



**Faculté de Technologie**  
**Département de Télécommunications**

**MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

**En : TELECOMMUNICATIONS**

**Spécialité : Réseaux et Télécommunications**

**Par: Mr. BENAISSA Bilal-Ilyes**

**Mr. BACHIRI Adel**

**Sujet**

**Détection du signal dans un système MIMO-NOMA**

Soutenu publiquement, le 30 / 09 / 2021, devant le jury composé de :

Mr. BOUSAHLA Miloud	MCB	Univ. Tlemcen	Président
Mme. GOURARI Fatima-Zohra	MCB	Univ. Tlemcen	Examinatrice
Mr. MERIAH Sidi Mohammed	Professeur	Univ. Tlemcen	Encadrant
Mr. DERRAZ Fouad	MCB	Univ. Tlemcen	Invité

# Dédicaces

*Je dédie ce travail*

*A mon père BENAÏSSA MILOUD*

*A la personne la plus chère à mon cœur qui a sacrifié toute sa vie pour la réussite de ses enfants*

*Et pour les voir dans les rangs supérieurs. En ce jour-là, je réalise l'un de ses souhaits, et j'espère*

*Être à la hauteur de sa confiance en moi et être fier de ce succès.*

*Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.*

*A ma très chère mère KARIMA*

*Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour les Sacrifices que tu n'as cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte.*

*Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.*

*Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.*

*A mon cher frère aîné KHEIR-EDDINE*

*En témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse et reconnaissance, je te souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, te protège et te garde.*

*A mes chères petits frères ANES et ISLEM*

*BENAÏSSA BILAL-ILYÈS*

## Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail, en première lieu, aux êtres qui me sont les plus chers ; Mes parents TAIEB et DJAMILA qui ont toujours aimé me voir réussir et qui n'ont pas cessés de m'encourager, Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours pour vous.*

*A tous mes chers frères et sœurs Qui m'ont aidé, encouragé et soutenu.*

*BACHIRI ADEL*

# *Remerciements*

*En préambule à ce mémoire on remercie ALLAH qui nous a aidé et nous a donné la patience et le courage durant ces longues années d'étude  
C'est avec un immense plaisir que nous réservons ces lignes en signe de gratitude et de reconnaissance à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*

*Toute notre reconnaissance de s'adresser à notre encadrant Mr. MERIAH sidi-mohammed.  
Professeur de la faculté de technologie à l'université de Tlemcen pour la confiance qu'il nous a accordée ainsi que son soutien moral. Les connaissances qu'il a su nous transmettre, sa patience, ses appréciations qui nous ont guidé dans notre travail et nous ont aidé à trouver des solutions pour mieux avancer et ses judicieux conseils nous énormément aidé et contribué à alimenter nos réflexions.*

*Toute notre reconnaissance s'adresse aussi à notre invité Mr. DERRAZ fouad pour sa disponibilité malgré la distance.*

*Nos sincères remerciements aussi aux membres du jury, Mr. BOUSAHLA miloud Maitre de conférences à l'université de Tlemcen pour l'honneur qu'il nous fait tant que président de jury, ainsi que Mme. GOURARI fatima-zohra Maitre de conférences à l'université de Tlemcen d'avoir accepté d'examiner ce modeste travail.*

*Nous saisissons cette même occasion pour exprimer notre profonde reconnaissance à tous nos enseignants du département de Télécommunications pour leur enseignement de qualité et ayant toujours su nourrir nos réflexions.*

*Et ne nous pouvant conclure sans remercier chaleureusement la promo RT.*

## **Résumé :**

En tant que technique clé pour les systèmes de communication mobile de cinquième génération (5G), L'accès multiple non orthogonal (NOMA) a attiré une attention considérable dans le domaine de la télécommunication. C'est une technologie récente permettant de multiplexer plusieurs signaux des différents utilisateurs dans une même sous -porteuse afin de permettre le partage de ressources entre ces derniers, et par conséquent, transmettre ces signaux sur la même bande fréquentielle en même temps avec différents niveaux de puissance, réduisant ainsi le temps de latence et améliorant largement le débit des utilisateurs. Cependant, l'interférence mutuelle due au multiplexage d'utilisateurs pendant la transmission est inévitable. L'annulation des interférences successives (SIC) est la principale méthode de détection NOMA appliquée aux récepteurs pour les transmissions NOMA montantes et descendantes.

