

**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 Technologie**

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

**Master**

En

« Télécommunications »

*Option :*

« Systèmes des Télécommunications »

**Titre :**

**Simulation d'un système de communication numérique  
multi-antennes, multi-accès et multi-porteuses pour un  
système de quatrième génération (4G)**

**Réalisé par :**

- ABDAT Belarbi
- YOUSFI Hamza

**Devant le jury composé de :**

- Président : Dr. KEDDACHE Mourad  
Examineur : Dr. SADOUKI BOUAAMAMA Reda  
Encadreur : Dr. BENYAROU Mourad

Année Universitaire: 2017 / 2018

قال الله تعالى:

« قَالُوا سُبْحَانَكَ لَا عِلْمَ لَنَا  
إِلَّا مَا عَلَّمْتَنَا إِنَّكَ أَنْتَ الْعَلِيمُ  
الْحَكِيمُ »

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à*

*Mes très chers parents, ma chère épouse, les deux chères filles: Hadjer, qui était très favorable à ses mots haut de gamme, Khawla, que je souhaite réussite et succès à l'examen du baccalauréat, le garçon intelligent Abderrahmane et tous les membres de ma famille, petits et grands sans exception 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 garde.*

*Au directeur à la retraite Mr. GUESSAL Mahmoud, qui m'a soutenu de toutes ses forces pour continuer mes études.*

*À Mr. AOUAMEUR djamel, l'actuel directeur de l'école primaire Qais Mohamed, qui m'a beaucoup soutenu en espérant que je terminerais mes études avec succès.*

*Pour tous mes professeurs de l'école primaire à l'université sans exception, en particulier le professeur de physique Mr. BONEDJAR Hamid, qui était comme la bougie qui brûle pour éclairer mon chemin, et qui n'a pas voulu se reposer avant d'avoir vu mon succès se réalisé sous ses yeux.*

*À Tous mes élèves que j'ai enseigné en quatrième année primaire.*

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

*ABDAT Belarbi*

## *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 sœur de  
m'avoir soutenu non seulement durant ce travail mais tout au long de  
ma vie.*

*Yousfi Hamza*

# *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. BENYAROU Mourad pour le soutien continu, pour sa patience, de motivation et savoir immense. Ses conseils nous ont aidés 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

Les systèmes de communications numériques sont à la base de tous les systèmes de communication actuels, ils sont même à la base des technologies avancées tel que la télévision numérique, ordinateur, téléphone mobile, communication par satellite... Dans ce contexte ce projet est destiné à concevoir une chaîne de communications numérique sans fil, allant de la source vers le destinataire en passant par le canal de transmission qui est l'espace libre et en suivant des hypothèses que nous fixons à l'avance. Au dernier chapitre des simulations seront faites en donnant comme application les données d'un système de communications sans fil de quatrième génération.

**Mots clés :** communication numérique, Conception, simulation, multi porteuses, multi antennes, multiutilisateurs, 4G.

---

### المخلص

أنظمة الاتصالات الرقمية هي أساس جميع أنظمة الاتصالات الحالية، بل هي أساس التقنيات المتقدمة مثل التلفزيون الرقمي، الكمبيوتر، الهاتف المحمول، الاتصالات عبر الأقمار الصناعية... في هذا السياق، خصص هذا المشروع لتصميم سلسلة اتصالات رقمية لاسلكية انطلاقاً من المصدر و وصولاً إلى المتلقي مروراً عبر قناة الإرسال التي هي فضاء حر و تبعاً للافتراضات التي وضعناها مسبقاً. في الفصل الأخير سيتم إجراء محاكاة يتم من خلالها القيام بتطبيق بيانات نظام الاتصالات اللاسلكية من الجيل الرابع.

الكلمات المفتاحية: الاتصالات الرقمية ، التصميم ، المحاكاة ، متعدد الناقل ، متعدد الهوائيات ، متعدد المستخدمين ، الجيل الرابع 4G .

---

### Abstract

Digital communication systems are the basis of all current communication systems, they are even the basis of advanced technologies such as digital television, computer, mobile phone, satellite communication ... In this context, this project is designed to design a wireless digital communications chain, from the source to the recipient through the transmission channel which is the free space and following assumptions that we set in advance. In the final chapter of the simulations will be done giving as application the data of a fourth generation wireless communications system.

**Key words:** digital communication, design, simulation, multi-carrier, multi-antenna, multi-user, 4G.

## Liste des abréviations

<b>1G</b>	1ère Génération
<b>2G</b>	2ème Génération
<b>3G</b>	3ème Génération
<b>3GPP</b>	3rd Generation Partnership Project
<b>4G</b>	4ème Génération
<b>5G</b>	5ème Génération
<b>ASK</b>	Amplitude Shift Keying
<b>BER</b>	Bit Error Rate
<b>BPSK</b>	Binary Phase Shift Keying
<b>CDMA</b>	Code Division Multiple Access
<b>CP</b>	Cyclic Prefix.
<b>DAB</b>	Digital Audio Broadcasting .
<b>DS-CDMA</b>	Direct-Sequence Code Division Multiple Access
<b>FDD</b>	Frequency Division Duplex.
<b>FDM</b>	Frequency Division Multiplexing.
<b>FDMA</b>	Frequency Division Multiple Access.
<b>FEC</b>	Forward Error Correction.
<b>FFT</b>	Fast Fourier Transform
<b>FSK</b>	Frequency Shift Keying
<b>GSM</b>	Global System of Mobile
<b>IES</b>	Interferences Entre Symboles
<b>IFFT</b>	Inverse Fast Fourier Transform ISI Inter Symbols Interferece
<b>ISI</b>	InterSymbol Interference
<b>LOS</b>	Line Of Sight

<b>LTE</b>	<b>Long Term Evolution .</b>
<b>MIMO</b>	<b>Multiple Input Multiple Output</b>
<b>MISO</b>	<b>Multiple Input Single Output</b>
<b>MC-CDMA</b>	<b>Multi Carrier-Code Division Multiple Access</b>
<b>MC-DS-CDMA</b>	<b>Multi carrier-DirectSequence- Code Division Multiple Accès</b>
<b>OFDM</b>	<b>Orthogonal Frequency Division Multiplex.</b>
<b>OFDMA</b>	<b>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</b>
<b>PSK</b>	<b>Phase-shift keying</b>
<b>QAM</b>	<b>Quadrature Amplitude Modulation</b>
<b>QoS</b>	<b>Quality of Service</b>
<b>QPSK</b>	<b>Quadrature Phase Shift Keying</b>
<b>RMS</b>	<b>Root Mean Square .</b>
<b>RSB</b>	<b>Rapport Signal sur Bruit</b>
<b>SISO</b>	<b>Single Input Single Output</b>
<b>SIMO</b>	<b>Single Input Multiple Output</b>
<b>SDMA</b>	<b>Space Division Multiple Access</b>
<b>STTC</b>	<b>Space-Time Trellis Coding</b>
<b>STBC</b>	<b>Space-Time Block Coding</b>
<b>SNR</b>	<b>Signal to Noise Ratio.</b>
<b>TDD</b>	<b>Time Division Duplex</b>
<b>TDMA</b>	<b>Time Division Multiple Access</b>
<b>TEB</b>	<b>Taux d'Erreur Binaire</b>
<b>WDMA</b>	<b>Wavelength Division Multiplexing Access</b>
<b>WLAN</b>	<b>Wireless Local Area Network.</b>
<b>WLL</b>	<b>Wireless Local Loop.</b>



## **Liste des figures**

### **Chapitre 1**

Figure.1.1 : Schéma général d'une antenne en mode transmission .....	4
Figure.1.2 : L'antenne en mode : (a) d'émission et (b) réception.....	5
Figure.1.3 : Différentes formes d'antennes .....	6
Figure.1.4 : Systèmes SISO .....	7
Figure.1.5 : systèmes SIMO.....	7
Figure.1.6 : systèmes MISO.....	8
Figure.1.7 : Systèmes MIMO.....	8
Figure .1.8 : Systèmes mono-antenne .....	9
Figure.1.9 : Capacité en fonction du SNR .....	10
Figure.1.10 : Modèle équivalent du canal SISO .....	11
Figure.1.11 : Schéma d'un système de transmission sans fil MIMO. ....	12
Figure.1.12 : Représentation des différents trajets dans un système MIMO. ....	14
Figure.1.13 : un canal sélectif en fréquence . ....	15
Figure.1.14 : Comparaison montrant un canal non sélectif . ....	16
Figure.1.15 : Architecture d'un système de codage spatio-temporel.....	19
Figure.1.16 : Schéma bloc d'un émetteur à code d'Alamouti .....	20
Figure.1.17 : Dispositif MIMO .....	22
Figure.1.18 : Capacité des systèmes SIMO à 4 et 8 antennes par rapport au système SISO.....	23

### **Chapitre 2**

Figure 2. 1 : Les différentes technologies d'accès sans fil pour l'utilisateur 4G. ...	27
Figure 2. 2 : Schéma d'un système de transmission numérique.....	29
Figure 2. 3 : Différentes techniques d'accès multiples .....	33
Figure 2. 4 : Propagation par multi-trajets .....	35
Figure 2. 5 : fonction de transfert d'un canal comportant un retard .....	36
Figure 2. 6 : Différence entre le technique FDM et OFDM .....	38
Figure 2. 7 : Représentation fréquentielle et temporelle d'un signal OFDM .....	41
Figure 2. 8 : Schéma de principe du modulateur OFDM.....	42
Figure 2. 9 : Spectre en sortie du modulateur OFDM.....	43
Figure 2. 10 : Schéma de principe du démodulateur OFDM.....	43
Figure 2. 11 : Modulateur OFDM numérique.....	44
Figure 2. 12 : Démodulateur OFDM numérique .....	45

Figure 2. 13 : Chaîne de communication simplifiée OFDM .....	45
Figure 2. 14 : Le système de transmission MIMO/OFDM.....	48
Figure 2. 15 : L'OFDM appliquée aux MIMO .....	50

### **Chapitre 3**

Figure 3. 1 : Schéma de principe de l'émetteur et du récepteur d'un système OFDM.....	56
Figure 3. 2 : Schéma simplifié d'un système MIMO-OFDM avec un codage STBC .	56
Figure 3. 3 : Courbes de BER en fonction de SNR des 2 méthodes d'inversion de canal .....	58
Figure 3. 4 : Courbes de BER en fonction de SNR de méthode d'inversion de canal (mode=0).....	58
Figure 3. 5 : Courbes de BER en fonction de SNR de méthode d'inversion de canal régularisé (mode=1).....	59
Figure 3. 6 : Courbes de BER en fonction de SNR de la méthode d'inversion de canal régularisé pour NF-frame = 8 et Np-packet = 100,200,300.....	60
Figure 3. 7 : Courbes de BER en fonction de SNR de la méthode d'inversion de canal régularisé pour NF-frame = 9 et Np-packet = 100,200,300.....	60
Figure 3. 8 : Courbes de BER en fonction de SNR de la méthode d'inversion de canal régularisé pour NF-frame = 10 et Np-packet = 100,200,300.....	61
Figure 3. 9 : Courbes de BER en fonction de SNR de la méthode d'inversion de canal régularisé pour NF-frame = 11 et Np-packet = 100,200,300.....	61
Figure 3. 10 : Courbes de BER en fonction de SNR de la méthode d'inversion de canal régularisé pour NF-frame = 12 et Np-packet = 100,200,300 .....	61
Figure 3. 11 : L'effet de la taille de transformer de fourrier rapide FFT et IFFT sur les performances d'un Système MIMO-OFDM.....	63
Figure 3. 12 : L'effet de la diversité des antennes sur les performances d'un Système MIMO-OFDM .....	64

## Liste des tableaux

Tableau 1. 1 : Tableau récapitulatif des différentes sélectivités. ....	17
Tableau 3. 1 : Paramètres globale de simulation d'un système multi_user_MIMO....	57
Tableau 3. 2 : Paramètres globale de simulation d'un système MIMO-OFDMA .....	62

# Table de Matière

## Remerciement

## Résumé

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
-----------------------------------	----------

## Chapitre 1 : Les systèmes mono-antennes et multi-antennes

1.1. Introduction .....	3
1.2. GENERALITES SUR LES ANTENNES.....	4
1.2.1. DEFINITION D'ANTENNE .....	4
1.2.1.1. L'antenne en mode d'émission.....	4
1.2.1.2. L'antenne en mode et réception.....	4
1.2.2. Différents types d'antennes .....	5
1.2.3. Caractéristiques générales d'une antenne.....	6
1.3. Les Différents systèmes d'antennes.....	7
1.3.1. Système SISO .....	7
1.3.2. Système SIMO.....	7
1.3.3. Système MISO.....	7
1.3.4. Système MIMO .....	8
1.4. Les systèmes mono-antennes SISO .....	8
1.4.1 Présentation du système SISO .....	8
1.4.2. Capacité du canal SISO .....	9
1.5. Les systèmes multi-antennes MIMO .....	11
1.5.1. Présentation des systèmes MIMO .....	12
1.5.2. Architectures et techniques MIMO .....	13
1.5.3. Notion de Sélectivité.....	15
1.5.3.1. Canal sélectif en fréquence .....	15
1.5.3.2. Canal sélectif en temps .....	16
1.5.3.3. Canal sélectif en temps et en fréquence.....	16
1.5.3.4. Canal non sélectif .....	16
1.5.4. Diversité et codage .....	17
1.5.4.1. Techniques de diversité des antennes .....	17
1.5.4.1.1. Diversité temporelle .....	17

1.5.4.1.2. Diversité fréquentielle .....	18
1.5.4.1.3. Diversité de diagramme .....	18
1.5.4.1.4. Diversité spatiale.....	18
1.5.4.2. Codes spatio-temporels.....	19
1.5.4.2.1. Codes spatio-temporels par blocs.....	19
1.5.5. Capacité d'un canal MIMO .....	22
1.5.6. Comparaison des capacités des différents systèmes.....	23
1.5.7. Avantages et désavantages des systèmes MIMO .....	24
1.5.8. Conclusion .....	24

## **Chapitre 2 : Etude et principe de la modulation OFDM multi accès**

<b>2.1. Introduction.....</b>	<b>26</b>
2.2. La 4ème génération des réseaux de mobiles.....	27
2.2.1. DEFINITION DE LA QUATRIEME GENERATION .....	27
2.2.2. LES CONDITIONS TECHNIQUES POUR REALISER LA QUATRIEME GENERATION DE MOBILES.....	27
2.2.3. CARACTERISTIQUES DES SYSTEMES SANS FIL 4G .....	28
2.2.4. BUTS DE LA 4G .....	28
2.3. Systèmes de communication numérique .....	29
2.3.1. Les Modulation Numériques.....	30
2.3.2. DEFINITIONS ET APPELLATIONS .....	31
2.4. Méthodes d'accès radio .....	32
2.4.1. DIVISION DUPLEX PAR FREQUENCE (FDD).....	32
2.4.2. DIVISION DUPLEX PAR LE TEMPS (TDD).....	32
2.5. Techniques d'accès multiples .....	33
2.6. Canal à trajets multiples.....	35
2.6.1. CARACTERISTIQUE DU CANAL MULTI-TRAJET .....	35
2.6.1.1. Atténuation .....	36
2.6.1.2. Effet des trajets multiples .....	37
2.7. OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) .....	37
2.7.1. CONCEPTION DU SYSTEME OFDM.....	38
2.7.1.1. Hypothèses de Conception .....	39
2.7.1.2. Paramètres de conception d'un system OFDM .....	39
2.7.2. PRINCIPE ET FONCTIONNEMENT DE L'OFDM .....	40

2.7.2.1. Principe de l'OFDM .....	40
2.7.2.2. fonctionnement de l'OFDM .....	41
2.7.2.3. Principe de la modulation .....	42
2.7.2.4. Principe de la démodulation .....	43
2.7.2.5. Implantation numérique du modulateur.....	44
2.7.2.6. Implantation numérique du démodulateur.....	44
2.8. CHAINE DE COMMUNICATION OFDM BASIQUE.....	45
2.8.1. Bande de garde .....	46
2.9. Système de transmission MIMO associé à une modulation OFDM .....	47
2.9.1. Présentation détaillé du système MIMO-OFDM.....	49
2.9.2. CAPACITE DU SYSTEME MIMO-OFDM.....	49
2.10. LES APPLICATIONS MIMO-OFDM ACTUELLES .....	51
2.10.1. Avantages et inconvénients de l'OFDM.....	51
2.11. CONCLUSION .....	52

### **Chapitre 3 : Simulations et calcul des performances d'un système de 4eme génération multi-antennes**

<b>3.1. Introduction .....</b>	<b>53</b>
<b>3.1.1. La démarche de simulation .....</b>	<b>53</b>
<b>3.2. Notions de bases .....</b>	<b>53</b>
3.2.1. CHOIX D'UN LOGICIEL DE SIMULATION .....	53
3.2.2. NOTION DE BASE SUR MATLAB .....	54
3.2.3. PLATE-FORME DE SIMULATION .....	54
3.2.4. TAUX D'ERREUR BINAIRE (BER).....	55
3.2.5. RAPPORT SIGNAL SUR BRUIT (SNR).....	55
3.2.6. SCHEMA DE PRINCIPE D'UN SYSTEME OFDM .....	55
3.2.7. SYSTÈME MIMO-OFDM .....	56
3.3. Simulations et discussion des résultats .....	57
3.3.1. SIMULATION ET PERFORMANCE D'UN SYSTEME MIMO MULTI UTILISATEUR..	57
3.3.1.1 Comparaison entre les performances d'inversion de canal et les performances d'inversion du canal régularisé .....	57
3.3.1.2. Influence du nombre d'antennes sur les performances de la méthode d'inversion de canal et d'inversion de canal régularisé .....	58

3.3.1.3. Influence du nombre de trames et du nombre de paquets sur les performances de la méthode d'inversion de canal régularisé.....	59
3.3.2. SIMULATION ET PERFORMANCE D'UN SYSTEME MIMO-OFDM OU MIMO-OFDMA.....	62
3.3.2.1. L'effet de la taille de transformer de fourrier rapide FFT et IFFT sur les performances d'un Système MIMO-OFDM.....	62
3.3.2.2. L'influence de la diversité des antennes sur les performances d'un Système MIMO-OFDM.....	63
3.4. Conclusion.....	65
<b>Conclusion generale.....</b>	<b>66</b>

### **Bibliographie**

Annexe

# **Introduction générale**



### *Introduction Générale*

Le monde de la communication a fait des avancées qualitatives dans les communications sans fil, où les services aux utilisateurs sont devenus plus nombreux, nécessitant le transfert de la voix, des données ou du contenu multimédia (images, vidéo, ...). Ce développement s'est accompagné d'une augmentation significative du nombre d'utilisateurs et de leurs exigences en termes de productivité, alors que l'utilisateur n'est pas convaincu de parler uniquement avec son interlocuteur au téléphone, mais nécessite d'autres services tels que l'Internet mobile ou les appels vidéo, et avec une bonne qualité de service.

Cependant, l'augmentation des besoins de production est entravée par la disponibilité des ressources spectrales pour le rayonnement électromagnétique, et aussi par la nature des canaux eux-mêmes. En effet, les communications sont faites sur de plus en plus de bandes de fréquences limitées par le grand nombre de normes. De plus, la communication sans fil est réalisée par la propagation d'une onde électromagnétique dans l'espace, mais le canal est généralement de type multi-trajets, en raison de plusieurs obstacles (bâtiments, arbres, voitures, etc.). A la réception, le signal reçu d'un ensemble de signaux est constitué de directions différentes qui rendent le canal sélectif en fréquence et augmentent son effet avec le débit de transmission. Pour résoudre ces problèmes, deux technologies prometteuses, le premier est le système multi-antennes MIMO (Multi-Input et Multiple Output), ont vu le jour, ce qui a permis de gagner en diversité spatiale et d'améliorer la capacité du système. La seconde est la modulation multi-porteuses OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), qui permet d'accéder à une bonne efficacité spectrale avec une bonne robustesse de la transmission. En outre, des débits historiques ont été atteints avec l'apparition de la combinaison des deux technologies précédentes pour donner une nouvelle système, ce qu'on appelle MIMO-OFDM, qui est la base principale du système de communication de la quatrième génération, ce qui permet une meilleure exploitation de la plus grande diversité spatiale et de la diversité fréquentielle prévue par cette technique de modulation.

## Introduction Générale

---

Le but de ce travail est d'étudier et de simuler le système MIMO-OFDM multi-accès pour faire apparaître l'effet de ses performances associé.

Notre mémoire est organisée comme suit:

- Dans le premier chapitre, nous décrivons les mécanismes de base régissant sur Les systèmes mono-antennes et multi-antennes, et nous présentons la technologie MIMO, ainsi que les principaux techniques de la diversité associé à ses systèmes pour le multiplexage spatial, et nous nous intéressons aux techniques de diversité, et plus particulièrement au codage spatio-temporel.
- Dans le deuxième chapitre, nous présentons l'étude et principe de la modulation OFDM multi accès. à partir du concept dans le domaine temporel continu, conduisant à la mise en œuvre actuelle dans le temps séparés en utilisant transformée de Fourier rapide. Après cela, nous avons vu comment l'ajout du préfixe cyclique de rotation au code OFDM simplifie considérablement le processus de réalisation de l'égalisation dans les canaux multi-trajets, nous terminerons ce chapitre par la technique MIMO-OFDM avec ses avantages.
- Dans le troisième et dernier chapitre, nous tenterons de valider les concepts théoriques par programmes sous l'environnement MATLAB en calculant les performances d'un système de 4eme génération multi-antennes et multi-accès.

Nous terminons ce mémoire par une conclusion et des perspectives, puis une bibliographie et une annexe.

# **Chapitre 1**

## **Les systèmes mono- antennes et multi- antennes**

### 1.1. Introduction

Dans le cadre des communications sans fil, la demande en termes de débit et de qualité de service ne cesse de croître depuis une dizaine d'années. Le besoin d'instantanéité et d'interaction dans les échanges, l'intégration de services multimédia (voix, données et vidéo) de débit variable et de haute qualité exigent des systèmes de communication de plus en plus performants, pour lesquels la capacité des réseaux sans fil doit être augmentée de manière significative pour répondre à ces attentes. Mais les systèmes de communications traditionnels, n'acceptent qu'une antenne à l'émission et une antenne à la réception ce que on' appelle les systèmes mono-antennes SISO (Single-Input Single-Output). Or les futurs services de communications mobiles sans fils comme la quatrième génération (4G) demandent plus de transmissions de données (augmentation de la capacité de transmission). Ainsi pour augmenter la capacité des systèmes SISO et satisfaire ces demandes, les bandes passantes de ces systèmes et les puissances à transmettre ont été largement augmentées. Mais les récents développements ont montré que l'utilisation de plusieurs antennes à l'émission et à la réception permettait d'augmenter le débit de transmission des données et cela sans augmenter ni la bande passante de l'antenne réceptrice du système SISO, ni la puissance du signal à l'émission. Cette technique de transmission s'appelle les systèmes multi-antennes MIMO (Multiple Input, Multiple Output).

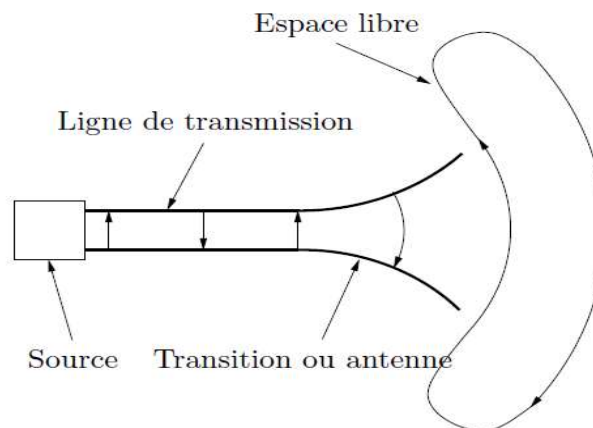
L'objectif de ce chapitre est de présenter les généralités sur les antennes et la comparaison entre les systèmes mono-antenne et les systèmes multi-antennes. et décrit de façon générale les différentes architectures et performance des ceux systèmes.

## 1.2. Généralités sur les antennes

### 1.2.1. Définition d'antenne

Une antenne est un transducteur entre un milieu de propagation et le système dans lequel elle fonctionne. C'est un dispositif qui transforme les ondes électromagnétiques guidées en ondes rayonnées dans l'espace libre en mode émission ou l'inverse en mode réception, donc de recevoir ou d'émettre des ondes radioélectriques [1].

