

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد حنبل بلدية  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Master

Mention Telecommunication

Systèmes de Télécommunications (ST)

présenté par

Ladraa Bouchra

&

Zaoui Imene

---

# Formation de faisceaux dans un système de communication MIMO massif

---

Proposé par : Dr. ANOU Abderrahmane

Année Universitaire 2019-2020.

---

**ملخص:** الهدف من هذه الأطروحة هو الدراسة التفصيلية واستغلال MIMO-OFDM، Massive MIMO هي خاصية تقنية جديدة للجيل الخامس. بدلاً من تجميع هوائي إرسال واحد، تجمع تقنية MIMO الضخمة بين هوائيات متعددة في وقت واحد لتقوية الإشارة وتقليل التداخل. غالباً ما تتم دراسة مثل هذا النظام لعمليات النقل متعددة المستخدمين بفضل قدرته على تركيز الطاقة. من بين العديد من التقنيات المميزة لشبكة 5G، نرى مرشحاً جيداً لنظام يعمل بأطوال موجية مليمترية لتلبية الحاجة إلى إنتاجية عالية في المناطق المستهدفة الصغيرة. سنقوم بنمذجة نظام MIMO-OFDM من نقطة إلى نقطة مع تشكيل الحزمة. الجمع بين تقنيات تعدد الإرسال والإخراج المتعدد (MIMO) وتقنيات تعدد الإرسال بتقسيم التردد المتعامد (OFDM) لتوفير إنتاجية أعلى للبيانات. نظراً لأن MIMO يستخدم صفائف الهوائي، يمكن اعتماد تشكيل الحزمة لتحسين نسبة الإشارة إلى الضوضاء المستقبلية (SNR)، والتي بدورها تقلل من معدل الخطأ في البتات (BER).

**الكلمات الجوهرية:** 5G, MIMO-OFDM, beamforming , SNR , BER

---

**Résumé :** L'objectif de ce mémoire est Etude détaillée et exploitation de l'association MIMO-OFDM., Le MIMO massif est une nouvelle technologie caractéristique de la 5G. Au lieu de mettre en place une seule antenne réceptrice-émettrice, le MIMO massif combine plusieurs antennes à la fois afin de renforcer le signal et réduire les interférences. Un tel système est très souvent étudié pour des transmissions multi-utilisateurs grâce à son potentiel à focaliser l'énergie. Parmi les nombreuses technologies caractéristiques de la 5G, nous considérons comme un bon candidat un système fonctionnant à des longueurs d'onde millimétriques afin de satisfaire le besoin du débit élevé sur des petites zones cibles. nous allons modéliser un système MIMO-OFDM point à point avec beamforming. La combinaison des techniques de multiplexage à entrées multiples et sorties multiples (MIMO) et de multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM) pour fournir un débit de données plus élevé. Comme MIMO utilise des réseaux d'antennes, la formation de faisceaux peut être adoptée pour améliorer le rapport signal / bruit (SNR) reçu, ce qui réduit à son tour le taux d'erreur binaire (BER).

**Mots clés :** 5G, MIMO-OFDM, beamforming , SNR , BER

---

**Abstract:** The objective of this thesis is Detailed study and exploitation of the MIMO-OFDM association., Massive MIMO is a new technology characteristic of 5G. Instead of setting up a single receiving-transmitting antenna, massive MIMO combines multiple antennas at once to strengthen the signal and reduce interference. Such a system is very often studied for multi-user transmissions thanks to its potential to focus energy. Of the many technologies characteristic of 5G, we see a good candidate for a system operating at millimeter wavelengths to meet the need for high throughput in small target areas. we are going to model a point-to-point MIMO-OFDM system with beamforming. Combining Multiple Input Multiple Output Multiplexing (MIMO) and Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) techniques to provide higher data throughput. As MIMO uses antenna arrays, beamforming can be adopted to improve the received signal-to-noise ratio (SNR), which in turn reduces the bit error rate (BER).

**Keywords:** 5G, MIMO-OFDM, beamforming, SNR, BER.

---

# *Dédicace*

A mes chers parents, qui m'ont donné tout le courage, la tendresse Et la patience.

A mes chers frères et mes chères sœurs.

A toute la famille LADRAA

Et surtout A Mon Binôme qui m'a Supporté, Soutenu, Conseillé, Aidé le long de Notre travail

Ensemble. à tous mes chers amis

Et à ceux avec qui je partage de bons souvenirs

A toute la promo ST 2019/2020

Je dédie ce travail.

*Bochna*

## *Dédicace*

« Ma chère Mère », qui a toujours été présente pour moi, dans les moments les plus difficiles et qui sans cesse veille sur moi avec ses prières, pour ses grands sacrifices et tout l'amour qu'elle me porte.

« Mon chère Père », pour tous ses conseils et pour toute la confiance qu'il a mise en moi et pour son dévouement pour mon bonheur.

A mon frère «Abde kader »,et à mes chères sœurs : « Meriem», « Faiza» et « Chaima»

A Mon Binôme qui m'a Supporté, Soutenu, Conseillé, Aidé le long de Notre travail Ensemble.

Je Dédier Ce Travail Plus Particulièrement à Mon marie et Mon cher fils Mohamed

.ET A Toute la Famille ZAOUI

## *Imène*

## Remerciement

---

NOUS REMERCIONS DIEU LE TOUT PUISSANT, MISERICORDIEUX POUR NOUS AVOIR DONNE,  
LA FOI, LE COURAGE, LA PATIENCE, LA VOLONTE ET LA FORCE NECESSAIRE, POUR  
AFFRONTER TOUTES LES DIFFICULTES ET LES OBSTACLES, QUI SE SONT MIS AU TRAVERS DE  
NOTRE CHEMIN DURANT TOUTES NOS  
ANNEES D'ETUDES.

JE REMERCIE MESSIEURS LES MEMBRES DE JURY D'AVOIR ACCEPTE D'EXAMINER ET  
D'EVALUER NOTRE TRAVAIL.

JE TIENS A EXPRIMER MES SINCERES GRATITUDE A MON ENCADREUR DR. ANOU  
ABDERRAHMANE D'AVOIR ACCEPTE DE M'ENCADRER ET AUSSI POUR SA PATIENCE, SON  
SOUTIEN ET SES ORIENTATIONS.

JE TIENS A REMERCIER TOUTES LES PERSONNES QUI M'ONT AIDEE LORS DE LA  
REDACTION DE CE MEMOIRE.

ENFIN, NOUS NE POURRONS PAS TERMINER CES REMERCIEMENTS SANS UNE PENSEE A  
L'ENSEMBLE DES ENSEIGNANTS, QUI SONT A L'ORIGINE DE TOUT NOTRE SAVOIR.

## Table des matières

Introduction Générale.....	1
Chapitre 1 : Réseaux de 5eme génération .....	3
1.1 Introduction .....	3
1.2 Evolution des réseaux mobiles .....	3
1.2.1 La 1 ère génération.....	3
1.2.2 La 2eme génération.....	3
1.2.3 La 3eme génération.....	4
1.2.4 La 4ème génération.....	4
1.2.5 La 5eme génération.....	5
1.3 C'est quoi la 5G ? .....	5
1.3.1 Le spectre de fréquence .....	6
1.3.2 Usages de la 5G .....	6
1.3.4 Standards de la 5G .....	7
1.3.5 Architecture de réseau 5G.....	8
1.3.6 Technologies de 5G .....	9
1.4 Conclusion .....	13
Chapitre 2 : OFDM ET MIMO-OFDM .....	14
2.1 Introduction .....	14
2.2 la technique OFDM .....	15
2.2.1 C'est quoi OFDM ? .....	15
2.2.2 Modulation mono porteuse .....	15
2.2.3 Modulation multi porteuse .....	16
2.2.4 Principe de la modulation OFDM.....	16
2.2.5 Principe de la démodulation OFDM .....	17
2.2.6 Orthogonalité des sous-porteuses .....	18

2.2.7 Intervalle de garde.....	18
2.2.8 Bande de garde.....	20
2.2.9 Avantages OFDM .....	20
2.2.10 Inconvénients des systèmes OFDM.....	21
2.3 MIMO-OFDM.....	21
2.3.1 Système MIMO.....	21
2.3.2 Architecture des systèmes MIMO .....	22
2.3.3 PRINCIPE DU SYSTEME MIMO.....	24
2.3.4 Techniques de diversité dans les systèmes MIMO .....	25
2.3.5 Le multiplexage par division spatiale (SDM Spatial Division Multiplexing) .....	25
2.3.6 Codage spatio-temporel (STC) .....	25
2.3.7 Techniques de Multiplexage .....	26
2.3.8 Détection Linéaire.....	27
2.3.9 Détection Non-Linéaire .....	28
2.3.10 Antennes intelligentes .....	29
2.3.11 Antennes adaptatives .....	31
2.3.12 Massive MIMO.....	31
2.4 SYSTEME MIMO-OFDM.....	35
2.4.1 Association MIMO-OFDM .....	35
2.4.2 Principe de l'association MIMO et OFDM .....	35
2.5 Conclusion.....	37
Chapitre 3 : Simulation et résultats .....	39
3.1 Introduction .....	39
3.2 Toolbox.....	39
3.3 Beamforming pour système MIMO-OFDM.....	40
3.3.1 Transmission du signal .....	41
3.3.2 Propagation du signal.....	42

3.3.3 Réception du signal.....	42
3.3.4 Effet de quantification de déphaseur.....	44
3.3.5 Alamouti STBC avec deux antennes de réception.....	45
3.4 Conclusion.....	46
Conclusion Général .....	47

# Liste des figures

FIGURE 1. 1 :SOLUTION GLOBALE D'ACCES SANS FIL 5G CONSISTANT EN L'EVOLUTION DU LTE EN COMBINAISON AVEC UNE NOUVELLE TECHNOLOGIE DE RADIO ACCES .....	6
FIGURE 1. 2 : SPECTRE DE 5G .....	6
FIGURE 1. 3 : DIFFERENTS CATEGORIES DE 5G .....	7
FIGURE 1. 4 : ARCHITECTURE DE RESEAU 5G .....	8
FIGURE 1. 5 : ARCHITECTURE DE NG-RAN .....	9
FIGURE 1. 6 : SYSTEME MIMO . .....	10
FIGURE 1. 7 : LES DIFFERENTS TECHNOLOGIES DE LA 5G .....	11
FIGURE 2. 1: REPRESENTATION FREQUENTIELLE ET TEMPORELLE D'UN SIGNAL OFDM.....	16
FIGURE 2. 2: SCHEMA DU PRINCIPE DU MODULATEUR OFDM. ....	17
FIGURE 2. 3: SCHEMA DU PRINCIPE DU DEMODULATEUR OFDM. ....	18
FIGURE 2. 4: INTERVALLE DE GARDE. ....	19
FIGURE 2. 5: PREFIXE CYCLIQUE.....	19
FIGURE 2. 6: ZERO PADDING.....	20
FIGURE 2. 7 : SYSTEMES SISO , MISO , SIMO ET MIMO .....	24
FIGURE 2. 8 : SCHEMA D'UN SYSTEME MIMO UTILISANT LE CODE ALAMOUTI. ....	26
FIGURE 2. 9: SCHEMA SIMPLIFIE D'UN SYSTEME DE MULTIPLEXAGE SPATIAL.....	27
FIGURE 2. 10 : PRINCIPE DU DETECTEUR OSIC [23].....	28
FIGURE 2. 11: PRINCIPE DU DECODEUR SPHERIQUE [23]. ....	29
FIGURE 2. 12 : PRINCIPE DE BASE D'UNE ANTENNE INTELLIGENTE. ....	30
FIGURE 2. 13 : UNE ILLUSTRATION DE MIMO MASSIVE. ....	32
FIGURE 2. 14 : SYSTEME MASSIVE MIMO EN TRANSMISSION MULTI-UTILISATEURS.....	32
FIGURE 2. 15 : SYSTEME MASSIVE MIMO BEAMFORMING. ....	35
FIGURE 2. 16: PRINCIPE D'UN SYSTEME MIMO-OFDM. ....	36
FIGURE 3. 1: BEAMFORMING DANS UN SYSTEME A PLUSIEURS EMETTEURS ET UN RECEPTEUR MISO.....	40
FIGURE 3. 2 : PROPAGATION DES ONDES ELECTROMAGNETIQUES DES ANTENNES A UN SEUL, DEUX ET QUATRE ELEMENTS DE RAYONNEMENT.....	41
FIGURE 3. 3 : DIAGRAMME DE CONSTELLATION 1.....	43
FIGURE 3. 4: DIAGRAMME DE CONSTILLATION 2. ....	43
FIGURE 3. 5: BEAMFORMING ANALOGIQUE.....	44
FIGURE 3. 6: DIAGRAMME DE CONSTELLATION 3.....	45
FIGURE 3. 7: BER EN FONCTION DE $E_b/N_0$ POUR $2T_x$ ET $2R_x$ ALAMOUTI STBC (CANAL DE RAYLEIGH) ET MODULATION BPSK. ....	46

## Listes des acronymes et abréviations

4G	4ième génération
5GC	5G Core
ACI	Adjacent Channel Interference
AMPS	Advanced Mobile Phone System
AN	Access Network
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BER	Bit Error Rate
BS	Base Station
CCI	Co-channel interference
CP	Cyclic prefix
DAC	Digital-to-analog converter
EDGE	Enhanced Data Rates for Global Evolution
eMBB	enhanced Mobile Broadband
ETACS	Extended Total Access Communication System
FDM	Frequency Division Multiplexing
FFT	Fast Fourier Transform.
GPRS	General Packet Radio System
GSM	Global System for Mobile Communications
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineer
IEP	Interférence Entre Porteuses
IES	Interférences Entre Symboles
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IMT-2000	International Mobile Télécommunications for the year 2000
LTE	Long Term Evolution.
LTE-A	Long Term Evolution-Advanced
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MISO	multi-Input et Single Output
ML	Maximum Likelihood
MMSE	Minimum Mean Square Error
mMTC	massive Machine-Type Communication
NG-RAN	New Generation Radio Access Network
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplex
OSIC	Ordered Successive Interference Cancellation
PAPR	Peak to Average Power Ratio
RF	Radio Fréquence
SD	Sphere Decoding
SDM	Spatial Division Multiplexing
SIMO	Singel Input Multiple Output
SISO	Single Input Single Output
SNR	Signal to Noise Ratio
STBC	Space-Time Bloc Code
STTC	Codes espace-temps en treillis
TACS	Total Access Communication System

TFD	Transformée de Fourier Discrète.
VDSL	Very high bit rate digital subscriber line
Wi-Fi	Wireless Fidelity.
WIMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
ZF	Zero Forcing
ZP	Zeros padding

Introduction

Générale

## Introduction Générale

Depuis quelques années, les réseaux mobiles sans fils ont connu une évolution qui n'a cessé de croître, d'abord la 1ère génération, la 2ème génération (GSM), la 3ème génération (UMTS) puis la 4ème génération (LTE), et ne compte pas s'arrêter là, car il y aura d'autres qui vont suivre (la 4ème génération LTE-Advanced et la sortie de la 5ème génération en 2016).

L'évolution des systèmes de communications numériques s'articule autour de plusieurs aspects : des besoins croissants de débit, le caractère mobile du terminal, un contexte d'encombrement de la ressource spectrale. Les modulations à mono-porteuse ne permettent pas de répondre d'une manière optimale à ces besoins, en raison de la sélectivité en fréquence des canaux et des multiples trajets que peut emprunter un même signal. L'optimisation du rapport débit/largeur de bande nécessite l'utilisation de la technologie multi-antennes ou bien le (MIMO : Multiple-Input Multiple-Output) permet aussi d'augmenter les débits de transmission.

Les modulations sont assez sensibles aux interférences entre symboles (ISI : Inter Symbol Interference) introduites dû à la sélectivité fréquentielle du canal de transmission multi-trajets. Cette contrainte impose aux concepteurs des systèmes de communication de mettre en œuvre des techniques, on peut citer : les techniques de transmission multi-porteuses, les techniques d'étalement de spectre, l'égalisation, etc. L'utilisation des techniques de transmission multi-porteuses (par exemple OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

L'OFDM transmet des données en utilisant un grand nombre de porteuses à largeur de bande étroites. Ces porteuses sont régulièrement espacées dans la fréquence, formant un banc de spectre. L'espacement de fréquence et la synchronisation des porteuses sont choisis de telle manière que les porteuses soient orthogonales, signifiant qu'elles ne causent pas l'interférence entre elles. La démodulation et l'égalisation sont réduites à l'application de la FFT (FFT : Fast Fourier Transform) et à une simple multiplication par un scalaire pour chaque sous-porteuse.

Les systèmes multiple input multiple output MIMO ont fait l'objet de plusieurs recherches depuis la dernière décennie du vingtième siècle. En 1984 Jack Winters du Bell Lab a présenté une étude fondamentale des limites des débits des systèmes à antennes multiples dans un environnement à trajet multiples avec évanouissement de Rayleigh. La technologie MIMO consiste à l'utilisation non plus d'une seule antenne pour émettre et/ou recevoir le signal mais plusieurs antennes à l'émission qu'à la réception. L'avantage d'une telle transmission est la diversité spatiale qui permet d'augmenter la capacité. Le principe de cette technique consiste à scinder un flux de données à débit élevé en plusieurs flux à débit plus faibles qui sont ensuite

transmis en parallèle sur plusieurs canaux spatiaux (antennes). Il existe différentes approches à savoir : formation de voies, multiplexage spatiale, codage espace-temps, privilégiant soit la robustesse, soit l'efficacité spectrale et nécessitant ou non la connaissance du canal à l'émission et/ou à la réception.