Ce travail de projet de fin d'études a pour objectif d'étudier les principes fondamentaux de cette nouvelle technologie, en analysant les performances de ce système point de vue capacité et probabilité de panne.

### **Mots-clés :**

5G ; accès multiple non-orthogonal (NOMA) ; entrées multiples sorties (MIMO) ; capacité, probabilité de panne, BER.

## **Abstract:**

As a key technique for fifth generation (5G) mobile communication systems, Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) has attracted considerable attention in the telecommunication field. It is a recent technology that allows multiplexing of several signals from different users in the same sub-carrier to allow sharing of resources between them, and therefore transmitting these signals on the same frequency band at the same time with different power levels, thus reducing latency and greatly improving user throughput. However, mutual interference due to user multiplexing during transmission is inevitable. Successive Interference Cancellation (SIC) is the main NOMA detection method applied to receivers for NOMA uplink and downlink transmissions.

This end of studies project work aims to study the fundamentals of this new technology, by analyzing the performance of this system from a achievable capacity and outage probability.

### **Keywords**

5G ; non-orthogonal multiple access (NOMA) ; multiple-input multiple-output (MIMO); achievable capacity ; outage probability ; BER .

## ملخص:

كأسلوب رئيسي لأنظمة الاتصالات المتنقلة من الجيل الخامس (5G)، اجتذبت الوصول المتعدد غير المتعامد (NOMA) اهتمامًا كبيرًا في مجال الاتصالات. إنها تقنية حديثة تسمح بعدة إرسال إشارات من مستخدمي مختلفين في نفس الناقل الفرعي للسماح بمشاركة الموارد بينهم، وبالتالي، لنقل هذه الإشارات على نفس النطاق الترددي في نفس الوقت بمستويات مختلفة من الطاقة، وبالتالي تقليل زمن الوصول وتحسين إنتاجية المستخدم بشكل كبير. ومع ذلك، فإن التداخل المتبادل الناجم عن تعدد إرسال المستخدمين أثناء الإرسال أمر لا مفر منه. إلغاء التداخل المتتالي (SIC) هو الأسلوب الأساسي لاكتشاف NOMA المطبق على أجهزة الاستقبال لعملية إرسال NOMA المنبع والمصب.

المدفوع من هذا العمل هو دراسة أساسيات هذه التكنولوجيا الجديدة، وهي الجدوى وكذلك أفضل طريقة لتلبية متطلبات الجيل الخامس (5G) في التطبيقات العملية عن طريق دراسة أداء هذا النظام من قدرة قابلة لتحقيق واحتمال انقطاع التيار.

## الكلمات المفتاحية:

الجيل الخامس (5G)؛ الوصول المتعدد غير المتعامد (NOMA)؛ مخرجات مدخلات متعددة (MIMO)؛. قدرة قابلة لتحقيق؛ احتمال انقطاع التيار؛ BER.

# Table des Matières

<i>Dédicaces</i> .....	1
<i>Remerciement</i> .....	3
<i>Résumé</i> .....	4
<i>Abstract</i> .....	5
<i>ملخص</i> .....	6
<i>Acronymes</i> .....	10
<i>Liste des tables</i> .....	13
<i>Liste des figures</i> .....	13
<i>Introduction générale</i> .....	15

## -----Chapitre I : Généralités sur la 5G-----

<i>I.1 Introduction</i> : .....	18
<i>I.2 les objectifs de la 5G</i> : .....	18
<i>I.3 Les familles d'usage 5G</i> : .....	19
<i>I.4. Architecture de la 5G</i> : .....	20
<i>I.4.1 Principe</i> .....	20
<i>I.4.2 Le service innovant</i> .....	22
<i>I.4.2 La plate-forme de validation (Architecture réseau)</i> .....	22
<i>I.4.4 La radio Hyper-Connecté</i> .....	24
<i>I.4.4.1. Bandes millimétriques</i> .....	24
<i>I.4.4.2. MIMO massive</i> .....	25
<i>I.4.4.3. Méthodes duplex</i> .....	26
<i>I.5 la couche physique</i> : .....	27
<i>I.6 Caractéristiques et la comparaison entre 4G et 5G</i> : .....	29
<i>I.7 Les défis de la 5G</i> : .....	30
<i>I.8 La 5G dans le monde</i> : .....	30
<i>I.9 Conclusion</i> : .....	32

