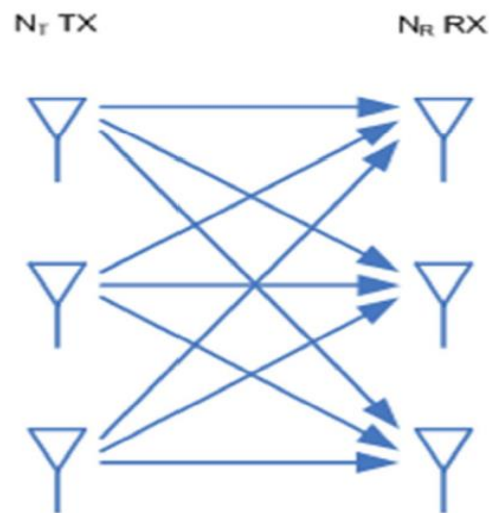


Figure 3.6 : Système de communication MIMO [34].

### 3.5. Technique de diversité pour les transmissions multi-porteuses :

#### a) Principe de diversité :

La diversité est utilisée dans les systèmes de transmission pour combattre l'évanouissement à petite échelle causé par les trajets multiples. Le principe de cette technique consiste à fournir aux récepteurs une version multiple du même signal transmis de façon à moyenner l'impact des évanouissements. Chacune des versions est définie comme une branche diversité. Si ces versions sont effectuées par des conditions d'évanouissements indépendantes, la probabilité que toutes les branches soient en même temps réduites de façon spectaculaire par conséquent, la diversité aide à stabiliser le durcissement du canal de la pensée de liaison, ce qui conduit à une amélioration de la perfection en termes de taux d'erreur [31].

Les trois formes de diversité traditionnellement exploitées en communications numériques sont : la diversité temporelle, la diversité fréquentielle et la diversité spatiale.

#### b) Diversité temporelle :

La diversité temporelle est utilisée pour combattre l'évanouissement sélectif en temps. Elle consiste à envoyer plusieurs fois le même signal ou des répliques du signal à des intervalles de temps supérieurs ou égaux au temps de cohérence  $T_c$  du canal. Elle est utilisée conjointement avec un code correcteur d'erreur. Le principal inconvénient de ce procédé est le retard induit par la diversité [36].

### c) Diversité fréquentielle :

La diversité fréquentielle est surtout efficace pour un canal sélectif en fréquence. Elle consiste à transmettre le même signal (ou ses versions redondantes) sur plusieurs fréquences porteuses dont l'écartement fréquentiel est d'au moins égal à la bande de cohérence du canal  $B_c$ . La diversité fréquentielle peut être exploitée par l'utilisation d'une modulation multi-porteuse [37].

### d) Diversité spatiale :

Est l'une des techniques les plus simple à réaliser, un signal porteur d'informations est transmis ou reçu via différentes antennes où le gain maximum peut être atteint lorsque l'évanouissement survenant dans le canal est indépendant (ou faiblement corrélé). Dans le récepteur, le gain de diversité peut être obtenu en combiner les signaux redondants arrivant via indépendant (ou faiblement corrélé) canaux [38].

La figure 3.7 montre quelques combinaisons possibles de transmettre la diversité qui peut être atteint lors de l'utilisation de plusieurs antennes d'émission.

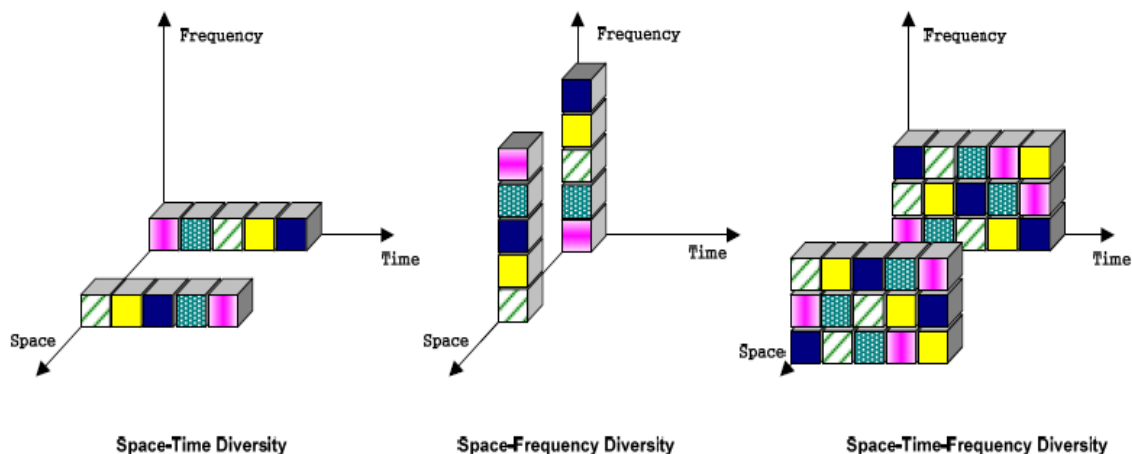


Figure 3.7 : Transmettre la diversité [38].

### 3.6. Présentation du système MC- CDMA :

La demande de services de communication sans fil a connu une croissance rapide dans le passé. La tendance est devrait se poursuivre à l'avenir en raison de la introduction de nouveaux services, comme la vidéo en direct transmission, jeux mobiles et divers services basés. Les services en développement nécessitent des débits de données plus élevés de systèmes de communication sans fil. Cependant, de nouveaux les bandes de fréquences radio sont très rares si disponibles du tout.

Ainsi, la future communication sans fil les systèmes doivent fournir des rendements de bande passante plus élevés [38].

### 3.7. Description du système MC-CDMA :

L'accès multiple par répartition en code multiporteuse (MC-CDMA) combine la technique de transmission multiporteuse connue sous le nom de multiplexage par répartition en fréquence orthogonale (OFDM) avec l'accès multiple par répartition en code (CDMA). Le premier a été populaire dans la diffusion audio et vidéo numérique, et plus récemment dans les réseaux locaux sans fil (LAN sans fil), ainsi que dans l'accès sans fil fixe à large bande. Le second est particulièrement populaire dans les systèmes cellulaires mobiles. OFDM et CDMA ont tous deux des caractéristiques intéressantes, et MC-CDMA tente de les combiner [37].