L'antenne faisant partie des systèmes de télécommunication qui sert à rayonner ou recevoir des ondes électromagnétiques. En pratique, on peut le définir comme un dispositif de transformation d'ondes guidées par conducteurs en ondes qui se propagent dans l'espace et inversement **Figure 1.1**.



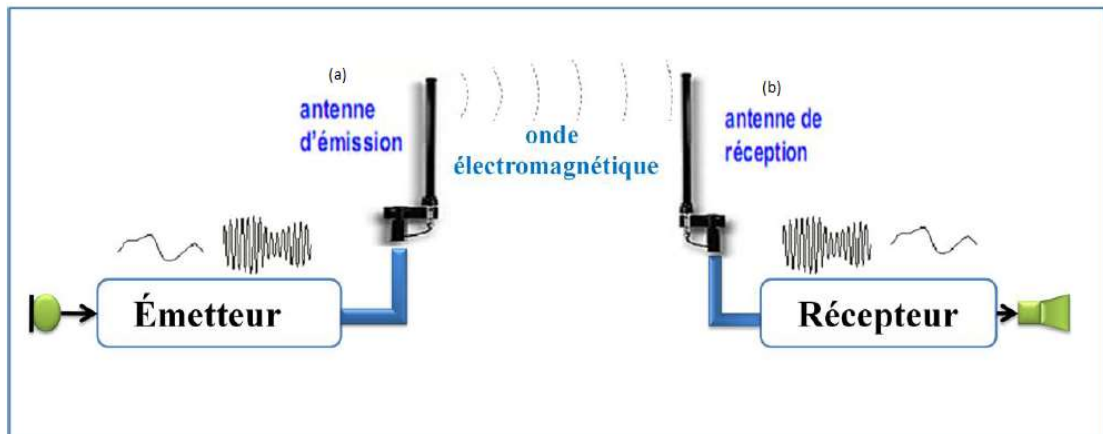
**Figure.1.1** : Schéma général d'une antenne en mode transmission.

#### 1.2.1.1. L'antenne en mode d'émission

L'émission : Une antenne d'émission est un conducteur qui transforme une énergie électrique en un rayonnement électromagnétique **Figure 1.2a**.

#### 1.2.1.2. L'antenne en mode et réception

A la réception : Une antenne de réception transforme un rayonnement électromagnétique en un courant électrique induit **Figure 1.2b**. Une même antenne peut servir à l'émission où à la réception à la puissance près **Figure 1.2**.

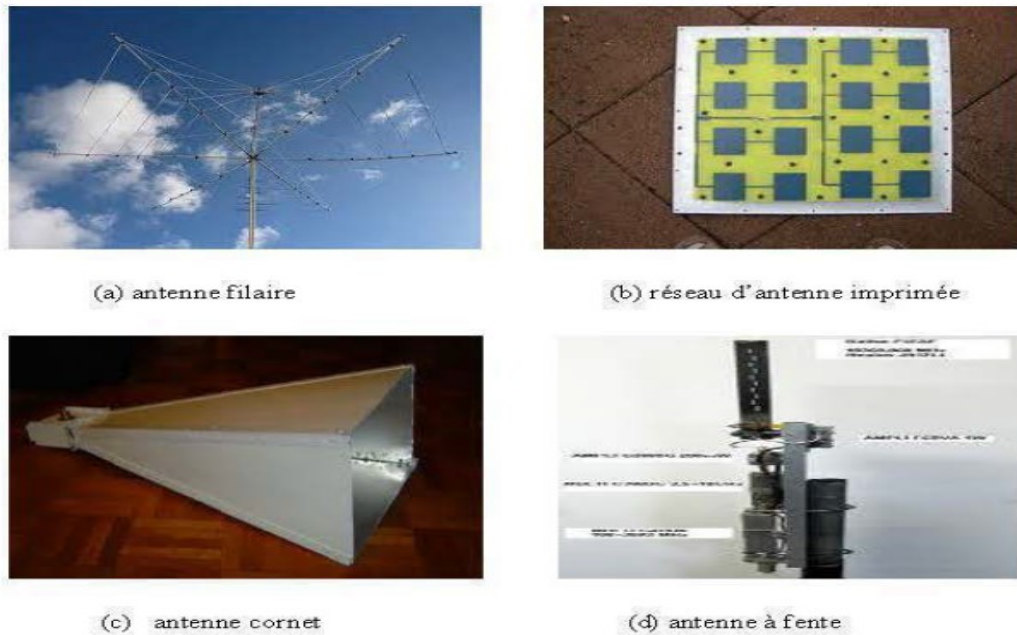


**Figure.1.2** : L'antenne en mode : (a) d'émission et (b) réception.

### 1.2.2. Différents types d'antennes

Il existe une grande variété d'antennes à l'origine selon la géométrie, le gain, la forme du faisceau et la bande passante. On peut les classer comme suite **Fig.1.3** [2] :

- Les formes ou géométries:
  - antennes filaires: dipôle, boucle, spirale
  - antennes à ouverture: cornet, fente
  - antennes imprimées: patch, dipôle imprimé, spirale
- Le gain:
  - gain élevé : planaire
  - gain moyen : cornet
  - gain bas : dipôle, fente, patch
- La forme de faisceau :
  - omnidirectionnelle : dipôle
  - faisceau étroit : planaire
  - faisceau large : antenne réseau
- La largeur de bande :
  - bande large : spirale
  - bande étroite : patch, fente



**Figure.1.3** : Différentes formes d'antennes.

### 1.2.3. Caractéristiques générales d'une antenne.

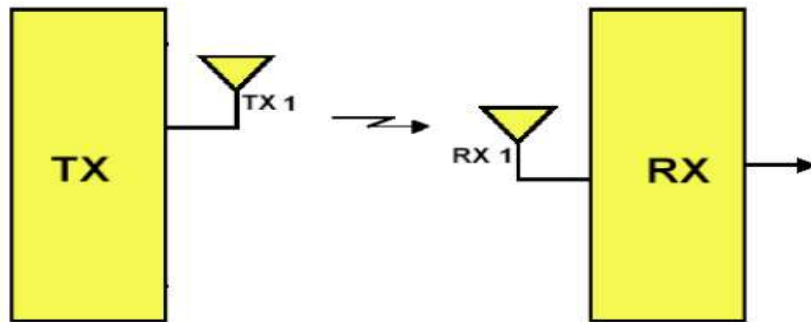
On a vu que la théorie des antennes est basée sur le rayonnement produit par des sources (charges, courants) à la surface d'un conducteur. Quand on veut décrire le fonctionnement d'une antenne particulière, certaines caractéristiques fondamentales, communes à tous les types d'antennes, sont données :

- 1- densité de puissance rayonnée
- 2- diagramme de rayonnement
- 3- résistance d'antenne et résistance de rayonnement
- 4- impédance d'entrée
- 5- bande passante
- 6- largeur de faisceau ou angle d'ouverture
- 7- Gain d'antennes
- 8- surface équivalente
- 9- Polarisation
- 10- la directivité

### 1.3. Les Différents systèmes d'antennes

#### 1.3.1. Système SISO

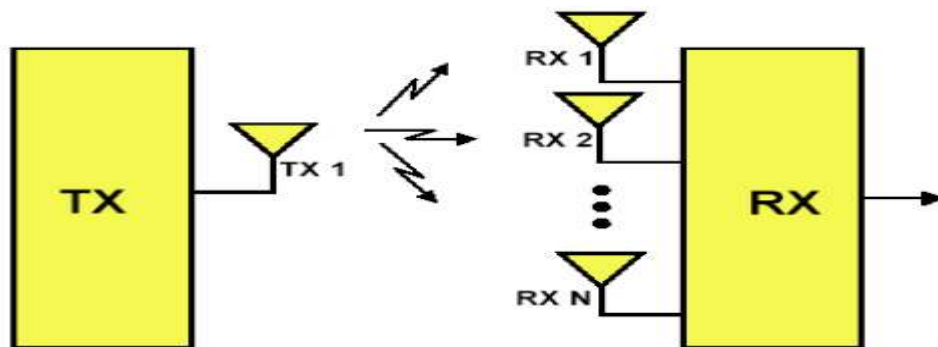
Un système dit SISO est donc un système plus traditionnel où l'on dispose d'une seule antenne en émission et d'une autre en réception [3]. Ce sont les systèmes les plus simples, on les qualifie aussi de mono variables **Figure 1.4**.



**Figure.1.4** : Systèmes SISO.

#### 1.3.2. Système SIMO

Une antenne émet le signal et plusieurs antennes en réception l'interceptent, cette technique a pour objectif de lutter contre l'évanouissement du canal **Figure 1.5** [3].



**Figure.1.5** : Systèmes SIMO.

#### 1.3.3. Système MISO

C'est une technique de diversité spatiale en émission. Plusieurs antennes émettent des signaux qui seront interceptés par une seule antenne en réception. Dans ce mode de transmission, une superposition du signal transmis simultanément par les  $N_t$  antennes émettrices est reçue **Figure 1.6** [3].



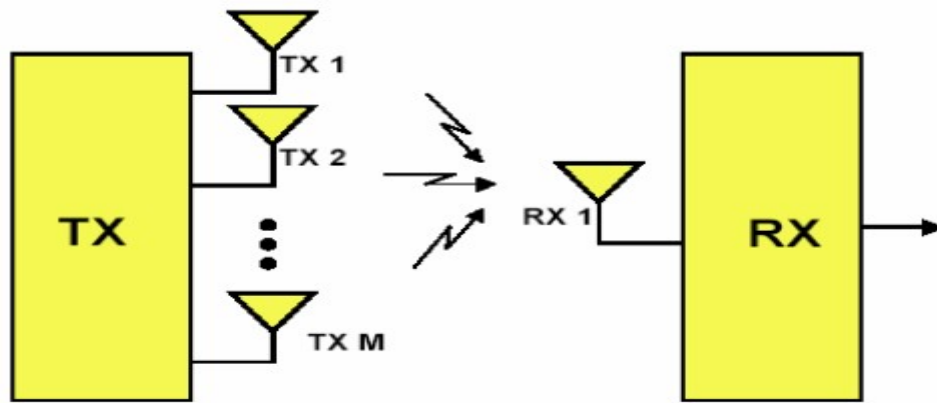


Figure.1.6 : Systèmes MISO.

### 1.3.4. Système MIMO

On dispose ici plusieurs antennes en émission et en réception, la configuration MIMO est la plus générale, elle englobe les systèmes MISO et SIMO comme des cas particuliers Figure 1.7[3]

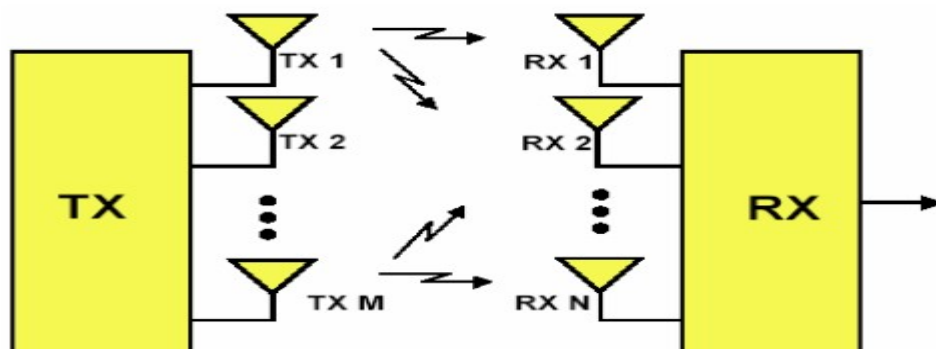
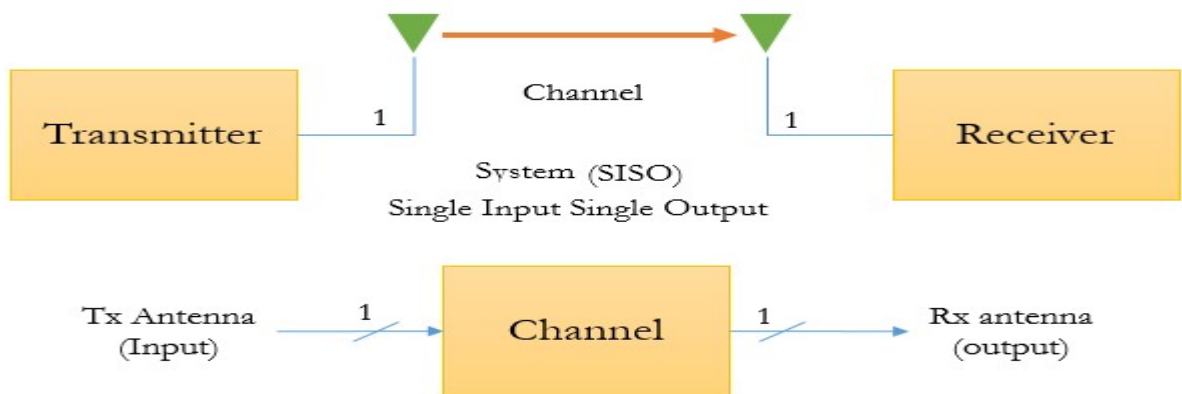


Figure.1.7 : Systèmes MIMO.

## 1.4. Les systèmes mono-antennes SISO

### 1.4.1. Présentation du système SISO

C'est l'architecture la plus simple qui utilise une seule antenne en émission et une autre en réception Figure 1.8.



**Figure .1.8 :** Systèmes mono-antenne.

Le système mono-antenne générique et paramétrable développé a permis de contribuer aux projets et également d'optimiser le compromis entre diversité et orthogonalité de l'accès multiple à l'aide de procédures de chip-mapping et d'égalisation adaptées,[4] dans ce système, l'augmentation de la taille de la modulation et/ou de la bande de fréquence utilisée sont les seules solutions pour augmenter le débit de données, avec tous les problèmes de complexité ou d'encombrement que cela entraîne.[5] Les systèmes SISO utilisent une technique de duplexage telle que TDD et FDD. En TDD, le système transmet et reçoit à différents instants mais à la même fréquence. En FDD, le système transmet et reçoit simultanément en même temps mais à deux fréquences différentes [11].

SISO est utilisé dans les systèmes radio, satellite, GSM et CDMA [12].

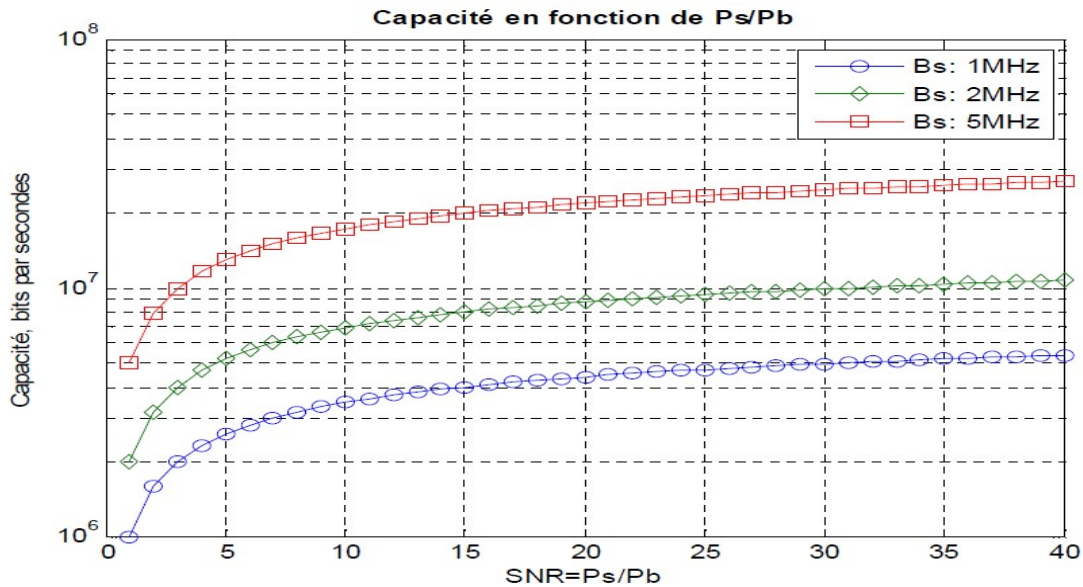
#### 1.4.2. Capacité du canal SISO

La capacité du canal définit la quantité d'information pouvant être transmise sans erreur sur le canal. En présence d'un bruit blanc additif gaussien et pour une entrée de type gaussien, C.E. Shannon a défini la capacité  $C$  du canal par[6] [13]:

$$C = B_s \log \left( 1 + \frac{P_s}{P_b} \right) \quad (1.1)$$

Où  $P_s$  et  $P_b$  désignent respectivement la puissance du signal émis et celle du bruit. A partir de cette équation, deux approches permettant d'augmenter la capacité peuvent être énoncées.

La première consiste à utiliser une bande étroite avec un rapport  $\frac{P_s}{P_b}$  important; la seconde permet d'exploiter une bande large avec un rapport  $\frac{P_s}{P_b}$  faible. La technique d'étalement de spectre que nous allons aborder est basée sur la seconde approche. La **Figure 1.9** représente parfaitement ce cas c.à.d. plus la largeur de la bande de fréquence  $B_s$  augmente et plus la capacité augmente [6].



**Figure.1.9** : Capacité en fonction du SNR [6].

- $y = hs + b(1.2)$

Soit  $h$  le gain complexe du canal avec

$$E(h^2) = 1 \quad (1.3)$$

- $\rho_R$  est le rapport signal à bruit à l'antenne de réception :

$$\rho_R = \frac{E(y^2)}{\sigma^2} = \frac{P_R E(h^2)}{\sigma^2} = \frac{P_R}{\sigma^2} \quad (1.4)$$

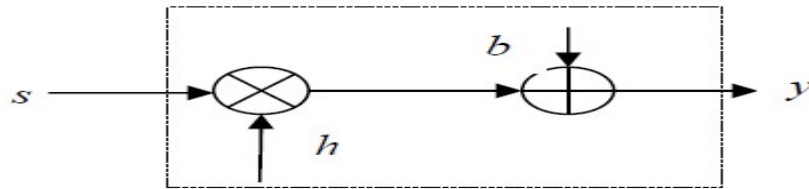
$\sigma^2$  est la puissance du bruit.

Donc la capacité d'un canal SISO **Figure 1.10** est [6] :

$$C_{SISO} = \text{Log}_2(1 + \rho_R |h|^2) \text{ bits/s/Hz} \quad (1.5)$$

Le système SISO **Figure.1.10** a cependant un débit très limité, et ne peut pas empêcher certains phénomènes nuisibles dûs à l'environnement de propagation ; c'est pourquoi les chercheurs ne cessent de proposer des solutions pour accroître les débits

de transmission. Ainsi l'apparition de nouveaux systèmes multi-antennes pour des applications en diversité à MIMO constitué une révolution pour la quatrième génération (4G)[7].



**Figure.1.10** : Modèle équivalent du canal SISO.

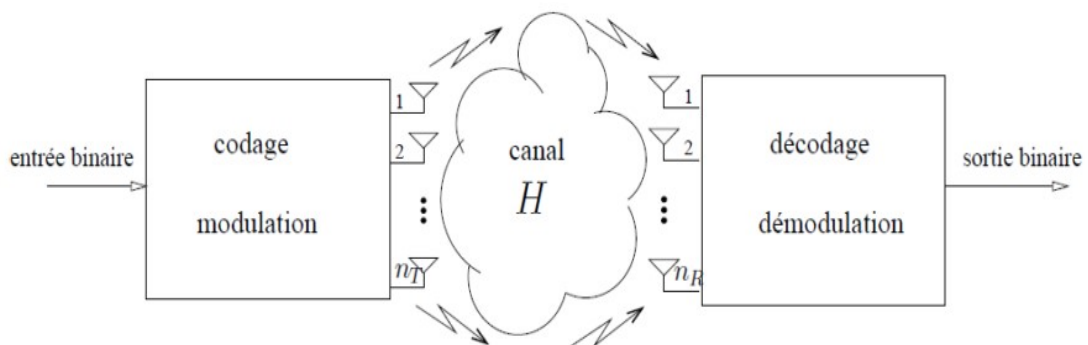
### 1.5. Les systèmes multi-antennes MIMO

Les technologies multi-antennaires ont permis l'évolution des systèmes de communication conventionnels SISO (Single Input Single Output) aux systèmes SIMO, MISO et MIMO avec des configurations respectives d'antennes multiples en réception et en émission. Néanmoins, les avantages de performances des techniques multi-antennaires sont accompagnés par des défis techniques significatifs. Un challenge important se trouve dans l'utilisation d'antennes multiples dans le lien descendant des réseaux mobiles pour des configurations SIMO et MIMO. La taille globale d'un terminal mobile, et plus proprement dit, le volume restreint alloué pour les antennes dans le terminal mobile, force les antennes à être faiblement espacées. Par conséquent, ces antennes souffrent d'une forte corrélation, d'un couplage mutuel important et d'une faible isolation qui limitent leurs performances. De plus, les antennes intégrées dans les terminaux mobiles actuels sont conçues pour être multi-bandes qui, en raison de l'espace limité de mise en œuvre, peut dégrader l'efficacité de l'antenne, le gain du système multi-antennaire. L'utilisation pratique des terminaux mobiles représente un défi supplémentaire à la conception de systèmes multi-antennaires car c'est une exigence majeure que d'obtenir de bonnes performances dans un environnement de propagation donné tenant compte également d'un utilisateur. Il faut souligner que la présence de l'utilisateur induit à un detuning de l'antenne, l'absorption de la puissance rayonnée, affectant ainsi les performances d'efficacité et de corrélation du système multi-antennaire[1].

### 1.5.1. Présentation des systèmes MIMO

Dans un système mono-antenne, l'augmentation de la taille de la modulation et/ou de la bande de fréquence utilisée est les seules solutions pour augmenter le débit de données, avec tous les problèmes de complexité ou d'encombrement que cela entraîne. Partant du point de vue de la théorie de l'information, deux membres des laboratoires de recherche Bell, TELATAR [3] [13] et FOSHINI [3] [14], ont parallèlement et indépendamment montré que la capacité des systèmes multi-antennes augmente linéairement avec le nombre d'antennes émettrices, dépassant de manière significative la limite théorique de SHANNON [3]. L'aptitude des systèmes multi-antennes à résister aux évanouissements et aux interférences constitue par ailleurs un avantage supplémentaire indéniable. Ces découvertes ont fait des systèmes MIMO **Figure 1.11** un des domaines les plus attractifs pour les industriels, qui y voient une des technologies susceptibles de résoudre les problèmes d'encombrement et de limitation de capacité des réseaux sans fil large bande. De nombreuses études ont donc été menées, proposant de nouvelles architectures, différents algorithmes de réception ou encore des méthodes d'optimisation. On distingue principalement deux types d'architecture de systèmes multi-antennes, développées pour atteindre le même objectif de départ [3].

MIMO est utilisé dans les technologies sans fil telles que wimax -16e, WLAN-11n, 11ac, 11ad, 3GPP, 4G LTE ...etc. [12].



**Figure.1.11** : Schéma d'un système de transmission sans fil MIMO.

- L'architecture originale, connue sous le nom de BLAST visait à augmenter principalement la capacité des systèmes et a naturellement pris le nom de système spatio-temporel par couches, puisque la chaîne de symboles est directement démultiplexée sur les antennes émettrices [3].

- Afin d'améliorer la qualité de la transmission, TAROKH [3] [16] puis ALAMOUTI [3] [17] ont conçu des systèmes basés essentiellement sur la diversité, proposant un codage et un étiquetage conjoints. La redondance ainsi introduite permet alors de réduire considérablement le Taux Erreur Bit, sacrifiant une partie du gain en débit dû à la multiplicité d'antennes [3]

- **Limite de SHANNON**

Lors de transmission, la quantité d'information transmise est limitée par la capacité du canal, ainsi cette limite est indépendante de l'utilisateur, et par conséquent, impose une limite aux transmissions, cette limite est appelée : capacité de Shannon.

La limite physique imposée par le canal à la quantité d'information envoyer nous pousse à trouver une solution pour améliorer le débit, tout en gardant une complexité du matériel raisonnable.

Certaines techniques ont été utilisées pour améliorer qualitativement ou quantitativement l'information transmise, comme la technique de diversité spatiale en émission (MISO) ou la technique de diversité spatiale en réception (SIMO) [3].