-----**Chapitre II : MIMO-NOMA**-----

<b>II.1 Multiple Input Multiple Output (MIMO) :</b> .....	<b>34</b>
II.1.1 Introduction .....	34
II.1.2 MIMO traditionnel .....	35
II.1.3 Systèmes à antennes multiples (MIMO) .....	35
II.1.4 Principes du MIMO .....	36
II.1.5 Types de MIMO .....	37
II.1.5.1 SISO (Single Input Single Output) .....	37
II.1.5.2 SIMO (Single Input Multiple Output) .....	38
II.1.5.3 MISO (Multiple Input Single Output) .....	39
II.1.5.4 MIMO (Multiple Input Multiple Output) .....	39
II.1.6 La capacité des réseaux MIMO en pratique .....	40
II.1.7 Modélisation physique des canaux MIMO .....	41
<b>II.2 Techniques d'accès multiples non-orthogonales (NOMA)</b> .....	<b>42</b>
II.2.1 Introduction .....	42
II.2.2 L'accès multiples .....	42
II.2.3 Techniques d'accès multiples orthogonales (OMA).....	42
II.2.3.1. La modulation multi -porteuses .....	43
II.2.3.2. L'OFDM .....	43
II.2.3.2.1. Le Principe de la modulation l'OFDM .....	44
II.2.3.2.2. Rappel de la notion d'orthogonalité .....	45
II.2.3.2.3. La Chaîne de transmission OFDM .....	46
II.2.3.2.4. La technique d'accès multiple OFDMA .....	47
II.2.3.2.5. Les avantages de l'OFDM .....	48
II.2.3.2.6. Les inconvénients de l'OFDM .....	48
II.2.4. Techniques d'accès multiples non-orthogonales NOMA.....	49
II.2.4.1 Introduction .....	49
II.2.4.2 NOMA liaison descendante .....	49
II.2.4.2.1 Transmission par superposition .....	49
II.2.4.2.2 Successive interférence cancellations (SIC) .....	50
II.2.4.2.3 Capacité de la voie descendante .....	52
II.2.4.2 NOMA liaison montante .....	54
II.2.4.2.1 Modèle de la liaison montante .....	54
II.2.4.2.2 Capacité de la voie montante .....	55
II.2.4.3 Avantages et Inconvénients NOMA .....	56
II.2.4.3.1 Avantages NOMA .....	56

II.2.4.3.2 Inconvénients NOMA .....	58
-------------------------------------	----

-----**Chapitre III : simulation et résultats**-----

<b>III.1 Introduction :</b> .....	62
<b>III.2 Simulation du BER de l'accès multiple non orthogonal (NOMA) dans le canal AWGN</b> .....	62
<b>III.3 Simulation du BER de l'accès multiple non orthogonal (NOMA) dans le canal de décoloration de Rayleigh</b> .....	64
III.3.1 Modèle de décoloration de Rayleigh .....	64
III.3.2 Modèle de système .....	64
III.3.3 Modèle de signal .....	65
III.3.4 Codage et transmission NOMA .....	66
III.3.5 Décodage NOMA à l'utilisateur 1 (utilisateur éloigné) .....	66
III.3.6 Décodage NOMA à l'utilisateur 2 (près de l'utilisateur) .....	67
<b>III.4 Etude d'un système MIMO-NOMA</b> .....	69
III.4.1 Modèle de système .....	69
III.4.2 Modèle de signal .....	70
III.4.2.1 Signal émis .....	70
III.4.2.2 Signal reçu .....	71
<b>Conclusion Générale</b> .....	75
<b>Références bibliographiques</b> .....	76

# Acronymes

1G	Première génération de réseaux mobiles
2G	Deuxième génération de réseaux mobiles
3G	Troisième génération de réseaux mobiles
3GPP	3rd Generation Partnership Project
4G	Quatrième génération de réseaux mobiles
5G	Cinquième génération de réseaux mobiles
5G-PPP	5G Public Private Partnership
ADC	Analogue to Digital Converter
AFB	Analysis Filter Bank
AI	Artificial Intelligence
API	Application Programming Interfaces
APSK	Amplitude of Phase Shift Keying
ASK	Amplitude Shift Keying
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BER	Bit Error Rate
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BS	Base Station
CAN	Controller Area Network
CB	Coordinated Beamforming
CDMA	Code Division Multiple Access
CMA	Constant Modulus Algorithm
CoMP	Coordinated Multi-Point
CP	Cyclic Prefix
CS	Coordinated Scheduling
CSI	Channel State Information
CST	Codage Spatio-Temporel
CSTB	Codage Spatio-Temporel par Blocs
CSTT	Codage Spatio-Temporel en Treillis
DBS	Digital Beam Steering
DL	Down Link
DoA	Date of Announcement
EMBB	Enhanced Mobile Broad Band
FBMC	Filter Bank based Multi Carrier
FCC	Federal Communications Commission
FDD	Frequency Duplexing
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FFC	Federal Communications Commission