On a jugé utile de partager le mémoire en trois chapitres :

Le premier chapitre de ce mémoire est consacré à une étude générale de la nouvelles technologie radio-mobile de 5ème génération. Dans ce contexte nous présentons un historique de l'évolution des réseaux mobile jusqu'à l'arrivée de la 5G. Par la suite, nous développons les points essentiels de la 5G. Nous terminerons ce chapitre par une présentations des technologies clés des réseaux 5G.

Dans le deuxième chapitre on a estimé nécessaire de donner des définitions concernant les techniques OFDM et MIMO ainsi que MIMO-OFDM . en commençant par les fonctionnement de la modulation OFDM . On va aborder plus particulièrement les techniques de diversité soit en réception où en émission des systèmes MIMO ;ensuite traite l'association de la technique MIMO avec la technique de modulation multi-porteuses OFDM. par une présentation détaillée sur le principe de système MIMO-OFDM

Dans le troisieme chapitre, nous allons modéliser un système MIMO-OFDM point à point avec beamforming. La combinaison des techniques de multiplexage à entrées multiples et sorties multiples (MIMO) et de multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM) a été adoptée dans les récentes normes sans fil, telles que les familles 802.11x, pour fournir un débit de données plus élevé. Comme MIMO utilise des réseaux d'antennes, la formation de faisceaux peut être adoptée pour améliorer le rapport signal / bruit (SNR) reçu, ce qui réduit à son tour le taux d'erreur binaire (BER).

# Chapitre 1

# CHAPITRE 1 : Réseaux de 5eme génération

## 1.1 Introduction

La vie a évolué ces dernières années grâce à des appareils Complexe qui nous aident à rester connecté au monde. Sont « les téléphones mobiles intelligents ».

Actuellement les communications sans fils sont à une croisée de chemins en effet la demande de capacité croissante et la prolifération d'appareils intelligents , avec des applications nécessitant des débits élevés ,nécessitent de nouvelles générations de réseau plus efficaces pour permettre une augmentation substantielle de performances , Les systèmes de communications mobiles de 5<sup>ème</sup> génération répandent à une large gamme de besoin des services hétérogènes devraient fournir des améliorations de ( le débit, faible latence, la capacité de trafic, l'efficacité du réseau, efficacité spectral..)[1] .

L'objectif de ce chapitre est de présenter la 5ème génération afin de parler sur les réseaux mobiles en général, en suite en va définir le système 5G, son spectre de fréquence, ses différents usages, ces standards, son architecture, ainsi ses technologies, en fin en présente quelques futurs objectif liés au réseau 5G.

## 1.2 Evolution des réseaux mobiles

### 1.2.1 La 1 ère génération

la 1G a été le début d'une grande révolution dans le monde de la téléphonie. Celle-ci possédait un fonctionnement analogique et était composée de nombreux appareils volumineux suivants :

- Apparu en 1976 aux États-Unis, l'AMPS (Advanced Mobile Phone System)
- La TACS (Total Access Communication System) est la version européenne du modèle AMPS
- Par la suite en 1983, ETACS (Extended Total Access Communication System) est une version améliorée du standard TACS et donc AMPS développé au Royaume-Uni

Les réseaux cellulaires de première génération ont été rendus obsolètes avec l'apparition d'une seconde génération entièrement numérique [1].

### 1.2.2 La 2eme génération

Créé en 1980, son système cellulaire repose sur une technologie numérique pour la liaison ainsi que pour le signal vocal. Elle utilise les standards suivants :

- Le GSM (Global System for Mobile communications), le standard le plus utilisé en Europe à la fin du XXe siècle, supporté aux Etats-Unis. Ce standard utilise les bandes de fréquences 900 MHz et 1800 MHz en Europe,
- Le CDMA (Code Division Multiple Access), utilisant une technique d'étalement de spectre permettant de diffuser un signal radio sur une grande gamme de fréquences.

Grâce à la perfection du réseau 1G et donc à la création du réseau 2G, il est possible pour les individus de communiquer des données numériques de faibles volume. Il est notamment possible d'envoyer des SMS, ou encore différents autres messages multimédias tels que des photos en MMS. Cette norme GSM permet cependant un débit maximal de 9.6kpbs (kilobits par seconde) ce qui est peu pour notre époque, mais une grande avancée auparavant.

À la suite d'extensions, le standard GPRS (General Packet Radio System) permet d'obtenir des débits théoriques plus puissants atteignant les 40 kbit/s. Cette technologie ne rentrant pas dans les futurs critères de la 3G, les spécialistes ont décidé de la baptiser « 2.5G ».

N'ayant toujours pas terminé son aventure, l'histoire de la 2G continue avec la norme EDGE (Enhanced Data Rates for Global Evolution) Celle-ci a été nommée la « 2.75G »

### **1.2.3 La 3eme génération**

Les spécifications IMT-2000 (International Mobile Télécommunications for the year 2000) de l'UIT (Union Internationale des Communications a été en charge des critères à prendre en compte en ce qui concerne la 3G. Une partie de ces caractéristiques sont les suivantes :

- Ils souhaitent avoir un haut débit de transmission :
- Une compatibilité mondiale de façon à avoir accès au réseau internet dans le monde entier.
- Une compatibilité des services mobiles de 3ème génération avec les réseaux de seconde génération, c'est-à-dire qu'ils souhaitent garder les paramètres des générations précédentes (envoi de messages et contenus multimédias).

La principale norme 3G en Europe s'appelle UMTS (Universel Mobile Télécommunications System).

### **1.2.4 La 4ème génération**

Cette génération est celle utilisée actuellement. En voie d'expansion à travers le monde, la 4G n'est pour l'instant disponible que dans certaines agglomérations. Cette évolution garantie un échange de données plus importants puisque le débit n'a pas à se partager comme au sein de la 3G ou les données internet et conversations téléphoniques étaient séparées. Les débits de la

4G vont de 100Mb/s à 1Go/s. Elle offre un débit alors nettement supérieur à celui aux autres générations de ce réseau.

### **1.2.5 La 5eme génération**

La technologie 5G est une « technologie clé » qui pourrait permettre des débits de télécommunication mobile de plusieurs gigabits de données par seconde : soit jusqu'à 1 000 fois plus rapide que les réseaux mobiles en 2010 et jusqu'à 100 fois plus rapide que la 4G à l'horizon 2020. L'apparition de ce débit permettrait de répondre aux attentes croissantes des individus possédant un smartphone connecté au réseau. Ce type de réseau devrait favoriser le cloud computing, basé sur une étude de Microsoft Azure. De plus, ce réseau faciliterait l'intégration d'objets communicants et de smartgrids. Ce sont des réseaux électriques publics auxquels sont ajoutés des fonctionnalités issues des nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC). La 5G serait la solution si toute fois notre environnement venait à se domotiser intégralement pour devenir une « ville intelligente ». Cela pourrait également développer l'imagerie 3D.

### **1.3 C'est quoi la 5G ?**

La 5G est un élément de futur communication utilise les bandes millimétriques pour la transmission des données c- à- d les bandes de fréquences ultra haute (UHF entre 6-300 GHZ). la 5G une évolution de la 4ème génération comme le montre dans la figure au-dessus, découle à l'arrivisme de répondre à une gamme plus large de service et d'application dans les communications mobiles et sans fil , elle vise à fournir une plateforme flexible permettant de nouvelle analyse de modèle intégrant des industries verticales ,telle que l'automobile ,la fabrication ,l'énergie la cyber santé et divertissement ,pour cela le découpage de réseau apparait comme un cadre prometteur à l'épreuve du temps l'adhésion aux besoin technologique et commerciaux des différents industries . Le découpage de réseau doit être étendant sur différent domaine technologique (réseau centrale, réseau transport, et d'accès) et domaine administratif [2].

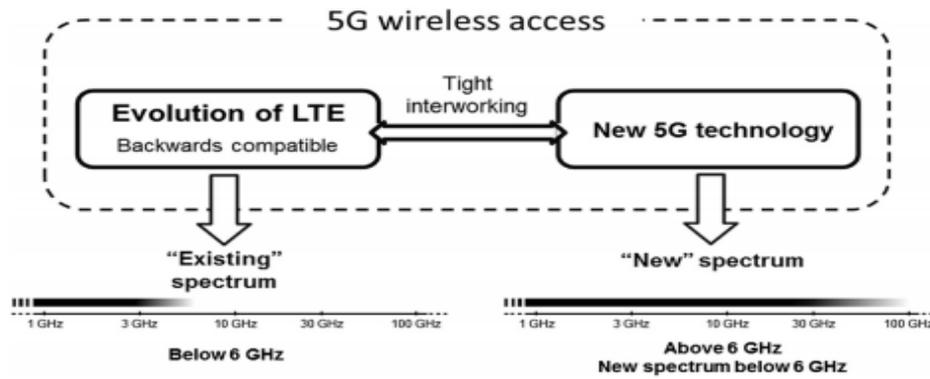


Figure 1. 1 :Solution globale d'accès sans fil 5G consistant en l'évolution du LTE en combinaison avec une nouvelle technologie de radio accès 5G [3]

### 1.3.1 Le spectre de fréquence

L'Access mobile 5G permette d'augmenter les volumes de données mobiles pris en charge, la grande fiabilité, la faible latence .la quantité, qualité et l'efficacité d'utilisation du spectre sera un facteur de succès pour la 5G. Le spectre de fréquence de haut débit mobile devra « 1340-1960 MHZ » d'ici 2020 avec une capacité des trafics de réseau mobile 1000 fois plus élevée que des autres technologies [4]

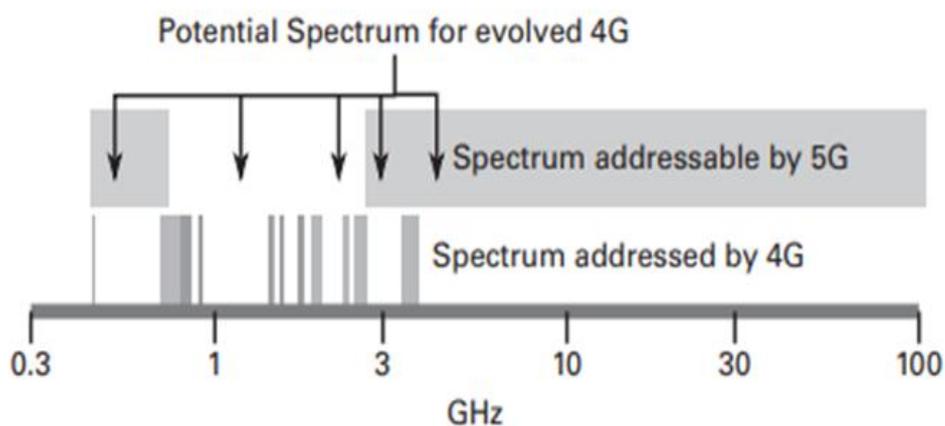


Figure 1. 2 : Spectre de 5G [4].

### 1.3.2 Usages de la 5G

L'UIT a publié le diagramme (coin triangle) illustré dans la figure 1.3, pour identifier les services 5G. les cas d'usages significatifs contiennent les services à venir de la 5G ( eMBB, mMTC , URLLC) [3]:

- eMBB : (enhanced Mobile Broadband) correspond à une évolution plus simple des services mobiles d'aujourd'hui haut débit, permettant d'augmenter le volume des données.
- mMTC : (Massive Machine-Type Communication) correspond aux services caractérisé par un nombre massif de périphérique par exemple des capteurs distants, des actionneurs et une surveillance de divers équipements pour un faible cout de périphérique, une consommation d'énergie très faible permettant une très long duré de vie de la batterie d'au moins plusieurs années.
- URLLC : (Ultra –Reliable and low –latency) sont les services de communication ultra faible pour le besoin critique avec une très faible latence et une fiabilité élevée par exemple la sécurité de la circulation, contrôle automatique de l'automation d'usine [3].

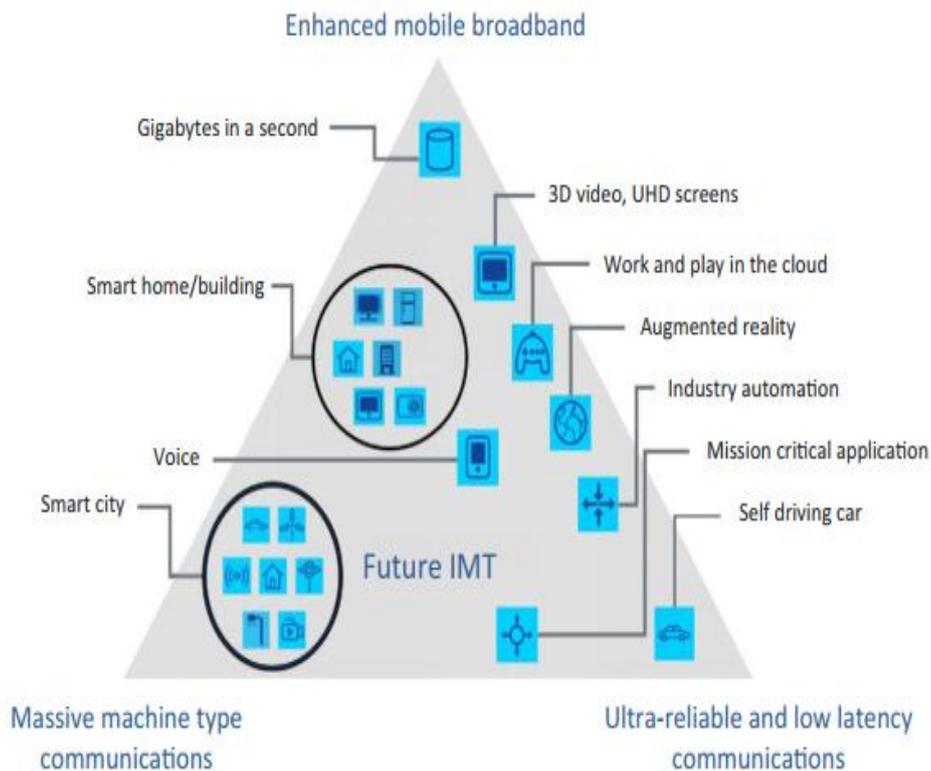


Figure 1. 3 : Différents catégories de 5G [3].

### 1.3.4 Standards de la 5G

Les activités de normalisation de 5G dans l'ITU, 3GPP, IEEE sont représenté ou dessous :

- UTI-R : le groupe de travail 5D dirige le standard de radio communication de l'UIT-R en 2012 pour l'objectif de développer des exigences pour une interface aérienne de communication mobile 5G.

- IEEE : organisme de l'institut des ingénieurs électriciens et électroniciens permet de traiter les réseaux métropolitain, IEEE 802.15 pour les réseaux personnels sans fil (WPAN), IEEE 802.11 une norme de Gbit (IEEE 802.11 ac de 5G pour les hautes fréquences), (IEEE 802.11 ad pour les ondes millimétriques de 60 GHz sont des systèmes découlent en 2013 vers l'année 2020.
- 3GPP : une organisation de communication mobiles écrit des spécifications techniques pour 2G GSM, 3G WCDMA / HSPA, 4G LTE et 5G NR. Les technologies 3GPP sont les plus largement déployées au monde, avec plus de 95% des 7,8 milliards d'abonnements mobiles dans le monde au quatrième trimestre 2017 [3].

### 1.3.5 Architecture de réseau 5G

Un réseau 5G est composé d'un accès réseau 5G AN (Access Network) et d'un réseau 5G (5G Core). Le réseau d'accès (AN) : est composé la nouvelle génération de réseau d'accès radio (NG-RAN), qui utilise la nouvelle interface radio 5G(NR), et/ou un non 3GPP AN connecté au réseau cœur 5G [1], la connexion entre les entités de réseau se fait par le protocole TCP/IP, qui prend en charge les fichiers QOS.

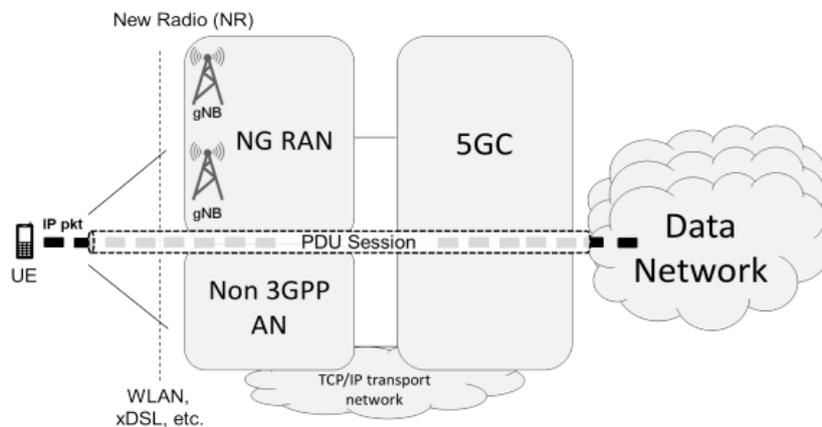


Figure 1. 4 : Architecture de réseau 5G [5].

Comme illustrer la figure 1, dans la 5G l'équipement d'utilisateur connecter a des réseaux mobile externe. La session PDU responsable sur le service de connectivité 5G, elle est constituée d'une séquence de tunnels NG au niveau de 5GC et un ou plusieurs porteurs radios sur l'interface radio. La session PDU est similaire à un porteur EPS à LTE la différence est le model QOS et les unités des donnes des utilisateurs supportés. La session PDU permet le transport des paquets IP et aussi l'ETHERNET de plus permettant une communication de la couche -2 entre les groupe d'EU, le flux QOS est la base de model 5G. Le NG-RAN est le responsable de l'établissement, la maintenance et la libération des parties des sessions PDU

qui traversent l'interface radio. Il gère le problème de l'insuffisance (interférence et réduction énergétique) les Handover inter-gNB, et le multiplexage de la session. Les fonctions de 5GC gèrent les parties restantes des parties PDU ainsi que tous les autres processus non liés à l'accès radio [5].