### **1.5.2. Architectures et techniques MIMO**

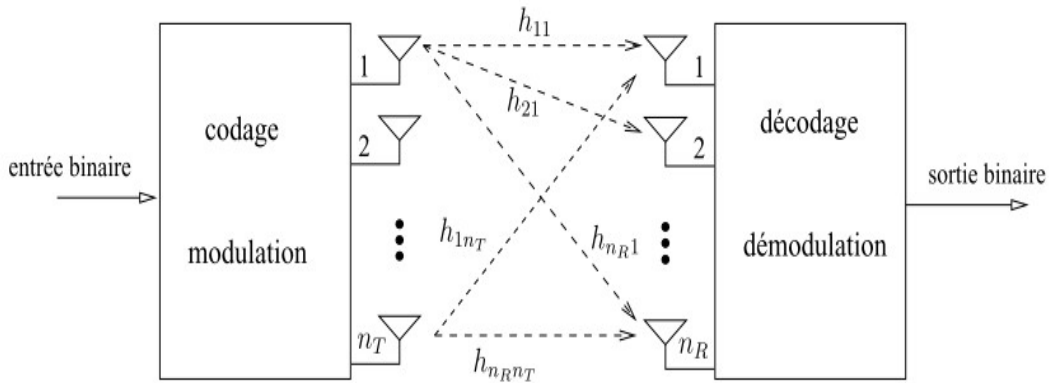
Nous pouvons distinguer plusieurs configurations dans les différents dispositifs d'antenne. Cependant ces architectures et particulièrement l'architecture MIMO, utilisent différentes fonctions de traitement de signal, afin de permettre une meilleure performance du dispositif d'antenne [3].

Les architectures MIMO ont ainsi été développées parallèlement, allant du multiplexage spatial aux codes spatio-temporels et proposant toutes une amélioration incroyable des performances des systèmes de transmission. Cependant, cette technologie multi-antennes ne fonctionne pas dans tous les milieux et doit respecter bon nombre de contraintes. Elle est de plus en pleine expansion avec les innovations affluentes. Cette partie a donc pour objectif d'une part de lever quelques restrictions propres à ces systèmes spatio-temporels et d'autre part d'optimiser leurs performances [18] [19] [5].

Considérons un système MIMO avec  $n_R$  récepteurs et  $n_T$  émetteurs. On suppose que la bande de fréquence utilisée pour la transmission est assez étroite pour que le canal soit non sélectif en fréquence. Chaque trajet entre une antenne émettrice et une antenne réceptrice peut alors être caractérisé par un gain complexe  $h_{ji}$  représentant le coefficient d'évanouissement entre le  $i^e$  émetteur et le  $j^e$  récepteur **fig. 1.12**. A la réception, chaque antenne reçoit la somme des symboles  $s_i$  transmis simultanément par chacune des  $n_T$  antennes émettrices. Le signal  $r_j$  reçu par la  $j^e$  antenne peut par conséquent s'écrire de manière discrète [5] :

$$r_j = \sum_{i=1}^{n_T} h_{ji} s_i + v_j \quad (1.6)$$

Où  $v_j$  représente un échantillon du bruit qui perturbe le signal, généralement considéré comme BBAG.



**Figure.1.12 :** Représentation des différents trajets dans un système MIMO.

Si l'on considère à présent l'ensemble des symboles reçus simultanément par les antennes, le système peut s'écrire sous la forme matricielle suivante [5]:

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{v} \quad (1.7)$$

où  $\mathbf{H}$  est la matrice de canal de taille  $n_R \times n_T$  définie par l'ensemble des trajets [5]:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1n_T} \\ h_{21} & \cdots & h_{2n_T} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{n_R 1} & \cdots & h_{n_R n_T} \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

$\mathbf{s}$  est le vecteur émis de taille  $n_T \times 1$  et  $\mathbf{v}$  est le vecteur de bruit de taille  $n_R \times 1$ .

### 1.5.3. Notion de Sélectivité

La notion de sélectivité [20] du canal est définie à partir du rapport entre la bande occupée par le signal et la bande de cohérence, et du rapport entre la durée d'un symbole et le temps de cohérence [3].

On aura les équations des signaux d'entrée et de sortie qui auront la forme suivante :

$$e(t) = R\{X(t)e^{j2\pi f_c t}\} \quad (1.9)$$

$$s(t) = R\{W(t)e^{j2\pi f_c t}\} \quad (1.10)$$

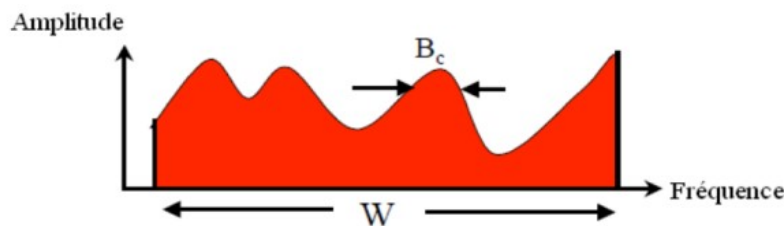
- Le message transmis est défini par :  $e(t)$ .
- L'enveloppe du message reçu est :  $X(t)$ .
- Le message reçu est défini par :  $s(t)$ .
- L'enveloppe du message reçu est :  $W(t)$ .
- La fréquence de la porteuse est représentée par  $f_c$

Quatre cas peuvent avoir lieu :

#### 1.5.3.1. Canal sélectif en fréquence

On désigne par canal sélectif en fréquences [21], un canal avec évanouissements à haut niveau de corrélation dû à des fréquences rapprochées et sans corrélation pour les fréquences bien espacées. Implicitement, ce type de canal est non sélectif en temps.

Nous parlons d'un canal sélectif en fréquence, si la largeur de bande  $B_s$  du signal à transmettre est plus grande que la bande de cohérence du canal  $B_c$ , dans ce cas la réponse impulsionnelle du canal change d'une manière significative dans les limites de la bande du signal transmis et les composantes fréquentielles du signal transmis  $e(t)$  séparées de la bande de cohérence subissent des atténuations différentes, en effet, le récepteur distingue plusieurs trajets multiples. Une sélectivité en fréquence ne fait que traduire une diminution du rapport signal sur bruit [3] **Figure 1.13**.



**Figure.1.13** : Un canal sélectif en fréquence [3].



### 1.5.3.2. Canal sélectif en temps

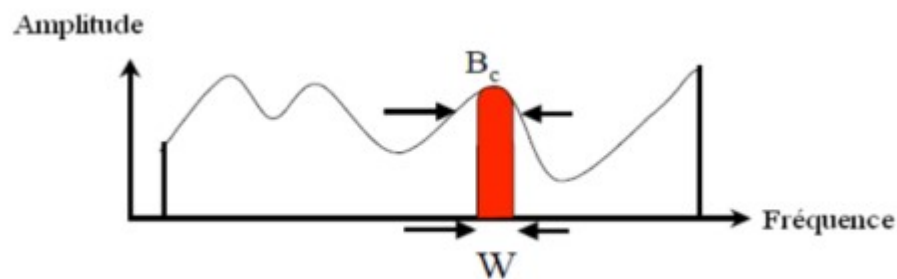
On désigne par canal sélectif en temps, un canal avec évanouissements à haute corrélation due à des temps rapprochés et sans corrélation avec espace temporel suffisant. Ce type d'évanouissement causera des interférences entre les symboles envoyés et ainsi, une dégradation de la probabilité d'erreur. Nous parlons d'un canal sélectif en temps si la durée  $T_s$  de transmission d'un symbole est plus grande que  $T_c$ [3].

### 1.5.3.3. Canal sélectif en temps et en fréquence

On déduit logiquement par les deux sous-sections précédentes que ce cas correspond à une corrélation en fonction du niveau d'espacement en temps et fréquence. Ainsi, ce type de canal est doublement dispersif. Par contre, la sélectivité en temps et en fréquence est exclusive ou indépendante. Ainsi, on doit être à la fois au-dessus des limites et sous les limites [3].

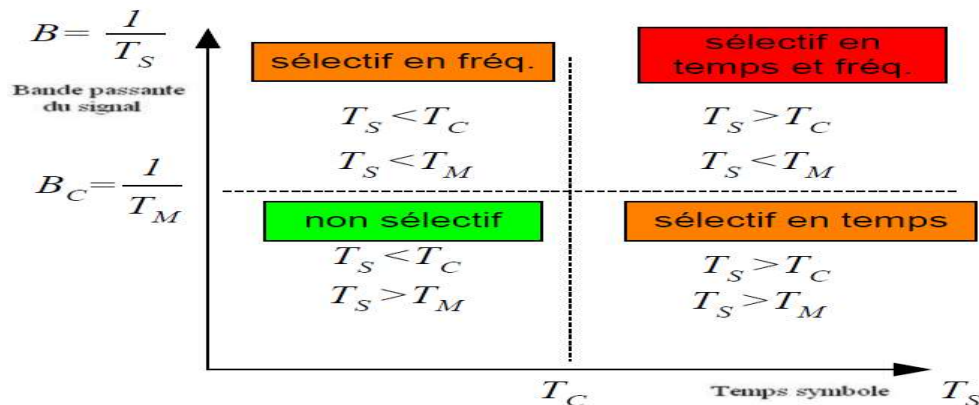
### 1.5.3.4. Canal non sélectif

Ce type de canal, bien plus simple et commun, ne démontre aucune sélectivité, que ce soit en temps ou en fréquence. Nous parlons d'un canal non sélectif, si la bande du signal  $B_s$  est très petite par rapport à la bande cohérente  $B_c$ . Autrement dit, le temps symbole  $T_s$  est largement inférieur au temps de cohérence ( $T_s \ll T_c$ ). Le canal peut être considéré comme constant pendant la transmission, le récepteur est capable de distinguer un seul trajet de propagation. Toutes les composantes spectrales du signal émis sont affectées de la même façon par le canal [3] **Figure 1.14**.



**Figure.1.14** : Comparaison montrant un canal non sélectif [3].

Le **Tableau.1.1** résume les différents types de sélectivité du canal que nous venons de présenter.



**Tableau.1.1** : Récapitulatif des différentes sélectivités [3].

#### 1.5.4. Diversité et codage

La capacité des systèmes sans fil peut être augmentée considérablement en positionnant plusieurs antennes aux deux extrémités du lien sans fil. Pour approcher cette capacité, le codage spatio-temporel (CST) a été fondé spécifiquement pour les systèmes multi-antennes. Afin d'introduire une corrélation entre les signaux transmis par le réseau d'antennes, un codage conjoint dans l'espace et dans le temps est appliqué. Cette corrélation est exploitée en réception afin de tirer partie du canal MIMO (subissant des évanouissements indépendants) et donc de minimiser les erreurs de transmission. Le CST amène un gain en diversité et en puissance pour des systèmes non-codés (sans code correcteur d'erreur) et ce, sans étendre la bande passante. Les techniques de diversité permettent d'accroître le rapport signal à bruit (RSB) et améliorent en conséquence le lien sans fil sans avoir à augmenter la puissance de transmission ou la bande passante [8]. Il existe plusieurs techniques de diversité des antennes.

##### 1.5.4.1. Techniques de diversité des antennes

###### 1.5.4.1.1. Diversité temporelle

Elle consiste à transmettre le même signal à des instants différents. La séparation temporelle est au minimum le temps de cohérence du canal. Le codage convolutif associé à un entrelaceur engendre cette diversité (redondance de l'information).

Cependant, ce traitement implique une perte sur l'efficacité spectrale en raison de la répétition du message à transmettre [8].

#### **1.5.4.1.2. Diversité fréquentielle**

Dans ce cas, plusieurs fréquences sont utilisées pour transmettre le même signal. Les fréquences doivent être suffisamment espacées pour garantir des évanouissements indépendants. La séparation en fréquences est de l'ordre de plusieurs fois la bande de cohérence du canal. La redondance de l'information induit également une perte sur l'efficacité spectrale [8].

#### **1.5.4.1.3. Diversité de diagramme**

La diversité de diagramme peut être utilisée quand les diagrammes des deux antennes sont différents. En utilisant deux antennes ayant des diagrammes de rayonnement différents, les signaux parvenant aux antennes seront de directions différentes et donc probablement indépendants [23]. La diversité en diagramme n'est jamais appliquée seule, elle est généralement combinée avec la diversité spatiale [7].

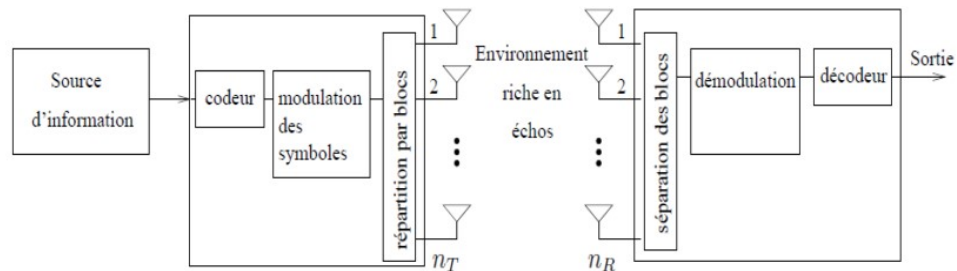
#### **1.5.4.1.4. Diversité spatiale**

Elle est appliquée en disposant plusieurs antennes à l'émission ou/et en réception. Les antennes doivent être suffisamment séparées (distance de cohérence) pour que les signaux soient non-corrélés. Cette distance de cohérence est déterminée en fonction des dimensions des antennes, de l'environnement de propagation et de la fréquence d'onde. Cette technique, plus coûteuse en matériel, n'occasionne aucune perte sur l'efficacité spectrale, comme souligné pour les deux cas précédents.

➤ Les diversités de polarisation et d'angle sont deux exemples de diversité spatiale. Pour la diversité de polarisation, le même signal est émis et reçu sur des ondes polarisées orthogonalement. Dans la diversité d'angle, plusieurs antennes au récepteur sont orientées dans des directions différentes afin de recevoir des répliques non-corrélées du signal émis. Suivant la disposition des antennes à l'émission ou en réception, la diversité spatiale peut être classée respectivement en deux catégories : diversité de transmission et diversité de réception [8].

### 1.5.4.2. Codes spatio-temporels

Les systèmes MIMO permettent des communications bien plus sûres grâce à un codage conjoint de toutes les sous-chaînes d'information qui sont transmises aux antennes. Ce codage spatio-temporel, dont l'architecture générale est présentée sur la **Figure 1.15** ajoute donc de la redondance aux données binaires émises afin d'augmenter la diversité spatiale et éviter les évanouissements propres au canal radio-mobile [3][5].



**Figure.1.15** : Architecture d'un système de codage spatio-temporel.

En revanche l'indépendance des signaux diminue proportionnellement, il est même possible de coder ceux-ci de telle sorte que le débit soit le même que pour une transmission mono-antenne. Dans ce cas les antennes multiples ne sont plus utilisées pour augmenter le débit, mais simplement pour créer la diversité spatiale nécessaire à l'acheminement d'information sur un canal particulièrement difficile [3][5].

La paternité des codes spatio-temporels est attribuée à TAROKH [16] qui proposa une forme de codes convolutifs pour systèmes MISO, créant ainsi la première famille de CST, les CST en treillis (CSTT). Cependant la popularité des CST provient surtout d'une structure ultérieure développée originellement par ALAMOUTI dans [17], Cette seconde architecture connue sous le nom de CST par blocs (CSTB) semble en effet plus intéressante, car moins complexe [3][5]. On considère par la suite le codage espace temps par bloc.

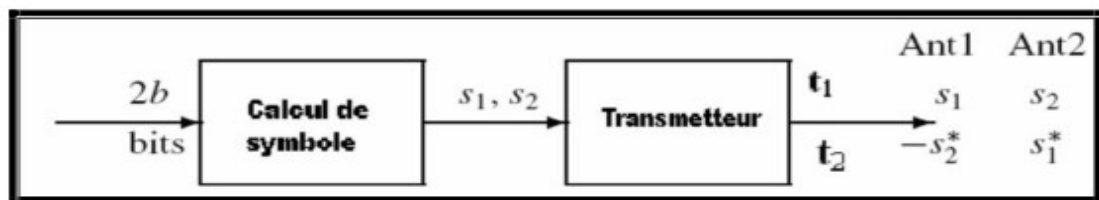
#### 1.5.4.2.1. Codes spatio-temporels par blocs

Espérant réduire la complexité exponentielle du décodeur dévolu aux CSTT, Alamouti a proposé un schéma simple de diversité d'émission [17], étendu par la suite

par Tarohk et al. [25] pour former une nouvelle classe de codes spatio-temporels: les codes spatio-temporels en blocs (CSTB), possédant le même avantage de diversité que les techniques de combinaisons des répliques à gain maximal. Les CSTB sont définis comme une opération de modulation d'un bloc de symboles à la fois dans l'espace et dans le temps, créant ainsi des séquences orthogonales transmises par des antennes émettrices différentes [3][5][9].

Le schéma original d'Alamouti **Figure 1.16** comportait deux antennes à l'émission pour atteindre un ordre de diversité égal à 2 et une seule à la réception, le tout sans aucune connaissance du canal à l'émission. La structure de codage proposée peut être représentée matriciellement sous la forme suivante[5][9]:

$$C = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} s_0 & s_1^* \\ s_1 & s_0^* \end{pmatrix} \quad (1.11)$$



**Figure.1.16** : Schéma bloc d'un émetteur à code d'Alamouti.

L'objectif de ce schéma **Figure 1.16** de codage est la diversité pure, et il n'est pas question ici d'augmentation du débit de données. Les lignes de la matrice C représentent les antennes alors que les colonnes sont les poids attribués à chaque période symbole. Comme le bloc de symboles formé par  $s_0$  et  $s_1$  est codé à la fois dans l'espace et dans le temps, le schéma a tout naturellement pris le nom de code spatio-temporel par blocs [5][9].

Les codes CSTB [26] sont définis comme une opération de modulation d'un bloc de symboles à la fois dans l'espace et dans le temps, créant ainsi des séquences orthogonales transmises par des antennes émettrices différentes. D'une manière générale, les codes spatiotemporels en bloc peuvent être vus comme le mapping d'une séquence de symboles complexes  $\{s_0, s_1, s_2, \dots, s_{n-1}\}$  en une matrice de taille  $N \times d_s$

Les symboles constituant la matrice sont transmis pendant périodes symboles et sur les  $N$  antennes d'émission, de telle sorte qu'à chaque période symbole les éléments d'une colonne sont transmis sur les  $N$  antennes.

En résumé, les codes espace-temps en bloc sont conçus de façon à maximiser le rendement du code, à réduire le temps de retard, à minimiser le nombre d'antennes mis en jeu et de maximiser le gain de diversité [3][9].

- **Codes STBC**

Les codes STB linéaires [27] sont les codes découverts par ALAMOUTI en 1998. Ces codes sont utilisables pour 2 antennes à l'émission et s'appuient sur un algorithme de décodage très simple. Ils ne nécessitent d'ailleurs qu'une seule antenne en réception.

Cette technique a été généralisée par TAROKH à un nombre arbitraire d'antennes d'émission. Néanmoins les codes obtenus, bien qu'a diversité maximale, perdent en rendement lorsque le nombre d'antennes est supérieur à 2.

A chaque opération de codage,  $N_s$  symboles de modulation sont codés par la technique STBC pour générer  $N_s$  séquences de signaux parallèles. Ces séquences sont transmises simultanément à partir de  $N_t$  antennes.

Pour le cas  $N_t = 2$  et  $N_r = 1$ , ALAMOUTI a proposé un code spatio-temporel avec  $Q = T = 2$  et donc  $R = 1$ .

A l'instant  $t = 1$ , les symboles  $s_1$  et  $s_2$  sont transmis respectivement sur les antennes 1 et 2 puis à l'instant  $t = 2$ , les symboles  $s_1^*$  et  $s_2^*$  sont transmis sur les antennes 1 et 2. Ainsi sous forme matricielle, on a:

$$C_{STBC,2} = \begin{bmatrix} s_1 & s_2^* \\ s_2 & s_1^* \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

$$[y_{11} \quad y_{12}] = [h_{11} \quad h_{12}] \cdot \begin{bmatrix} s_1 & -s_2^* \\ s_2 & s_1^* \end{bmatrix} + [n_{11} \quad n_{12}] \quad (1.13)$$

Le code présente la propriété d'être orthogonal car nous avons :

$$C_{STBC,2} \cdot C_{STBC,2}^H = (\|s_1\|^2 + \|s_2\|^2) \cdot I_2 \quad (1.14)$$

Le code d'ALAMOUTI est le seul code orthogonal complexe permettant d'atteindre la diversité maximale. Il existe seulement quelques autres codes

orthogonaux complexes ayant un rendement inférieur à 1. Par exemple pour  $N_t = 3, N_r = 1, Q = 3$  et  $T = 4$  et donc  $R = 3/4$  on a la matrice code suivante :

$$C_{STBC,3} = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & s_3 & 0 \\ -s_2^* & -s_1^* & 0 & -s_3 \\ -s_3^* & 0 & s_1^* & s_2 \end{bmatrix} \quad (1.15)$$

Il est possible de construire des codes de rendement supérieur ou égal à 1. Par exemple :  $N_t = 4$  et  $R = 1$ .

$$C_{STBC,3} = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2^* & -s_3^* & s_4 \\ s_2 & s_1^* & -s_4^* & -s_3 \\ s_3 & -s_4^* & s_1^* & -s_2 \\ s_4 & s_3^* & s_2^* & s_1 \end{bmatrix} \quad (1.16)$$

Cette matrice est obtenue à partir de deux matrices d'ALAMOUTI et d'une transformée de HADAMARD.

### 1.5.5. Capacité d'un canal MIMO

La capacité du canal, notion introduite par Shannon dans les années 40, mesure la quantité d'information maximum par unité de temps et par bande de fréquence pouvant être transmise à travers un canal particulier. Dans les années 90, Foschini et Telatar ont démontré que la capacité du canal MIMO augmente linéairement avec le nombre d'antennes[6].

Le calcul de la capacité MIMO dépend principalement de deux paramètres [9] [29] :

- \* Le modèle du canal MIMO.
- \* La distribution des puissances entre les antennes émettrices.

Dans le cas de la **figure 1.17** où nous avons un système MIMO à M émetteurs et N récepteurs, le canal MIMO est traduit par une matrice H de taille N×M dite matrice de canal [7]

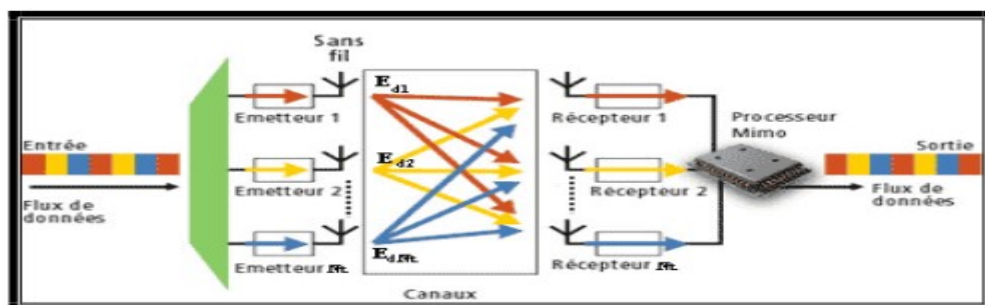


Figure.1.17 : Dispositif MIMO.

La matrice complexe  $H$  du canal peut alors s'écrire :

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdot & \cdot & h_{1M} \\ \vdots & h_{22} & \cdot & \cdot \\ h_{N1} & h_{N2} & \cdot & h_{NM} \end{bmatrix} \quad (1.17)$$

$h_{ij}$  est le gain complexe du canal entre la  $j$ -ème antenne émettrice et la  $i$ -ème antenne réceptrice.

Donc la capacité d'un canal MIMO [en bits/s/Hz] est donnée par [9] :

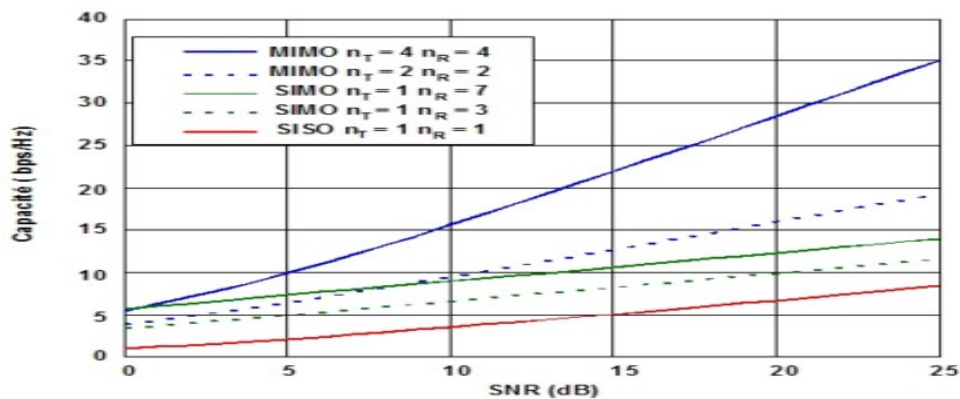
$$C = \log_2 \det [I_N + \frac{\rho}{M} H \cdot H^*] \quad (1.18)$$

$\rho$  est le rapport signal à bruit au récepteur.