MC-CDMA a attiré l'attention en tant que technique de transmission puissante. C'est particulièrement attractif pour les communications sans fil à large bande en liaison descendante, car l'orthogonalité de l'utilisateur peut être plus facilement fournie dans une liaison descendante synchrone que dans une liaison montante pour maintenir le niveau d'interférence d'accès multiple (MAI) modéré. Contrairement aux systèmes CDMA à séquence directe simple porteuse conventionnels (DS – CDMA), l'énergie du signal reçu peut être collectée dans le domaine fréquentiel dans les systèmes MC – CDMA avec une complexité modérée même lorsque la largeur de bande du signal est grande [39].

### 3.8. Concept de fonctionnement :

Dans un système multiporteuse, il existe évidemment différentes manières d'utiliser CDMA. Étant donné que la transmission multi-porteuse donne la dimension de fréquence en plus de la dimension de temps (qui est la seule dimension disponible dans les systèmes à porteuse unique), la transmission des puces correspondant à un symbole donné peut être effectuée en utilisant à la fois dimensions. Dans la première littérature, le MC-CDMA a été utilisé pour décrire la variante dans laquelle l'étalement est effectué uniquement dans le domaine fréquentiel [40].

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



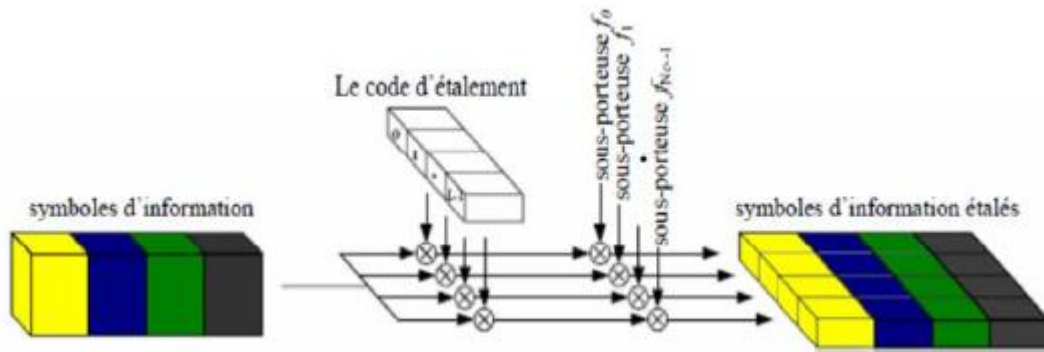


Figure 3.8 : Génération d'un signal MC-CDMA pour un utilisateur [41].

Comme la figure 3.8 le montre, 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 [41] :

$$S_i^j(t) = \sum_{k=0}^{N-1} b_i^j c_k^j e^{2\pi(f_0 + kf_d)t} P(t - iT) \quad (2.3)$$

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 :

$$p(t) = \begin{cases} 1 & \text{pour } 0 \leq t \leq T \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (2.4)$$

#### a) Emetteur :

MC-CDMA transmet simultanément un symbole de données d'un utilisateur sur plusieurs bandes étroites sous-canaux. Ces sous-canaux sont multipliés par les puces du code d'étalement spécifique à l'utilisateur, comme illustré sur la figure 3.9. La modulation multi-porteuse est réalisée en utilisant le fonctionnement OFDM à faible complexité. Etant donné que l'évanouissement sur les sous-canaux à bande étroite peut être considéré comme plat, une égalisation simple avec une

multiplication à valeurs complexes par sous-canal peut être réalisée. MC-CDMA offre une conception de système flexible, depuis l'épandage la longueur de code n'a pas à être choisie égale au nombre de sous-porteuses, permettant des complexités de récepteur réglables [41].

Dans le cas où  $f_d = 1/T$ , le signal transmis peut être généré par l'utilisation de l'IFFT, comme dans le cas des systèmes OFDM. La structure globale du transmetteur peut être implantée par la concaténation de l'étalement DS-SS et la modulation OFDM comme le montre la figure 3.9.

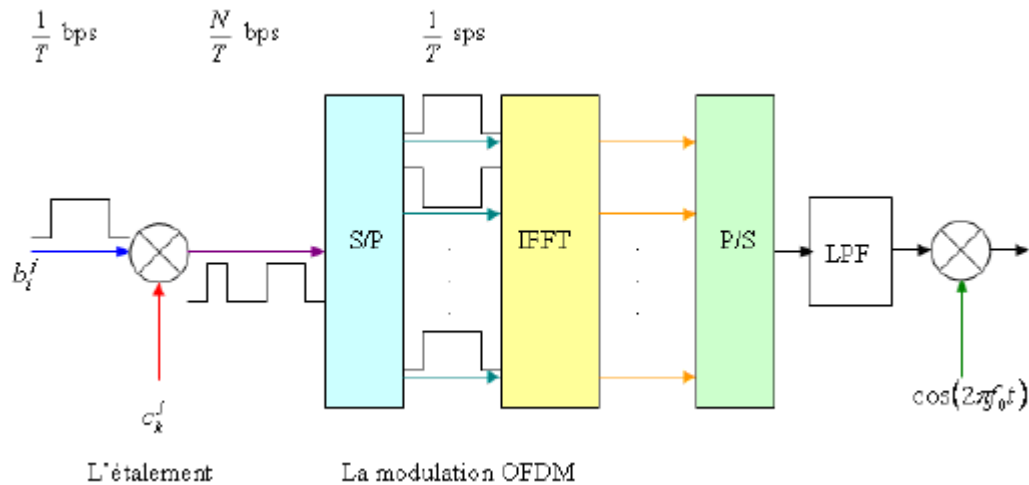


Figure 3.9 : Schéma du transmetteur MC-CDMA [41].