### New Generation Radio Access Network (NG-RAN)

Les NG-RAN est composé d'un ensemble de station de base 5G appelée gNB connecté au 5GC par un ensemble d'interface logique, les gNB connectés par interface Xn afin d'améliorer les fonctions de mobilité et de gestion.

Le fonctionnement de la gNB est parfois réparti. Dans ce cas, l'architecture résultante est formée par une unité centrale (gNB-CU) qui nécessite une ou plusieurs unités distribuées (gNB-DU) et connectées à une carte radio distante (RRH). L'unité centrale est encore divisée en deux parties, une pour les fonctions de plan de contrôle (gNB-CU-CP) et l'autre pour les fonctions de plan d'utilisateur (gNB-CU-UP) [5]

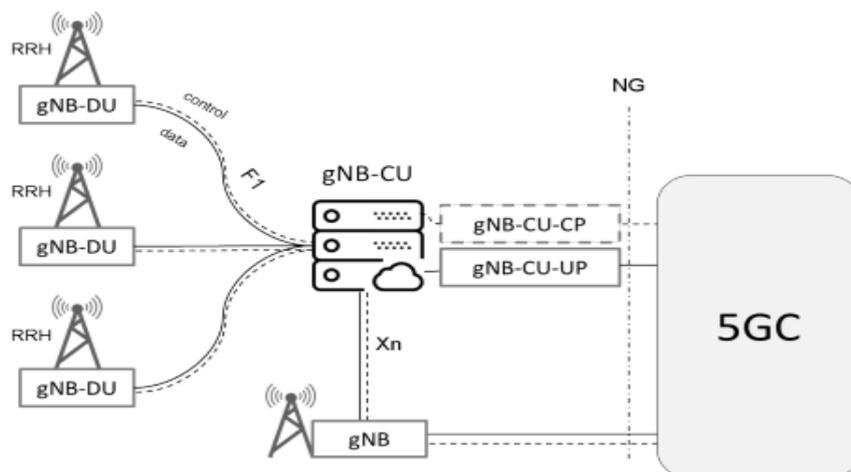


Figure 1. 5 : Architecture de NG-RAN [1]

□ 5G Core Network (5GC) : Le 5GC a une architecture basée sur le service applicable partout, les procédures sont définies comme des services de sorte qu'il est possible de les réutiliser [5]. Dans le core 5G, les interactions entre les entités du plan contrôle utilisent des interfaces basées sur les services prises en charge par des outils web tels que HTTP/2, REST et JSON [5].

### 1.3.6 Technologies de 5G

Les réseaux mobiles 5G sont sous des activités intense de portée et de développement. Par rapport aux réseaux mobiles 4G actuel, commercialisé autour de 2019/2020, ils devraient soutenir une capacité de système énorme. Moins de latence et environ 1000 fois plus de dispositifs par kilomètre carré, entre autres exigences. Pour satisfaire ces exigences. Plusieurs

nouvelles technologies ont été suggérées et sont en cours de développement pour les réseaux 5G [6].

### 1.3.6.1 Entrée multiple sortie multiple massif (mMIMO)

Une technologie travailler avec des fréquences inférieures à 6 GHz approprié à la couche physique basé sur la multiplication de nombre de canaux entre antenne. Le principe de base de cette technologie consiste à augmenter le nombre de réseau d'antenne au niveau de la station de base qui transmette simultanément aux différents terminaux. la communication MIMO se fait par deux format : la diversité spatiale et le multiplexage spatial :

- La diversité spatiale transmette les mêmes données dont des chemins différents, plusieurs antennes au niveau de récepteur reçoive les données et traité.
- Le multiplexage spatial : les données sont découpées en petite partie et envoyer par différent chemin, dans cette technique la vitesse augmente mais à moindre fiabilité.

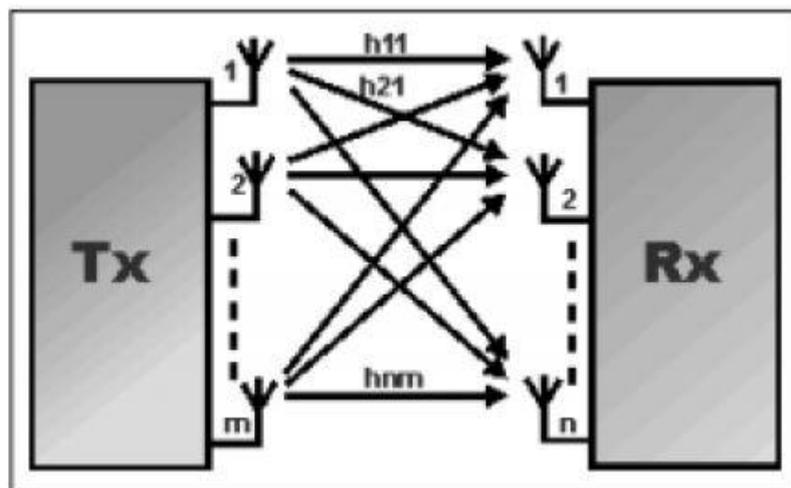


Figure 1. 6 : Système MIMO [7].

### 1.3.6.2 Utilisation de petite cellule

A cause de l'utilisation de la bande millimétrique pour la transmission des données à grand débit, le fait que les ondes millimétriques sont bloquées par les obstacles, l'utilisation des petites cellules est la solution optimale qui devrait améliorer la couverture, la qualité et la capacité de service réseau.

### 1.3.6.3 L'utilisation des fréquences des ondes millimétriques

Au cours des dernières années, les communications sans fil sont omniprésentes et sont déployées dans de nombreuses applications différentes. Les débits de données extrêmement élevés et l'amélioration des performances des réseaux sans fil sont des sujets de préoccupation

importants pour satisfaire les futurs besoins des clients .De manière inhérente, un système nécessitant un débit de données élevé se traduit Directement par une demande de bande passante disponible élevée, l'utilisation de Fréquences de porteuse beaucoup plus élevées a été proposée comme solution pour une bande passante plus large disponible. La bande de fréquence à ondes millimétriques (onde mm) et au-delà a fait l'objet de nombreuses recherches pour surmonter la saturation des ressources spectrales Ces fréquences correspondent à des fréquences de 30 GHz à 300 GHz, associées à une longueur d'onde de 10 mm à 1 mm, respectivement. Le principe derrière les ondes millimétriques est d'offrir une bande passante disponible élevée et une puissance transmise élevée. Ce qui distingue ces bandes à haute fréquence des autres est leur vitesse [5].

#### 1.3.6.4 Communication sans fil full-duplexe

L'émission et la réception des données dans les systèmes des réseaux mobiles classique se font dans des différentes bandes de fréquences (FDD duplexage en fréquences, TDD duplexage en temps). La communication full-duplexe permet de limiter les interférences entre les stations radio, macro et Small, et les terminaux. De façon d'Utiliser une seule fréquence pour assurer simultanément l'émission et la réception des données

#### 1.3.6.5 Le déploiement d'une nouvelle génération d'antenne <<intelligentes >>

Un grand nombre d'antenne dans le but d'atteindre les débits et les capacités inacceptable. Cette technique gérer la focalisation et un faisceau fin et précisé dont le but d'augmenter. l'efficacité de signal, consommation moins d'énergie et gérer les interférences.



Figure 1. 7 : Les différents technologies de la 5G [5].

La technique d'accès multiple et la modulation utilisées sont les conditions principales de l'efficacité spectrale. 1.

#### 1.3.6.6 Modulation utilisé dans la 5G

LTE Advanced (4G) le multiplexage par répartition en fréquence orthogonale (OFDM) et l'accès multiple par répartition en fréquence orthogonale (OFDMA) comme une technique de modulation et une planification d'accès multiple. De plus la 3G utilise l'accès multiple par répartition en code (CDMA) en téléphonie cellulaire. En 5G l'application de l'OFDM sur les ondes millimétriques n'est pas officielle. Une étude comparative des schémas de modulation FBMC, multi-porteuse filtrée universelle (UFMC) et OFDM en 5G a été présentée.

### **1.3.6.7 Codage de la 5G**

Le groupe de travail chinois IMT-2020 a choisis le code polar, comme l'une des techniques centrales de la 5G. le code polar a été élaboré en 2008 par Erdal ARIKA. Ce dernière autorisé par le gouvernement chinois en 2013 , il est utilisé par plus de 50 entreprise tel Huawei Technologies Co, Xiaomi Inc, la China Academy of Télécommunication Research ou encore la China Mobile Ltd.

### **1.3.6.8 Domaines d'applications de la 5G**

La technologie de 5G possède des pas de transformations immense afin de faciliter nos vies, en effet le système de 5<sup>ème</sup> génération devient indispensable pour satisfaire les demandes des personne qui utilisent une quantité importante de transformation des données [8] :

#### **□ Transport :**

- Les données relatives aux transports circulent librement entre les sous-secteurs des transports auparavant isolés.
- Possibilités de nouvelles collaborations et applications.
- Véritable expérience de l'Internet des objets dans laquelle tous les éléments rencontrés sur la route sont connectés.
- Les données et les données évoluées produites sont reconnues par l'ensemble des parties prenantes et sont protégées dans la mesure où elles constituent le carburant de la nouvelle chaîne de valeur `
- Le partage de données relatives au transport et l'accès à ces données est fondamental.

#### **□ Automobile :**

- Le secteur est ouvert au changement.
- De nouveaux modèles économiques font leur apparition.
- Niveau de confiance élevé de la part des utilisateurs et des secteurs connexes.
- Normalisation et cadres efficaces au niveau gouvernemental.

#### **□ Service publics :**

- Niveaux élevés de connectivité soutenus par un environnement réglementaire solide
- Collaboration inter-verticale et Trans-verticale.
- Interopérabilité et intégration.
- Conception d'un nouvel écosystème de dispositifs et de réseaux afin de répondre aux besoins des consommateurs.

□ **Soin de santé :**

- Acceptation généralisée de l'innovation fondée sur la technologie.
- Les professionnels de la santé sont ouverts au changement.
- Emergence de nouveaux modèles économiques étayés par des réglementations solides et claires.
- La prévention des maladies relève du domaine des soins de santé au même titre que le traitement de celles-ci .
- L'amélioration du bien-être et de la qualité de vie relèvent du domaine des soins de santé.

### **1.3.6.9 Objectif de la 5G**

- Changement au mieux la vitesse de transmission des données.
- Le temps de latence plus court.
- Une grande couverture.
- Utilisation d'énergie du réseau réduite.
- Long durée de vie de batterie (jusqu'à 10 ans).
- 1000 fois l'augmentation de bande passante.
- Plusieurs appareils connectés (jusqu'à 100 fois).
- 99.999% de disponibilité
- Le double de la vitesse de transmission par rapport au 4G.

### **1.4 Conclusion**

Actuellement, l'explosion des systèmes de communication impose à améliorer les performances et l'architecture de réseau mobile, les autres générations sont utilisées pour des communications ultra faibles avec un temps de latence faible des communications massives de type machine, ce qui oblige le groupe de travail dans le secteur de communication à présenter une nouvelle génération sous le nom de 5G. La 5G connue par sa grande portée et sa bande de fréquence large a devienne une génération de communication major.

# Chapitre 2

## Chapitre 2 : OFDM ET MIMO-OFDM

### 2.1 Introduction

Dans ce chapitre , nous allons nous intéresser aux techniques multi-porteuses et plus particulièrement à la technique OFDM. Le principe de base de l'OFDM repose sur la répartition de l'information sur un grand nombre de sous-porteuses ayant un faible débit. Ces sous porteuses sont moins sensibles aux distorsions du canal, créant ainsi des sous-canaux très étroits de largeur inférieure à la bande de cohérence du canal, donc des sous-canaux non sélectif en fréquence. S'il y a un profond évanouissement, il n'affectera que certaines fréquences, qui pourront être "récupérées" par une égalisation fréquentielle (FEQ : Frequency Equalizer). Les systèmes de transmission actuels équipés d'une antenne à l'émission et à la réception (SISO) ne tirent profit que de la diversité temporelle et/ou fréquentielle. Contrairement, les systèmes MIMO permettent de profiter d'un ordre supplémentaire de diversité apporté par la dimension spatiale. En plus, les systèmes MIMO présentent des avantages par rapport aux systèmes SISO tel que:

- 1) Grâce à la diversité spatiale ils permettent d'améliorer la qualité du lien en réduisant les évanouissements des canaux,
- 2) Ils permettent d'augmenter le débit d'information sans augmenter la bande passante utilisée ou la puissance transmise. Le principe de base des systèmes MIMO consiste à combiner les signaux judicieusement à l'émission qu'à la réception, ce qui augmente la fiabilité de la transmission. Les systèmes MIMO peuvent employer un codage en bloc espace-temps (STBC) exploitant à la fois les dimensions spatiale et temporelle. Alors que la combinaison de la technique OFDM avec le système MIMO va permettre d'exploiter à la fois les diversités temporelles, fréquentielles et spatiales [9].

Pour assurer les objectifs de la cinquième génération concernant la transmission de l'information numérique à des débits plus élevés et pour une qualité de service de plus en plus exigeante ainsi pour la résolution de problème de limitation de capacité des réseaux par rapport à la bande passante ou à la puissance d'émission. La 5G emploie un nouveau système de transmission qui est représenté par le MIMO Beamforming qui comporte deux technologies. MIMO Massif qui repose sur l'installation de plusieurs antennes soit à l'émission ou à la réception et qu'offre une efficacité spectral plus élevée que celle des systèmes mono-antenne, ce système assure aussi une

augmentation de la capacité du réseau ; Et grâce à l'association du Beamforming qui focalise presque la totalité de la puissance émise vers le récepteur concerné, ce système devient plus robuste aux évanouissements du canal de transmission en améliorant donc la qualité de transmission

## **2.2 la technique OFDM**

### **2.2.1 C'est quoi OFDM ?**

La technique OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) est la modulation multi-porteuse la plus répandue et elle est utilisée dans nombreux systèmes de communications sans fil tel que WiFi IEEE 802.11, WiMax IEEE 802.16, LTE [10]. La grande popularité de la modulation OFDM vient principalement de sa grande efficacité spectrale due à l'espacement étroit entre ses sous-porteuses orthogonales, sa robustesse aux effets du multi-trajet et capacité d'éviter les interférences inter-symboles et inter-porteuses grâce à l'ajout de préfix cyclique (CP).

L'OFDM est une forme particulière de la technique de modulation multi-porteuses par multiplexage par répartition en fréquence (FDM). Dans les systèmes à porteuses multiples, les informations à transmettre sont divisées en plusieurs fragments plus petits et sont transmises indépendamment [11].

OFDM, comme FDM, sépare la largeur de bande du canal en plusieurs sous-porteuses à bande étroite pour acheminer les informations. Pour prévenir les interférences de porteuses adjacentes (ACI), les systèmes FDM traditionnels nécessitent de petits espaces ou des bandes de garde entre les porteuses où aucune information ne peut être transmise. Cela entraîne une perte de spectre. Pour résoudre ce problème, OFDM utilise des sous-porteuses spéciales, orthogonales les unes aux autres. Cela permet non seulement de retirer les bandes de garde, mais étant donné que les sous-porteuses ne sont absolument pas liées, elles peuvent même se chevaucher. C'est pourquoi OFDM utilise si efficacement la bande passante [12]. L'utilisation de sous-canaux à bande étroite par rapport à un seul canal à large bande rend le système très résistant aux évanouissements de canal, ce qui réduit considérablement la complexité requise de l'égaliseur de récepteur. Un récepteur OFDM typique utilise uniquement un égaliseur à prise unique par sous-porteuse

### **2.2.2 Modulation mono porteuse**

Dans la modulation mono-porteuse, chaque symbole élémentaire d'information occupe toute la bande spectrale disponible sur un intervalle de temps minimale. Les systèmes de

transmission mono porteuse sont des systèmes qui transmettent les données de façon séquentielle sur une seule bande de fréquence ou canal physique, autour d'une seule porteuse.