Lorsque  $N$  et  $M$  sont grands, l'espérance de la capacité pour un canal de Rayleigh croît proportionnellement avec  $N$ . La capacité augmente donc beaucoup plus vite que dans les cas SISO et SIMO grâce au grand nombre d'antennes [7].

### 1.5.6. Comparaison des capacités des différents systèmes

La **Figure 1.18** représente les courbes de la capacité en fonction du SNR pour plusieurs valeurs de  $N$  et  $M$ . La capacité MIMO augmente ensuite beaucoup plus rapidement avec le SNR, pour finir avec un gain de plus de 50% à 25 dB de SNR. Nous pouvons aussi vérifier que la capacité du système MIMO à huit antennes est presque le double de celle du système à quatre antennes [7].



**Figure.1.18** : Capacité des systèmes SIMO à 4 et 8 antennes par rapport au système SISO [7].

#### Applications envisagées :

La première application connue des systèmes MIMO concerne les réseaux locaux sans fil. L'environnement intra-muros est particulièrement favorable aux systèmes de communication multi-antennes puisqu'il engendre de nombreux échos et que les



canaux de transmission varient très lentement dans le temps. Les systèmes MIMO sont appliqués actuellement dans les réseaux fixes et mobiles de 3<sup>ème</sup> (3G) et 4<sup>ème</sup> génération (4G) et seront appliqués même dans la future 5<sup>ème</sup> génération (5G)

### 1.5.7. Avantages et désavantages des systèmes MIMO

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 spatio-temporel et sans puissance supplémentaire [5].

Par ailleurs, lorsqu'on utilise plusieurs antennes à l'émission ou à la réception, la probabilité de perdre toute l'information diminue exponentiellement avec le nombre d'antennes décorréelées. C'est le phénomène de diversité spatiale et l'ordre de diversité est défini par le nombre de branches décorréelées [5].

Alors que les systèmes MIMO offrent aux utilisateurs des avantages évidents au niveau de l'application, la conception et le test des dispositifs MIMO ne sont pas sans défis majeurs. Les avantages du système tels que l'amélioration du débit de données et la résilience aux trajets multiples sont susceptibles de motiver le développement continu des systèmes de communication MIMO-OFDM [30]. Néanmoins, le simple fait de rapprocher des antennes pose des problèmes physiques (place, interactions électromagnétiques...).

### 1.5.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu que les systèmes basant sur le mode d'échange appelé systèmes mono-antennes (SISO), qui consiste à avoir une antenne à l'émission et une antenne à la réception restent très limités en terme de débit, et ne peuvent pas empêcher certains phénomènes nuisibles dus à l'environnement de propagation; c'est pourquoi les chercheurs ne cessent de proposer des solutions au problème des trajets multiples en exigeant plusieurs chemins de signaux pour accroître les débits de transmission, comme les systèmes multi-antennes (MIMO). Cette technologie (MIMO) offre un débit de données plus élevé grâce à la transmission simultanée de plusieurs symboles de données sur la même fréquence avec plusieurs antennes au

niveau de l'émetteur et du récepteur, ceci peut être utilisé pour augmenter le débit et minimiser le taux d'erreur binaire (TEB). Ces systèmes MIMO ont été proposés dans plusieurs normes de communication sans fil modernes telles que la 3GPP, et pour des applications a construit une révolution pour la quatrième génération (4G). Dans le chapitre suivant, nous allons étudier la modulation OFDM pour l'utilisation dans les systèmes de communication sans fils de la quatrième génération (4G).

**Chapitre 2**  
**Etude et principe de la**  
**modulation OFDM**  
**multi accès**

## 2.1. Introduction

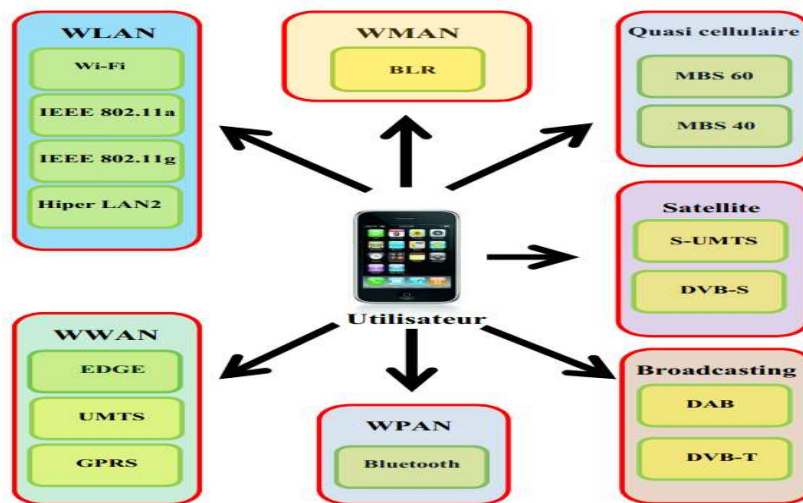
Depuis longtemps, des techniques de multiplexage en fréquence ont existé et consistaient à transmettre des données numériques simultanément en les modulant sur un grand nombre de porteuses ce sont des techniques qu'on appelle multi porteuses. Le regain d'intérêt actuel réside dans l'amélioration apportée pour augmenter l'efficacité spectrale en «orthogonalisant» les porteuses, ce qui permet d'obtenir un meilleur recouvrement spectral, c'est la modulation OFDM. L'implémentation de la modulation et de la démodulation s'effectue à l'aide de circuits performants basée sur la transformée de Fourier rapide (FFT) [10] et son inverse(IFFT). L'OFDM est utilisé dans les réseaux sans fil et les réseaux cellulaires de la quatrième génération (4G), sans oublier la télévision numérique. Et en fin Il aborde les avantages, et les problèmes posés par l'OFDM dans les systèmes radios et les techniques permettant de les compenser.

La première génération des systèmes de communication mobiles sans fil 1G a été introduite dans les années 70 et la deuxième génération 2G dans les années 80 ont été principalement destinée à la transmission de la voix. Les premiers systèmes avaient utilisé la modulation de fréquence analogique alors que la seconde avait utilisé des techniques de communication numérique avec multiplexage temporel (TDM), multiplexage en fréquence (FDM) ou le Code Division Multiple Access (CDMA). Les systèmes sans fil de troisième génération qui sont juste introduites dans les marchés mondiaux offrent des débits de données beaucoup plus élevés, et permet des améliorations significatives par rapport aux systèmes 2G. Les systèmes sans fil 3G ont été proposées pour fournir des services vocaux, de radiomessagerie et fournir des interactifs multimédias, y compris l'accès à l'internet, la téléconférence et d'autres services. Toutefois, ces systèmes offrent un réseau (WAN) large de couverture étendue, de débit de 384 kbps à 2 Mbps. Ainsi la prestation de services à large bande serait l'un des principaux objectifs des systèmes sans fil 4G [11].

## 2.2. La 4ème génération des réseaux de mobiles

### 2.2.1. Définition de la quatrième génération

La définition de la 4G a évolué comme une nouvelle vague d'efforts pour transporter les données à grande capacité. L'union internationale des télécommunications (UIT), qui supervise le développement de la plupart des normes de générations cellulaires, a récemment publié une déclaration soulignant que la 4G n'est pas défini. En réponse, les opérateurs mobiles avec des architectures 3G avancées ont commencé la commercialisation des services «4G». De toute évidence, les ingénieurs ne veulent pas du commerçant d'usurper la vision d'une amélioration d'un ordre de grandeur à chaque génération d'architectures cellulaires, encore, les commerçants veulent tirer parti de la dernière tendance, tandis que cela semble encore ésotérique, les différentes technologies sans fil sont représentées dans la **figure 2.1** suivante [11]:



**Figure.2.1** : Les différentes technologies d'accès sans fil pour l'utilisateur 4G.

### 2.2.2. Les conditions techniques pour réaliser la quatrième génération de mobiles

Afin de répondre aux différents besoins des utilisateurs, la quatrième génération de mobiles doit satisfaire les conditions techniques suivantes [11]:

- La majorité de personnes peuvent accéder à la voix ou aux bases de données de services qui sont fournis par les réseaux mobiles.

- Le réseau mobile peut être attaché entièrement à l'Internet en raison de son concept de base (exemple: VoIP).
- Le réseau peut s'auto-organiser.
- Le système peut maintenir les paramètres de QoS (qualité de services).
- Le paramètre de la disponibilité de communication dans le réseau doit converger vers 100%.
- Une interface universelle de software/hardware pourrait être normalisée ce qui devrait faciliter le développement de nouveaux services sans aucun problème.

### **2.2.3. Caractéristiques des systèmes sans fil 4G**

Voici quelques fonctionnalités possibles des systèmes 4G [11]:

- 1- Prise en charge multimédia interactives, voix, vidéo, Internet sans fil et autres services large bande.
- 2- Haute vitesse, grande capacité et à faible coût.
- 3- La mobilité mondiale, la portabilité des services, réseaux mobiles évolutifs.
- 4- Des communications transparentes, la variété de services basés sur la qualité de service (QoS)
- 5- Une meilleure planification et des techniques de contrôle d'admission d'appel robustes.

### **2.2.4. Buts de la 4G**

Les principaux objectifs visés par les réseaux de 4<sup>ème</sup> génération sont les suivants [11][12]:

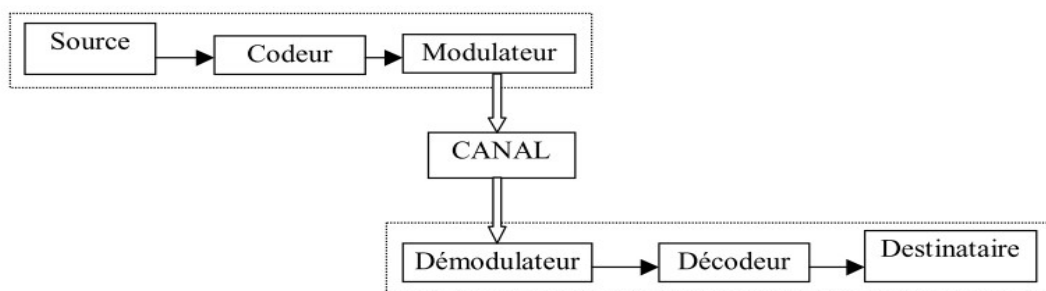
- 1- Assurer la continuité de la session en cours.
- 2- Réduire les délais et le trafic de signalisation.
- 3- Fournir une meilleure qualité de service.
- 4- Optimiser l'utilisation des ressources.
- 5- Réduire le délai de relève, le délai de bout-en-bout, la gigue et la perte de paquets.
- 6- Minimiser le coût de signalisation. Avant d'entamer le chapitre nous allons faire un rappel sur les communications numériques.

### 2.3. Systèmes de communication numérique

Les systèmes de communication numérique véhiculent de l'information entre une source et un destinataire en utilisant un support physique comme le câble, la fibre optique ou encore, la propagation sur un canal radioélectrique. Les signaux transportés peuvent être soit directement d'origine numérique, comme dans les réseaux de données, soit d'origine analogique (parole, image...) mais convertis sous une forme numérique. La tâche du système de transmission est d'acheminer l'information de la source vers le destinataire avec le plus de fiabilité possible.

Le schéma synoptique d'un système de transmission numérique est donné à la **figure 2.2** où l'on se limite aux fonctions de base [13]:

- 1- La source émet un message numérique sous la forme d'une suite d'éléments binaires.
- 2- Le codeur peut éventuellement supprimer des éléments binaires non significatifs (compression de données ou codage de source), ou au contraire introduire de la redondance dans l'information en vue de la protéger contre le bruit et les perturbations présentes sur le canal de transmission (codage de canal). Le codage de canal n'est possible que si le débit de source est inférieure à la capacité du canal de transmission (la probabilité d'erreur  $P_e$  tend dans ce cas vers 0 d'après les travaux de Hartley - Shannon).
- 3- La modulation a pour rôle d'adapter le spectre du signal au canal (milieu physique) sur lequel il sera émis.
- 4- Enfin, du côté récepteur, les fonctions de démodulation et de décodage sont les inverses respectifs des fonctions de modulation et de codage situées du côté émetteur.



**Figure.2.2** : Schéma d'un système de transmission numérique.

Les trois caractéristiques principales permettant de comparer entre elles les différentes techniques de transmission sont les suivantes [13]:

- 1- La probabilité d'erreur  $P_e$  par bit transmis permet d'évaluer la qualité d'un système de transmission. Elle est fonction de la technique de transmission utilisée, mais aussi du canal sur lequel le signal est transmis. Il est à noter que  $P_e$  est une valeur théorique dont une estimation non biaisée au sens statistique est le Taux d'Erreur par Bit TEB.
- 2- L'occupation spectrale du signal émis doit être connue pour utiliser efficacement la bande passante du canal de transmission. On est contraint d'utiliser de plus en plus des modulations à grande efficacité spectrale.
- 3- La complexité du récepteur dont la fonction est de restituer le signal émis est le troisième aspect important d'un système de transmission

### 2.3.1. Les Modulation Numériques

La modulation a pour objectif d'adapter le signal à émettre au canal de transmission. Cette opération consiste à modifier un ou plusieurs paramètres d'une onde porteuse **Eq(2.1)** centrée sur la bande de fréquence du canal [13].

$$S(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (2.1)$$

Les paramètres modifiables sont [13]:

- L'amplitude :  $A$
- La fréquence :  $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$
- La phase:  $\varphi_0$

Dans les procédés de modulation binaire, l'information est transmise à l'aide d'un paramètre qui ne prend que deux valeurs possibles.

Dans les procédés de modulation M-aire, l'information est transmise à l'aide d'un paramètre qui prend M valeurs. Ceci permet d'associer à un état de modulation un mot de  $n$  digits binaires. Le nombre d'états est donc  $M = 2^n$ . Ces  $n$  digits proviennent du découpage en  $n$  paquets de  $n$  digits du train binaire issu du codeur.

Les types de modulation les plus fréquemment rencontrés sont les suivants [13]:

- Modulation par Déplacement d'Amplitude MDA. (Amplitude Shift Keying ASK).
- Modulation par Déplacement de Phase MDP. (Phase Shift Keying PSK).



- Modulation par Déplacement de Phase Différentiel MDPD. (Differential Phase Shift Keying DPSK).
- Modulation d'amplitude de deux porteuses en quadrature MAQ. (Quadrature Amplitude modulation QAM)
- Modulation par Déplacement de Fréquence MDF. (Frequency Shift Keying FSK).

### 2.3.2. Définitions et appellations

- Un symbole est un élément d'un alphabet. Si  $M$  est la taille de l'alphabet, le symbole est alors dit  $M$ -aire. Lorsque  $M=2$ , le symbole est dit binaire. En groupant, sous forme d'un bloc,  $n$  symboles binaires indépendants, on obtient un alphabet de  $M = 2^n$  symboles  $M$ -aires. Ainsi un symbole  $M$ -aire véhicule l'équivalent de  $n = \log_2 M$  bits.
- La rapidité de modulation  $R$  se définit comme étant le nombre de changements d'états par seconde d'un ou de plusieurs paramètres modifiés simultanément. Un changement de phase du signal porteur, une excursion de fréquence ou une variation d'amplitude sont par définition des changements d'états.

La "rapidité de modulation"  $R = \frac{1}{T}$  s'exprime en "bauds".

- Le débit binaire  $D$  se définit comme étant le nombre de bits transmis par seconde. Il sera égal ou supérieur à la rapidité de modulation selon qu'un changement d'état représentera un bit ou un groupement de bits.

Le "débit binaire"  $D = \frac{1}{T_b}$  s'exprime en "bits par seconde".

Pour un alphabet  $M$ -aire, on a la relation fondamentale :  $T = nT_b$  soit  $D = n R$ . Il y a égalité entre débit de source et rapidité de modulation uniquement dans le cas d'une source binaire (alphabet binaire).

La qualité d'une liaison est liée au taux d'erreur par bit [13]:

$$T.E.B = \frac{\text{nombre de bits faux}}{\text{nombre de bits transmis}} \quad (2.2)$$

On notera la différence entre  $P_e$  et  $TEB$ . Au sens statistique, on a

$P_e = E(TEB)$ .  $TEB$  tend vers  $P_e$  si le nombre de bits transmis tend vers l'infini.

- L'efficacité spectrale d'une modulation se définit par le paramètre  $\eta = \frac{D}{B}$  et s'exprime en "bit/seconde/Hz". La valeur  $D$  est le "débit binaire" et  $B$  est la

largeur de la bande occupée par le signal modulé. Pour un signal utilisant des symboles M-aires, on aura [13]:

$\eta = \frac{1}{T.B} \log_2 M \text{bit/sec/Hz}$ . Remarquons que pour  $B$  et  $T$  donnés, l'efficacité spectrale augmente, comme on pouvait s'y attendre, avec le nombre de bit/symbole  $n = \log_2 M$ . C'est en effet la raison d'être de la modulation M-aire

## 2.4. Méthodes d'accès radio

La communication entre deux MS nécessite l'utilisation de deux liens radio parallèles : un lien montant UL (UpLink) pour toutes les communications allant du terminal mobile vers la station de base et un lien descendant DL (DownLink) pour transporter les informations dans le sens contraire [14].

Deux méthodes sont utilisées pour permettre la séparation de la transmission UL et DL. Ce sont la division duplex par fréquence (FDD Frequency Division Duplex) et la division duplex par le temps (TDD Time Division Duplex)[14].

### 2.4.1. Division Duplex par fréquence (FDD)

Avec la division duplex par fréquence FDD, le UL et le DL utilisent chacun une bande de fréquence différente. L'espace entre les deux bandes de fréquence pour l'UL et la DL est appelé comme distance duplex. Elle est constante pour toutes les stations mobiles dans une même norme. D'une façon générale la bande de fréquence du DL est placée à une fréquence plus élevée que la bande de l'UL. De cette manière on limite la consommation des équipements mobiles. Plus la fréquence est élevée, plus la consommation est forte [14].

### 2.4.2. Division Duplex par le temps (TDD)

Dans le cas de la division duplex par le temps (TDD), l'UL et le DL se partagent la même bande de fréquence. Ceci est fait en divisant la bande en time slots (TS) et trame. Une trame contient un nombre spécifique  $n$  de time slots (TS). Un certain nombre de ces  $n$  times slots sont réservés pour la transmission UL (moitié des times slots dans les systèmes 2G) et le reste pour la transmission DL. La durée d'une trame détermine la répétition cyclique de la transmission correspondante UL/DL.

La transmission UL et DL se produit quasi simultanément, c'est-à-dire. la durée d'une trame est généralement dans la gamme d'un certain nombre de ms.

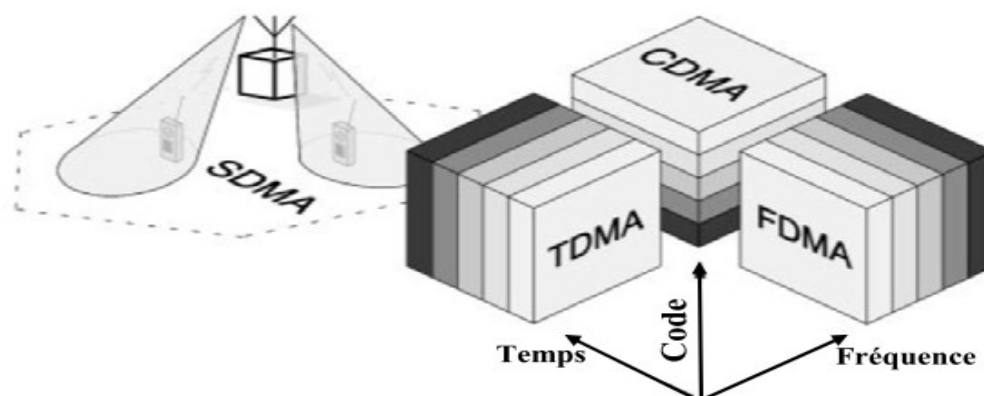
TDD est principalement employée pour la transmission des données des systèmes mobiles de communications de la 2ème génération (pour les transmissions numériques). La transmission numérique simplifie la compression de la parole et de données. En conséquence, seulement une fraction du temps nécessaire pour la transmission analogue est exigée pour la transmission numérique des données d'un abonné.

Pour un opérateur donné, le nombre de canaux est limité. Il est alors impensable de réserver en permanence une paire de canaux à chaque abonné. D'où la nécessité de définir des méthodes afin de permettre à tous d'accéder au réseau. Ces méthodes sont souvent appelées «méthodes d'accès multiples » [14].

## 2.5. Techniques d'accès multiples

L'accès multiple est une manière efficace de partager les ressources de communication en bande passante et en temps pour augmenter la capacité d'un réseau de communication en nombre d'utilisateurs. Cette technique de partage doit être mise en œuvre sans créer des interfaces nuisibles aux performances des systèmes. La condition nécessaire pour éviter les interférences d'accès multiple est l'orthogonalité entre les signaux des différents utilisateurs [3].

Il existe essentiellement quatre formes d'accès multiple ou multiplexage sont présenté dans la **Figure 2.3** [6]:



**Figure.2.3** : Différentes techniques d'accès multiples.

- Les systèmes d'accès multiples sont basés sur l'orthogonalité des signaux.
- Le signal radio électrique est fonction de la fréquence, du temps et du code de l'utilisateur :

$$s(f, t, c) = s(f, t)c(t) \quad (2.3)$$

$s(f, t)$  est fonction de la fréquence et du temps,  $c(t)$  est fonction du code

- ✓ FDMA : Les différents utilisateurs partagent la même durée temporelle et sont séparés par des mêmes intervalles de bandes fréquentielles régulières  $\Delta f$ .
- ✓ TDMA : Les différents utilisateurs partagent la même bande fréquentielle et sont séparés par des mêmes intervalles de temps réguliers  $\Delta t = T_s$ .
- ✓ CDMA : Les différents utilisateurs partagent la même durée temporelle et la même bande fréquentielle et sont séparés par des codes orthogonaux.
- ✓ SDMA : Dans cette technique on attribue à chaque utilisateur (ou groupe d'utilisateurs) un secteur qui lui est propre. Le faisceau radioélectrique est dirigé uniquement vers l'utilisateur  $j$  considéré à l'aide de coefficients de pondérations d'un système à base de réseau d'antennes adaptatif (intelligent) [6].

La première méthode utilisée par les systèmes analogique est la répartition en temps TDMA (Time Division Multiple Access). Par la suite, avec les systèmes numériques, apparaît la répartition en fréquence FDMA (Frequency Division Multiple Access). La dernière méthode est la répartition par étalement spectral CDMA (Code Division Multiple Access) où un code permet de répartir l'accès à notre interface unique. Bien que ce soit le dernier utilisé pour les applications civiles, il est connu de longue date par les militaires [14].

Enfin, une nouvelle technique d'accès multiple c'est la WDMA. Pour cette technique, le multiplexage se fait en longueurs d'onde c'est-à-dire que chaque utilisateur émet sur une longueur d'onde différente. Les signaux en sortie des modulateurs sont multiplexés et émis sur la fibre .A la réception ,pour extraire la signal qui correspond à un utilisateur donne ,il sera nécessaire de disposer d'un filtre optique [15].