FFT	Fast Fourier Transform
F-OFDM	Filtered OFDM
FSK	Frequency Shift Modulation
Gbps	Gegabit par second
GFDM	Generalized Frequency Division Multiplexing
Ghz	Gega hertz
Go	Gega octet
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEP	Interference between carriers (Interférence Entre Porteuses)
IES	Interferences Between Symbols (Interférence Entre Symbols)
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IoT	Internet of Things
ISI	Inter symbol Interference
LOS	Loss Of Signal
LSTM	Long Short Term Memory
LTE	Long Term Evolution
M2M	Machine to Machine
Mbps	Megabit par second
MDP	Magellan Data Provider
MIMO	Multiple Inputs-Multiple Output
mlIoT	massiv Internet of Things
MISO	Multi Input Single Output
MMSE	Minimum Mean Square Error
MMTC	Massive Machine Type Communications
Mmwave	Millimeter Wave
MSE	Mean Square Error
MTC	Machine Type Communication
MVDR	Minimum Variance Distortionless Response
NFV	Network Functions
NLOS	Non-line-of-Sight
NLP	Natural Language Processing
NN	Neural Network
NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access
NR	New Radio
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OMA	Orthogonal Multiple Access
QAM	Amplitude Modulation of Two Quadrature Carriers
RAN	Radio Access Networks
ReLU	Rectified Linear Unit
SCMA	Sparse Code Multiple Access
SDN	Software Defined Networking
SIC	Successive Interference Cancellation

<b>SIMO</b>	Single Input <b>M</b> ulti <b>O</b> utput
<b>SISO</b>	Single Input Single <b>O</b> utput
<b>SNR</b>	Signal-to- <b>N</b> oise <b>R</b> atio
<b>TDD</b>	Time- <b>D</b> ivision <b>D</b> uplex
<b>UE</b>	User <b>E</b> quipment
<b>UFMC</b>	Universal <b>F</b> iltered <b>M</b> ulti- <b>C</b> arrier
<b>UL</b>	Up <b>L</b> ink
<b>UMTS</b>	Universal <b>M</b> obile <b>T</b> élécommunications <b>S</b> ystem
<b>URLLC</b>	Ultra <b>R</b> eliable and <b>L</b> ow <b>L</b> atency <b>C</b> ommunications
<b>UT</b>	User <b>T</b> erminal
<b>Wi-Fi</b>	<b>W</b> ireless <b>F</b> idelity
<b>WIMAX</b>	<b>W</b> orldwide <b>I</b> nteroperability for <b>M</b> icrowave <b>A</b> ccess
<b>WLAN</b>	<b>W</b> ireless <b>L</b> ocal <b>A</b> rea <b>N</b> etwork
<b>ZF</b>	<b>Z</b> ero <b>F</b> orcing

## Liste des tables

Tableau I.1 : Comparaisons entre les performances de 4G et de la 5G .....	30
---	----

## Liste des figures

---

### *Chapitre I : Généralités sur la 5G*

---

Figure I.1 : Les familles d'usage 5G .....	20
Figure I.2 : Les principales technologies mises en œuvre pour la 5G .....	21
Figure I.3 : L'architecture de la 5G .....	22
Figure I.4 : Centralisation du plan de contrôle dans un réseau défini par un logiciel (software defined network) .....	23
Figure I.5 : Illustration d'une architecture réseau CloudRAN .....	24
Figure I.6 : Répartition de fréquence sur le spectre électromagnétique .....	25
Figure I.7 : MIMO massive .....	25
Figure I.8 : Illustration du full-duplex, comparé au FDD et TDD .....	26
Figure I.9 : Illustration de multiplexage power Domain NOMA .....	28
Figure I.10 : Comparaison entre la 4G et la 5G .....	29