### 2.2.3 Modulation multi porteuse

Les techniques qu'on appelle multi porteuses consistent à transmettre des données numériques en les modulant sur un grand nombre de porteuses en même temps. Ce sont des techniques de multiplexage en fréquence qui existent depuis longtemps. Son principe est de diviser la totalité de la bande passante allouée à la transmission en un nombre fini de sous-porteuses. L'information sera transmise sur chacune de ces sous-porteuses. En effet, le train binaire contenant l'information à transmettre sera répartie sur  $N$  sous-porteuses orthogonales. L'espacement entre les sous-porteuses est choisi tel que ces dernières soient mathématiquement orthogonales les unes par rapport aux autres

### 2.2.4 Principe de la modulation OFDM

Le principe de l'OFDM consiste à répartir sur un grand nombre de sous-porteuses le signal numérique que l'on veut transmettre. Comme si l'on combinait le signal à transmettre sur un grand nombre de systèmes de transmission (des émetteurs, par exemple) indépendants et à des fréquences différentes. Pour que les fréquences des sous-porteuses soient les plus proches possibles et ainsi transmettre le maximum d'information sur une portion de fréquences donnée, l'OFDM utilise des sous-porteuses orthogonales entre elles. Les signaux des différentes sous-porteuses se chevauchent mais grâce à l'orthogonalité n'interfèrent pas entre eux. Comme le montre la figure suivante :

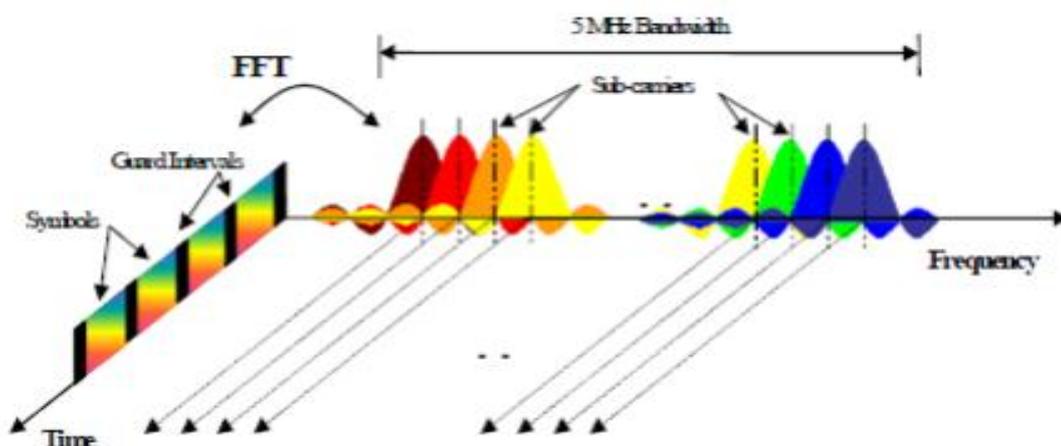


Figure 2. 1: Représentation fréquentielle et temporelle d'un signal OFDM.

Le principe du multiplexage en fréquence est de grouper des données numériques par paquets de  $N$ , qu'on appellera symbole OFDM et de moduler par une porteuse différente chaque

donnée en même temps. La figure II.2 illustre le principe d'un modulateur OFDM. Considérons une séquence de  $N$  données  $c_0, c_1, \dots, c_{N-1}$ , appelons  $TS$  la durée symbole c'est-à-dire le temps qui sépare 2 séquences de  $N$  données. Chaque donnée  $C_k$  module un signal à la fréquence  $f_k$ . Le signal  $s(t)$  total correspondant à toutes les données d'un symbole OFDM est la somme des signaux individuels [13] :

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{2j\pi f_k t} \quad (2.1)$$

Le multiplexage est orthogonal si l'espace entre les fréquences est  $1/TS$ .

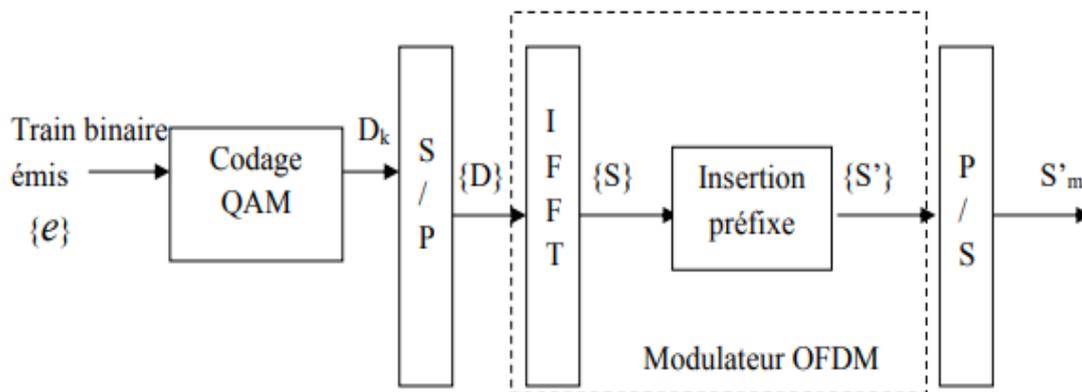


Figure 2. 2: Schéma du principe du modulateur OFDM.

### 2.2.5 Principe de la démodulation OFDM

Le signal parvenant au récepteur s'écrit, sur une durée symbole  $TS$  [13]:

$$Y(t) = \sum_{k=1}^{N=0} C_K H_K(t) e^{2j\pi((f + \frac{k}{TS})t)} \quad (2.2)$$

Est la fonction de transfert du canal autour de la fréquence  $f_k$  et au temps  $t$ . Cette fonction varie lentement et on peut la supposer constante sur la période  $TS$  ( $TS \ll 1/Bd.$ ) [13]. La démodulation classique consisterait à démoduler le signal suivant les  $N$  sous-porteuses suivante le schéma classique :

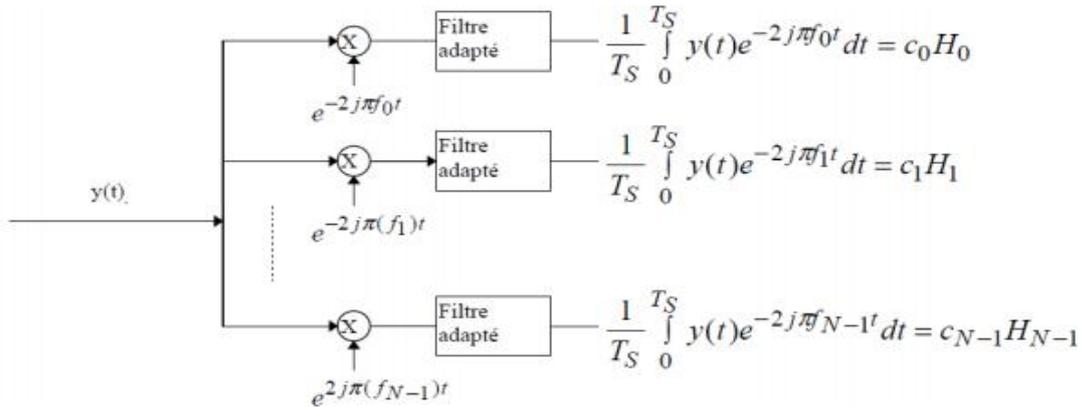


Figure 2. 3: Schéma du principe du démodulateur OFDM.

### 2.2.6 Orthogonalité des sous-porteuses

Afin de ne pas créer un effet d'interférence entre les différentes sous-porteuses (communément appelé ICI, pour Inter-Carrier Interference), les exponentielles complexes doivent être orthogonales entre elles. L'orthogonalité de deux signaux est évaluée en fonction du résultat de leur produit scalaire [14]. Cela conduit à la condition d'orthogonalité donnée par :

La condition d'orthogonalité nous montre que :

$$\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} Y(t) e^{-2j\pi f_i t} dt = \frac{1}{T_s} \sum_{K=0}^{N-1} \int_0^{T_s} C_k H_k e^{2j\pi(K-i)\frac{t}{T_s}} dt = C_i H_i \quad (2.3)$$

Parce que :

$$\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} e^{2j\pi(K-i)\frac{t}{T_s}} dt = \begin{cases} 0 & \text{si } K \neq i \\ 1 & \text{si } K = i \end{cases} \quad (2.4)$$

En pratique, comme pour la modulation, on remarque que la démodulation peut être réalisée par une transformée de Fourier.

### 2.2.7 Intervalle de garde

L'intervalle de garde est inséré à chaque début de trame, prolongeant la durée d'un symbole OFDM à  $T + T_g$ . La période d'intégration reste néanmoins la même puisque l'intervalle est supprimé à la réception. En choisissant un intervalle de garde au moins aussi long que le retard maximum induit par le canal de communication [15], comme montré à la figure II.5, les trames adjacentes à  $i$  n'interfèrent plus pendant la période d'intégration  $T$  du symbole. Les IES sont alors évitées et toutes les composantes du signal sur  $T$  sont issues de la même trame en fonction des échos. L'intervalle de garde est donc élément essentiel des communications OFDM pour s'affranchir des IES.

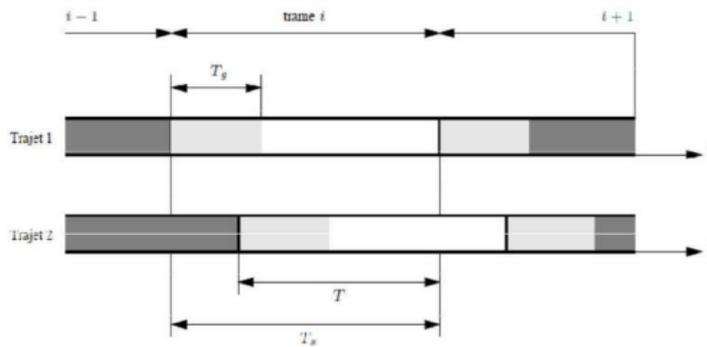


Figure 2. 4: Intervalle de garde.

Il existe principalement deux types d'intervalles de garde utilisés dans la pratique :

1. L'extension cyclique (CP/SC)
2. Le zéro Padding

### 2.2.7.1 Préfixe cyclique

Le CP Consiste à copier une partie de la fin d'un symbole OFDM dans son début comme il est illustré par la figure 2.6 :

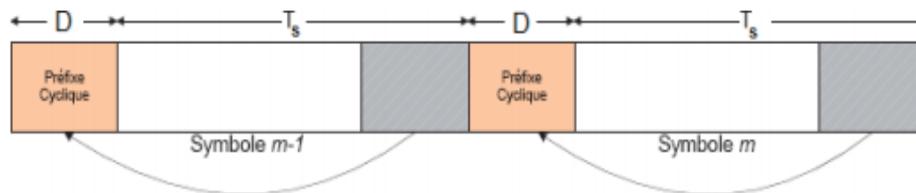


Figure 2. 5: Préfixe cyclique.

Par contre, le suffixe cyclique consiste à copier une partie du début d'un symbole OFDM dans sa fin. Il a été démontré que l'ajout d'un intervalle de garde, de longueur égale ou supérieure à la dispersion maximale causée par le canal, permet de maintenir l'orthogonalité entre les différentes sous porteuses. Le CP et le CS peuvent être utilisés ensemble, comme dans le système VDSL, le premier pour prévenir l'IES et le second pour garantir l'orthogonalité entre les signaux.

### 2.2.7.2 Zero Padding (ZP)

À la différence de l'intervalle de garde de type CP, dans ce cas, l'intervalle de garde ne contient que des zéros.

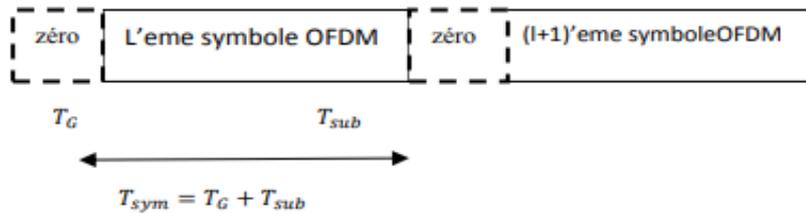


Figure 2. 6: Zéro Padding.

### 2.2.8 Bande de garde

Un symbole OFDM, dans le domaine fréquentiel, 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.

### 2.2.9 Avantages OFDM

Avantages du système OFDM Combattre l'IES et réduction de l'IEP. L'utilisation du préfixe cyclique permet un double avantage :

- L'élimination de l'IES, due à l'occupation de l'intervalle de garde entre deux symboles OFDM.
- La suppression de l'IEP, à cause du maintien de l'orthogonalité entre les sous porteuses.
- **Efficacité spectrale** : L'orthogonalité entre les sous porteuses (sous porteuses espacées de  $1/T_{sym}$ ) permet d'arranger les sous porteuses de manière que les lobes latéraux des sous porteuses adjacentes se recouvrent sans pour autant créer de l'interférence entre porteuses IEP au niveau du récepteurs. L'occupation spectrale est alors réduite par rapport à une FDM (Frequency Division Multiplexing) classique.
- **Simplicité d'implémentation** : L'utilisation des algorithmes IFFT/FFT dans l'implémentation, permet de réduire la complexité et les coûts des émetteurs /récepteurs OFDM [16].
- **Robustesse** : Les systèmes OFDM sont plus robustes que les systèmes mono-porteuses dans les environnements sélectifs en fréquence

- **Débit** : Dans les canaux variant lentement dans le temps, il est possible d'augmenter la capacité d'un système OFDM en adaptant le débit par sous porteuse selon le SNR de cette sous porteuse particulière [17].
- **Intégration** : Les systèmes OFDM peuvent intégrer les bénéfices des systèmes MIMO, des antennes intelligentes et des modulations adaptatives.

## 2.2.10 Inconvénients des systèmes OFDM

### 2.2.10.1 Synchronisation

L'OFDM est très sensible aux erreurs de synchronisation fréquentielle et temporelle. La source d'erreur de synchronisation fréquentielle est, d'une part, la différence entre les fréquences des oscillateurs locaux dans l'émetteur et le récepteur. D'autre part, l'étalement Doppler à cause de la mobilité de l'émetteur et du récepteur. Pour optimiser les performances d'une liaison OFDM, une synchronisation minutieuse doit être maintenue au niveau symbole, fréquences porteuses et fréquence d'échantillonnage [17].

### 2.2.10.2 Rapport puissance crête à puissance moyenne (PAPR)

Le PAPR (Peak to Average Power Ratio), est proportionnel au nombre des sous porteuses utilisées dans un système OFDM. Un PAPR important rend complexe l'implémentation des convertisseurs Analogique/Numérique (DAC et DCA). De même, la conception des amplificateurs RF devient difficile si le PAPR augmente. Pour réduire le PAPR, les techniques de fenêtrage et les techniques d'annulation de crête peuvent être utilisées [16].

### 2.2.10.3 Interférence Co-canal

L'utilisation de l'OFDM dans les systèmes de communication cellulaire induit l'apparition d'Interférence entre Co-Canal (CCI). Ces interférences peuvent être combattues par les techniques d'antennes adaptatives

## 2.3 MIMO-OFDM

### 2.3.1 Système MIMO

les réseaux MIMO (Multiple Input Multiple Output) connus sous le nom de MIMO. Cette technologie émergente se présente comme l'une des méthodes les plus prometteuses pour les systèmes révolutionnaires de la cinquième génération des réseaux mobiles (5G) et de l'internet des objets[18]. Les évolutions technologiques exigeront des systèmes de communication puissants et fiables. Cela nécessite de nombreux progrès sur les systèmes actuels. Dans le cadre des améliorations possibles s'inscrit le MIMO. Les systèmes MIMO

utilisant le multiplex spatial réside dans l'obligation d'utiliser les systèmes dans une bande de fréquence relativement étroite. Ces systèmes ne fonctionnent en effet que dans des environnements favorables aux multi-trajets et qui proposent par conséquent de nombreux échos. Pour éviter l'IES la période symbole doit donc être largement supérieure au plus long des échos, ce qui réduit le spectre utilisable. Il existe plusieurs techniques pour élargir la bande spectrale d'un signal, parmi lesquelles l'étalement de spectre, qu'il soit par séquence directe ou par sauts de fréquence, et les techniques multi-porteuses.

### 2.3.2 Architecture des systèmes MIMO

Selon le nombre d'antennes existant dans les différents dispositifs d'antennes, nous pouvons distinguer plusieurs configurations (SISO, SIMO, MISO, et MIMO)(systèmes). Cependant, ces architectures utilisent des différentes fonctions pour traiter le signal telles que la technique de combinaison, le codage spatio-temporel, le multiplexage spatial etc...., dont le but est d'achever la meilleure performance possible du dispositif antenne.

#### 2.3.2.1 Système SISO

C'est la plus simple des architectures radio peut définies en termes MIMO comme SISO - Single Input Single Output. Ce système ressemble à un canal radio standard (l'émetteur fonctionne avec une antenne comme le récepteur. il ne nécessite aucun traitement en fonction de diversité ni aucun autre traitement). La capacité du canal SISO est donnée par :

$$C = W \log_2 \left( 1 + \frac{P}{WN_0} \right) \text{bps} \quad (2.5)$$

Où :

$P$  : la puissance du signal utile en Watt

$N_0$ : la densité spectrale de puissance du bruit calculé en W/Hz.

$W$  : la bande passante donnée en Hz.

En normalisant la capacité par la bande utile  $W$ , on obtient :

$$C = \log_2(1 + \rho) \quad (2.6)$$

Avec  $\rho$  le rapport signal sur bruit ( $P/N_0$ ).

#### 2.3.2.2 Système MISO

MISO (multiples input single output) est aussi appelé diversité d'émission. Dans ce cas, les données sont transmises en redondance à partir des deux antennes émettrices. À La réception les données sont récupérées par un traitement optimal du signal reçu (la somme des signaux des deux chemins). La capacité du canal MISO est donnée par l'équation suivante:

$$C = W \log_2 \left( 1 + N_t \frac{P_i}{wN_0} \right) = W \log_2 \left( 1 + \frac{P_i}{wN_0} \right) \text{ bps} \quad (2.7)$$

Où  $N_t$ : le nombre d'antenne d'émission.

En normalisant la capacité par la bande utile  $W$ , nous obtenons :

$$C = \log_2(1 + \rho) \quad (2.8)$$

L'équation 2.6 et 2.8 sont identiques, mais l'avantage de la technique MISO par rapport à la technique SISO est que dans les multi trajets, la probabilité d'évanouissement dans  $N_t$  antennes est inférieure à la probabilité d'évanouissement sur une seule antenne

### 2.3.2.3 Système SIMO

Le système SIMO (Single Input Multiple Output) utilise à l'émission une seule antenne et plusieurs antennes à la réception. Il est souvent utilisé pour lutter contre les effets de la décoloration qui se produit lors de la réception de plusieurs signaux d'un certain nombre de sources indépendantes. La capacité du canal SIMO est donnée par l'équation suivante:

$$C = W \log_2 \left( 1 + N_r^2 \frac{p}{wN_0} \right) \text{ bps} \quad (2.9)$$

$N_r$  : le nombre d'antenne réceptrice.