Il y'a une autre technique d'accès multiple qui est l'association entre la FDMA et l'OFDM appelée OFDMA que nous allons utiliser par la suite dans nos simulation donc son spectre est comme celui d'une modulation OFDM et part les différentes sous

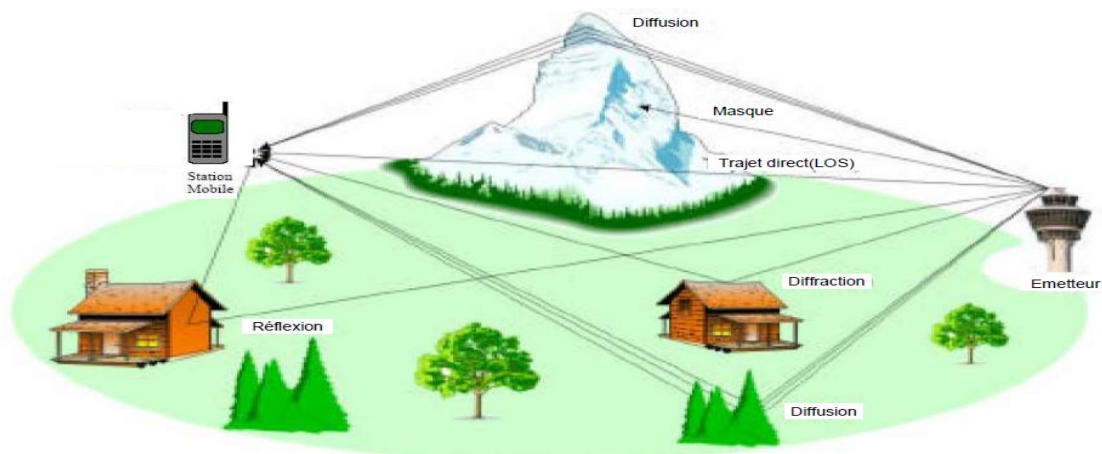
portuses sont assignées à plusieurs utilisateurs pour permettre une transmission multiutilisateurs.

Pour ne pas encombrer le mémoire nous n'allons pas détailler les différentes techniques multiutilisateurs car elles sont disponibles sur internet et dans les livres.

## 2.6. Canal à trajets multiples

Avant d'exposer le principe de la modulation multi-porteuse, nous allons donner quelques caractéristiques du canal pour lequel ce type de modulation est intéressant. Les premières applications ont concerné la diffusion du son numérique dans la canal radio mobile: c'est l'exemple de ce canal que nous prenons, en n'omettant pas le fait que le modèle de ce canal peut aussi s'appliquer à d'autres canaux très perturbés [16]. Le signal émis sous forme d'onde subit de nombreuses réflexions, en particulier en milieu urbain où le récepteur reçoit une série d'échos de provenances diverses et imprévisible. Ces échos d'amplitudes variables introduisent de retards variable

**Figure 2.4.**



**Figure.2.4 :** Propagation par multi-trajets.

### 2.6.1. 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 [16]:

$$h(t) = \sum_i h_i \delta(t - \tau_i) \quad (2.4)$$

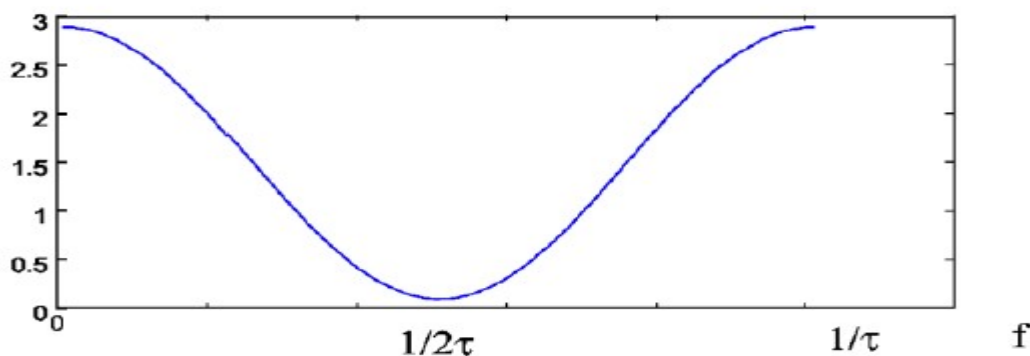
Sa fonction de transfert est donc :

$$H(f) = \sum_i h_i e^{-2j\pi f t_i} \quad (2.5)$$

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

$$h(t) = 1 + \alpha\delta(t - \tau) \text{ et } |H(f)|^2 = 1 + \alpha^2 + 2\alpha\cos 2\pi f\tau \quad (2.6)$$

La fonction de transfert a l'allure suivant :



**Figure.2.5** : fonction de transfert d'un canal comportant un retard [16].

On remarque que la fonction de transfert **figure.2.5** 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  $1/2 \cdot \tau$  (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 [16].

### 2.6.1.1. 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 [16]:

- 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.

### 2.6.1.2. Effet des trajets multiples

De façon générale, supposons que le signal émis s'écrive [16]:

$$s(t) = R_e[s_1(t)e^{2j\pi f_c t}] \quad (2.7)$$

$f_c$  étant la fréquence porteuse.

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

$$x(t) = \sum \alpha_n(t)s(t - \tau_n(t)) \quad (2.8)$$

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 :

$$x(t) = R_e\{\sum[\alpha_n(t)e^{-2j\pi f_c \tau_n(t)}s_1(t - \tau_n(t))]\}e^{2j\pi f_c t} \quad (2.9)$$

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 :

$$c(t, \tau) = \sum \alpha_n(t)e^{-2j\pi f_c \tau_n(t)} \delta(\tau - \tau_n(t)) \quad (2.10)$$

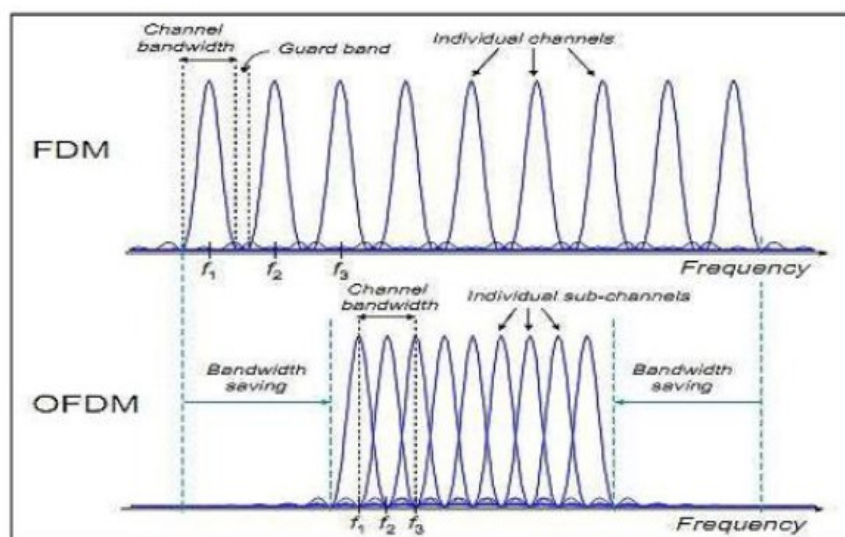
Le canal de transmission constitue le problème central auquel il faut faire face dans les différentes solutions de transmission proposées. Lorsqu'on envoie un symbole à travers le canal, celui-ci sera reçu sous forme de versions superposées retardées et atténuées ce qui peut générer de l'interférence 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].

## 2.7. OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

L'origine de l'OFDM est un développement de la FDM depuis les années 1950

**Figure 2.6.** L'OFDM est une technique de modulation numérique qui joue sur

l'efficacité et la rentabilité de transmission dans le canal radio mobile pour un environnement multi-trajets. L'OFDM transmet les données en utilisant un grand nombre de porteuses pour une bande étroite. L'espace de fréquence et de synchronisation de la porteuse est choisi de telle sorte que les porteuses sont orthogonales pour éviter les interférences. Pour l'implémentation de l'OFDM on utilise la FFT (Fast Fourier Transform), qui est la base de cette technique. La première utilisation de l'OFDM est en 1980 dans les systèmes DAB (Digital Audio Broadcasting), et DVB (Digital Video Broadcasting). Pour ces deux derniers systèmes il y a une seule direction de la station de base vers les utilisateurs. Notre but est l'utilisation de l'OFDM dans les réseaux de communication sans fil pour des applications multi-utilisateurs. Ces applications incluent dans les réseaux WLAN (Wireless Local Area Network), WLL (Wireless Local Loop) et le téléphone mobile de la 4G [17].



**Figure.2.6 :** Différence entre le technique FDM et OFDM [10].

OFDM est en fait un cas particulier de la FDM. Pour FDM, il n'y a aucune relation spéciale entre fréquences porteuses,  $f_1$ ,  $f_2$  et  $f_3$  [10].

### 2.7.1. Conception du système OFDM

L'idée de base de l'OFDM est de diminuer le débit des données sur chacune des sous porteuse, alors la durée du symbole augmente, et par conséquent le multi-trajet est éliminé. D'autre part, une valeur élevée du CP permet un bon résultat, mais cause



une perte d'énergie due à l'insertion du CP. Un compromis doit être trouvé pour une conception raisonnable [18].

### 2.7.1.1. Hypothèses de Conception

La conception d'un système OFDM, dépend des hypothèses suivantes [18]:

1. **Largeur de bande disponible** : La bande disponible est la ressource rare qui permet de déterminer le nombre des sous porteuses à utiliser.
2. **Débit requis** : Le système OFDM doit supporter le débit requis par les utilisateurs.
3. **Étalement du retard tolérable** : L'étalement du retard dépend de l'environnement de l'utilisateur (Indoor, Outdoor), La longueur du CP est déterminé selon l'étalement tolérable.
4. **Valeur Doppler** : Dépendant de la vitesse de déplacement de l'utilisateur. Le déplacement Doppler doit être pris en compte.

### 2.7.1.2. Paramètres de conception d'un system OFDM

Les paramètres de conception d'un système OFDM sont [18]:

1. **Nombre de sous porteuses**: L'augmentation du nombre des sous porteuses diminue l'effet du multi-trajet mais augmente la complexité de la synchronisation.
2. **Intervalle de garde CP et durée du symbole** : Un bon rapport entre l'intervalle de garde CP et la durée du symbole est nécessaire pour éviter les multi- trajets et en même temps réduire la perte d'énergie due au CP. En pratique, L'intervalle de garde CP doit être deux à quatre fois plus grand que la variance des retards (RMS delay spread). La durée du symbole OFDM doit être plus grande que Le CP afin de minimiser la perte du SNR, et aussi pour contenir plus de sous porteuse.

En revanche, plus de sous porteuses nécessité une charge de calcul plus importante au niveau de l'émetteur et du récepteur et par conséquent, augmente le coût et la complexité des équipements.

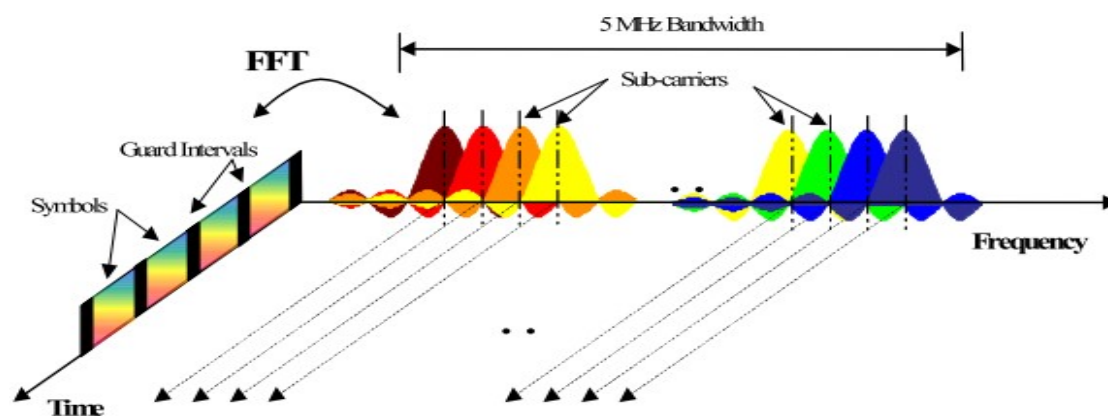
3. **Espacement entre sous porteuses**: Ce paramètre dépend essentiellement de la largeur de la bande allouée et du nombre de sous canaux requis, à condition que la synchronisation soit réalisable.

4. **Type de modulation par sous porteuse** : Les performances des systèmes OFDM dépend du type de la modulation utilisée. Il est à noter que les modulations différentielles présentent des performances intéressantes surtout pour la complexité de la démodulation.
5. **Codage FEC** : Le choix du codage FEC doit assurer que le canal soit robuste vis avis des erreurs aléatoires.
6. **Egalisation**: L'égalisation du canal radio peut se faire dans le domaine temporel ou dans le domaine fréquentiel. En effet, la complexité des égaliseurs (c.à.d. le nombre de coefficients  $N_{taps}$ ) est proportionnelle à  $\log_2(N_{taps})$  dans le domaine fréquentiel, alors qu'il augmente linéairement avec  $N_{taps}$  dans le domaine temporel. Comme l'OFDM est recommandée pour les canaux à large étalement de retard, le nombre de coefficients des égaliseurs est alors important; par conséquent l'égalisation fréquentielle est la mieux indiquée.

## 2.7.2. Principe et fonctionnement de l'OFDM

### 2.7.2.1. Principe de l'OFDM

Le principe de l'OFDM est de transmettre les informations sur plusieurs porteuses orthogonales entre elles, ainsi le spectre du signal présente une occupation optimale de la bande allouée. Comme le montre la **figure.2.7**, l'OFDM découpe le canal en cellule selon les axes du temps et des fréquences. A chaque cellule fréquence/temps est attribuée une porteuse dédiée. L'information à transmettre est répartie sur l'ensemble de ces porteuses, modulée chacune à faible débit par une modulation du type QPSK ou QAM. Un symbole OFDM comprend l'ensemble des informations contenues dans l'ensemble des porteuses à un instant  $t$ [17].



**Figure.2.7 :** Représentation fréquentielle et temporelle d'un signal OFDM [17].

La technique de transmission OFDM est basée sur l'émission simultanée sur  $n$  bandes de fréquence (situées entre 2 et 30 MHz) de  $N$  porteuses sur chaque bande. Pour le cas de la **figure.2.7** la bande allouée est de 5 MHz. Le signal est réparti sur les porteuses. Les fréquences de travail sont choisies en fonction des réglementations, les autres sont « éteintes » de manière logicielle. Le signal est émis à un niveau assez élevé pour pouvoir monter en débit, et injecté sur plusieurs fréquences à la fois. Si l'une d'elles est atténuée le signal passera quand même grâce à l'émission simultanée [17].

### 2.7.2.2. Fonctionnement de l'OFDM

Les modulations multi porteuses comme l'OFDM consistent à répartir les Symboles sur un grand nombre de porteuses à bas débit, à l'opposé des systèmes conventionnels qui transmettent les symboles en série, chaque symbole occupant alors toute la bande passante disponible.

Ainsi dans le cas de l'OFDM, pour un train de symboles initial de période,  $T_{Si}$ , les Symboles seront répartis en  $N$  trains plus lents et auront alors une durée  $T_S = N \cdot T_{Si}$ . Cette diminution du rythme symbole entraîne une diminution des interférences entre symboles d'un rapport  $N$ . Ainsi pour un débit symbole de 10M symboles/s transmis sur un canal radio de réponse impulsionnelle  $250\mu s$ , un symbole interfère avec  $K = \frac{250}{0.1} = 2500$  symboles.

Le processus d'égalisation s'effectue alors par bloc et est très complexe. En revanche, en répartissant ces symboles sur  $N = 2048$  porteuses, moins de 2 symboles sont en interférence, ce qui simplifie énormément l'égalisation [19].

### 2.7.2.3. Principe de la modulation

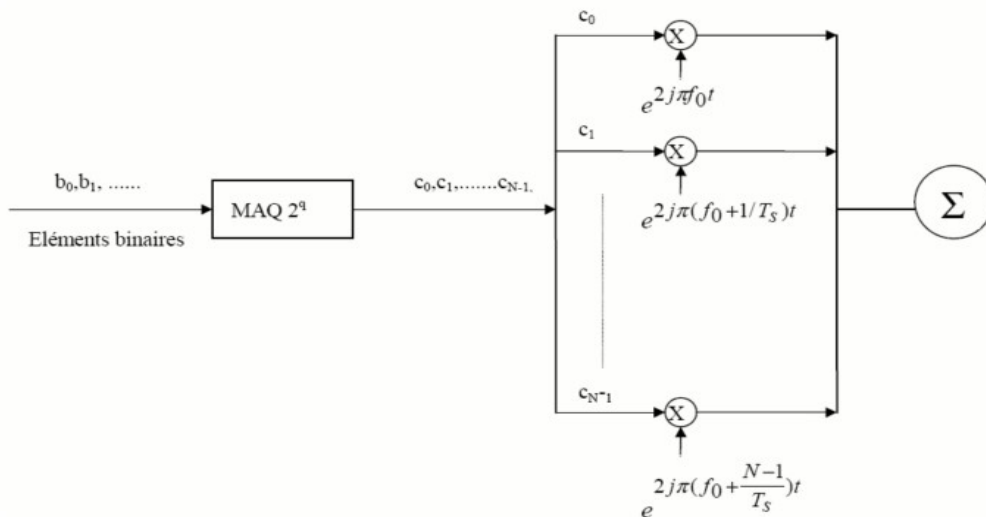
Pour répartir les données à transmettre sur les  $N$  porteuses, on groupe les symboles  $c_k$  par paquets de  $N$ . Les  $c_k$  sont des nombres complexes définis à partir des éléments binaires par une constellation souvent de modulation MAQ à 4, 16, 64,  $2^q$  états.

La séquence de  $N$  symboles  $c_0, c_1, \dots, c_{N-1}$  constitue un symbole OFDM. Le  $k$ -ième train de symboles parmi les  $N$  trains module un signal de fréquence  $f_k$ . Le signal modulé du train  $k$  s'écrit sous forme complexe [19]:

$$c_k e^{2j\pi f_k t}$$

Le signal total  $s(t)$  correspondant à l'ensemble des  $N$  symboles réassemblés en un symbole OFDM **Figure 2.8** [19]:

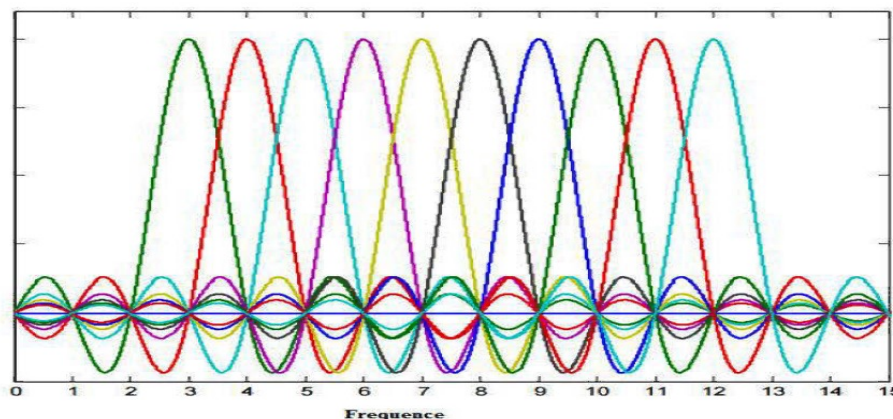
$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{2j\pi f_k t} \quad (2.11)$$



**Figure.2.8** : Schéma de principe du modulateur OFDM.

Les fréquences sont orthogonales si l'espace entre deux fréquences adjacentes  $f_k$  et  $f_{k+1}$  est  $\frac{1}{T_S}$ . En effet chaque porteuse modulant un symbole pendant une fenêtre rectangulaire temporelle de durée  $T_S$ , son spectre en fréquence est un sinus cardinal, fonction qui s'annule tous les multiples  $\frac{1}{T_S}$  **Figure 2.9**.

$$F_K = f_0 + \frac{k}{T_S} \quad (2.12)$$



**Figure.2.9** : Spectre en sortie du modulateur OFDM [19].

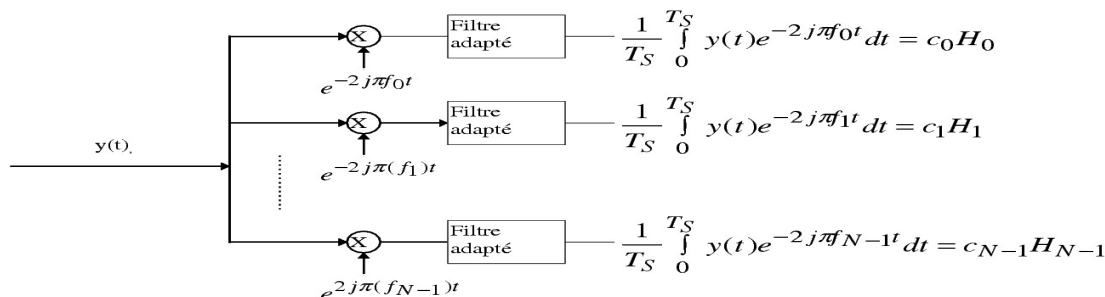
Ainsi, lorsque l'échantillonnage est effectué précisément à la fréquence  $f_k$  d'une sous-porteuse, il n'y a aucune interférence avec les autres sous-porteuses. C'est ce qui permet de recouvrir les spectres des différentes porteuses et d'obtenir ainsi une occupation optimale du spectre. Le nombre de sous-porteuses  $N$  est choisi de manière à remplir les deux conditions primordiales  $T_s \gg T_m$  afin de pouvoir considérer le canal plat, et  $T_s \ll \frac{1}{B_d}$  [19].

### 2.7.2.4. Principe de la démodulation

Le signal parvenu au récepteur s'écrit sur une durée symbole  $T_s$  [19]:

$$y(t) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k H_k(t) e^{2j\pi(f_0 + \frac{k}{T_s})t} \tag{2.13}$$

$H_k(t)$  est la fonction de transfert du canal autour de la fréquence  $f_k$  et à l'instant  $t$ . Cette fonction varie lentement et on peut la supposer constante sur la période  $T_s$  ( $T_s \ll \frac{1}{B_d}$ ). La démodulation classique consisterait à démoduler le signal suivant les  $N$  sous-porteuses suivant le schéma classique **Figure 2.10**.