Dans la figure 3.9, on génère  $N$  copies du même symbole d'entrée  $b$  de l'utilisateur  $j$ , chaque copie  $b_{ik}$ , est multiplié 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. 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 spectre fréquentiel du signal émis est un spectre OFDM avec un espace entre les sous porteuses  $f_d = N/T$ .

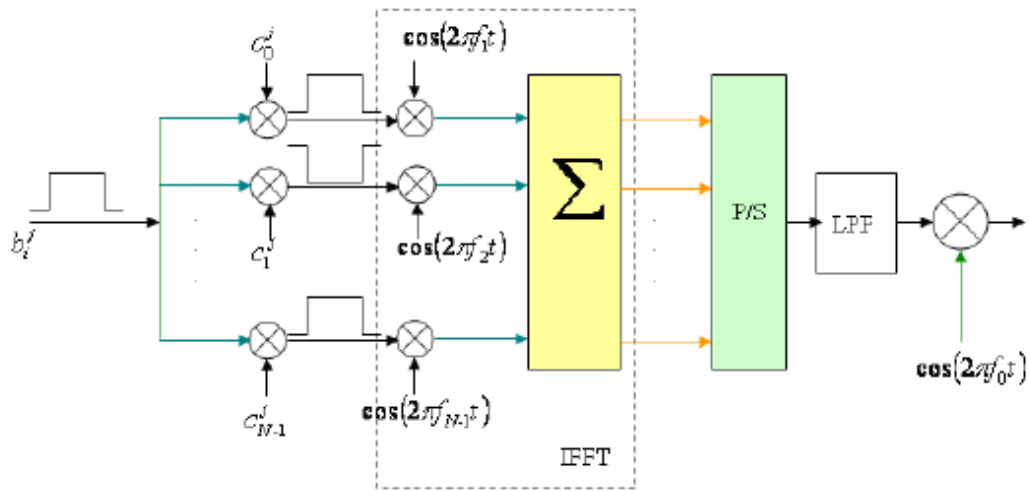


Figure 3.10 : Autre schéma du transmetteur MC-CDMA [41].

**b) Récepteur :**

Au niveau du récepteur montré dans la figure 3.11, pour chaque porteuse, le signal correspondant au chip  $c_k$  est récupéré à l'aide du bloc «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  $b_i$ .

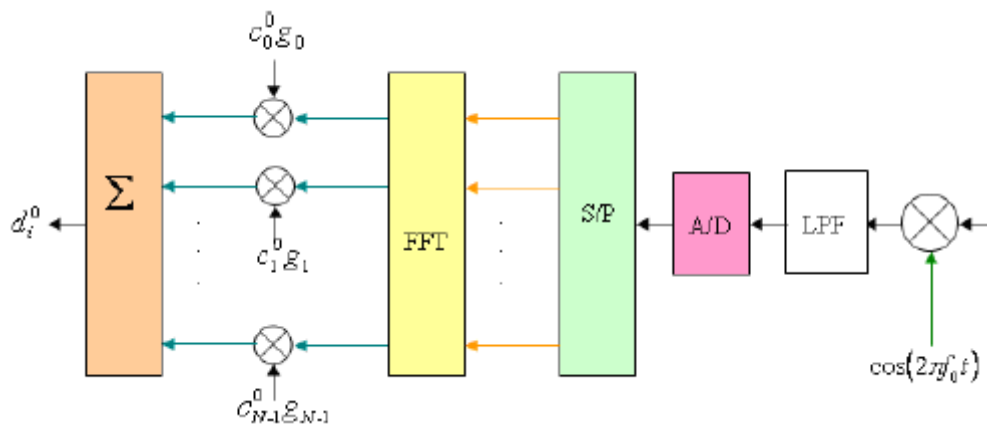


Figure 3.11 : Schéma du récepteur MC-CDMA [41].

Le signal du  $i^{\text{ème}}$  symbole reçu au niveau du récepteur pour la sous porteuse numéros  $k$  est sous la forme [41] :

$$r_{k,i} = \sum_{j=0}^{J-1} H_k b_i^j c_k^j + n_{k,j} \quad (2.5)$$

- $J$  : le nombre des utilisateurs.
- $H_k$  : la réponse fréquentiel du canal pour la  $k$  ème sous-porteuse.
- $k i n_{k,j}$  : les échantillons du bruit.

Pour l'utilisateur numéro '0', le récepteur MC-CDMA multiplie le signal  $r_{k,i}$  de l'équation (2.5) 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  $k$  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 :

$$d_i^0 = \sum_{k=0}^{N-1} c_k^0 g_k r_{k,i} \quad (2.6)$$

Généralement, la longueur du code d'étalement est choisie égale au nombre de sous porteuses, mais des variantes sont possibles pour mieux adapter le signal au canal.

### 3.9. Fonctionnement de la MC-DS-CDMA :

MC-DS-CDMA série-parallèle convertit les symboles de données à haut débit en sous-flux parallèles à faible débit avant d'étaler les symboles de données sur chaque sous-canal avec un code d'étalement dans le sens du temps, ce qui correspond à un étalement séquentiel direct sur chaque sous-canal. Les mêmes codes d'épandage peuvent être appliqués sur les différents sous-canaux.

Le principe de MC-DS-CDMA est illustré dans la Figure 3.12. Dans la première étape, les  $M$  bits successifs de l'utilisateur  $j$ ,  $b_i^j, i = 0, 1, \dots, M-1$  seront convertis série/parallèle. Ensuite chaque bit  $b_i^j$  est étalé par la séquence du code d'étalement du  $j$  ème utilisateur dans le domaine temporel. Les autres opérations sont identiques au cas d'un émetteur MC-CDMA [41].