En normalisant la capacité en par la bande utile  $W$ , nous obtenons

$$C = \log_2(1 + N_r^2 \rho) \text{ bps} \quad (2.10)$$

Avec  $\rho$  le rapport signal sur bruit.

### 2.3.2.4 Système MIMO

La technologie MIMO (Multiple input Multiple output) repose sur  $N_t$  antennes de transmission et  $N_r$  antennes de réception. MIMO peut être utilisé pour améliorer la capacité des canaux ainsi que le débit de canal.

Dans le cas de la Figure 2.7 où nous avons un système MIMO à  $N_t$  émetteurs et  $N_r$  récepteurs, le canal MIMO est traduit par une matrice  $H$  de taille dite matrice de canal

$$H = \begin{bmatrix} h_{1,1} & \cdots & h_{1,N_e} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_r,1} & \cdots & h_{N_r,N_e} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Un signal MIMO peut être défini par :

$$Y = HX + \eta \quad (2.12)$$

Où :

$X$  : la séquence émit.

$Y$  : la séquence reçue.

$\eta$ : représente le bruit qui corrompt le signal lors de la traversée du canal.

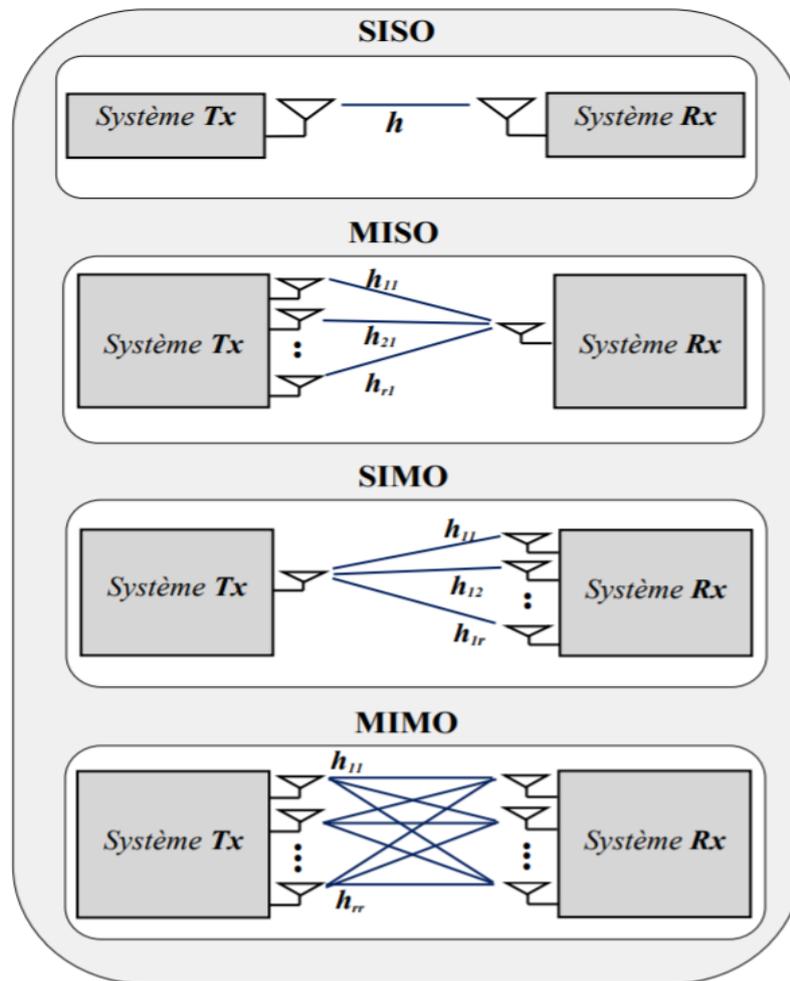


Figure 2. 7 : Systèmes SISO , MISO , SIMO et MIMO

### 2.3.3 PRINCIPE DU SYSTEME MIMO

Les techniques MIMO Les techniques utilisées dans les systèmes MIMO sont classées en trois catégories Les techniques de diversité. Les techniques de multiplexage, Les techniques de formation de faisceaux.

#### 2.3.3.1 Techniques de diversité

Les techniques de diversité reposent sur le principe que la probabilité, que plusieurs sous-canaux indépendants souffrent simultanément d'un évanouissement fort, est trop faible. Ces techniques sont, donc, destinées à améliorer la qualité du lien de communication et réduire par conséquent, le taux de bits erronés. Types de diversité

- a- **Diversité temporelle** : La même information est transmise en redondance sur deux instants différents séparés par un intervalle de temps qui soit supérieur au temps de cohérence du canal.
- b- **Diversité fréquentielle** : La même information est transmise en redondance sur deux bandes de fréquences différentes séparées par une plage de fréquence supérieure à la bande de cohérence.
- c- **Diversité Angulaire** : Plusieurs antennes réceptrices avec différentes directivités permettent de recevoir différentes versions du même signal.
- d- **Diversité spatiale** : Des antennes séparées par une distance suffisamment grande, permettent de créer des sous canaux indépendants. La même information peut ainsi être envoyée sur les différents sous canaux.

### 2.3.4 Techniques de diversité dans les systèmes MIMO

Les techniques de diversité spatiale offrent une troisième dimension en plus du temps et de la fréquence, pour créer de la diversité sans, pour autant, utiliser plus de ressources en temps ou en fréquence.

### 2.3.5 Le multiplexage par division spatiale (SDM Spatial Division Multiplexing)

Le multiplexage SDM consiste à émettre des flux différents sur chacune des antennes d'émission. Le multiplexage SDM peut améliorer le débit de façon significative, car le nombre de données spatiales résolues est plus important. Chaque flux spatial doit disposer de sa propre paire d'antennes de transmission/réception à chaque extrémité du lien radio. Il est important de noter qu'une chaîne de radiofréquences RF et qu'un convertisseur analogique-numérique distincts sont nécessaires pour chaque antenne du système MIMO. Les configurations qui nécessitent plus de deux chaînes d'antennes RF doivent être conçues avec attention pour maintenir des coûts peu élevés tout en répondant aux attentes en matière de performances.

### 2.3.6 Codage spatio-temporel (STC)

Le principe du codage spatio-temporel est d'émettre des symboles différents sur chacune des antennes d'émission tout en introduisant de la redondance pendant T instant. On peut alors améliorer la robustesse de la liaison. On distingue deux techniques

#### 2.3.6.1 Code spatio-temporel par bloc (STBC Space-Time Bloc Code)

Le principe du STBC est d'introduire une redondance d'information entre les deux antennes. Le canal STBC comprend  $M \times N$  sous canaux. Chaque sous canal est un canal à

évanouissements indépendants ; ce qui fait que le STBC augmente la diversité du canal de transmission et donc la robustesse du récepteur.

Cette méthode est très attractive car elle n'exige pas la connaissance de l'état du canal (CSI) même si cela peut réduire la capacité de transmission des données. Le gain de diversité résultant améliore la fiabilité des liaisons sans fil à évanouissements et améliore la qualité de la transmission. Il est à noter que ce type de codage n'améliore pas la capacité de transmission linéairement avec le nombre d'éléments utilisés. Ainsi pour améliorer à la fois la capacité et la qualité, un système MIMO doit être implémenté avec les deux types de codages à savoir le SDM et le STBC [19].

-Un cas particulier : le code d'Alamouti : Dans ce cas on dispose de deux antennes émettrices et d'une antenne réceptrice, utilisant le code d'Alamouti [20]. Comme montré à la figure ci-dessous (Figure. 2.8).

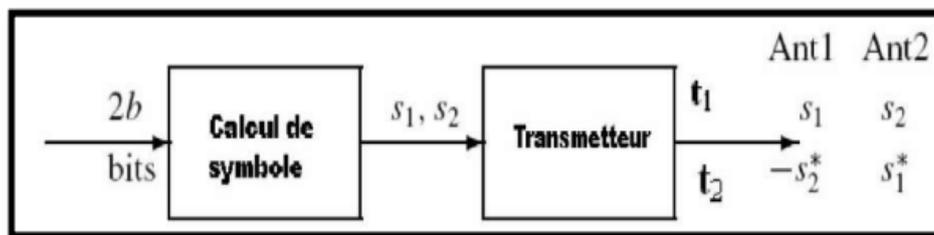


Figure 2. 8 : Schéma d'un système MIMO utilisant le code Alamouti.

### 2.3.6.2 Codes espace-temps en treillis (STTC)

Initialement le concept de codage espace-temps en treillis a été introduit par Tarokh, Seshadri et Calderbank dans leur papier de référence. L'émetteur est constitué d'un ensemble de registres à décalage et de fonctions algébriques générant un mot de code de  $N_t$  symboles transmis simultanément par le réseau d'émission. Le récepteur utilise communément l'algorithme de Viterbi pour rechercher le chemin avec la métrique la plus faible, et donc le plus probable. Cette technique combine les avantages de la diversité spatiale avec ceux du codage en treillis. Cependant, l'inconvénient majeur des codes STTC est la complexité des algorithmes de décodage. [20].

### 2.3.7 Techniques de Multiplexage

Contrairement aux techniques de diversité, le but d'utiliser les techniques de multiplexage est l'augmentation du débit [21]. Cela consiste à diviser le flux de données, qui arrive à l'émetteur, en plusieurs flux secondaires, chacun envoyé sur une des antennes disponibles à l'émetteur en utilisant la bande de fréquence. Il a été démontré que la capacité, d'un système à  $M$  antennes émettrices et  $N$  antennes réceptrices, augmente de façon presque linéaire avec

min (M, N) [22]. Cependant, le grand défi dans les techniques de multiplexage est la détection au niveau du récepteur. La figure 2.9 présente le schéma de base d'un système utilisant le multiplexage spatial [23].

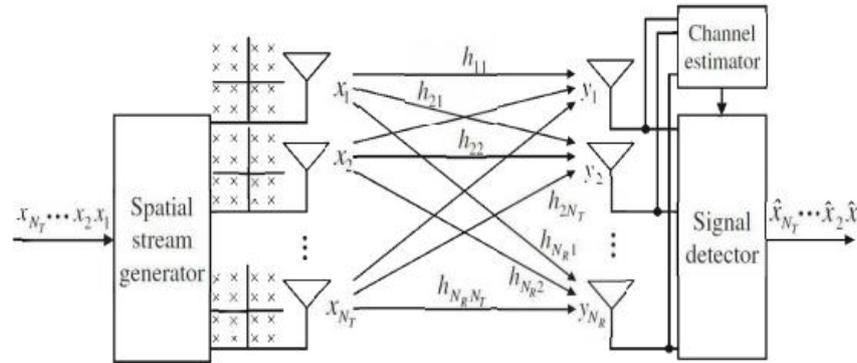


Figure 2. 9: Schéma simplifié d'un système de multiplexage spatial.

Soit  $H$  la matrice du canal MIMO  $M \times N$  représentée dans la figure 2.11 où  $h_{ij}$  le coefficient du canal entre la  $i^{eme}$  antenne émettrice et la  $j^{eme}$  antenne réceptrice avec  $i = 1, 2, \dots, M$  et  $j = 1, 2, \dots, N$ . Les vecteurs,  $x = (x_1, x_2, \dots, x_M)$ ,  $y = (y_1, y_2, \dots, y_M)$  et  $z = (z_1, z_2, \dots, z_M)$  sont, respectivement, les signaux transmis, reçus et le bruit blanc gaussien additif centré de variance  $a$ . Le système peut être décrit par l'équation :

$$y = H \cdot x + z \quad (2.13)$$

Les techniques de détection peuvent être classées en deux catégories, les techniques linéaires et les techniques non-linéaires. Dans cette section, nous présentons quelques techniques utilisées pour la détection.

### 2.3.8 Détection Linéaire

Dans ce type de détection, on détecte un signal désiré par une superposition linéaire de tous les signaux reçus. Ceci se fait en inversant l'effet du canal. Il existe principalement deux méthodes de détection linéaire connues : le forçage à zéro (ZF) et à erreur quadratique minimale (MMSE) [23].

- a) Zero Forcing : L'annulation de l'effet du canal est faite en multipliant le vecteur des signaux reçus par la matrice suivante :

$$w_{ZF} = (H^H H)^{-1} H^H \quad (2.14)$$

Où  $(.)^H$  désigne l'opérateur de la transposée hermitienne. Le signal détecté est donc:

$$x = w_{ZF} \cdot y + (H^H H)^{-1} H^H \cdot z \quad (2.15)$$

À noter que, dans ce cas, les performances du système sont directement liées à la puissance du terme :

$$(H^H H)^{-1} H^H \cdot z \quad (2.16)$$

b) Minimum Mean Square Error : Avec cette technique, la matrice utilisée pour annuler l'effet du canal est un peu modifiée comme suit [23]:

$$w_{MMSE} = (H^H H + \sigma_z^2 I)^{-1} H^H \quad (2.17)$$

La différence donc, par rapport à la technique ZF, est l'ajout du terme  $\sigma_z^2 I$  contenant de l'information statistique sur le bruit additif, ce qui permet de réduire son effet sur le signal détecté.

### 2.3.9 Détection Non-Linéaire

#### 2.3.9.1 OSIC (Ordered Successive Interference Cancellation)

Les méthodes linéaires ont, généralement, une faible performance par rapport aux techniques non-linéaires. Cependant, ceux-là requièrent une complexité plus élevée [23]. La technique OSIC permet d'améliorer la performance avec une légère augmentation dans la complexité. Cette technique consiste en une banque de récepteurs linéaires placés en série. À chaque étage, un seul signal est détecté, soustrait du signal total reçu puis passé à l'étage d'après. Le principe de cette technique est illustré dans la figure 2.12

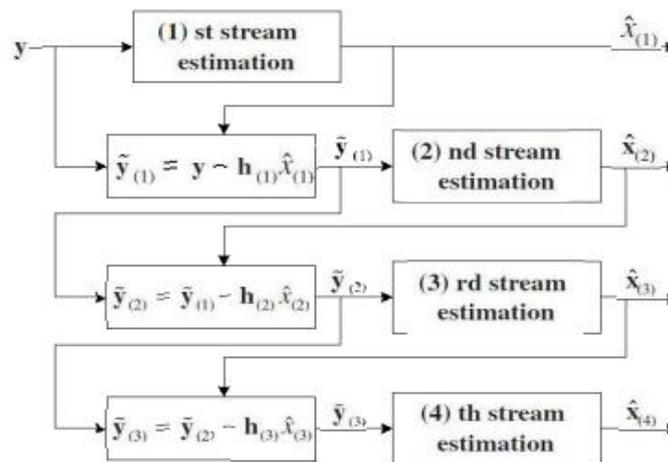


Figure 2. 10 : Principe du détecteur OSIC [23].

#### 2.3.9.2 Détecteur ML (Maximum Likelihood)

Le détecteur à maximum de vraisemblance où :Maximum Likelihood, mesure la distance Euclidienne entre le signal total reçu y et le signal transmis x multiplié par la matrice du canal estimé H selon l'équation suivante:

$$\tilde{X}_{ML} = \operatorname{argmin}_x |y - Hx| \quad (2.18)$$

La performance, du détecteur ML, est nettement meilleure que celle des détecteurs linéaires et OSIC. Cependant, sa complexité augmente de façon exponentielle [23].

### 2.3.9.3 Décodeur sphérique ou Sphere Decoding (SD)

Le décodeur sphérique utilise le même principe que le décodeur ML, sauf qu'il ne fait pas une recherche exhaustive sur tout le domaine des solutions possibles. Il choisit, par contre, un domaine de recherche contenue dans une sphère d'un certain rayon. Le rayon de la sphère grandit lorsqu'il n'y a pas de vecteur à l'intérieur, et rétrécit lorsqu'il y en a beaucoup, comme il est illustré dans la figure 2. 13.

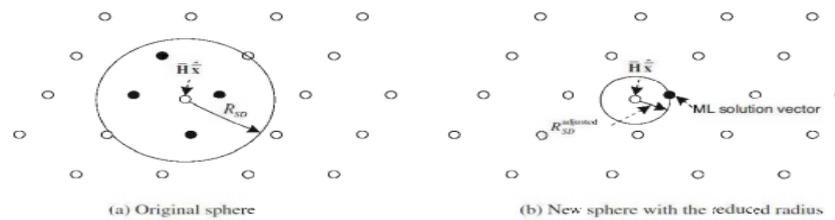


Figure 2. 11: Principe du décodeur sphérique [23].

### 2.3.6 Techniques de formation de faisceaux (Beamforming) et antennes intelligentes

Un système d'antennes MIMO peut aussi être utilisé pour améliorer le rapport signal sur bruit (SNR). Les techniques de formation de faisceaux sont exploitées aussi pour réduire les interférences inter-canaux dans les systèmes à plusieurs utilisateurs, augmentant ainsi le rapport signal sur interférence et bruit (SINR).