**Figure.2.10** : Schéma de principe du démodulateur OFDM.

### 2.7.2.5. Implantation numérique du modulateur

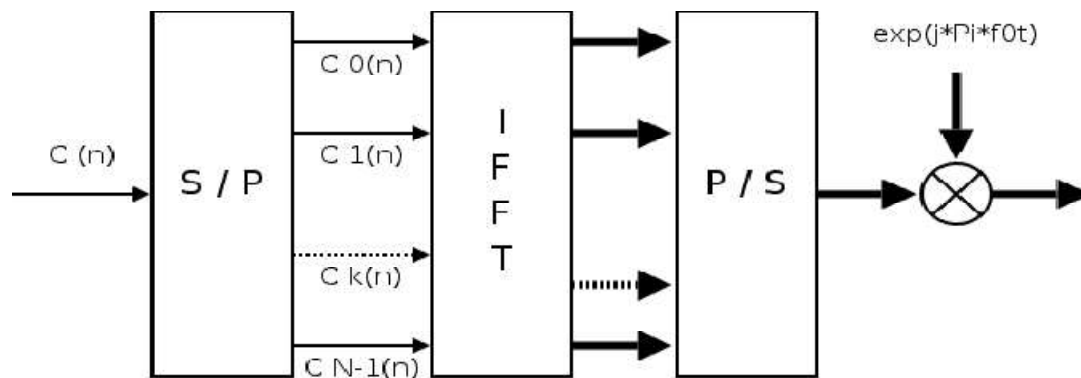
L'analyse algébrique indique que le signal de sortie  $s(t)$  est sous la forme [19]:

$$s(t) = e^{2j\pi f_0 t} \cdot \sum_{K=0}^{N-1} c_k e^{2j \frac{kt}{T_s}} \quad (2.14)$$

En discrétisant ce signal et en le ramenant en bande de base pour l'étude numérique on obtient une sortie  $s(n)$  sous la forme [19]:

$$s_n = \sum_{K=0}^{N-1} c_k e^{2j \frac{kn}{T_s}} \quad (2.15)$$

Les  $s(n)$  sont donc obtenus par une transformée de Fourier inverse discrète des  $c(k)$ . En choisissant le nombre de porteuses  $N$  tel que  $N = 2^n$ , le calcul de la transformée de Fourier inverse se simplifie et peut se calculer par une simple IFFT nous conduisant au schéma numérique suivant **Figure.2.11** [19]:



**Figure.2.11** : Modulateur OFDM numérique.

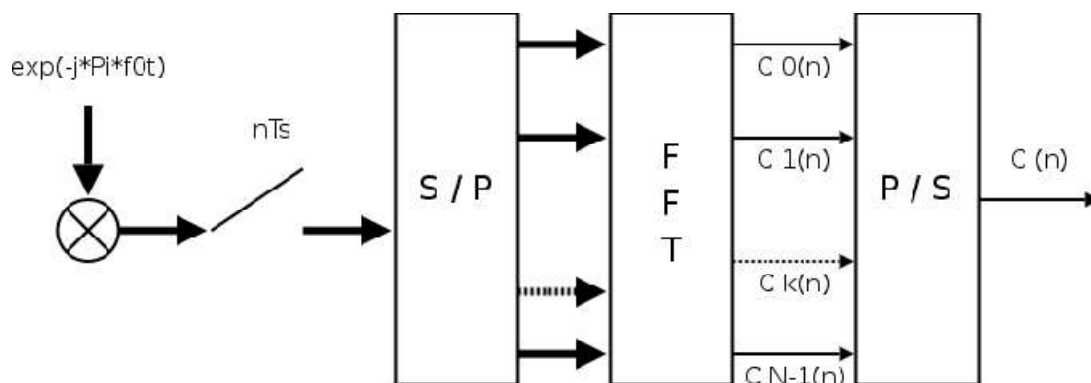
### 2.7.2.6. Implantation numérique du démodulateur

L'analyse théorique définit le signal discrétisé reçu au niveau du démodulateur sous la forme [19]:

$$z(t_n) = z\left(\frac{nT_s}{N}\right) = z_n = \sum_{K=0}^{N-1} c_k H_K e^{2j\pi \frac{kn}{T_s}} \quad (2.16)$$

$z(n)$  est la transformée de Fourier discrète inverse de  $c_k H_k$ , la démodulation consiste donc à effectuer une transformée de Fourier directe discrète. Le nombre de porteuses

ayant été choisi tel que  $N = 2^n$ , on peut réaliser ce calcul à l'aide d'une FFT. On obtient alors le schéma de principe suivant **Figure 2.12** [19]:

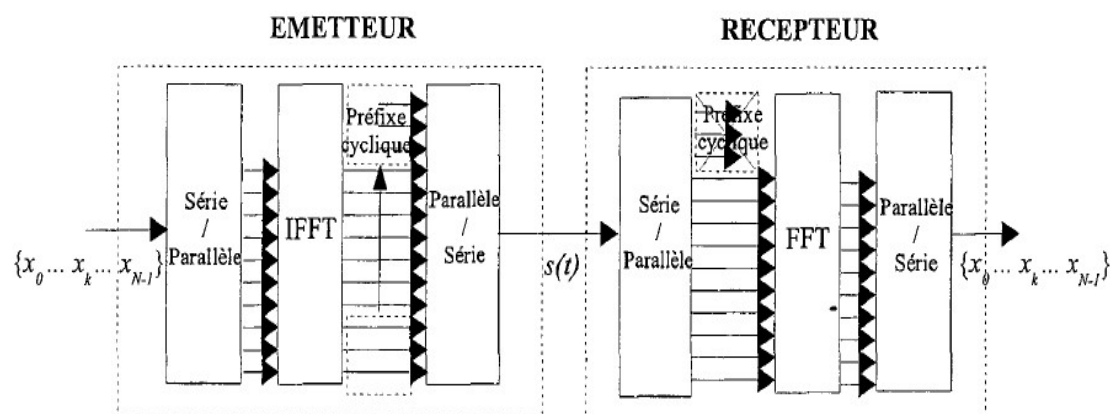


**Figure.2.12** : Démodulateur OFDM numérique.

## 2.8. Chaîne de communication OFDM basique

La **Figure.2.13** montre l'exemple d'une chaîne de communication OFDM basique. De façon pratique, l'OFDM est employée dans le DVB-T (plusieurs modes de transmissions préconisés, spécifiant notamment un nombre de sous-porteuses et une taille d'intervalle de garde). On retrouve également l'OFDM comme technique de transmission dans la norme 802.11 (802.11 a et 802.11 g).

Le récepteur est constitué des éléments duaux de ceux de l'émetteur: on emploie une FFT (Fast Fourier Transform) afin de retrouver les symboles émis à l'origine [20].



**Figure.2.13** : Chaîne de communication simplifiée OFDM [20].

Cette technique ne constitue pas une technique multi-accès en soi, il faut pour cela lui associer une technique de séparation des utilisateurs. Ainsi, dans la forme la plus simple de l'OFDM, chaque utilisateur utilise toutes les sous-porteuses disponibles durant un intervalle de temps qui lui est attribué. Dans ce cas, il faut parler d'OFDM-TDMA, afin de spécifier le caractère d'accès multiple. Il est possible de modifier et d'adapter la structure de l'OFDM afin de changer l'accès multiple employé. On peut utiliser la technique OFDMA pour avoir l'accès multiple, cette dernière est utilisée dans les systèmes de 4<sup>ème</sup> génération tels que le WiMax fixe et mobile et la 4G LTE. Il y'a aussi la solution bien connue qui consiste à coupler l'OFDM avec la technique multi-accès DS-SS-CDMA. On distingue notamment deux techniques hybrides issues de cette association, qui diffèrent par la façon dont est appliqué le code utilisateur sur le signal : il s'agit des techniques MC-SS-CDMA (Multi Carrier Code Division Multiple Access) et MC-DS-SS-CDMA (Multi Carrier Direct Sequence Code Division Multiple Access) [20]. Comme on l'a dit plus haut on va s'intéresser uniquement à la technique d'accès multiple OFDMA. Donc tout ce qui est dit à propos de l'OFDM est applicable pour l'OFDMA.

### 2.8.1. Bande de garde

Un symbole OFDM. Dans le domaine fréquentielle, est la somme des sous porteuses, chacune, représentée par un signal en sinus cardinal (Sinc). Cette somme résulte en un débordement du spectre du signal OFDM, ce qui engendre une interférence avec les spectres adjacents. C'est pour cette raison qu'une bande de garde est ajoutée des deux côtés du spectre du signal OFDM pour minimiser les interférences avec les spectres adjacents. Il y a principalement deux façons de réduire le débordement du spectre [21]:

- 1- L'utilisation d'un filtre passe-bande : ceci induit une complexité plus élevée pour avoir un filtrage acceptable. Une alternative à cela est l'utilisation d'une fenêtre dans le domaine temporel, comme la fenêtre en cosinus surélevé.
- 2- L'utilisation de porteuses virtuelles : ce sont des sous-porteuses qui ne sont pas utilisées. Elles sont ajoutées sur les bords de la bande du signal OFDM, réduisant, ainsi, le débordement du spectre. Cependant, ceci a pour effet latéral de dégrader l'efficacité spectrale d'un taux égale à  $N_{used}/N_{FFT}$ ,  $N_{FFT}$  étant le nombre total de sous-porteuses, et  $N_{used}$  le nombre de sous-porteuses utilisées pour la



transmission de l'information utile.

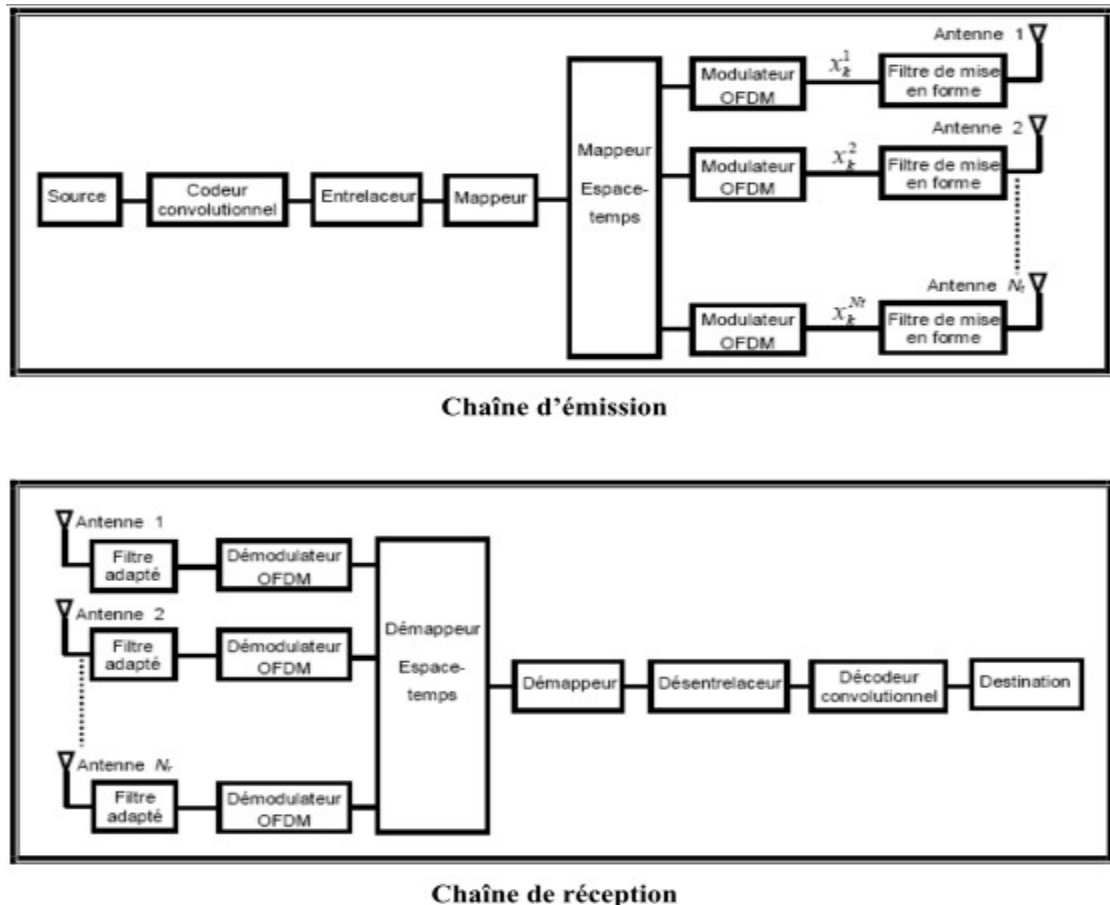
L'insertion de l'intervalle de garde a deux objectifs. Le premier est d'absorber l'IES apportée par le canal de propagation et de rendre le canal non sélectif en fréquence pour chaque sous porteuse. Pour cette raison, la taille de l'intervalle de garde doit être choisie plus grande que l'étalement maximal des retards. Le deuxième objectif est de rendre cyclique la convolution entre le signal OFDM et le canal. Pour cela, la fin du signal est recopiée dans l'intervalle de garde : le signal OFDM devient ainsi cyclique d'où le nom du préfixe cyclique. Dans le schéma OFDM, c'est l'ajout de cette extension cyclique à chaque bloc qui permet de prendre en compte le caractère sélectif du canal [22].

## 2.9. Système de transmission MIMO associé à une modulation OFDM

Les techniques multi-antennes multi porteuses MIMO-OFDM ont été à la base des systèmes de téléphonie mobile en raison de leur robustesse et de leur efficacité spectrale. La combinaison du MIMO et de l'OFDM permet d'exploiter les avantages des deux méthodes : la robustesse de la liaison sur des canaux sélectifs en fréquence pour l'OFDM et la robustesse sur des canaux non corrélés en espace pour les MIMO avec codage.

### 2.9.1. Présentation détaillé du système MIMO-OFDM

Une des techniques les plus efficaces pour améliorer l'efficacité spectrale (capacité ou débit binaire) d'une communication radio, est l'utilisation d'antennes multiples à l'émission et à la réception. Nous considérons un système MIMO utilisant la modulation OFDM, où l'émetteur et le récepteur sont munis respectivement de  $N_t$  et  $N_r$  antennes. Les antennes sont disposées, de la façon la plus communément utilisée, appelée en anglais Uniform Linear Array (ULA), c'est-à-dire elles sont alignées et uniformément espacées. La distance relative entre deux antennes adjacentes est donnée par :  $\Delta = 1/2 \lambda$ , où  $\lambda$  est la longueur d'onde. La **Figure 2.14** présente le schéma de la chaîne de transmission du système MIMO/OFDM considérée dans ce chapitre [9].



**Figure.2.14 :** Le système de transmission MIMO/OFDM.

Nous décrivons à présent le parcours suivi par le message depuis sa génération par la source jusqu'à sa destination [9]:

- 1- Le message généré par la source est d'abord transformé en une séquence binaire. Idéalement nous désirons avoir le minimum de bits erronés possible. Cette opération de conversion d'un signal analogique en un signal numérique est assurée par un processus de compression appelé le codeur source. Dans toute le mémoire, le codeur source n'est pas pris en compte lors de l'étude des performances des systèmes MIMO. Ainsi la chaîne de transmission se délimite par le codeur canal et le décodeur canal de part et d'autre du canal de transmission.
- 2- La séquence binaire résultante est ensuite passée au codeur canal. Le but du codeur canal est de la protéger contre les effets du canal (bruits, interférences, etc.). Ainsi, le codeur introduit d'une façon contrôlée des bits de redondance qui peuvent être utilisés au niveau du récepteur. Ensuite, la séquence binaire passe à

travers un entrelaceur afin que la transmission soit plus robuste aux atténuations en bloc (*block fading*) du canal.

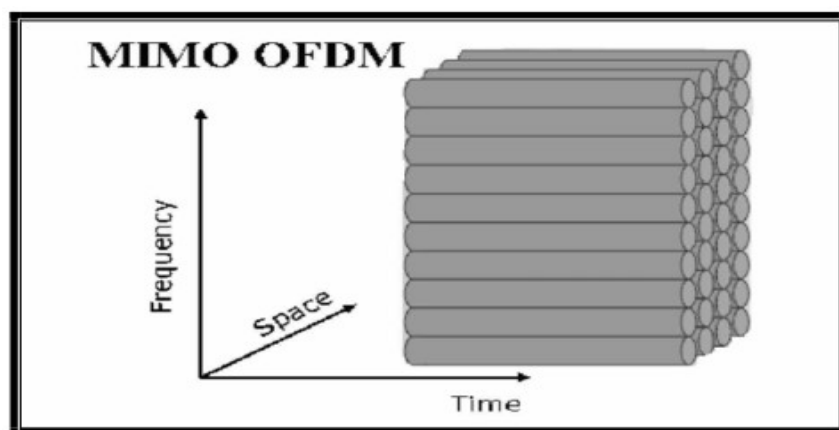
- 3- La séquence binaire entrelacée passe à travers un modulateur numérique. Ce dernier associe à chaque séquence de  $b$  bits un symbole complexe selon une constellation de taille  $2b$ . Par exemple, nous citons la modulation binaire à décalage de phase dite (BPSK), la modulation à décalage de phase en quadrature (QPSK), la modulation d'amplitude en quadrature (QAM).
- 4- Les symboles complexes sont par la suite mappés afin qu'ils soient transmis sur les  $N_t$  antennes de transmission et à travers les ressources orthogonales du canal. Comme le système MIMO étudié considère la modulation OFDM, nous disposons à l'entrée du canal de  $M_{N_t}$  échantillons à émettre, ainsi l'utilisation d'un modulateur spatio-temporel s'avère une bonne idée afin de profiter des ressources en espace, temps et fréquence présentes.
- 5- Finalement, les symboles passent à travers le modulateur OFDM avant d'être filtrés par le filtre limiteur de bande (passe bande).
- 6- Le signal analogique résultant est transmis à travers le canal radio, où il se trouve affecté par les atténuations dues aux réflexions et aux réfractions du signal dans le milieu de propagation.
- 7- A la réception, le récepteur à antennes multiples est constitué d'un filtre adapté au filtre limiteur de bande (passe bande) utilisé à l'émission, du démodulateur OFDM, du décodeur spatio-temporel, du démodulateur numérique, du décodeur canal et du décodeur source.

### 2.9.2. Capacité du système MIMO-OFDM

Les systèmes de transmission de type MIMO permettent d'atteindre des capacités très importantes grâce à l'exploitation de la diversité spatiale du canal. Mais la transmission est limitée par la durée symbole qui doit être grande devant la durée de la réponse impulsionnelle du canal, ce qui limite le débit dans le cas d'un canal avec de longs échos. L'utilisation d'une modulation OFDM classique dans un système MIMO permet de s'affranchir de cette contrainte simplement en assurant un temps de garde supérieur au dernier écho du canal. Nous supposons que l'émetteur (avec  $M$  antennes) et le récepteur (avec  $N$  antennes) sont parfaitement synchronisés et que l'instant de décision est optimal. De même le canal est supposé avoir été estimé par le récepteur et

la puissance totale émise est équirépartie entre les  $M$  émetteurs. Nous montrons que le système MIMO/OFDM équivalent en bande de base peut être vu comme  $P$  branches parallèles et indépendantes d'un système MIMO mono porteuse. Le principe d'un système MIMO-OFDM est présenté à la **Figure 2.15**.

Les données à émettre sont démultiplexées en  $M$  voies indépendantes, pour être émises sur chaque antenne via un modulateur OFDM. En réception, le signal de chaque sous porteuse est séparé, antenne par antenne, à l'aide de  $N$  démodulateurs OFDM. Pour chaque sous porteuse, le signal des différentes antennes est démodulé avec un récepteur MIMO classique. Au final les données des  $P$  récepteurs MIMO sont multiplexées dans l'ordre initial. Le canal MIMO large bande est modélisé par  $P$  matrices  $H_p$  ( $N \times M$ ), chaque matrice correspondant à la réponse du canal. pour la fréquence du  $p^e$  sous porteuse. Si  $S_p$  est le vecteur symbole émis par la  $p^e$  sous porteuse, alors le vecteur reçu correspondant par la suite de l'application des codes espace- temps sur chaque sous canal [9].



**Figure.2.15** : L'OFDM appliquée aux MIMO [9].

Le modèle du signal pour la  $p^e$  sous porteuse s'écrit de la façon suivante:

$$r_p = H_p s_p + n_p \quad (2.17)$$

La capacité théorique représente la capacité du canal, calculée

$$C = 1/p \sum_{p=1}^p C_p \quad (2.18)$$

$C_p$  représentant la capacité du canal pour la sous porteuse  $p$ . Elle est obtenue de la façon suivante :

$$C_p = \xi \log_2 (1 + \rho_p ) \quad (2.19)$$

Où  $\rho_p$  le RSB de la sous-porteuse  $p$  et  $\xi = T_U / (T_U + \Delta)$  qui tient compte de la perte d'efficacité spectrale dans le temps de garde.

La capacité  $C_p$  étendue au canal MIMO-OFDM est donnée par :

$$C_p = \xi \log_2 (\det[I_N + \rho_p H_p H_p^* ]) \quad (2.20)$$

D'un point de vue théorie de l'information, la capacité d'un système MIMO-OFDM est égale à la capacité du canal MIMO sélectif en fréquence (en faisant abstraction de la perte en efficacité spectrale due à l'insertion de l'intervalle de garde). L'intérêt de L'association MIMO-OFDM réside dans le fait que cette modulation élimine le phénomène de l'IES donc à la réception le signal sera optimiser et nous aurons une bonne qualité de signal, pour cela nous allons voir cette amélioration dans la partie de simulation en mesurant le taux d'erreur bit (TEB) [9].

## 2.10. Les applications MIMO-OFDM actuelles

Les systèmes : HiperLAN/2, WIFI et les systèmes de téléphonie mobile tels que le WiMax et la 4G LTE utilisent la technologie MIMO-OFDM afin d'augmenter le débit de transmission et améliorer la qualité de transmission.

Les systèmes MIMO-OFDM sont par exemple proposés pour le standard de réseau local sans fil IEEE 802.11n où l'objectif était d'atteindre des débits de 100 mégabits par seconde pour les applications vidéo [9].

### 2.10.1. Avantages et inconvénients de l'OFDM

La technique OFDM est désormais une technique populaire qui est adoptée par plusieurs standards. Cette technique, à l'instar de toute technique de communication, a ses avantages et ses inconvénients.

Les principaux avantages de l'OFDM sont [21]:

- ✓ L'efficacité spectrale : avec l'OFDM, il y a la possibilité d'augmenter le nombre des sous-porteuses utilisées sans pour autant, augmenter la bande de fréquence utilisée, tant que l'orthogonalité entre les sous-porteuses est préservée.

- ✓ Implémentation simple : l'implémentation de l'OFDM nécessite une simple IFFT-FFT.
- ✓ Complexité réduite du récepteur : Puisque l'OFDM transforme un canal sélectif en fréquence, en plusieurs sous canaux à évanouissement plat, l'égalisation devient très simple au niveau du récepteur.
- ✓ Convenable pour les transmissions à haut débit.

Les principaux inconvénients de l'OFDM sont [21]:

- ✓ Rapport du pique à la puissance moyenne du signal très élevé comparé au système à une seule porteuse : Ceci requiert des amplificateurs avec une très large plage de linéarité.
- ✓ Sensibilité aux erreurs de synchronisation temporelle et fréquentielles
- ✓ Pertes en efficacité, dues à l'ajout des sous-porteuses virtuelles dans le domaine fréquentiel ainsi que l'intervalle de garde dans le domaine temporel.

## 2.11. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur la technologie de la 4ème génération (4G) et abordé une étude théorique de ses techniques de base de la modulation de l'OFDM. À la suite de cette étude, nous avons conclu que l'OFDM est utilisé pour la transmission à haute vitesse à travers les radiofréquences dans les environnements à trajets multiples. L'information est divisée en petits ensembles de données, dont chacune est affectée à des porteurs orthogonaux. L'avantage de ce processus est sa capacité à récupérer les informations transmises même si plusieurs résonances affectent la transmission sans fil. Cette technologie de modulation peut être adoptée par les systèmes de communication sans fil 4G qui fournissent aux utilisateurs des services multimédias asymétriques supplémentaires.

Le prochain chapitre sera consacré à la simulation et au calcul de la performance du système multi-antennes multi porteuses de quatrième génération à base de l'OFDMA.

**Chapitre 3**  
**Simulations et calcul**  
**des performances d'un**  
**systeme de 4<sup>eme</sup>**  
**génération multi-**  
**antennes.**

### **3.1. Introduction**

La conception matérielle d'un système de communication complexe de la quatrième génération (4G) multi-antennes, tel un système MIMO-OFDM nécessite d'établir les valeurs et le choix des paramètres du système pour des bonnes performances. Nous avons présenté aux chapitres précédents les systèmes multi-antennes qui étaient combinés avec la technique de modulation OFDM multi accès que nous voulions simuler ainsi que certains paramètres qui pourraient influencer les résultats. Les performances d'un système de transmission sont principalement évaluées par son aptitude à résister aux perturbations. Dans ce dernier chapitre, nous allons faire des simulations sous l'environnement MATLAB pour comparer les performances de différentes configurations MIMO-OFDM, en matière de taux d'erreur binaire (TEB) et le rapport du signal au bruit (SNR) sous différentes conditions, en supposant que le canal est parfaitement connu par le récepteur.

#### **3.1.1. La démarche de simulation**

La démarche consiste à commenter les résultats obtenus de la simulation des codes sous MATLAB pour les systèmes de communication numérique multi-antennes multi-accès et multi-porteuses .Ce qui nous permet de simuler et calculer les performances d'un système de quatrième génération. L'objectif est de démontré les étapes suivies dans la conception d'un simulateur MIMO-OFDM ou MIMO-OFDMA par MATLAB, la validation est par la suite des résultats obtenus. Nous établirons une comparaison des performances des systèmes de type MIMO-OFDM à accès multiple utilisant la modulation numérique QPSK, par rapport aux ces paramètres critiques qui sont le rapport BER en fonction du SNR.

### **3.2. Notions de bases**

#### **3.2.1. Choix d'un logiciel de simulation**

L'amélioration des performances radio des systèmes de télécommunication est une tâche complexe nécessitant l'utilisation d'outils de simulation spécialisés. Dans notre étude, sachant que nous sommes intéressés par les systèmes cellulaires actuels comme



la quatrième génération qui fait partie des réseaux mobiles. Nous allons ensuite discuter de la sélection de l'émulateur de réseau sélectionné pour produire les résultats, selon différents scénarios. En général, le programme de simulation comprend un large éventail de technologies et aide les utilisateurs à créer des réseaux d'outils complexes. Il existe une variété de simulateurs, et puisque nous voulons simuler et calculer les performances de notre système 4G multi-antennes, MATLAB est l'option la plus logique. Nous avons conçu un ensemble de programmes de simulation que nous allons utiliser dans l'environnement MATLAB.