Pour cette technique on transmet plusieurs signaux DS-CDMA en parallèle avec la structure OFDM, la figure 3.12, montre le principe de fonctionnement d'un émetteur MC-DS- CDMA

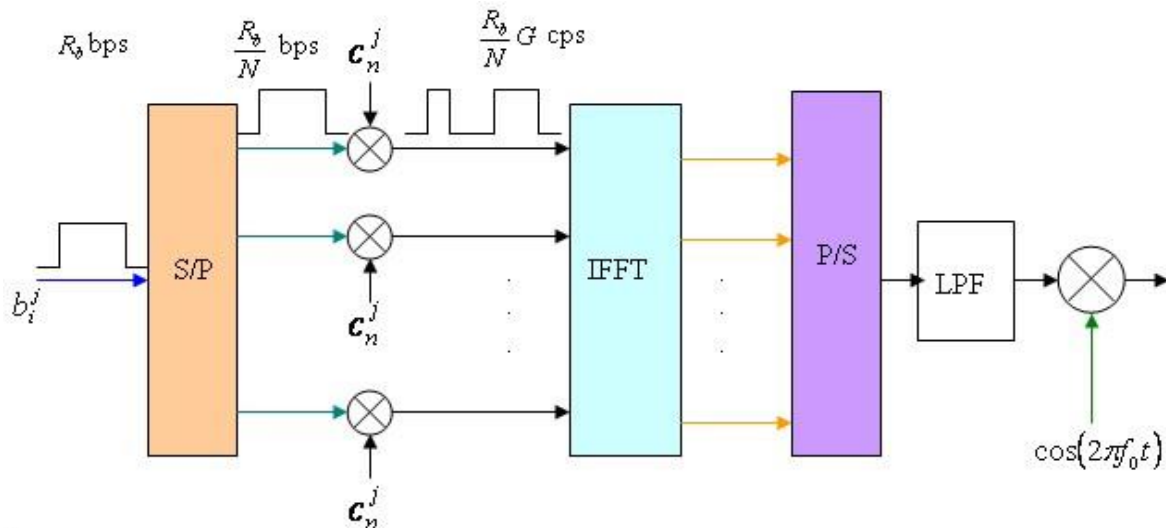


Figure 3.12 : Schéma du récepteur MC-DS-CDMA [41].

Dans ce cas, les bits  $b_i^j$  arrivant avec un débit égal  $R_b$ . Ce débit est réduit à  $R_b/N$  à la fin de la conversion S/P avec  $N$  est le nombre de sous porteuses. Ensuite, on obtient un débit  $R_b G/N$  à cause de l'étalement, où  $G$  est le facteur d'étalement. Le spectre de fréquence à la sortie de l'émetteur est un spectre OFDM, où l'espace entre deux fréquences adjacentes est :

$$f_d = \frac{R_b}{N} G \quad (2.7)$$

Le récepteur MC-DS-CDMA comprend un démodulateur OFDM et un corrélateur sur chaque porteuse. Une fraction de chaque symbole est transmise donc sur une seule des sous-porteuses. Du fait de l'allongement du temps symbole sur chaque sous-porteuse, la durée d'un chip est moins courte qu'en DS-CDMA, ce qui facilite la synchronisation des codes.

### 3.10. Avantage :

- La MC-CDMA compris en son gain de diversité fréquentiel.
- Résistante aux évanouissements.
- Efficace pour les services hauts débit en comparant à la DS-CDMA.

### 3.11. Limites :

- Sensible à la fréquence porteuse décalée.
- Sensible au bruit de phase
- Rapport de puissance crête à moyenne élevé.

**3.12. Conclusion :**

Dans ce chapitre, Nous avons étudié les systèmes MIMO, nous avons rappelé les notions de base, le principe et l'architecture de ce système. Ensuite nous avons introduit la technique d'accès MC-CDMA en donnant une généralité et son principe de fonctionnement et les deux différentes familles de ce systèmes d'étalement à porteuses orthogonales.

## CHAPITRE

## 4

*Résultats de simulations et discussions***4.1. Introduction :**

Après avoir présenté une étude théorique du CDMA, MIMO et MC-CDMA dans le deuxième et le troisième chapitre successivement, nous passons maintenant à la partie simulation, en utilisant le langage de programmation « Matlab », afin de pouvoir visualiser les performances de chaque technique de multiplexage en termes de performances de transmission.

Dans la théorie de l'information, la fiabilité d'un système de transmission numérique est souvent évaluée par son aptitude à résister aux perturbations, ce qui signifie l'assurance d'un BER le plus faible possible, et la transmission du maximum d'information utile au moyen d'un canal très bruité.

**4.2. Résultats de simulations :****4.2.1 Première partie : « CDMA » :**

Dans cette partie de simulation, on va étudier la qualité de transmission dans un système CDMA. Nous avons travaillé sur le programme MATLAB du système CDMA

Pour atteindre notre objectif souhaité, nous avons divisé la première partie de la simulation en deux cas, dans chaque cas, nous avons mis en évidence un paramètre spécifique qui est variable pour étudier son effet et son importance sur le système CDMA, et nous concentrant sur le taux d'erreur sur les bits (BER) en fonction de SNR. Ces variables sont :

- La longueur du code d'étalement dans le système.
- Type de codage utilisé dans le système.

### a) Effet de la longueur du code d'étalement sur la transmission dans le système CDMA :

Dans ce premier cas de simulation, on va examiner l'effet de la longueur du code d'étalement sur la transmission du signal dans un système CDMA en comparant la variation de BER de ces longueurs de code en fonction de SNR. Notre simulation est faite avec deux usagers sur le canal.

La figure ci-dessous représente les trois cas simulés :  $N=4$ ,  $N=8$  et  $N=16$ . En analysant la figure, on remarque que si on augmente la longueur du code  $N$ , le BER diminue. Donc on constate clairement que  $N=16$  donne de meilleures performances au niveau de qualité de signal transmis.

On conclut alors que la longueur du code  $N$  a une relation directe avec le BER.