---

---

### *Chapitre II : MIMO-NOMA*

---

Figure II.1 : Systèmes MIMO .....	36
Figure II.2 : SISO - Single Input Single Output .....	37
Figure II.3 : SIMO - Single Input Multiple Output .....	38
Figure II.4 : MISO - Multiple Input Single Output .....	39
Figure II.5 : MIMO- Multiple Input Multiple Output .....	40
Figure II.6 : Dualité temps-fréquence des modulations .....	43
Figure II.7 : Schéma-bloc d'un modulateur OFDM .....	44
Figure II.8 : Exemple de porteuses orthogonales dans le domaine fréquentiel.	45
Figure II.9 : Diagramme en bloc de la chaîne de transmission OFDM .....	46
Figure II.10 : Insertion du préfixe cyclique .....	47
Figure II.11 : Allocation de ressources OFDM/OFDMA .....	48
Figure II.12 : Transmission de signaux dans NOMA pour deux utilisateurs .....	50
Figure II.13 : Réception des signaux dans NOMA pour deux utilisateurs .....	52

---

<b>Figure II.14</b> : Comparaison entre OMA et NOMA dans la voie descendante ....	54
<b>Figure II.15</b> : Liaison montante du domaine de puissance NOMA .....	55
<b>Figure II.16</b> : La région de débit réalisable multi -utilisateurs pour la liaison montante NOMA avec un BS et deux utilisateurs .....	56

---

### *Chapitre III : simulation et résultats*

---

<b>Figure III.1</b> : Modèle du système.....	63
<b>Figure III.2</b> : simulation du BER en fonction du rapport signal sur bruit SNR ....	63
<b>Figure III.3</b> : Modèle de système .....	65
<b>Figure III.4</b> : Variation de la capacité en fonction de la puissance d'émission..	68
<b>Figure III.5</b> : Variation de la probabilité de panne en fonction de la puissance d'émission .....	68
<b>Figure III.6</b> : Variation du BER en fonction de la puissance d'émission .....	69
<b>Figure III.7</b> : Modèle de système MIMO-NOMA .....	70
<b>Figure III.8</b> : Variation de la probabilité de panne en fonction de la puissance d'émission .....	73
<b>Figure III.9</b> : Variation de la probabilité de panne en fonction de la puissance d'émission .....	73

---

# *Introduction générale*

Le développement rapide de la technologie de communication sans fil a entraîné une augmentation explosive du nombre d'utilisateurs mobiles. La prévalence des appareils intelligents conduit à la croissance explosive des exigences en matière de communication numérique sans fil. Bien que les nouvelles technologies telles que L'accès multiple non orthogonal (NOMA) et La technologie massive entrée multiples et sorties multiples (MIMO) ont attiré une attention considérable dans le domaine du sans-fil la communication spécialement dans la 5G.

À l'échelle mondiale, les réseaux mobiles sans fils deviennent un élément indispensable dans notre vie quotidienne. À cet égard, ces réseaux s'efforcent à satisfaire au mieux les besoins et les intérêts des utilisateurs qui accèdent au réseau. Pour cela nous observons une grande évolution dans les générations des réseaux mobiles allant de la 1G jusqu'à la 5G. Cependant chacune des générations introduit des nouvelles exigences en termes de débit, efficacité spectrale, latence, coût, fiabilité, .... Afin de pouvoir assurer ces contraintes chaque génération repose sur des techniques spécifiques, par exemple la technique FDMA pour la 1G, la technique TDMA pour la 2G, la technique CDMA pour la 3G et la technique OFDMA pour la 4G. Et en ce qui concerne les techniques utilisées pour la 5G sont en cours de recherche telles que : la technique FBMC, MIMO massive, NOMA.

Ce mémoire se concentre sur la détection du signal dans un système MIMO-NOMA. Afin de fournir la meilleure efficacité spectrale pour des conceptions de système pratiques. Il est structuré autour de trois chapitres :

- ✓ Tout d'abord, le premier chapitre introduit des généralités sur la cinquième génération, nous définissons les principales technologies mises en œuvre pour la 5G, L'architecture, Répartition de fréquence...et à la fin de ce chapitre nous abordons la comparaison entre la 4G et la 5G.
- ✓ Le deuxième chapitre se divise en deux parties, la première concerne La technologie massive entrée multiples et sorties multiples (MIMO), nous allons exposer cette technique avec ses types. La deuxième partie du chapitre deux portes sur la technique NOMA, nous allons définir cette nouvelle approche ainsi que ses différents mécanismes notamment la technique OFDM.