### **3.2.2. Notion de base sur MATLAB**

MATLAB est un logiciel commercial de calcul numérique/scientifique, visualisation et programmation performant et convivial développé par la société The MathWorks Inc. Le nom de MATLAB vient de MATrix LABoratory, les éléments de données de base manipulés par MATLAB étant des matrices de dimension quelconque (tableaux n-D, pouvant se réduire à des matrices 2D, vecteurs et scalaires) qui ne nécessitent ni déclaration de type ni dimensionnement (typage dynamique). Contrairement aux langages de programmation classiques (scalaires), les opérateurs et fonctions MATLAB permettent de manipuler directement ces tableaux (donc la plupart du temps sans programmer de boucles), rendant ainsi MATLAB particulièrement efficace en calcul numérique, analyse et visualisation de données en particulier. MATLAB est disponible sur les systèmes d'exploitation standards (Windows, GNU/Linux, Mac OS X...) [23].

### **3.2.3. Plate-forme de simulation**

Il est maintenant impératif de décrire notre plate-forme de simulation MATLAB, afin que tous les paramètres soient bien définis. Premièrement, nous considérerons que l'échantillonnage et la synchronisation seront parfaits, puisque notre étude ne se concentre pas sur ces paramètres et nous ne voulons pas qu'ils viennent interférer dans l'analyse de nos résultats. De plus, il n'y aura pas de codage canal et la largeur de bande de notre canal sera de 25 MHz. Nous assumerons que celui-ci sera pseudo statique, c'est-à-dire constant pour tout un bloc de symboles OFDM, mais indépendant et différent des autres blocs. Nous simulerons 20 blocs de 200 symboles,

ce qui nous donnera des courbes satisfaisantes tout en ayant un temps de simulation acceptable, considérant les nombreuses courbes que nous voulons obtenir.

### 3.2.4. Taux d'erreur binaire (BER)

Le taux d'erreur binaire (BER) constitue le paramètre primaire décrivant la qualité de la transmission numérique. Il se définit comme le rapport entre les bits erronés et le nombre total de bits reçus. Ce taux détermine le nombre d'erreurs apparues avant la modulation et juste après la démodulation, il augmente à cause des perturbations : équipement ou réseau défectueux, pointage incorrect d'une antenne, longueur de canal, etc. [10][4].

$$BER = \frac{\text{Nbre\_d'éléments\_binaire\_faux}}{\text{Nbre\_d'éléments\_binaire\_émis}} \quad (3.1)$$

### 3.2.5. Rapport signal sur bruit (SNR)

Ce terme fait référence au signal démodulé perçu après le processus de démodulation. Le bruit total est celui extrait du réseau de transmission plus le bruit intégré au signal de modulation sous la forme de bruit d'amplitude, de bruit phase et d'interférence inter symboles ainsi que d'autres dégradations de la modulation [10].

On le calcule à l'aide de l'une ou l'autre des formules représentées ci-dessous [10]:

$$\left(\frac{S}{N}\right) (db) = 10 \log \frac{p_S}{p_N} \quad (3.2)$$

$$\frac{S}{N} = \frac{p_S}{P_N} \quad (3.3)$$

$p_S$  : Puissance du signal en W.

$P_N$  : Puissance de bruit en W.

### 3.2.6. Schéma de principe d'un système OFDM

La **figure 3.1** illustre une chaîne de transmission d'un système OFDM utilisant des blocs réels[24]

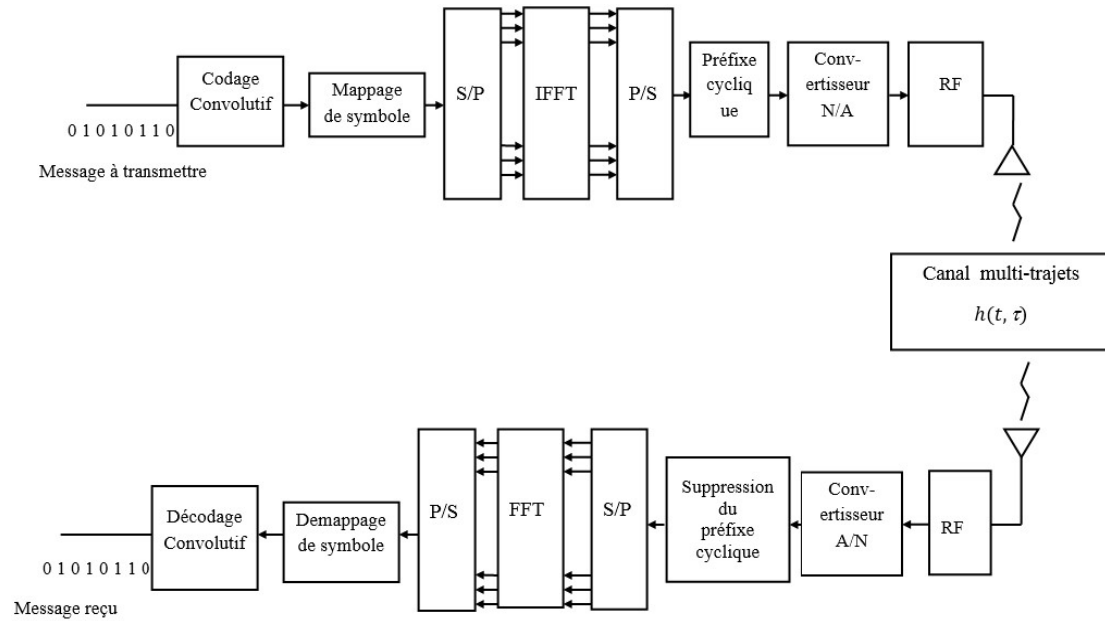


Figure.3.1 : Schéma de principe de l'émetteur et du récepteur d'un système OFDM [24].

### 3.2.7. Système MIMO-OFDM

Nous avons mentionné dans le chapitre précédent que les systèmes à large bande sans fil, les canaux MIMO sont fortement affectés par l'évanouissement sélectif de la fréquence. Pour y remédier, MIMO peut être intégré au système OFDM pour générer le système MIMO-OFDM. MIMO-OFDM est la base de la 4G, puisque MIMO peut atteindre un gain de diversité et améliorer la capacité du système, et OFDM peut atténuer les effets de l'évanouissement sélectif des fréquences **Figure 3.2**[24].

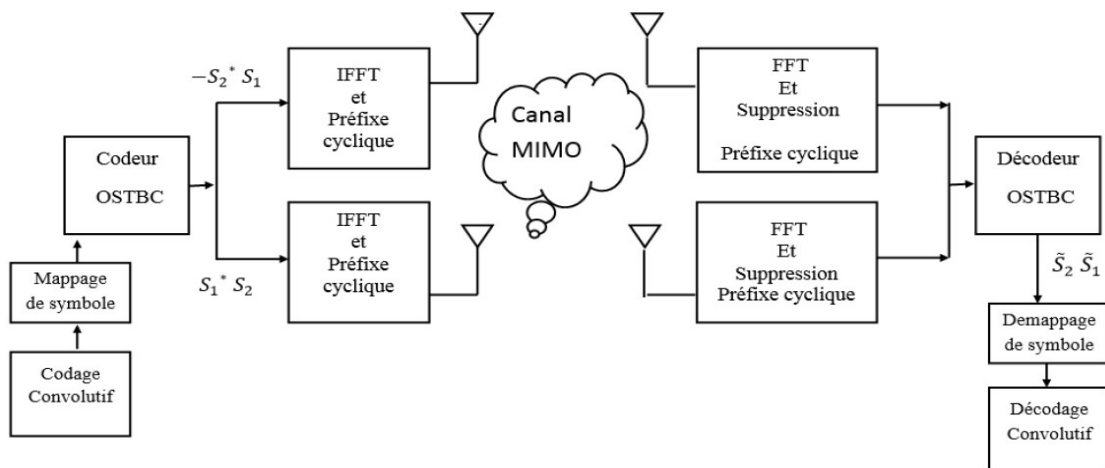


Figure.3.2 : Schéma simplifié d'un système MIMO-OFDM avec un codage STBC [24].

### 3.3. Simulations et discussion des résultats

Pour les simulations, on va utiliser 2 méthodes bien connues qui sont la méthode du canal inversé et la méthode du canal inversé régularisé (voir annexe).

#### 3.3.1. Simulation et performance d'un système MIMO multi utilisateur

➤ **Paramètres globale de la simulation :** Les paramètres utilisés dans la Simulation d'un système multi\_user\_MIMO sont :

Paramètres	Spécification
Mode de Canal inversé ou canal inversé régularisé	0/1
Type de Modulation	QPSK
Nombre de bits par symbole	2
Nombre d'antennes, NT	2,3,4,5,6,7,8
Nombre totale d'utilisateurs	20
Nombre d'utilisateurs actuels	4
Plage du SNR en dB	[0:2:20]
Nombre de trames	8 , 9 , 10 , 11 ,12
Nombre de paquets	100 , 200 , 300

**Tableau.3.1 :** Paramètres globale de simulation d'un système multi\_user\_MIMO.

#### 3.3.1.1. Comparaison entre les performances d'inversion de canal et les performances d'inversion du canal régularisé

➤ **Résultats et discussion :**

En lançant la simulation nous avons obtenu la **figure 3.3**, nous constatons que la méthode du canal inversé régularisé est la meilleure (courbe en bleu) pour  $NT = 4$  et  $Nuser = 4$ , où quatre utilisateurs avec les valeurs de canal standard.

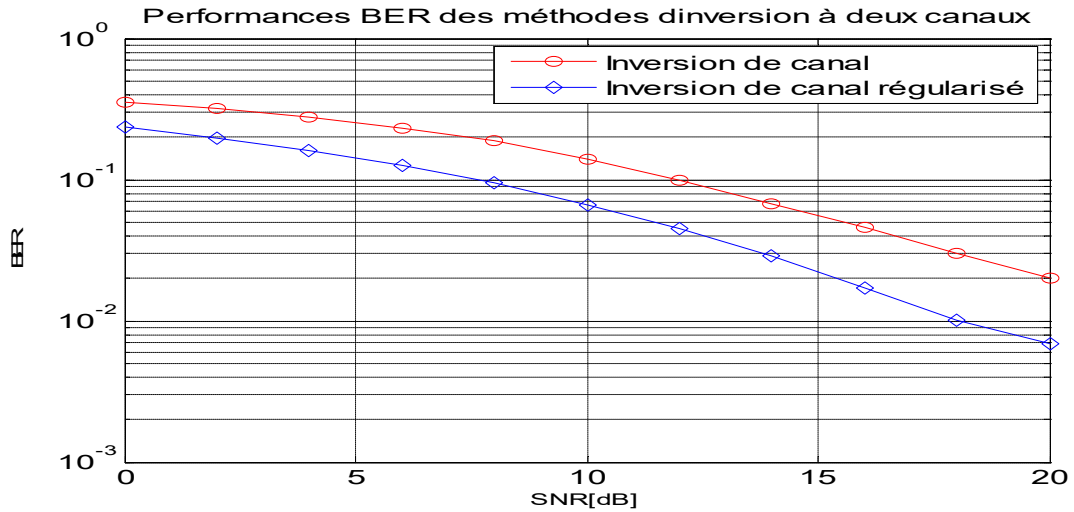


Figure.3.3 : Courbes de BER en fonction de SNR des 2 méthodes d'inversion de canal.

### 3.3.1.2. Influence du nombre d'antennes sur les performances de la méthode d'inversion de canal et d'inversion de canal régularisé

➤ **Paramètre :** Afin de voir l'influence du nombre d'antennes sur les performances de la méthode d'inversion de canal au système MIMO multiutilisateur, on garde les mêmes paramètres décrits dans le tableau (3.1), mais en variant chaque fois le nombre d'antennes d'émission et de réception et de plus le nombre d'utilisateurs de 2 à 9

➤ **Résultats et discussion :**

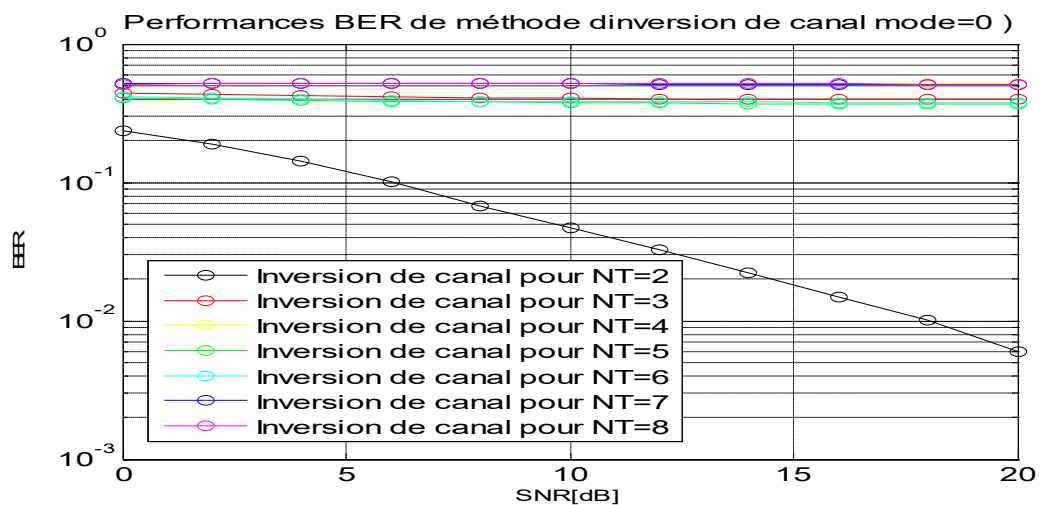
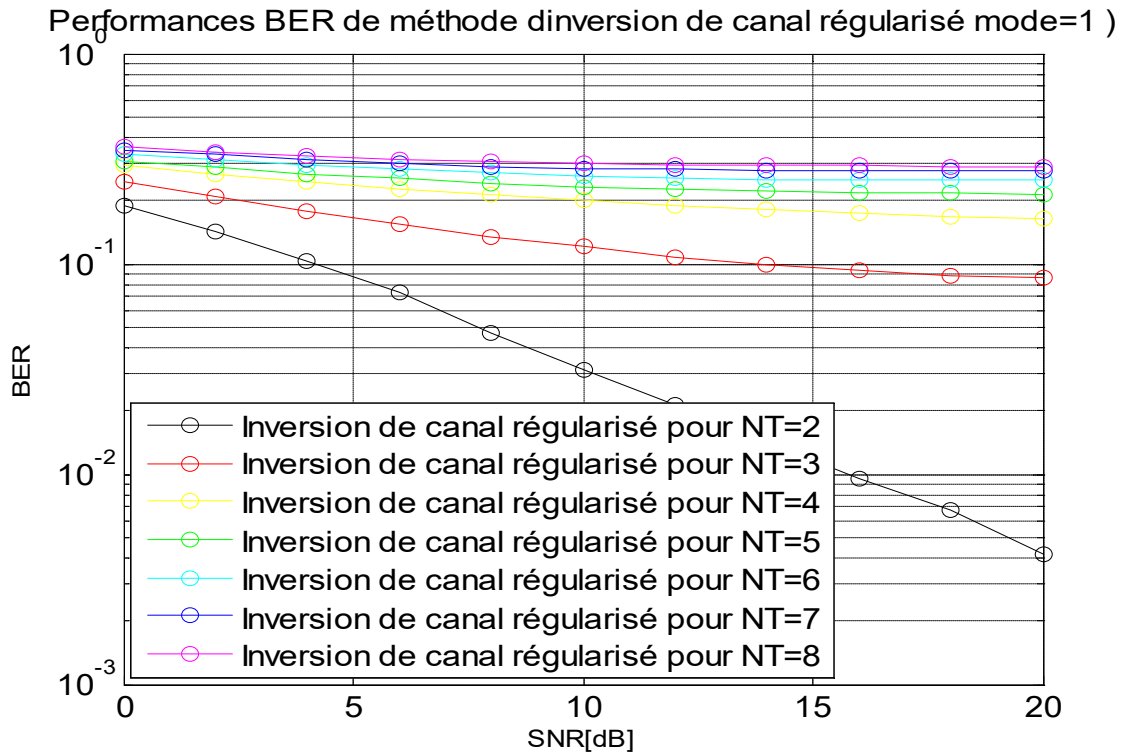


Figure.3.4 : Courbes de BER en fonction de SNR de méthode d'inversion de canal (mode=0).



**Figure.3.5 :** Courbes de BER en fonction de SNR de méthode d'inversion de canal régularisé (mode=1).

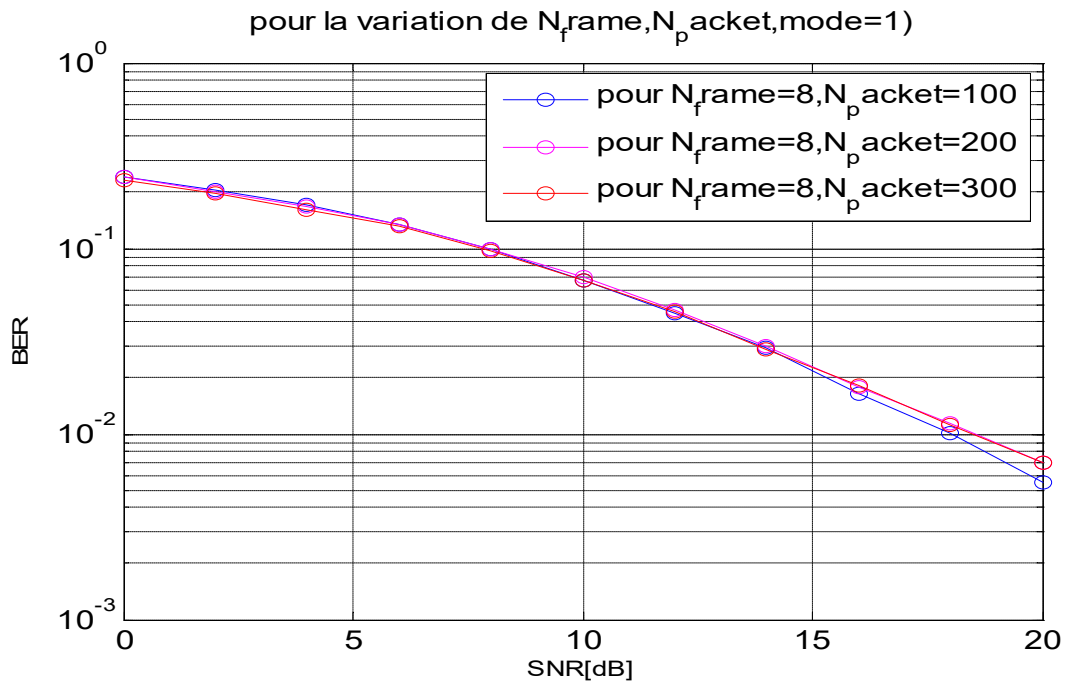
En voyant les 2 **figures 3.4** et **3.5** on constate que la méthode du canal inversé régularisée est la meilleur du point de vu du BER pour de mêmes SNR. De plus dans la **figure 3.2** les courbes sont presque horizontales ce qui montrent la très grande dégradation apportée par le canal de transmission et le bruit. Par contre dans la **figure 3.3** les courbes ont tendance à fléchir vers le bas ce qui montre l'avantage de la 2<sup>ème</sup> méthode pour combattre l'effet du canal et du bruit. On voit aussi l'effet du nombre d'antennes de réception sur les 2 figures.

### 3.3.1.3. Influence du nombre de trames et du nombre de paquets sur les performances de la méthode d'inversion de canal régularisé

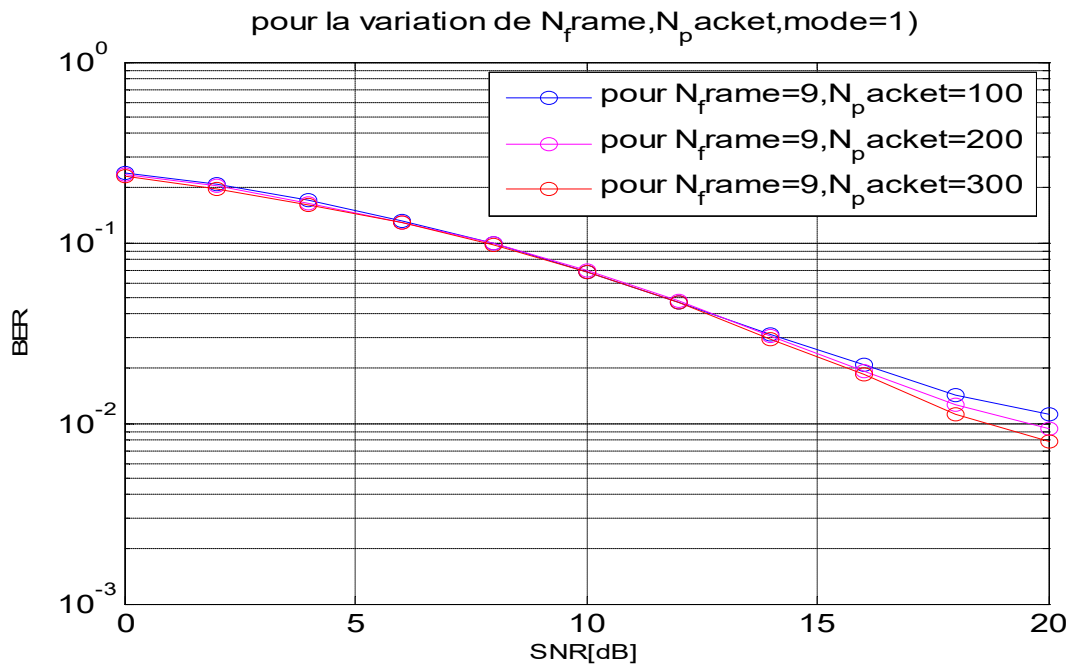
#### ➤ Paramètres de simulation :

Pour voir l'influence du nombre de trames et nombre de paquets sur les performances de la méthode d'inversion de canal régularisé au système MIMO multiutilisateur, on garde les mêmes paramètres décrits dans le **tableau (3.1)**, mais en variant chaque fois le nombre de trame de 8 à 12.

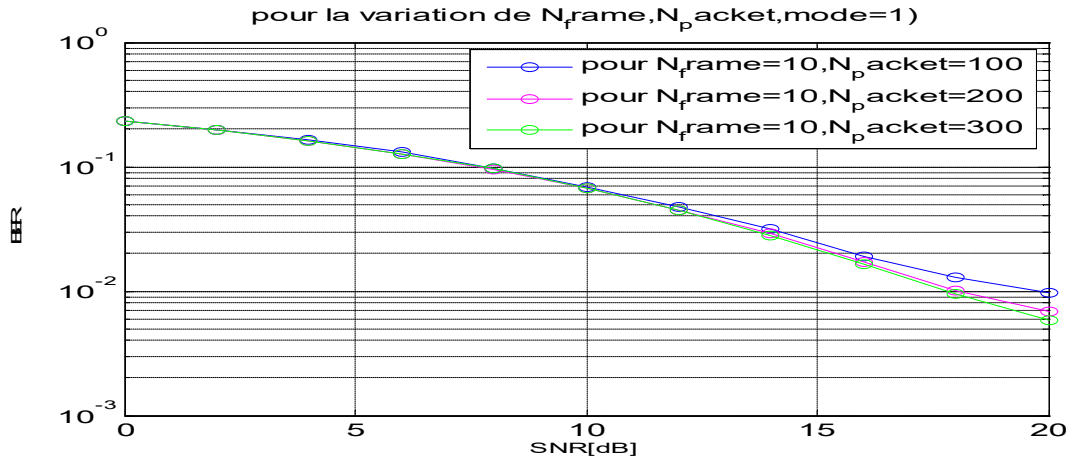
➤ Résultats et discussion :



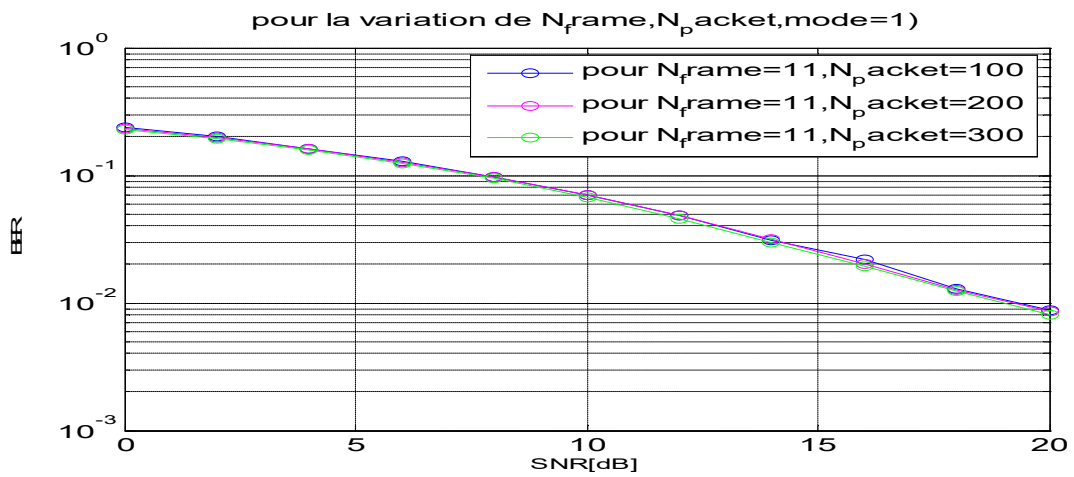
**Figure .3.6 :** Courbes de BER en fonction de SNR de la méthode d'inversion de canal régularisé pour  $N_F$ -frame = 8 et  $N_p$ -packet = 100,200,300.