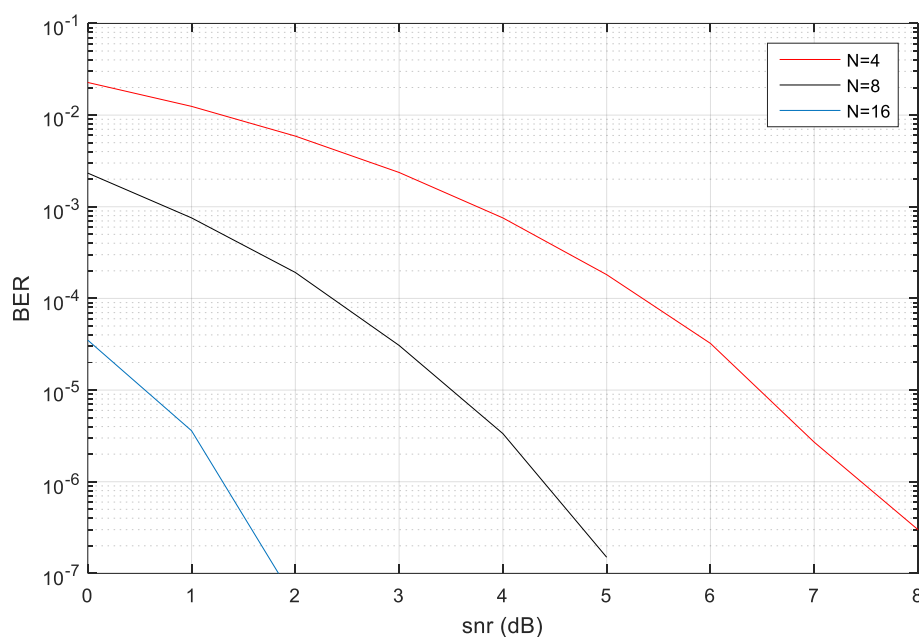


Figure 4.1 : Effet de la longueur du code sur le BER en une transmission en système CDMA.

### b) Influence de types de codage sur le BER en fonction de SNR :

Dans ce deuxième cas de simulation, on fixe la longueur de codage à  $N=4$  et on utilise deux usagers sur le canal.

On remarque une grande différence de BER entre le codage PN et le codage de Walsh et OVVSF où le BER du codage Walsh et OVVSF sont identiques et superposés l'un sur l'autre, au-delà de 3.5dB où on peut voir une petite variation de BER entre ces deux derniers codes, et à 4dB la différence est remarquable, une diminution de BER de codage OVVSF par rapport au BER de codage de Walsh.

On constate alors le codage OVVSF donne de meilleures performances au niveau de transmissions par rapport au codage PN et codage de Walsh.



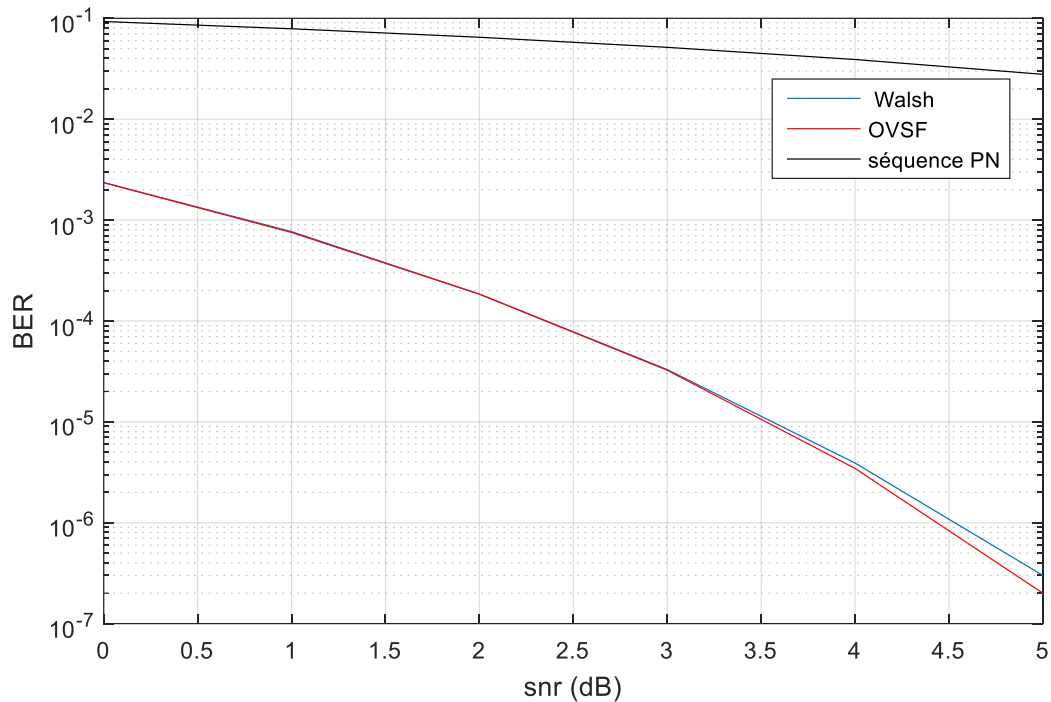


Figure 4.2 : Influence de types de codage sur le BER en fonction de SNR.

#### 4.2.2. Deuxième partie : « MC CDMA » :

Dans cette partie de simulation, on va étudier la qualité de transmission dans un système MC-CDMA dans un canal de Rayleigh à l'aide du programme MATLAB. Nous allons analyser les 03 cas suivants :

##### a) Comparaison entre le BER théorique et le BER simulé :

La figure ci-dessous représente une comparaison entre le BER théorique et le BER simulé d'une transmission MC-CDMA dans un canal de Rayleigh.

On fait la simulation de deux usagers dans le canal, et on divise le canal en 4 sous canaux et on fait notre étude de la variation de BER en fonction de SNR du signal transmis.

D'après la figure 4.3, on remarque que les deux courbes de BER théorique et de BER simulé sont superposées. Ce qui valide notre résultat de simulation.