- ✓ Pour le dernier chapitre, nous allons traiter et exposer les résultats de simulation. Nous allons simuler un système NOMA simple à deux utilisateurs à l'aide de MATLAB afin de trouver les meilleures performances du signal.

# *Chapitre I*

---

## Généralité sur la 5ème génération

## I.1 Introduction

La 5G est la cinquième génération. Il possède de nombreuses fonctions avancées, suffisantes pour résoudre de nombreux problèmes de notre vie moderne. Surtout les problèmes rencontrés lors de l'utilisation de la technologie actuelle, la première génération (1G ces téléphones sont des téléphones analogiques, les premiers téléphones mobiles ou cellulaires utilisés, ils offrent de très faibles niveaux d'efficacité et de sécurité) et la deuxième génération (Ils sont 2G) sont basés sur la technologie numérique et offrent une plus grande efficacité d'utilisation et une meilleure sécurité et de nouvelles fonctionnalités, telles que les messages texte et la communication à faible vitesse. « 1G et 2G sont des technologies de téléphonie mobile qui rendront éventuellement les téléphones mobiles accessibles à tous ». De même, la troisième génération (la technologie 3G vise à fournir des données à haut débit, la technologie d'origine a été améliorée pour permettre des données jusqu'à 14 Mbps et plus.), la quatrième génération (4G est une technologie IP complète qui peut fournir des débits de données jusqu'à 1Gbps.) Ainsi « la 3G et la 4G fournissent la technologie du haut débit mobile. » Pour nous, la 5G ne se concentre plus sur les opérateurs de téléphonie mobile et les communications grand public, mais ouvre de nouvelles perspectives, permettant la coexistence d'applications et d'usages extrêmement divers. Promeut une société entièrement connectée, où tout le monde peut accéder aux informations et mener des discussions virtuelles à tout moment, n'importe où, sans restriction. Il convient non seulement aux téléphones à large bande et mobiles, mais également à la connexion de diverses applications. Il ne s'agit pas seulement de la connexion des personnes, mais également de la connexion de tous les appareils et connexions disponibles à tout moment et en tout lieu. L'idée qui a commencé à se former derrière le concept 5G est qu'il n'augmentera pas simplement la vitesse comme dans les générations précédentes.

La 5G vise des secteurs très variés, qui n'auraient pas nécessairement d'autre élément commun que cette technologie, mais qui sont des piliers importants d'une société : l'énergie, la santé, les médias, l'industrie, le transport... etc.

## I.2 Objectif de la 5G

La 5G est l'Internet du futur. La technologie comprendra des réseaux d'accès sans fil et des réseaux centraux convergents qui combinent l'accès fixe et mobile. Cela comprend l'augmentation de la vitesse et de la capacité du réseau, ainsi que la préparation des événements « Internet des objets ». Les principaux objectifs comprennent :

- ✓ Forfait data plus volumineux : la quantité de data doit être 1000 fois plus élevée

- ✓ Moins d'antennes : Le nombre de terminaux pouvant être connectés à chaque antenne devrait être 100 fois plus important, mais le nombre d'antennes dépend principalement de la fréquence utilisée.
- ✓ Meilleure vitesse (1 Go par seconde)
- ✓ Un temps de "retard" plus court rend le réseau très sensible.
- ✓ Plus de batterie, moins de consommation.

### 1.3 Les familles d'usage 5G

La 5G est plus un voyage qu'une destination. Son objectif consiste à faire évoluer les réseaux de la 4G pour répondre aux différents besoins complémentaires : augmenter les débits, supporter les communications denses de longues portées et assurer des communications quasi -temps réel. Spécialement dans des applications critiques telles que la télémédecine [1].

Trois familles d'usage caractériseront la 5G :

Massive Machine Type Communications (MMTC), Enhanced Mobile Broadband (EMBB) et Ultra -reliable and Low Latency Communications (URLLC).

Ces ensembles sont analysés de la manière suivante :

#### 1.3.1 Massive Machine Type Communications (MMTC)

La MTC (Machine Type communication) est un paradigme de communication dans lequel un certain nombre de dispositifs ou d'objets sont connectés à l'internet ou directement connectés et communiquent entre eux avec peu ou pas d'intervention humaine. À l'arrivée des technologies 5G, de nouvelles applications des MTC sont développées pour servir un grand nombre d'objets, introduisant ce qu'on appelle le MTC massif (MMTC), ou l'Internet massif des objets (mIoT) [2].