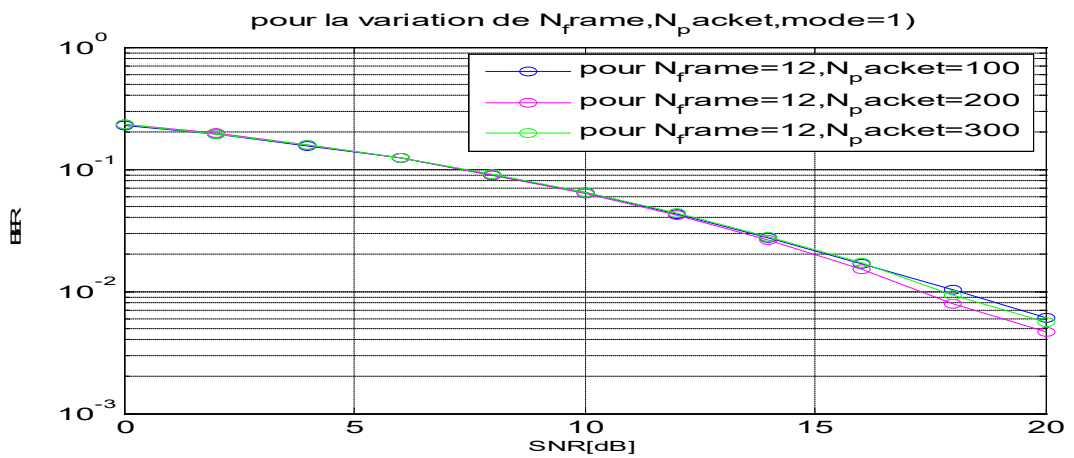
**Figure.3.7 :** Courbes de BER en fonction de SNR de la méthode d'inversion de canal régularisé pour  $N_F$ -frame = 9 et  $N_p$ -packet = 100,200,300.



**Figure.3.8 :** Courbes de BER en fonction de SNR de la méthode d'inversion de canal régularisé pour  $N_{\text{F-frame}} = 10$  et  $N_{\text{p-packet}} = 100,200,300$ .



**Figure.3.9 :** Courbes de BER en fonction de SNR de la méthode d'inversion de canal régularisé pour  $N_{\text{F-frame}} = 11$  et  $N_{\text{p-packet}} = 100,200,300$ .



**Figure.3.10 :** Courbes de BER en fonction de SNR de la méthode d'inversion de canal régularisé pour  $N_{\text{F-frame}} = 12$  et  $N_{\text{p-packet}} = 100,200,300$ .



Les figures 3.6, 3.7, 3.8, 3.9 et 3.10 montrent que le nombre de trames et le nombre de paquets n'influent pratiquement pas sur les performances de notre système MIMO-OFDM multi-utilisateurs, les courbes des BER en fonction du SNR sont presque les confondues.

### 3.3.2. Simulation et performance d'un Système MIMO-OFDM ou MIMO-OFDMA.

➤ **Paramètres globale de la simulation :** Les paramètres utilisés dans la simulation d'un système MIMO-OFDM sont :

Paramètres	Spécification
Modulation	QPSK
Nombre d'antennes d'émission $N_t$	1, 2, 3,4
Nombre d'antennes de réception $N_r$	1, 2, 3,4
Nombre de sous porteuse	12
Taille de FFT et IFFT	64, 128, 256, 512,1024
Taille préfixe cyclique CP	$\frac{1}{4}$ taille IFFT
Nombre de trajets	10
Plage du SNR en dB	[0:5:30]
L'angle ( $\phi$ )	$\pi/4$

**Tableau.3.2 :** Paramètres globale de simulation d'un système MIMO-OFDMA.

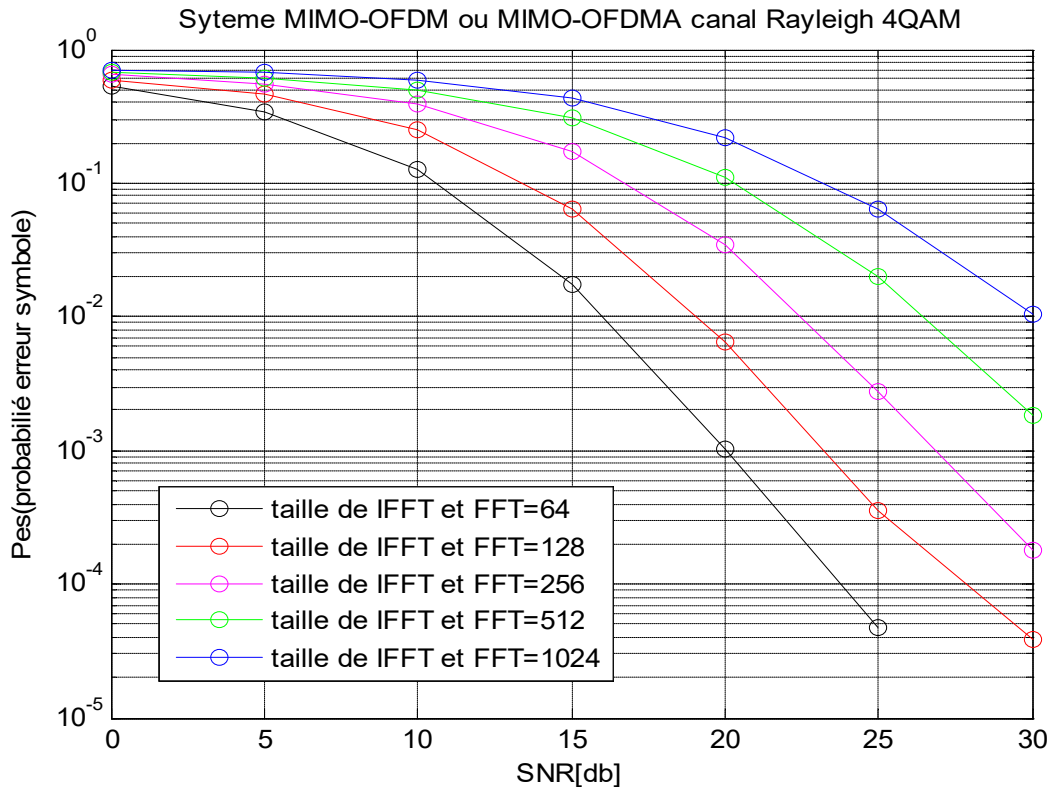
#### 3.3.2.1. L'effet de la taille de transformer de fourrier rapide FFT et IFFT sur les performances d'un Système MIMO-OFDM

➤ **Paramètres de simulation :**

Pour voir l'influence de la taille de l'IFFT et FFT sur les performances d'un système MIMO-OFDM, on garde les mêmes paramètres décrits dans le **tableau (3.2)**, mais en faisant varier chaque fois la taille de l'IFFT et FFT de 64 à 1024

➤ **Résultats et discussion :**

On voit sur la **figure 3.11** que plus la taille de l'IFFT augmente et plus les courbes ont tendances a monté vers le haut, c'est normale car dans ce cas le nombre de bits erroné a augmenté sous l'effet du canal et de l'augmentation de la taille de l'IFFT.



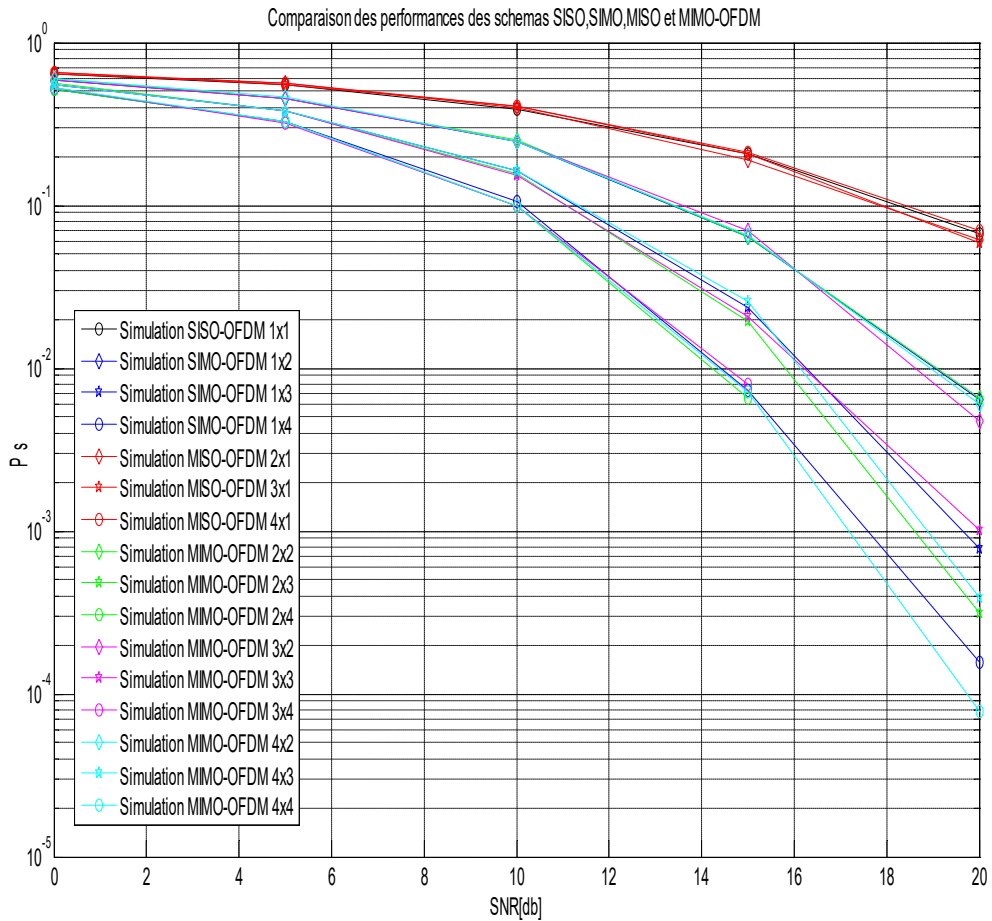
**Figure 3.11 :** L'effet de la taille de transformateur de Fourier rapide FFT et IFFT sur les performances d'un Système MIMO-OFDM.

### 3.3.2.2. L'influence de la diversité des antennes sur les performances d'un Système MIMO-OFDM

➤ **Paramètres de simulation :**

Pour voir l'influence de la diversité des antennes sur les performances d'un Système MIMO-OFDMA, on garde les mêmes paramètres décrits dans le **tableau (3.2)**, mais en faisant varier chaque fois le nombre des antennes d'émission et de réception de 1 à 4 suivant les schémas de la diversité des antennes que nous avons expliquée dans le premier chapitre sous le titre mono et multi-antennes c.a.d SISO, SIMO, MISO, MIMO-OFDM.

## ➤ Résultats et discussion :



**Figure.3.12** : L'effet de la diversité des antennes sur les performances d'un Système MIMO-OFDM.

Nous voyons sur la **figure 3.12** que la meilleure combinaison est pour  $N_T=4$  et  $N_R=4$  donc une meilleure réception et donc un bon  $BER=10^{-4}$  pour un SNR de 20 dB et la mauvaise combinaison est pour  $N_T=1$  et  $N_R=1$  avec un BER de  $10^{-1}$  pour un SNR=20dB.

En comparant les **figures 3.11** et **3.12** aux **figures 3.3** jusqu'à **3.10** on constate l'avantage apporté en associant la modulation OFDM ou OFDMA au canal MIMO car le BER qui était à peu près à  $10^{-2}$  dans les **figures 3.3** à **3.10** est passé à  $10^{-4}$  pour les 2 dernières figures. Donc c'est un énorme gain en nombre de bits reçus faux et donc une meilleure réception des utilisateurs.

### 3.4. Conclusion

Dans ce troisième chapitre nous avons mis en évidence les 2 parties théoriques vues dans les deux premiers chapitres. A travers les simulations nous avons constaté par des simulations sous l'environnement MATLAB l'avantage apporté par la modulation multi porteuses OFDM et multi-accès associée à un canal MIMO à trajets multiples appelé système MIMO-OFDM multiutilisateurs.

Donc plus le nombre d'antennes d'émission et de réception est grand, meilleur est le BER, au contraire plus le nombre de sous porteuses ou la taille de l'IFFT-FFT est grand mauvais est le BER ; donc lors de la conception d'un système MIMO-OFDM multiutilisateurs il faut un choix entre l'augmentation du nombre d'antennes ou l'augmentation de la taille de l'IFFT-FFT, donc c'est un compromis à faire.

# **Conclusion générale**

### *Conclusion générale*

Le système de communication sans fil a connu une croissance rapide ces dernières années dans toutes les parties du monde. Par conséquent, toutes les études dans ce domaine ont porté sur l'amélioration de la qualité de service et des performances du système de communication sans fil, en particulier la quatrième génération, afin d'assurer une meilleure qualité de transmission et une grande rapidité et confidentialité des utilisateurs.

Les communications sans fil de quatrième génération dépendent fortement de la technologie de modulation multiaccès OFDM en raison de ses nombreux avantages dans ce domaine.

L'objectif de notre travail de ce mémoire a porté sur l'étude et l'analyse des performances d'un système de communication numérique multi antennes, multiaccès et multi porteuses pour un système de quatrième génération.

La première partie de ce travail a été consacrée à l'étude théorique, nous avons commencé par des généralités sur les systèmes mono-antennes et multi-antennes. Ensuite nous avons présenté l'étude et le principe de la modulation OFDM multi accès.

Dans la deuxième partie, nous avons présenté et discuté les résultats obtenus, en validant les concepts théoriques présentés dans la première partie par la simulation à l'aide de MATLAB (scripts), en particulier les courbes BER en fonction du SNR. Notre mémoire est basé sur deux objectifs principaux. Le premier est de voir l'efficacité de la diversité spatiale pour atténuer les effets de l'évanouissement, résultant de la propagation multiple. Diverses techniques de combinaison ont été traitées, à la fois pour la diversité de diffusion et de réception. Le deuxième objectif est le centre d'intérêt a été la mise en évidence de l'importance de l'OFDM pour combattre l'ISI ainsi que la simplification du processus d'égalisation. Toutes ces notions ont pu être vérifiées par des simulations MATLAB.

Nous proposons comme perspectives, les points suivants :

- Etude des performances du système MIMO-OFDM en matière de capacité.
- Faire une estimation du canal.
- Proposer d'autres algorithmes de détection plus efficaces et moins complexes.
- Le système MIMO reste au centre de la recherche et la prochaine génération de téléphonie mobile (5G) est mise en œuvre, notamment dans le MIMO MASSIVE, qui consiste à utiliser massivement un plus grand nombre d'antennes pour atteindre des débits supérieurs à 1Gbit / s en DL.

# **Bibliographie**





## Bibliographie

- [1] Ibra Dioum, “Conception de systèmes multi-antennaires pour techniques de diversité et MIMO: application aux petits objets nomades communicants.” Université Nice Sophia Antipolis, p. 216, 2013.
- [2] HAMID CHORFI, *CONCEPTION D’UN NOUVEAU SYSTÈME D’ANTENNE RÉSEAU CONFORME EN ONDE MILLIMÉTRIQUE MÉMOIRE*. 2012.
- [3] Belarbi Mohammed El Amin et BAROUDI Zakaria, *La technologie W-CDMA étendue dans les systèmes multi-antennes*. 2013.
- [4] Fabrice PORTIER, *Thèse Systèmes hertziens à forte efficacité spectrale pour les communications mobiles multi-antennes et multi-porteuses de 4 e génération*. 2007.
- [5] Olivier BERDER, *Optimisation et stratégies d’allocation de puissance des systèmes de transmission multi-antennes*. 2002.
- [6] BENYAROU MOURAD, *Optimisation des systèmes multi- antennes appliqués aux systèmes MC- CDMA*. 2013.
- [7] Aliou DIALLO, *Systèmes multi-antennes pour diversité et MIMO*. 2010.
- [8] Taofik SAIDI, “Architectures matérielles pour la technologie W-CDMA étendue aux systèmes multi-antennes,” 2008.
- [9] FEROUANI SOUHILA, “Etude et Implémentation d’un Système MIMO dans un Contexte OFDM,” 2010.
- [10] Farhi Nabila et Helaimia Souhaila, *Etude et Simulation d’une Transmission de Type OFDM Pour Les Communications Sans Fil*. 2016.
- [11] MERAH Hocine, *Conception d’un MODEM de la quatrième génération (4G) des réseaux de mobiles à base de la technologie MC-CDMA*. 2012.
- [12] Melle BOUCHENTOUF Hadjer, *ETUDE DES PERFORMANCES DES RESEAUX 4G (LTE)*. 2013.
- [13] Patrice KADIONIK, “BASES DE TRANSMISSIONS NUMERIQUES Les modulations numériques,” pp. 1–41, 2000.
- [14] YEKHLEF Mohammed, “Étude des méthodes d’accès dans les réseaux mobiles.”
- [15] Jean Michel Rouvaen, *JOURNÉE DES DOCTORANTS SPI-STIC DE L’INRETS 2009*. 2009.
- [16] Touhami Ridha, *DEVELOPPEMENT D’UN MODEL OFDM POUR LA 4ème GENERATION DU MOBILE DE COMMUNICATION*. .
- [17] L. K. Helmi BEN HNIA, Abdennaceur KACHOURI, Ossama BEN BELGHITH, *Etude des performances de la modulation OFDM pour l’utilisation dans les systèmes de communication sans fils de la 4G*, no. March 2004. 2014.
- [18] BELAHAMMOU Oussama et BASSA Allaeddine, *Performance d’un Système de Communication OFDM*. 2017.
- [19] Pierre GRUYER ;Simon PAILLARD, “Modélisation d’un modulateur et démodulateur OFDM,” *Univ. Bretagne*, vol. 12, pp. 1–22, 2005.
- [20] Matthieu LOOSVELT, “Etude des performances des techniques d’accès multiple soumises au bruit de phase,” vol. 377, pp. 1–10, 2006.

- [21] HAMID AIT T ALEB, *MIMO-OFDM POUR LES COMMUNICATIONS SANS-FIL DANS LES MINES SOUTERRAINES*. 2017.
- [22] T. Haustein *et al.*, “MIMO-OFDM for a cellular deployment - Concepts, real-time implementation and measurements towards 3GPP-LTE,” *Eur. Signal Process. Conf.*, no. Eusipco, pp. 1849–1853, 2007.
- [23] DJELAD Sarra, *Optimisation du Handover dans le réseau 4G avec la logique flou*. 2017.
- [24] CHAABI Mohamed Nadjib and BOUTEGUI Mokhtar, “Etude et simulation d’un système de communication MIMO/OFDM,” pp. 2014–2015, 2015.
- [25] Y. S. Cho, J. Kim, W. Y. Yang, and C. G. Kang, *MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB®*. 2010.

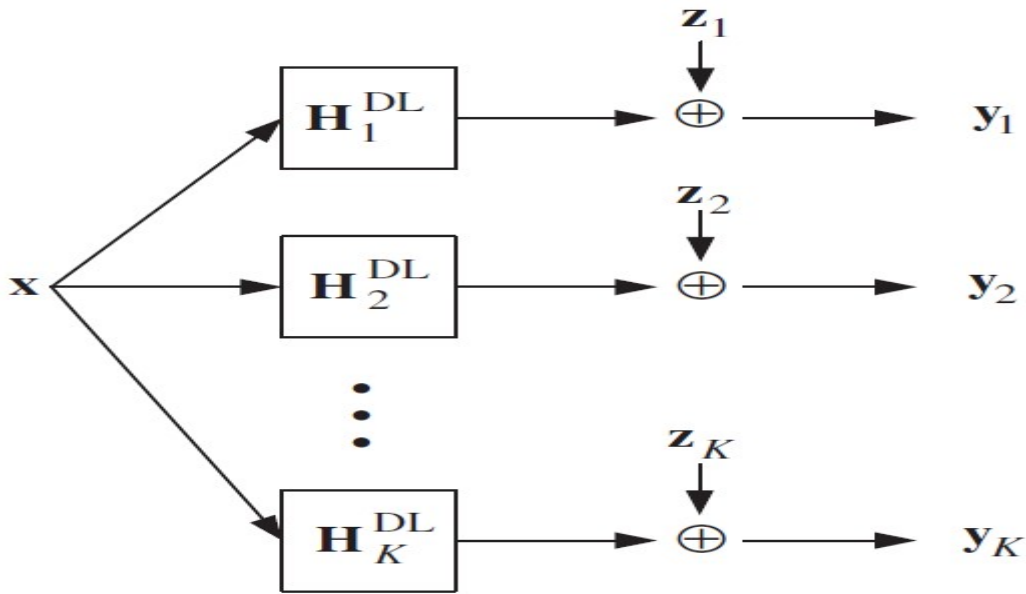
# Annexe A

## A.1. Méthodes de transmission pour le canal de diffusion

La principale difficulté dans la transmission de données en chaîne de diffusion est que la détection du signal coordonnée du côté du récepteur n'est pas simple, et donc, l'annulation d'interférence à station de base est nécessaire. Pour éviter cette interférence, il y a différentes méthodes de transmission : comme l'inversion des canaux.

### A.1. Inversion de canal et inversion de canal régularisée

Nous supposons  $N_M = 1$  pour tous les utilisateurs et  $K = N_B$ . Soit  $\tilde{x}_u$  désigne le  $u$  ième signal d'utilisateur tandis que  $H_U^{DL} \in \mathbb{C}^{1 \times K}$  désigne la matrice de canal entre station de base et l' $u$  ième utilisateur,  $u = 1, 2, \dots, K$ . Le système global peut être représenté par un seul vecteur comme Figure 4.1 :



**Figure. A.1:** Modèle de canal de liaison descendante pour système MIMO multiutilisateur: canal de diffusion

Le signal reçu de l'utilisateur peut être exprimé comme :

$$y_u = H_U^{DL} \begin{bmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \\ \vdots \\ \tilde{x}_K \end{bmatrix} + Z_u, \quad u = 1, 2, \dots, K. \quad (\text{A.1})$$

Et le signal reçu à l' $u$  ième utilisateur est exprimé comme :

$$y_u = H_U^{DL} x + Z_u, \quad u = 1, 2, \dots, K. \quad (\text{A.2})$$

Les signaux reçus de tous les utilisateurs peuvent être représentés comme :  $\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_k \end{bmatrix} =$

$$\begin{bmatrix} H_1^{DL} \\ H_2^{DL} \\ \vdots \\ H_K^{DL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \\ \vdots \\ \tilde{x}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_k \end{bmatrix} \quad (\text{A.3})$$

Le signal reçu à chaque terminal d'utilisateur dans **l'équation (A.3)** est un scalaire tandis que le signal reçu par chaque utilisateur dans **l'équation (A.2)** est un vecteur. Comme chaque utilisateur est équipé d'une seule antenne, les interférences dues à d'autres signaux ne peuvent pas être annulées. Au lieu de cela, des techniques de précodage telles que l'inversion de canal et l'inversion de canal régularisée peuvent être envisagées. Dans le cas MIMO mono-utilisateur, l'amélioration du bruit peut être atténuée. On appelle inversion de canal régularisée dans le contexte de MIMO multiutilisateur. Comme on peut le voir sur la figure 3.1 dans le chapitre 3, l'inversion de canal régularisée obtient de meilleures performances que la méthode d'inversion de canal, grâce à l'atténuation du bruit[25].