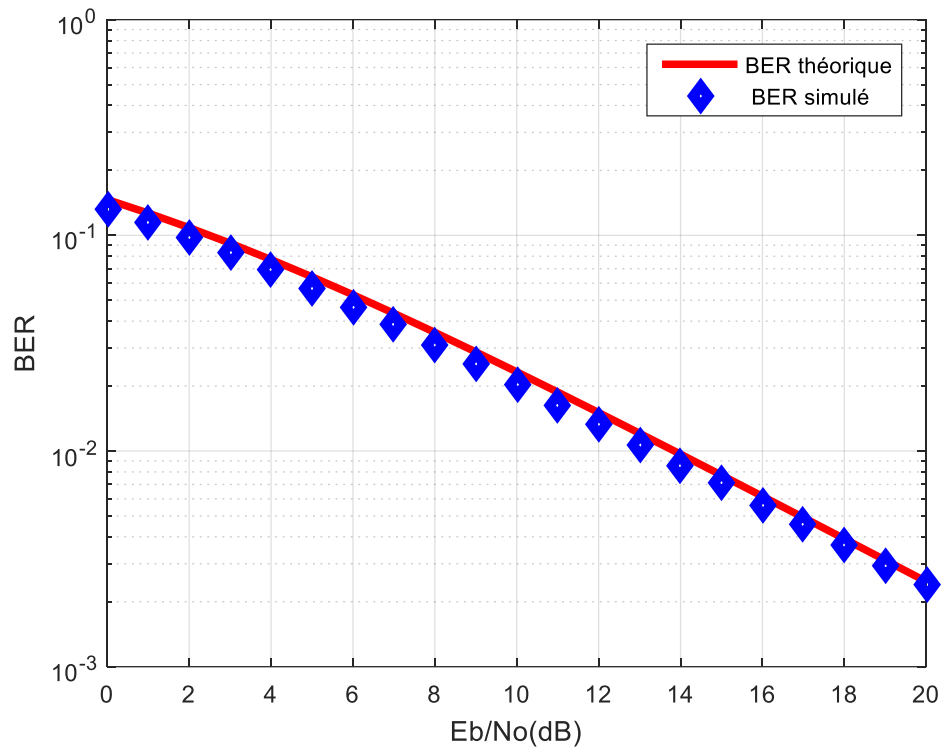


Figure 4.3 : Comparaison entre BER simulé et BER théorique d'une transmission MC-CDMA dans un canal de Rayleigh.

#### b) Capacité de canal de Rayleigh dans la transmission MC-CDMA :

Pour montrer la capacité de canal de Rayleigh dans une transmission MC-CDMA, on fixe le nombre de contraintes en  $N=8$ , et on fait varier le nombre d'utilisateurs  $U$  en 2, 4 et 8 utilisateurs respectivement. La figure 4.4 illustre les résultats de simulation.

En termes de probabilités d'erreurs, on observe que la transmission est inversement proportionnelle avec le nombre d'utilisateurs : chaque fois le nombre d'utilisateurs est augmenté, le BER décroît et la qualité de transmission est meilleure.

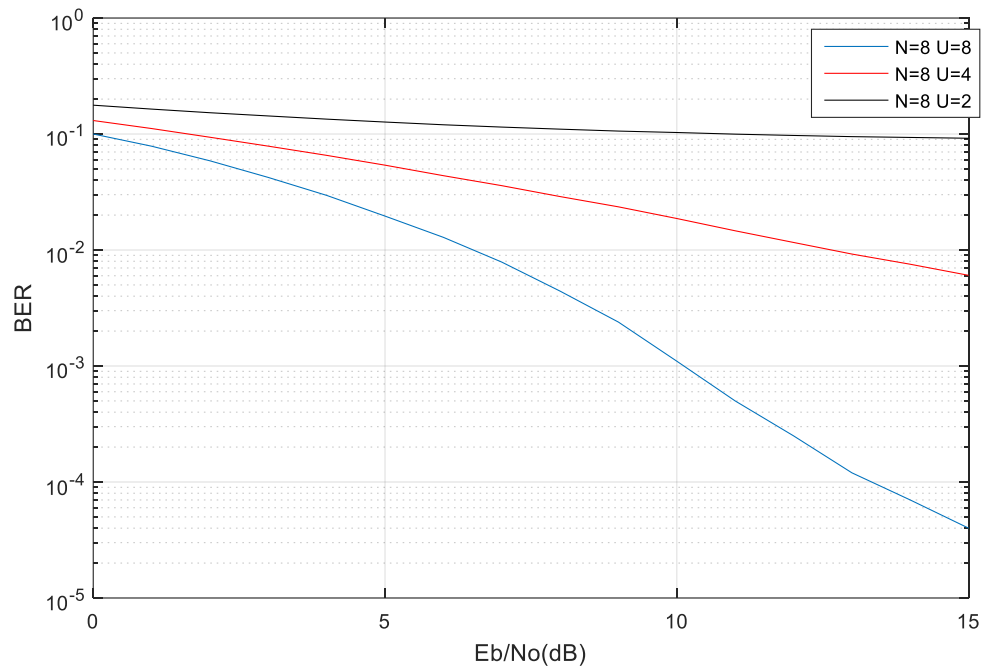


Figure 4.4 : Capacité d'un canal de Rayleigh de plusieurs usagers dans une transmission MC-CDMA

### c) Effet de la longueur des contraintes :

La figure ci-dessous représente une comparaison entre l'effet des valeurs de la longueur des contraintes sur la transmission dans un système MC-CDMA en canal de Rayleigh

D'après la figure Il y a une amélioration significative de la qualité du signal transmis, Où on remarque que lorsqu'on augmente la longueur des contraintes N, la valeur du BER diminue. On constate que N=32 donne meilleures performances au niveau de transmission.

Donc on conclut que plus on augmente la longueur des contraintes la qualité de transmission s'améliore.