#### 1.3.2 Enhanced Mobile Broadband (EMBB)

Une extension de services et d'applications et qui nécessitent une connexion toujours plus rapide avec des débits plus élevés [3]. Parmi les principales caractéristiques de l'EMBB, l'augmentation de la capacité d'accueillir beaucoup plus de trafic et assurer une couverture complète pour les zones urbaines.

#### 1.3.3 Ultra-reliable and Low Latency Communications (URLLC)

Cela concerne des applications nécessitant des exigences strictes : la latence, la fiabilité pour des applications critiques comme les véhicules autonomes (V2X), la chirurgie/les soins de santé à distance (e-santé) ou l'automatisation industrielle à temps critique (par exemple la fabrication des semi-conducteurs) [4] [5].

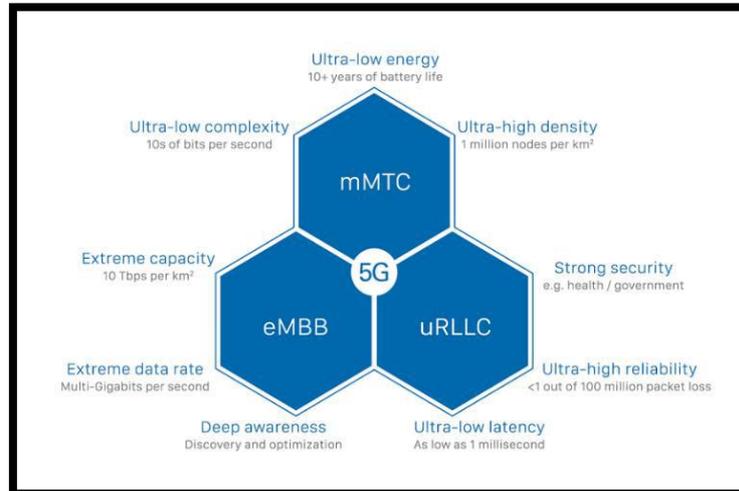


Figure I.1 : Les familles d'usage 5G.

## I.4 Architecture de la 5G

### I.4.1 Principe

Pour atteindre de nouveaux niveaux de performance et d'efficacité, la 5G utilise de nombreuses technologies clés telles que les ondes millimétriques, la NOMA, le Full-Duplex, le Beamforming, le Small-cell, Mimo-massive, etc. Les combinaisons de ces dernières vont étendre l'importance des communications mobiles. Elles vont leur permettre également de jouer un rôle capital dans les systèmes d'accès multiples. La 5G utilise les ondes millimétriques pour transférer rapidement d'énormes quantités de données, tout en sachant que la plage de diffusion est limitée. Pour pallier à ce problème, elle fait appel à la technologie de Beamforming à travers MIMO-massive qui permet la diffusion continue des données sur plusieurs appareils. Elle utilise aussi le processus des Small-cells pour assurer des connexions de l'ordre de gigabit même en état de marche.

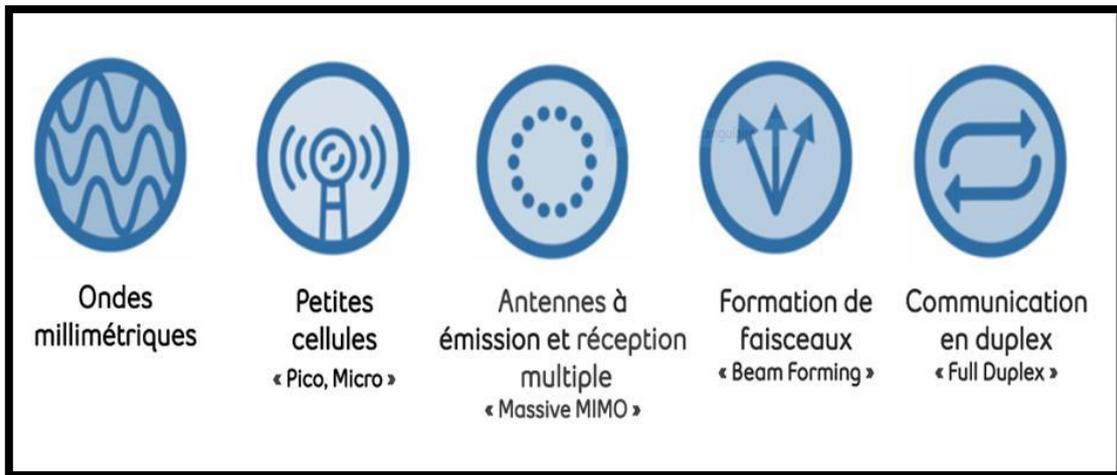


Figure I.2 : Les principales technologies mises en œuvre pour la 5G.