### 2.3.10 Antennes intelligentes

Les systèmes antennaires adaptatifs ou intelligents (smart antennas), ils résultent lors de l'association entre les domaines de l'électromagnétisme et le traitement de signal. Ces systèmes ont comme objectif l'automatisation de la réaction de leur capacité, en temps réel, selon les modifications intervenues sur le canal de propagation. Ils s'intéressent aussi à la réduction des pertes d'énergie présentée par les lobes secondaire dans la direction des interférences tout en concentrant la totalité d'énergie dans le lob principal et de lui focaliser vers la direction utile. Généralement, un tel système se repose sur un réseau d'antennes et un processeur récepteur adaptatif qui fonctionne en temps réel et qui assigne des pondérations aux éléments afin d'optimiser le signal de sortie selon une multitude d'algorithmes prédéfinies. Un réseau d'antenne adaptatif peut être définie comme un système qui a la capacité de modifier son diagramme de rayonnement, sa réponse fréquentielle et d'autres paramètres grâce à une boucle à retour de décision interne pendant de son fonctionnement.

Les antennes intelligentes sont capables de définir la position de la cible avant d'envoyer le signal et donc elles focalisent l'énergie uniquement vers la direction désirée. Par contre, pour les systèmes antennaires traditionnels, ils ne peuvent pas définir la localisation du mobile, et alors l'envoi du signal se fait d'une manière très large. Cette transmission augmente le niveau des interférences par l'émission de la puissance vers des directions inutiles.

### 2.3.10.1 Principe de fonctionnement des antennes intelligentes

Les antennes intelligentes semblent être une voie prometteuse pour accroître la capacité des systèmes de transmission. L'idée consiste à utiliser la dimension spatiale des capteurs. La Figure 2.12 illustre ce procédé.

Le principe de fonctionnement peut se résumer aux étapes suivantes [24] :

- 1- La station de base intelligente focalise sur un signal en particulier plutôt de capter les signaux provenant de toutes les directions.
- 2- Former des faisceaux d'énergie orientés vers un usager particulier sans avoir à connaître l'emplacement de cet usager. Cela serait comparable à un dispositif de poursuite, une sorte de signature spatiale. C'est comme doter chaque téléphone cellulaire de sa propre liaison sans fil.
- 3- Il faut moins d'énergie pour focaliser un signal sur 20 degrés qu'il en faut pour l'orienter sur 360 degrés. Donc, en ajoutant un éventail d'antennes et ayant recours à un mode perfectionné de traitement numérique des signaux, on peut créer les antennes intelligentes.

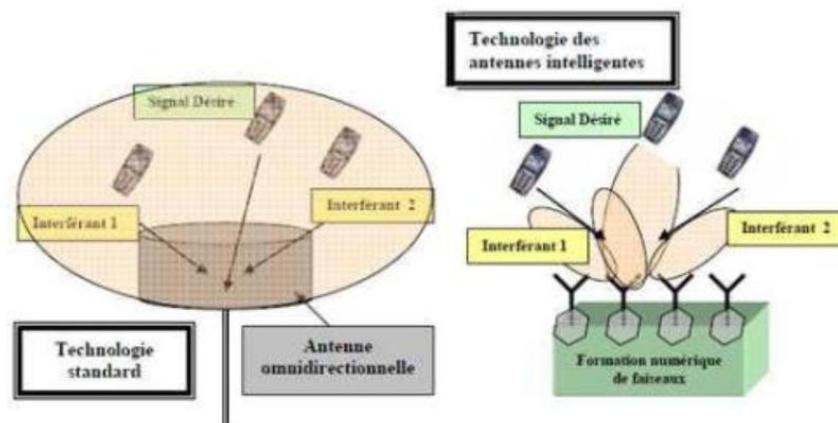


Figure 2. 12 : Principe de base d'une antenne intelligente.

La technologie des antennes intelligentes permettra deux choses:

- 1- L'augmentation du nombre d'utilisateurs que pourra desservir un système cellulaire donné.
- 2- L'accroissement de l'éventail des services offerts par le système cellulaire.

En faisant circuler l'énergie directement entre la station et le téléphone cellulaire de l'utilisateur on produit:

- Une réduction des bruits ambiants.
- Une élimination des interférences provenant d'autres usagers et obstacles.

Cette amélioration de qualité et l'augmentation du nombre d'utilisateurs et de services sont des atouts pour les futurs systèmes sans fils.

### **2.3.11 Antennes adaptatives**

Un réseau d'antennes adaptatives est un ensemble des éléments d'antennes qui s'adaptent continuellement à l'environnement de propagation selon ses changements. Chaque élément d'antenne à son propre coefficient de pondération qui se met à jour d'une manière adaptative pour maximiser son gain dans une direction précise. Grâce à la capacité de focaliser l'énergie et de poursuivre l'utilisateur dont le but est de réduire les interférences entre les signaux, plusieurs utilisateurs peuvent partager le même canal transmission à l'intérieur de la même cellule et donc optimiser l'utilisation des ressources.

D'autre terme, ils peuvent changer leur rayonnement, modèle de réception dynamiquement pour s'ajuster avec les variations de bruit de canal, afin d'améliorer le SNR du signal cette procédure se connaît sous le nom Beamforming Adaptatif.

### **2.3.12 Massive MIMO**

MIMO peut être résumée selon un principe : le multiplexage spatial MIMO consiste à utiliser simultanément les mêmes fréquences radioélectriques pour transmettre des signaux différents. Cela signifie que plusieurs antennes d'émission d'une station de base peuvent émettre des signaux différents et que plusieurs antennes de réception d'un appareil peuvent les recevoir et les diviser simultanément.

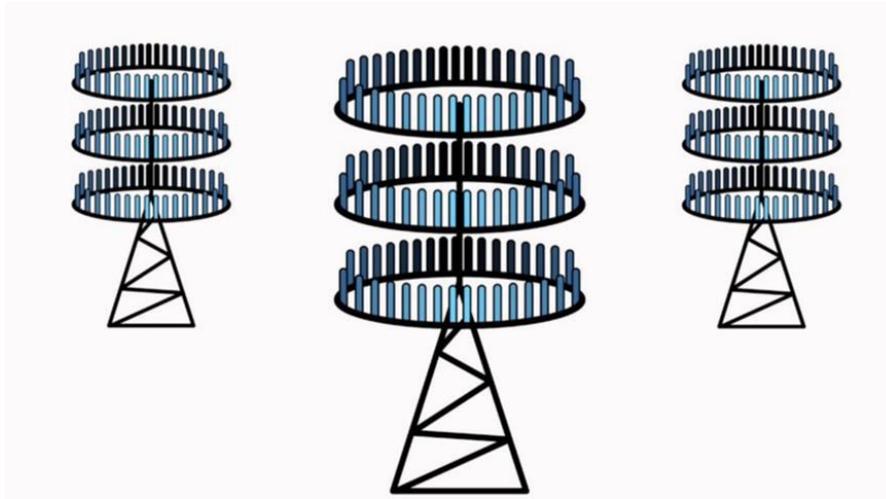


Figure 2. 13 : Une illustration de MIMO massive.

Les réseaux MIMO standard utilisent généralement deux ou quatre antennes pour transmettre les données et le même nombre pour les recevoir. Massive MIMO, en revanche, est un système MIMO avec un nombre d'antennes particulièrement élevé. Massive MIMO augmente le nombre d'antennes d'émission (des dizaines ou plus de 100 éléments) sur une station de base (figure 2.13). Massive MIMO propose deux innovations majeures :

### 1. Formation des faisceaux (Beamforming)

Est un système de signalisation du trafic pour stations de base cellulaires qui identifie la voie de transmission de données la plus efficace pour un utilisateur particulier et réduit les interférences pour les utilisateurs à proximité. Aux stations de base MIMO massives, des algorithmes de traitement du signal tracent le meilleur itinéraire de transmission par voie aérienne vers chaque utilisateur. Ils peuvent ensuite envoyer des paquets de données individuels dans de nombreuses directions différentes, en les renvoyant des bâtiments et d'autres objets selon un modèle parfaitement coordonné. En résumé, pensez à la technologie MIMO massive en tant que structure 3D massive augmentant les capacités de couverture horizontale et verticale.

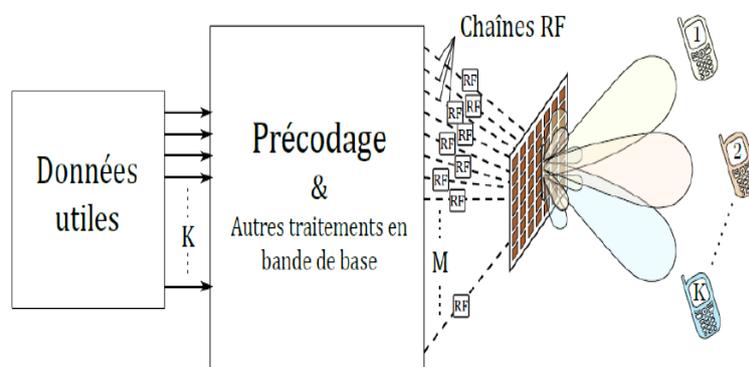


Figure 2. 14 : Système Massive MIMO en transmission multi-utilisateurs.

## 2. MU-MIMO

Augmente encore la capacité totale par station de base en permettant la communication avec plusieurs périphériques utilisant les mêmes ressources, créant ainsi un côté périphérique pratiquement unifié. L'utilisation simultanée des antennes de plusieurs périphériques permet de créer des canaux virtuels MIMO à grande échelle. La combinaison de ces deux innovations permet d'augmenter la vitesse de transmission sans fil en augmentant le nombre d'antennes de la station de base sans consommer plus de bande passante ni augmenter les valeurs de modulation.

### 1) Direction de Beamforming (DBS)

Beamforming numérique est constitué par un réseau d'antennes où chaque élément est directement relié à un convertisseur analogique/ numérique. En réception, un poids complexe affecté à chaque antenne est appliqué en numérique. Les algorithmes du Beamforming adaptent le diagramme de rayonnement en optimisant ces poids [25]. La technologie des antennes adaptatives vise à optimiser le diagramme afin d'atteindre les performances optimales. Ce type d'antennes utilise des algorithmes sophistiqués du traitement du signal pour distinguer continuellement entre les signaux désirés et les signaux d'interférence par le calcul de leur direction d'arrivées. L'approche adaptative actualise continuellement le diagramme de rayonnement. La capacité de suivre les usagers par les lobes principaux, et l'interférence par les zéros, sont assurées par la maximisation du bilan de liaison [26]. Leur principe est un processus formulé pour multiplier les diagrammes de faisceaux rayonnés des antennes en construisant complètement les signaux traités dans la direction des terminaux souhaités et en annulant les faisceaux de signaux brouilleurs. Beamforming d'émission travaille à maximiser la puissance du signal reçu par chaque utilisateur tout en minimisant la puissance du signal brouilleur provenant des autres utilisateurs, augmentant ainsi la capacité. Ceci peut être accompli en utilisant un filtre à réponse impulsionnelle finie (FIR). Les filtres FIR sont avantageux en ce que leurs poids peuvent être modifiés de manière adaptative et appliqués pour obtenir Beamforming optimal [27].

Les systèmes MIMO massifs sont extrêmement complexes : leur mise en place vous donnera plus de fil à retordre qu'un taureau mécanique. Cependant, les avantages offerts par le MIMO massif valent le coup de mordre la poussière deux ou trois fois [28].

- Efficacité spectrale - Ce sujet prend de plus en plus d'importance, car nous grignotons toujours davantage du spectre électromagnétique pour divers protocoles de communication.

Les gouvernements ont réservé une large bande de fréquences pour la 5G, mais ces spectres ne sont pas illimités. Le MIMO massif est en mesure d'exploiter son réseau d'antennes pour concentrer les faisceaux jusqu'aux utilisateurs individuels. Cela lui permet de proposer une efficacité spectrale 10 fois supérieure à celles des systèmes MIMO utilisés pour la 4G [28].

- Efficacité énergétique - Le Texas ne va pas continuer à produire du pétrole jusqu'à la fin des temps, il est donc grand temps de se soucier de l'efficacité énergétique des systèmes électroniques. Avec le MIMO massif, les antennes peuvent être conjuguées pour augmenter le gain de signaux transmis. Cela signifie qu'elles irradient moins d'énergie lorsqu'elles transmettent des données, améliorant l'efficacité énergétique du système [28].

- Suivi des utilisateurs - L'élément qui rend le MIMO massif si efficace énergétiquement parlant lui permet également de suivre très précisément les utilisateurs. Lorsque les faisceaux des antennes sont concentrés pour obtenir un gain élevé, leur largeur diminue. Ainsi, la tour doit suivre chaque utilisateur avec un signal de faisceau étroit. Ce suivi fournira aux utilisateurs une connexion plus fiable et de meilleure qualité que les signaux larges qui ont été utilisés jusqu'à présent [28].

## 2) Association MIMO Massif et Beamforming

Un système MIMO est par définition, c'est un système comprenant un grand nombre d'antennes, ce nombre d'antennes aide à augmenter le débit de données et l'efficacité du spectre d'antennes, et le spectre d'ondes millimétriques à haute capacité sont des synonymes de 5G. Mais au-delà des antennes et du spectre, des techniques de traitement du signal avancées telles que Beamforming sont essentielles à la fourniture de la 5G. L'objectif de la technologie de Beamforming c'est une technologie qui associées à un dispositif d'antenne réseau, Beamforming travaux sur combinant les signaux d'un ensemble de sources élémentaires, permet de former un ou plusieurs diagrammes de rayonnement. Beamforming est une technique de traitement des signaux utilisée pour les systèmes de transmission sans fil haut débit. Il peut également être considéré comme un filtre spatial pour chaque direction d'intérêt. Ce filtre va permettre de récupérer ou d'émettre des signaux dans des directions particulières avec un gain maximum, c'est-à-dire de favoriser le gain pour la direction d'intérêt et d'atténuer les signaux émis dans les directions non souhaitées. A la sortie de ce filtre, on n'aura que les signaux dans la direction d'intérêt.

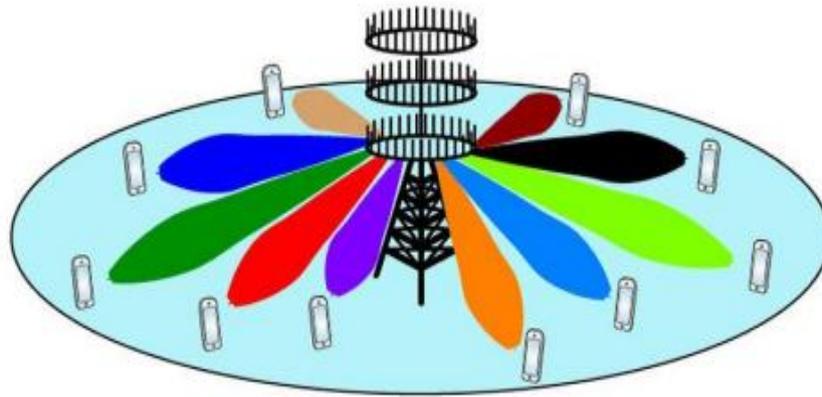


Figure 2. 15 : Système massive MIMO Beamforming.

## 2.4 SYSTEME MIMO-OFDM

### 2.4.1 Association MIMO-OFDM

La généralisation aux canaux sélectifs en fréquence des techniques MIMO développées initialement pour les canaux à évanouissements plats n'est pas triviale et peut s'avérer même délicate dès lors que nous considérons des schémas de transmission par bloc. Une technique efficace pour s'affranchir de l'ISI est la modulation OFDM introduite précédemment. La combinaison du MIMO et de l'OFDM permet d'exploiter les avantages des deux techniques : 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. Cette combinaison est efficace puisqu'elle 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 STBC.

### 2.4.2 Principe de l'association MIMO et OFDM

Comme nous venons de le voir, une des techniques les plus efficaces pour améliorer l'efficacité spectrale d'une communication radio est l'utilisation d'antennes multiples à l'émission et à la réception. Dans ce qui suit, 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 alignées et uniformément espacées. La distance relative entre deux antennes adjacentes est donnée par :  $\Delta = d/\lambda$ , où  $d$  est l'espace séparant deux antennes et la longueur d'onde. La figure présente le schéma de la chaîne de transmission pour un système MIMO-OFDM.

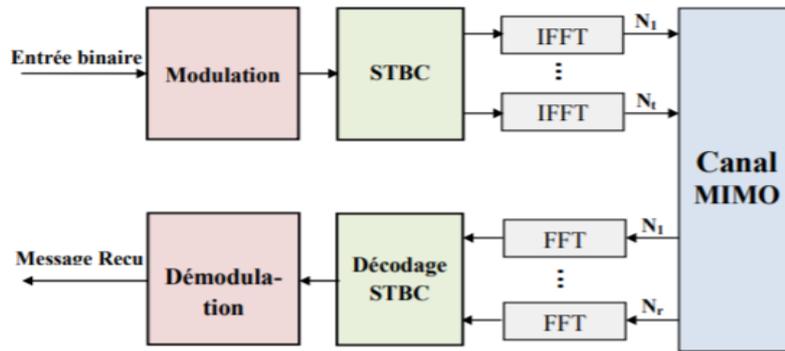


Figure 2. 16: Principe d'un système MIMO-OFDM.

Dans ce qui suit, nous décrivons le parcours suivi par le message comme il est illustré dans la figure:

1. la séquence binaire passe à travers un modulateur numérique. Ce dernier associe à chaque séquence de  $m$  bits un symbole complexe selon une constellation de taille  $2m$ .
2. les symboles complexes sont par la suite répartis afin qu'ils soient transmis sur les  $N_t$  antennes de transmission. Comme le système MIMO étudié considère la modulation OFDM, nous disposons à l'entrée du canal de  $N \times N_t$  échantillons à émettre, où  $N$  représente le nombre de sous-porteuses pour le signal OFDM. Ainsi l'utilisation d'un modulateur espace-temps s'avère être une solution efficace afin de profiter des ressources en espace, temps et fréquence présentes,
3. les symboles passent ensuite à travers le modulateur OFDM avant d'être filtrés par le filtre de mise en forme,
4. le signal analogique résultant est transmis à travers le canal radio, où il se trouve affecté par le milieu de propagation,
5. à la réception, le récepteur à antennes multiples est constitué d'un filtre adapté au filtre limiteur de bande utilisé à l'émission, du démodulateur OFDM, du décodeur espace-temps, du démodulateur numérique.