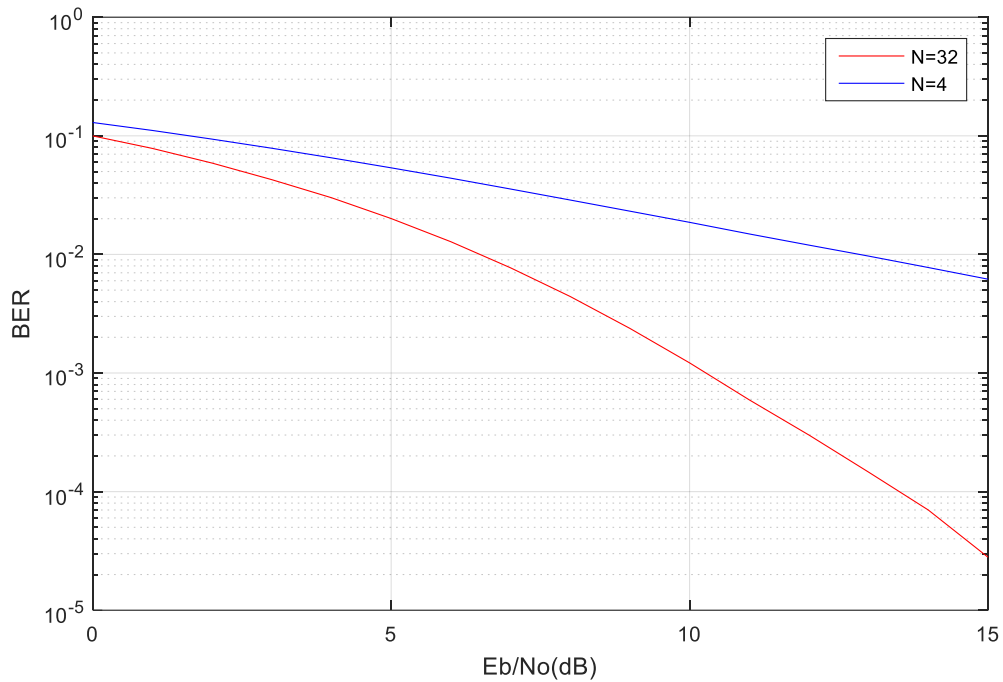


Figure 4.5 : Comparaison entre l'effet des différentes valeurs de la longueur de contrainte N.

### 4.3. Conclusion :

Dans ce chapitre de simulation, nous avons étudié deux systèmes de transmissions qui sont le CDMA et le MC-CDMA. On a exposé les résultats obtenus à travers les différentes simulations effectuées et nous avons traité les performances de ces systèmes dans des différentes conditions. Les résultats obtenus montrent que le MC-CDMA est plus performant que le CDMA.



## Conclusion Générale

Ce travail présente une étude portant sur la modulation MC-CDMA qui combine le multiplexage par répartition en fréquence orthogonale (OFDM) et l'accès multiple par division de code (CDMA) pour obtenir une vitesse élevée, une large bande passante, une meilleure diversité de fréquence à combattre, un évanouissement sélectif en fréquence et une performance dans des conditions de trajets multiples intenses.

Dans le premier chapitre, une description du canal de propagation est présentée avec une étude détaillée des phénomènes physiques affectant la propagation du signal radio, telle que la diffraction, la réflexion, la diffusion.... Ainsi qu'une modélisation statistique du canal de propagation.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté un état de l'art sur les systèmes CDMA, leurs caractéristiques ainsi que leurs principes de fonctionnement que soit pour un canal à un seul trajet ou pour multi trajet. Tout en mettant l'accent sur les codes d'étalements.

Dans la partie simulation, nous avons commencé par simuler un système DS-SS-CDMA, tout en étudiant l'influence de divers codes d'étalement et ainsi que la longueur des codes. Après, nous avons simulé et étudié une transmission MC-CDMA dans un canal de Rayleigh. Les résultats de simulation montrent que cette technique permet d'obtenir une meilleure diversité de fréquence à combattre, un évanouissement sélectif en fréquence et une performance dans des conditions de trajets multiples intenses. Ce que permet de dire que cette technique MC-CDMA est l'un des candidats les plus remarquables pour la couche physique en 5G et au-delà de la 4G.

Parmi les perspectives envisagées pour notre travail, on cite :

- Le gain que peut apporter les ondelettes à la place de la transformer de fourrier.
- Recherche de codes spécifiques permettant de diminuer voir d'éliminer les interférences entre les utilisateurs.

## *Références bibliographiques*

- [1] D. Shahbazzabar, S. Alirezaee, M. Ahmadi, R. Heydari, “ A MC-CDMA system based on orthogonal filter banks of wavelet transforms and partial combining “ , *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, Vol. 94, pp. 128-138, 2018.
- [2] H. Hijazi, “*Estimation de canal radio-mobile à évolution rapide dans les systèmes à modulation OFDM*“ (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG), 2008.
- [3] L.T. Aboura, “*Evaluation des performances du système MC-MC-CDMA sur un canal multi trajet* “, 2014.
- [4] P. Nagaradjane, L. Krishnan, A.S.S.Vasan, “ Performance analysis of multicell multiuser MIMO MC DS/CDMA system with MMSE user-ordered SIC technique “ , *Computers & Electrical Engineering*, Vol.38, pp. 105-115, 2012.
- [5] L. Hanzo, T. Keller, “ OFDM and MC-CDMA: a primer “, 2006.
- [6] C. Guellaut, “ *Prototypage d'un système MIMO MC-CDMA sur plate-forme hétérogène* “ (Doctoral dissertation), 2009.
- [7] I. Ouachani, “ *Performance analysis of communication systems wireless operator Micro and Macro Diversity* “. Université de Paris XI Rosary, 2005.
- [8] P. G. Manga, “ *Étude de performance d'une liaison sans fil OFDM dans un canal complexe* “ (Doctoral dissertation, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue). 2012.
- [9] P. Beaufils, Z. Choukair, S. Tabbane, “Réseaux 4G : technologies et services“, *Hermès sciences publications-Lavoisier*, 2008.
- [10] T. Milazavata, “*Algorithme d'optimisation des performances de la technologies LTE (4G)*“, Mémoire de Master Électronique. Université d'Antananarivo, 2018.
- [11] H. Merah, “ *Conception d'un MODEM de la quatrième génération (4G) des réseaux de mobiles à base de la technologie MC-CDMA* “,(Doctoral dissertation), 2018.

- [12] R. Touhami, “*Développement d’un model of dm pour la 4<sup>ème</sup> génération du mobile de communication* “, (Doctoral dissertation), 2018.
- [13] P. Pajusco, “ Modèles de Propagation pour les Systèmes Radio-mobiles “. *In Vers des radiocommunications reconfigurables et cognitives, Comité National Français de Radioélectricité Scientifique (CNFRS)*, 2006.
- [14] M. Hocine, “ *Conception d’un MODEM de la quatrième génération (4G) des réseaux de mobiles à base de la technologie MC-CDMA* ”. Mémoire de Magister En électronique, 2012.
- [15] J. Mountassir, H. Balta, M. Oltean, M. Kovaci, & A. Isar, A physical layer simulator for WiMAX in Rayleigh fading channel. *IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI)* (pp. 281-284). IEEE, 2011.
- [16] L. Frenzel, “ Fundamentals of Communications Access Technologies : FDMA, TDMA, CDMA, OFDMA, AND SDMA“, *Electronic Design*, Jan, 22. 2013.
- [17] K. Fazel, S. Kaiser, *Multi-carrier and spread spectrum systems: from OFDM and MC-CDMA to LTE and WiMAX*, John Wiley & Sons, 2008.
- [18] Patzold, Matthias. *Mobile fading channels: Modelling, analysis and simulation*. John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [19] M.K. Simon, M.S. Alouini, *Digital communication over fading channels*. John Wiley & Sons, 2005.
- [20] L. Dubreuil, “ *Amélioration de l’étalement de spectre par l’utilisation de codes correcteurs d’erreurs* “(Doctoral dissertation, université de Limoges), 2005.
- [21] S.G. Glisici, P.A. Leppänen, *Wireless communications: TDMA versus CDMA*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [22] J.S. Lee, L.E. Miller, *CDMA systems engineering handbook*. Artech House, Inc., 1998.
- [23] S. Lee, S. L. Short, *Spread spectrum CDMA*. McGraw-Hill, Inc., 2002.
- [24] H.H. Chen, *The next generation CDMA technologies*. John Wiley & Sons, 2007.
- [25] H. Y. Lu, “ Cyclic interference alignment for MIMO interference channels: A hybrid approach of MTLI and PSO “, *Applied Soft Computing*, Vol. 50, pp . 158-165, 2017.

- [26] Z. Chen, P. Chen, J. Li, P. Miao, “Non-orthogonal multi-carrier MIMO communication system using M-ary efficient modulation”, *Digital Signal Processing*, Vol. 76, pp. 14-21, 2018.
- [27] E. Ghayoula, A. Bouallegue, R. Ghayoula, J. Y. Chouinard, “Capacity and Performance of MIMO systems for Wireless Communications”, *Journal of Engineering Science and Technology, Review*, Vol. 7, No. 3, 2014.
- [28] S. Hiltunen, P. Chevalier, T. Petitpied, “New insights into time synchronization of MIMO systems without and with interference”. *Signal Processing*, Vol. 161, pp. 180-194, 2019.
- [29] D. Kitchener, M. Smith, C. Ward, “Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office”, *Patent*, No. 6, pp. 870-515, 2005.
- [30] S. Sanayei, A. Nosratinia, “Antenna selection in MIMO systems. *IEEE Communications Magazine*, Vol. 42, No. 10, pp. 68-73, 2004.
- [31] T. M. Duman, A. Ghayeb, *Coding for MIMO communication systems*. John Wiley & Sons, 2008.
- [32] R. Kapoor, R. Gupta, R. Kumar, S. Jha, “New scheme for underwater acoustically wireless transmission using direct sequence code division multiple access in MIMO systems”, *Wireless Networks*, Vol. 25, No. 8, pp. 4541-4553, 2019.
- [33] Y. Devlal, M. Awasthi, “Capacity analysis of MIMO technology”, *International Journal Of Engineering And Computer Science*, Vol. 4, No. 01, 2015.
- [34] K. Sengar, N. Rani, A. Singhal, D. Sharma, S. Verma, T. Singh, “Study and capacity evaluation of SISO, MISO and MIMO RF wireless communication systems”, *arXiv preprint arXiv*, pp. 1403.7774, 2014.
- [35] J. B. Andersen, “Antenna arrays in mobile communications : gain, diversity, and channel capacity”, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 42, No. 2, pp. 12-16, 2000.
- [36] A. Goldsmith, “*Wireless communications*”, Cambridge university press, 2005.
- [37] M. Mohaisen, Y. Wang, K. Chang, “Multiple antenna technologies”, *arXiv preprint arXiv*, pp. 0909.3342, 2009.



- [38] M. Juntti, M. Vehkaperä, J. Leinonen, V. Zexian, D. Tujkovic, S. Tsumura, S. Hara, “MIMO MC-CDMA communications for future cellular systems”, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 43, No. 2, pp. 118-124, 2005.
- [39] H. Sari, “A review of multicarrier CDMA. In Multi-Carrier Spread-Spectrum & Related Topics”, *Springer, Boston*, pp. 3-12, 2002.
- [40] L. Hanzo, M. Münster, B. Choi, T. Keller, *OFDM and MC-CDMA for broadband multi-user communications, WLANs and broadcasting*, John Wiley & Sons, 2005.
- [41] N. Larbi, “*Détection multi-utilisateurs dans le contexte de communication mobile : Exploitation de la combinaison OFDM/CDMA*”, Thèse de doctorat, Université d’Oran mohamed boudiaf, 2015.