### Capacité

Il a été démontré que la capacité d'un canal MIMO utilisant l'OFDM est, en fait, la moyenne des capacités à travers chaque sous porteuse. Sachant que le canal à travers chaque sous porteuse est considéré comme plat, la capacité dans le cas d'un système MIMO-OFDM est donnée par l'expression suivant.

$$C = \frac{1}{N} \sum_{K=1}^N \log_2 \left[ \det \left( I_{NR} + \frac{E_s}{M_{TN_0}} H_K H_K^H \right) \right] \text{ bps} \quad (2.19)$$

Avec  $N$  étant la taille de la FFT,  $I_{NR}$  et  $M_{TN_0}$  le nombre d'antennes réceptrices et émettrices, respectivement,  $H_K$  la matrice du canal MIMO à travers la lème sous porteuse OFDM.

## 2.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous nous sommes intéressés à la technique multi-porteuse du type OFDM. En utilisant cette technique, la bande totale de transmission est partagée en plusieurs sous-bandes orthogonales. L'utilisation du préfixe cyclique réduit les interférences entre symboles dues aux trajets multiples, au détriment d'une perte dans le débit utile. L'application de la IFFT au niveau de l'émetteur et de la FFT au niveau du récepteur permet de transformer la transmission dans un canal sélectif en fréquence en une transmission sur plusieurs sous-canaux plats non sélectifs en fréquence. Donc une simple égalisation fréquentielle (FEQ) appliquée au signal démodulé permet d'améliorer considérablement la détection et donne une bonne estimation des symboles émis, nous avons étudié les systèmes MIMO pour démontrer leurs utilités comme techniques capables de répondre aux besoins accrus de débits de transmission exigés par les nouvelles technologies. Le codage en bloc spatio-temporel (STBC) de type Alamouti a ajouté de la diversité temporelle à la diversité spatiale caractérisant les systèmes MIMO, permettant ainsi augmenter la robustesse quant aux interférences. Cependant, le codage STBC pour les systèmes MIMO montre ces incapacités dans un canal sélectif en fréquence. Pour contourner ce problème l'OFDM a été combiné au système MIMO, donnant naissance au système MIMO-OFDM.

# Chapitre 3

## Chapitre 3 : Simulation et résultats

### 3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons modéliser un système MIMO-OFDM point à point avec beamforming. La combinaison des techniques de multiplexage à entrées multiples et sorties multiples (MIMO) et de multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM) a été adoptée dans les récentes normes sans fil, telles que les familles 802.11x, pour fournir un débit de données plus élevé. Comme MIMO utilise des réseaux d'antennes, la formation de faisceaux peut être adoptée pour améliorer le rapport signal / bruit (SNR) reçu, ce qui réduit à son tour le taux d'erreur binaire (BER).

Cette modalisation nécessite "Communications Toolbox", sur logiciel MATLAB. Ce dernier est un langage de calcul scientifique de haut niveau et un environnement interactif pour le développement d'algorithmes, la visualisation et l'analyse des données, ou encore le calcul numérique (MATLAB veut dire MATrix LABoratory).

### 3.2 Toolbox

"Communications Toolbox" offre aux ingénieurs des algorithmes et des applications pour l'analyse, la conception, la simulation de bout en bout et la vérification des systèmes de communications. Avec les algorithmes proposés, comme le codage canal, la modulation, MIMO et OFDM, vous pouvez concevoir et simuler un modèle de couche physique pour les système de communications basé ou non sur un standard.

"CommunicationsToolbox", "WLANToolbox", "LTEToolbox", "RF Toolbox", "Antenna Toolbox", "Phased Array System Toolbox", et la Bibliothèque 5G de la "LTE System Toolbox" offrent diverses fonctionnalités pour la conception de systèmes MIMO. À l'aide de ces boîtes à outils, vous pouvez construire des liaisons complètes de communications MIMO de bout en bout pour la simulation des performances globales de la liaison ou l'étude d'une partie spécifique des liaisons. Un modèle de liaison MIMO de bout en bout peut comprendre un désigne de réseau d'antennes, un désigne d'émetteur-récepteur RF, une génération de signal conforme aux standards, des modèles de canaux MIMO à évanouissement, une égalisation de canal MIMO, du codage de blocs spatio-temporel (STBC), du codage de blocs spatio-fréquentiel (SFBC), un multiplexage spatial et une formation de faisceaux. En en plus et, grâce à ces fonctionnalités MIMO, nous pouvons également analyser les problèmes associés aux systèmes Massive MIMO pour les réseaux 5G, tels que la complexité des calculs, les

effets d'interférence du signal pilote, les effets de couplage mutuel, le retard de canal, ou encore les problèmes de calibration du réseau d'antennes.

### 3.3 Beamforming pour système MIMO-OFDM

Le terme MIMO est utilisé pour décrire un système dans lequel plusieurs émetteurs ou plusieurs récepteurs sont présents. Dans la pratique, le système peut prendre de nombreuses formes différentes, telles qu'un système à entrée unique, sortie multiple (SIMO) ou système à entrée unique et sortie multiple (MISO). Dans la simulation on illustre un système MISO de liaison descendante. Un ULA à 8 éléments est déployé à la station de base comme émetteur tandis que l'unité mobile est le récepteur avec une seule antenne.

Le reste du système est configuré comme suit. La puissance de l'émetteur est de 8 watts et le gain d'émission est de -8 dB. Le récepteur mobile est stationnaire et situé à 2750 mètres, et à 3 degrés de l'axe de visée de l'émetteur. Un brouilleur d'une puissance de 1 watt et d'un gain de -20 dB est situé à 9000 mètres, à 20 degrés de la ligne de visée de l'émetteur.

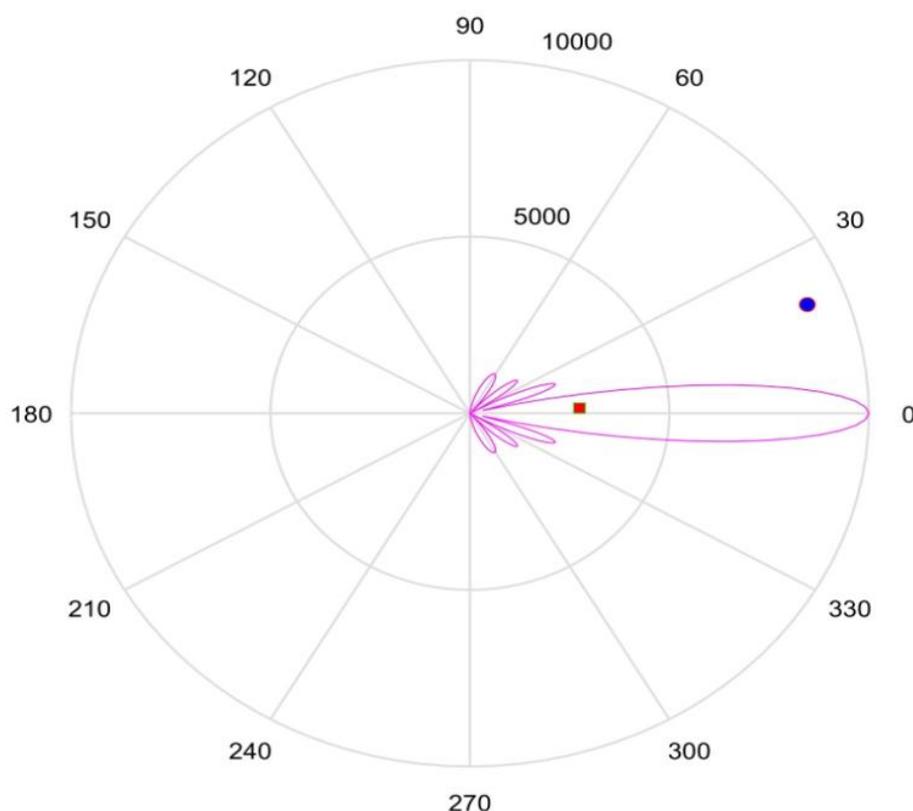


Figure 3. 1: Beamforming dans un système à plusieurs émetteurs et un récepteur MISO.

Si une seule antenne diffusant un signal sans fil diffuse ce signal dans toutes les directions (à moins qu'il ne soit bloqué par un objet physique). C'est la nature du fonctionnement des ondes

électromagnétiques. pour former un faisceau d'énergie électromagnétique ciblé, on utilise plusieurs antennes à proximité les unes des autres, toutes diffusant le même signal à des moments légèrement différents. Les ondes qui se chevauchent produisent des interférences qui, dans certaines zones, sont constructives (elles rendent le signal plus fort) et, dans d'autres, destructives (elles rendent le signal plus faible ou indétectable). S'il est bien réalisé, le processus de beamforming peut concentrer le signal là où l'on veut qu'il aille.

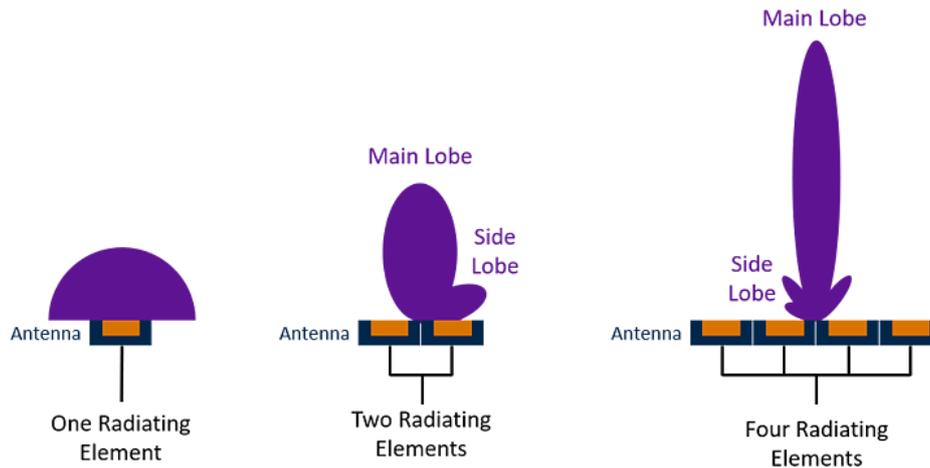


Figure 3. 2 : Propagation des ondes électromagnétiques des antennes à un seul, deux et quatre éléments de rayonnement.

### 3.3.1 Transmission du signal

On Commence par configurer l'émetteur du système.

Il existe de nombreux composants dans le sous-système émetteur, tels que le codeur convolutif, l'embrouilleur, le modulateur QAM, le modulateur OFDM, etc. Le message est d'abord converti en train de bits d'informations, puis passe par les étapes de codage de source et de modulation pour se préparer au rayonnement.

Dans un système OFDM, les données sont portées par de multiples sous-porteuses orthogonales les unes par rapport aux autres.

Ensuite, le flux de données est dupliqué vers tous les éléments rayonnants du réseau émetteur.

Dans un système MIMO, il est également possible de séparer plusieurs utilisateurs du multiplexage par répartition spatiale (SDMA). Dans ces situations, le flux de données est souvent modulé par un poids correspondant à la direction souhaitée de sorte qu'une fois rayonné, le signal est maximisé dans cette direction. Dans un canal MIMO, le signal émis par différents éléments peut traverser différents environnements de propagation, le signal rayonné par chaque antenne doit être propagé individuellement. Ceci peut être réalisé en définissant : "CombineRadiatedSignals" .

Pour réaliser le précodage, le flux de données rayonné depuis chaque antenne du réseau est modulé par un déphasage correspondant à sa direction de rayonnement. Le but de ce précodage est de garantir que ces flux de données s'ajoutent en phase si le tableau est orienté vers cette direction. Le précodage peut être spécifié comme poids utilisé au radiateur.

Pendant ce temps, le réseau est également orienté vers un angle de braquage donné, de sorte que les poids totaux sont une combinaison à la fois du précodage et des poids de direction.

Notons que le signal transmis, tx OFDM, est une matrice dont les colonnes représentent les flux de données rayonnés à partir des éléments correspondants dans le réseau d'émission.

### **3.3.2 Propagation du signal**

Ensuite, le signal se propage à travers un canal MIMO. En général, il y a deux effets de propagation sur la force du signal reçu qui sont intéressants:

- L'un d'eux est la perte d'étalement due à la distance de propagation, souvent appelée perte sur le trajet en espace libre;
- L'autre est la décoloration due aux trajets multiples. cette simulation modélise les deux effets.

Pour simuler un environnement mobile plus réaliste, on insère également une source d'interférence. Notons que dans un système de communication sans fil, l'interférence provient souvent d'un utilisateur mobile différent.

### **3.3.3 Réception du signal**

L'antenne de réception recueille à la fois le signal propagé ainsi que les interférences et les transmet au récepteur pour récupérer les informations d'origine incorporées dans le signal. Tout comme l'extrémité de transmission du système, le récepteur utilisé dans un système MIMO-OFDM contient également de nombreux étages, y compris le démodulateur OFDM, le démodulateur QAM, le désembrouilleur, l'égaliseur et le décodeur de Viterbi.

Une comparaison de la sortie décodée avec le flux de messages d'origine suggère que le BER résultant est trop élevé pour un système de communication. Le diagramme de constellation est également présenté ci-dessous :

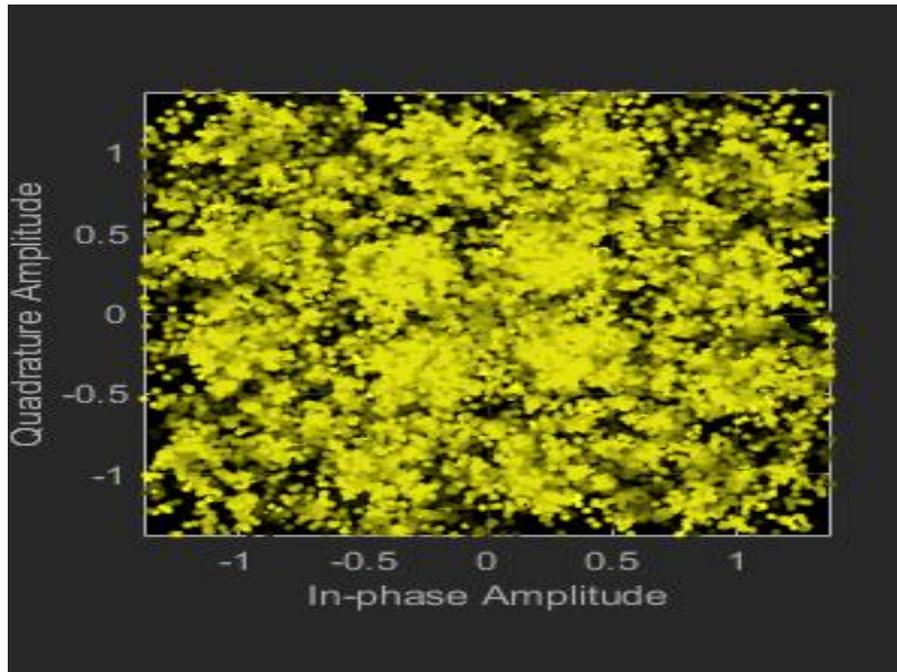


Figure 3. 3 : Diagramme de constellation 1.

BER = 32,07%; Nombre de bits = 30714; Nombre d'erreurs = 9850

Le BER élevé est principalement dû au fait que le mobile n'est pas dans la direction du réseau de stations de base. Si le mobile est aligné avec la direction, le BER est grandement amélioré.

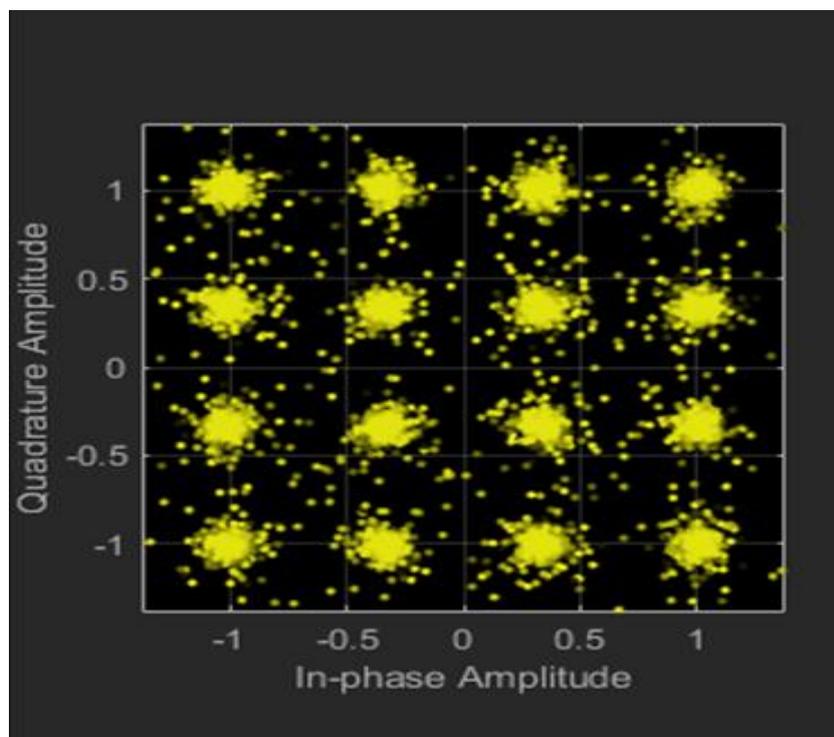


Figure 3. 4: diagramme de constellation 2.

BER = 0,02%; Nombre de bits = 30714; Nombre d'erreurs = 5

Par conséquent, le système est très sensible à l'erreur de direction. En revanche, c'est ce type de sensibilité spatiale qui permet à la SDMA de distinguer plusieurs utilisateurs dans l'espace.

### 3.3.4 Effet de quantification de déphaseur

Un réseau de beamforming analogique est typiquement relié à une seule chaîne HF qui ne génère qu'un seul faisceau à la fois. La plage de réglage des déphaseurs utilisés limite la gamme de fréquence.

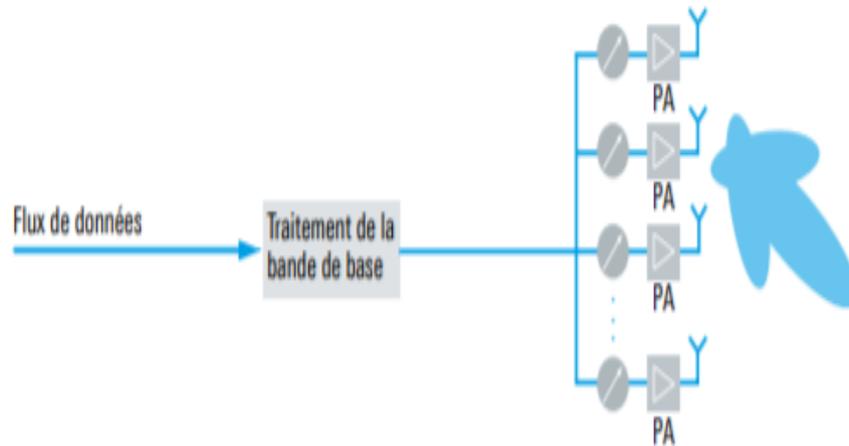


Figure 3. 5: Beamforming analogique.

La discussion jusqu'à présent suppose que le faisceau peut être orienté vers la direction exacte souhaitée. En réalité, cela n'est souvent pas vrai, en particulier lorsque Les déphaseurs analogiques utilisé n'ont qu'une précision limitée et sont classés par le nombre de bits utilisés dans les déphasages. Par exemple, un déphaseur 3 bits ne peut représenter que 8 angles différents à 360 degrés. Ainsi, si une telle quantification est incluse dans la simulation, les performances du système se dégradent, ce qui peut être observé à partir du tracé de constellation.

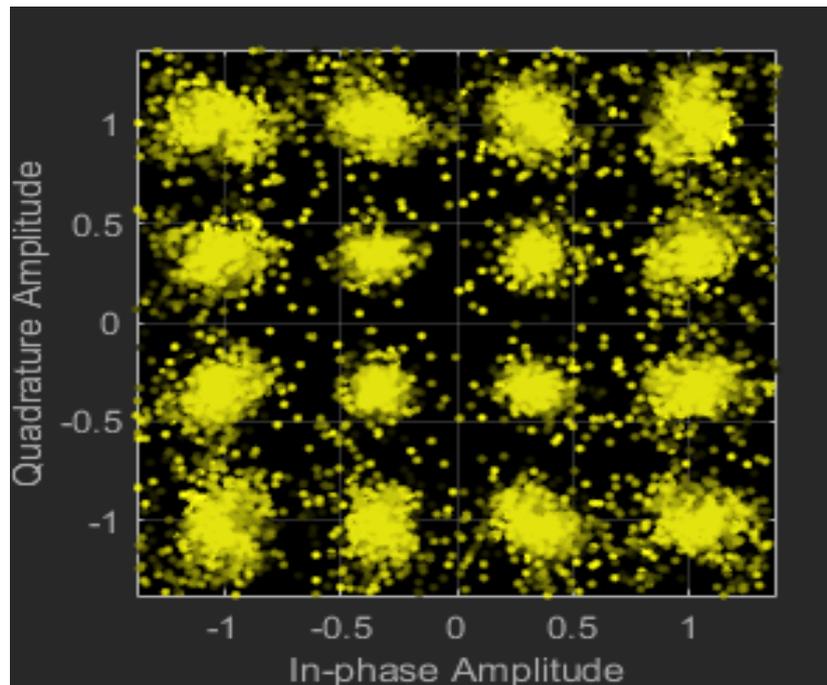


Figure 3. 6: Diagramme de constellation 3.

BER = 0,02%; Nombre de bits = 30714; Nombre d'erreurs = 7

Beamforming analogique est L'approche classique, mise en œuvre dans les applications radar par exemple, a recours à des déphaseurs et des amplificateurs de puissance pour diriger le faisceau dans la direction souhaitée et réduire au minimum les lobes secondaires. Nécessitant peu de matériel, cette méthode s'avère certes avantageuse en termes de coûts, mais ne convient que pour des réseaux d'antennes peu complexes.

### 3.3.5 Alamouti STBC avec deux antennes de réception

Pour réaliser cette partie de simulation, nous suivons les étapes suivante :

- a) Nous générons une séquence binaire aléatoire de + 1 et -1 ;
- b) Nous regroupons la séquence générer en paire de deux symboles ;
- c) Nous codons les symboles en utilisant le code spatio-temporel d'Alamouti ;
- d) Nous multiplions les symboles avec le canal, puis nous ajoutons du bruit gaussien blanc ;
- e) Nous égalisons les symboles reçus ;
- f) Nous effectuons un décodage par décision dure et compter les erreurs sur les bits ;
- g) Répétez pour plusieurs valeurs  $E_b/N_0$  et nous traçons les résultat de la simulation et les résultats théoriques.

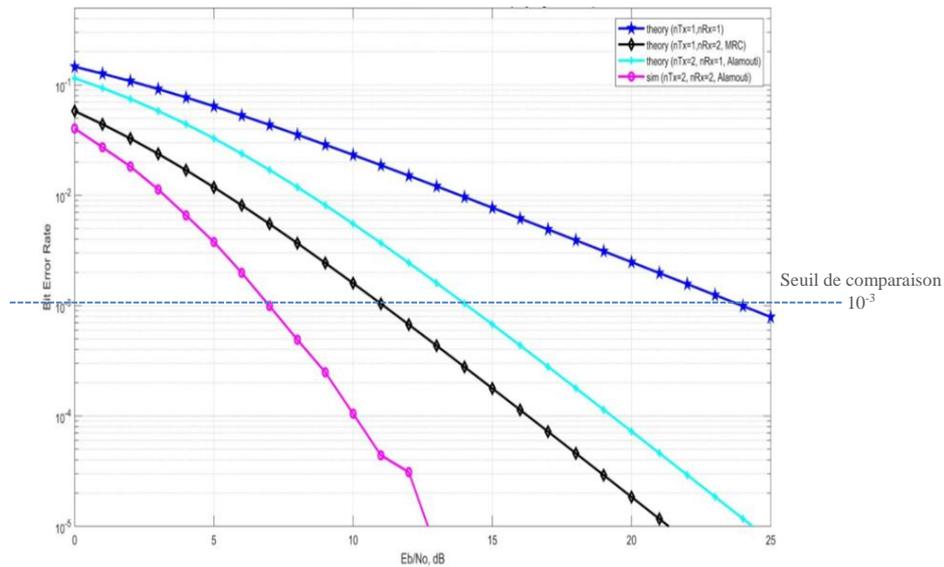


Figure 3. 7: BER en fonction de  $E_b/N_0$  pour  $2T_x$  et  $2R_x$  Alamouti STBC (canal de Rayleigh) et modulation BPSK.

Nous observons sur les courbes théoriques que les performances du BER sont meilleures pour l'égalisation MRC par rapport aux autres cas. En effet, le canal efficace concaténant les informations de 2 antennes de réception sur deux symboles donne un ordre de diversité de 4. Nous avons une amélioration du BER à  $10^{-3}$  de l'ordre de 3 dB par rapport au cas de deux antennes en émission ( $2T_x$ ) et une seule antenne en réception ( $1R_x$ ) (Alamouti STBC), et de 13 dB par rapport au cas d'une seule antennes en émission ( $1T_x$ ) et une seule antenne en réception ( $1R_x$ ). Nous observons aussi que la simulation ( Alamouti  $2T_x-2R_x$ ) donne de très bon résultats en termes de performance du BER par rapport aux courbe théoriques. En effet avec la simulation nous obtenons un gain du BER à  $10^{-3}$  de l'ordre de 4 dB par rapport à ( $1T_x-2R_x$ , MRC) et de 7 dB par rapport ( $2T_x-1R_x$ , Alamouti) et de 13 dB par rapport ( $1T_x-1R_x$ , Alamouti).

### 3.4 Conclusion

Cette simulation au niveau d'un système MIMO-OFDM point à point utilisant la formation de faisceaux. La simulation modélise de nombreux composants du système tels que le codage, la formation de faisceaux d'émission, le précodage, l'évanouissement par trajets multiples, l'estimation de canal, l'égalisation et le décodage et une nette amélioration des performances est constatée par rapport aux résultats théorique.

# Conclusion Général

## Conclusion Général

Le domaine de communications numérique sans fils très haut débit dans un contexte de forte mobilité est toujours un domaine de recherche très actif visant à développer des solutions de connectivité sans coupure et offrant une très bonne qualité de service pour les utilisateurs. Aujourd'hui, tous les standards de communications en cours de développement depuis quelques années reposent sur deux technologies clés : l'OFDM et le MIMO. Ces deux techniques sont aujourd'hui implémentées dans les standards 3G, 4G, comme elles sont envisagées pour la 5G avec des améliorations.

Dans le premier chapitre de notre mémoire nous nous sommes intéressés à la cinquième génération 5G des réseaux cellulaires. Ces réseaux doivent satisfaire la demande croissante de débit et gérer un grand nombre de cas et des exigences d'utilisation. La 5G vise un débit de l'ordre de Gigabits, une latence zéro, une connectivité 1000 fois supérieur à celle de 4G et une consommation faible d'énergie. Pour répondre à ces exigences, les ondes millimétriques (30GHz-300GHz) sont considérées comme d'excellents candidats pour les futures réseaux 5G car elles sont capables de fournir des fréquences très élevées et des bandes plus larges par rapport la 4G.

Dans le chapitre 2 nous avons introduit le principe de la techniques OFDM et la manière dont le signal OFDM est modulé (démodulé) puis émis (reçus) ainsi nous avons présenté les différentes architectures d'émetteur/récepteur permettant d'effectuer l'opération de transposition de fréquence et enfin les avantages et les inconvénients de l'OFDM. Le but de cette technique OFDM est d'augmenter le débit et minimiser les interférences entre symboles. nous avons présente aussi les systèmes MIMO qui sont employés dans des environnements à évanouissements pour exploiter les avantages de capacité et qui permet la transmission parallèle et simultanée de données sur 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 (BER). Ce système est considéré comme l'une des technologies les plus prometteuses pour améliorer les performances et la couverture du système. Par la suite, nous avons présente le système MIMO Massif multi-utilisateur qui transmis le signal dans le temps via plusieurs antennes transmetteurs. Ensuite on a montré l'importance des antennes intelligentes qui est associée à un dispositif complet permettant la détection de l'angle d'arrivée et la formation du diagramme de rayonnement en direction du récepteur .

Dans le troisième chapitre en utilisant une programmation MATLAB, pour modélisé un système MIMO-OFDM avec beamforming .La combinaison des techniques de multiplexage à

entrées multiples et sorties multiples (MIMO) et de multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM) et la formation de faisceaux pour améliorer le rapport signal / bruit (SNR) reçu, ce qui réduit à son tour le taux d'erreur binaire (BER).

## Bibliographie

- [1] D. M. Barnes, « The introduction of cellular radio in the United Kingdom », in *35th IEEE Vehicular Technology Conference*, 1985, p. 147-152, doi: 10.1109/VTC.1985.1623346.
- [2] S. Redana *et al.*, « 5G PPP Architecture Working Group: View on 5G Architecture », juin 2019, Consulté le: août 11, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://research-portal.uws.ac.uk/en/publications/5g-ppp-architecture-working-group-view-on-5g-architecture>.
- [3] E. Dahlman, S. Parkvall, et J. Sköld, *5G NR: the next generation wireless access technology*. London San Diego, CA Cambridge, MA Oxford: Elsevier, Academic Press, 2018.
- [4] A. Osseiran, Éd., *5G mobile and wireless communications technology*. United Kingdom : New York: Cambridge University Press, 2016.
- [5] D. Marwa et B. Asma, « Etude et Analyse de Méthodes de Beamforming pour des Systèmes Multi - utilisateur s Pour la 5G », Working Paper, 2019.
- [6] M. Massimo, « 5G : la 5ème génération de technologie de communication de réseau mobile », *Ontrack*, août 04, 2017. <https://www.ontrack.com/fr-fr/blog/5g-cinquieme-generation-reseau-mobile> (consulté le août 12, 2020).
- [7] S. BEDDIAF et S. YAHIA, « Technologie Radio sur Fibre pour les applications sans fil (5G) », Mémoire Master 2, Université 8Mai 1945 – Guelma, Guelma, 2019.
- [8] H. Zhao, « Pourquoi le monde a besoin de la 5G », *ITU News MAGAZINE*, n° 2, p. 36, févr. 2017.
- [9] W. Zhang, X.-G. Xia, et K. B. Letaief, « Space-Time/Frequency Coding for MIMO-OFDM in Next Generation Broadband Wireless Systems », *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 14, n° 3, p. 32-43, juin 2007, doi: 10.1109/MWC.2007.386610.
- [10] « IEC Calendar of Events ». <https://tockify.com/ieccal/> (consulté le août 13, 2020).
- [11] D. Guel, « Etude de nouvelles techniques de réduction du ' ' facteur de crête ' ' (PAPR) à compatibilité descendante pour les systèmes multiporteuses », Thèse, UNIVERSITÉ DE RENNES 1, RENNE, 2009.
- [12] S. Weinstein et P. Ebert, « Data Transmission by Frequency-Division Multiplexing Using the Discrete Fourier Transform », 1971, doi: 10.1109/TCOM.1971.1090705.
- [13] A. Le Glaunec, « MODULATIONS MULTIPORTEUSES ».
- [14] A. NOUARIA, « Modélisation d'un modulateur et démodulateur OFDM sur FPGA », UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, ANNABA, 2016.
- [15] W. Akmouche, A. Glavieux, et Université de Bretagne occidentale, « Etude et caractérisation des modulations multiporteuses OFDM », [s.n.], S.l., 2000.
- [16] E. ATALLAH, « Performance d'un système MIMO-OFDM.pdf », UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, Ourgla, 2019.
- [17] K. Dimou *et al.*, « Handover within 3GPP LTE: Design Principles and Performance », in *2009 IEEE 70th Vehicular Technology Conference Fall*, sept. 2009, p. 1-5, doi: 10.1109/VETEFCF.2009.5378909.
- [18] Shekhar, A. Singhal, R. Sharma, et P. Singh, « Study of Analysis of Multiple Input and Multiple outputs (MIMO) Technology in Wireless Communication », in *2016 International Conference on Micro-Electronics and Telecommunication Engineering (ICMETE)*, sept. 2016, p. 658-662, doi: 10.1109/ICMETE.2016.134.
- [19] H. Jiang et P. A. Wilford, « A Hierarchical Modulation for Upgrading Digital Broadcast Systems », *IEEE Trans. Broadcast.*, vol. 51, n° 2, p. 223-229, juin 2005, doi: 10.1109/TBC.2005.847619.
- [20] P. W. Wolniansky, G. J. Foschini, G. D. Golden, et R. A. Valenzuela, « V-BLAST: an architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel »,

- in *1998 URSI International Symposium on Signals, Systems, and Electronics. Conference Proceedings (Cat. No.98EX167)*, oct. 1998, p. 295-300, doi: 10.1109/ISSSE.1998.738086.
- [21] Hongwei Yang, « A road to future broadband wireless access: MIMO-OFDM-Based air interface », *IEEE Commun. Mag.*, vol. 43, n° 1, p. 53-60, janv. 2005, doi: 10.1109/MCOM.2005.1381875.
- [22] J. Mietzner, R. Schober, L. Lampe, W. H. Gerstacker, et P. A. Hoeher, « Multiple-antenna techniques for wireless communications - a comprehensive literature survey », *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 11, n° 2, p. 87-105, Second 2009, doi: 10.1109/SURV.2009.090207.
- [23] Y. S. Cho, Éd., *MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB*. Singapore ; Hoboken, NJ: IEEE Press ; J. Wiley & Sons (Asia), 2010.
- [24] Oussoukine.Amel, Rayeh. Narimane. "MIMO Beamforming Multi Utilisateur". L'Université De Tlemcen Faculté De Technologie Département De Telecommunication. Mai 2016
- [25] Jaber. Zouhair. "Conception d'une antenne intelligente à faisceau commutable assistée par un système de localisation des mobiles". Diss. École de technologie supérieure, 2008.
- [26] Nedil. Mourad. " Développement d'un réseau d'antennes à formation de faisceaux basé sur de nouvelles Matrices de Butler". Diss. Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, 2006.
- [27] Ali. Ehab, et al. "Beamforming techniques for massive MIMO systems in 5G: overview, classification, and trends for future research". *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering* 18.6 (2017): 753-772.
- [28] <https://fr.resourc.es.altium.com/blog-de-conception-de-circuit-imprim%C3%A9/les-avantages-du-mimo-massif-pour-l'infrastructure-cellulaire-5g>