L'architecture 5G est principalement composée de trois couches horizontales, à savoir « l'activation de service innovante », « la plate-forme d'activation » et « la radio hyper-connectée », que nous décrivons dans cette section en détail.

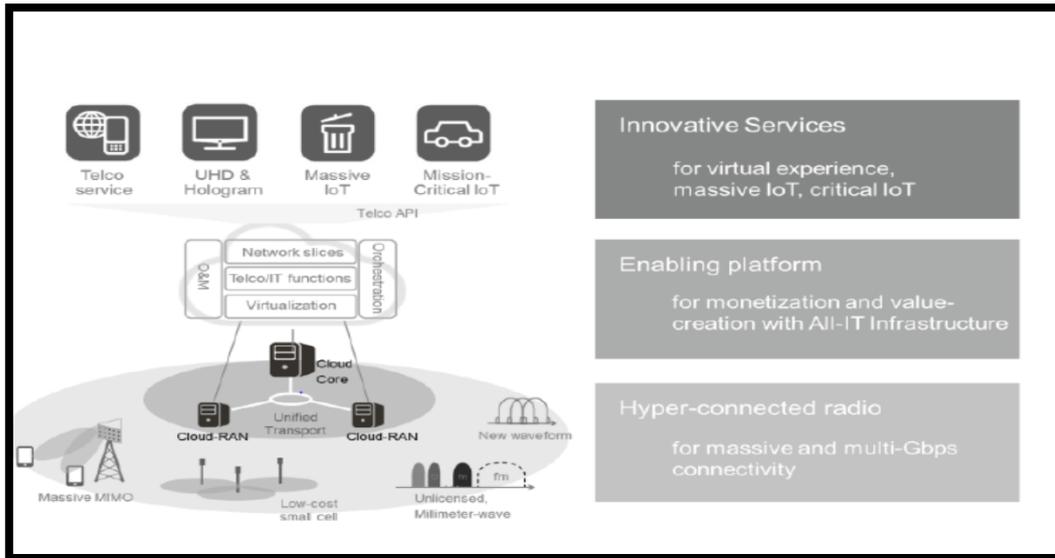


Figure I.3 : L'architecture de la 5G.

#### I.4.2 Le service innovant

C'est la couche supérieure qui inclut des services 5G innovants. Basé sur des capacités d'infrastructure 5G différenciées, les services 5G seront en mesure d'offrir une expérience utilisateur hautement fiable et immersive. En particulier, le streaming vidéo en ultra-haute définition finira par devenir des services dominants offrant des expériences utilisateur virtuelles telles que le streaming vidéo multi-view et même les hologrammes. De plus, la bande passante suffisante et la grande fiabilité offerte par la 5G faciliteront l'émergence de services de contrôle de robots à distance et de services d'Internet des objets (IoT) essentiels à la mission.

#### I.4.3 La plate-forme de validation (Architecture réseau)

Elle représente la couche intermédiaire qui crée des valeurs significatives et centrées sur le service pour prendre en charge la couche supérieure de « service innovant » en transformant correctement les éléments mécaniques et disjoints. Réseaux sous-jacents à une infrastructure orientée services. Il utilise deux activateurs clés pour effectuer cette tâche. L'un est la virtualisation des fonctions réseau (NFV) et le réseau SDN (Software Defined Networking), qui virtualisent l'infrastructure et les services pour offrir toujours plus de souplesse, d'intelligence et d'ouverture, sont l'avenir des télécommunications.

- ✓ Le SDN a pour objectif de dissocier la partie contrôle d'un réseau de sa partie opérationnelle, ces deux parties étant traditionnellement liées et distribuées (dernière figée) dans le réseau. Le contrôle du réseau, autrefois dévolu à des

composants matériels spécialisées et non évolutif, est centralisé sous forme de logiciel sur des serveurs plus puissants et affranchis (en théorie) des spécifications des équipementiers. Cela permet de déploiement de services à forte valeur ajoutée (équilibrage de charge, routage intelligent, configuration dynamique ...) dans des environnements hétérogènes [6].

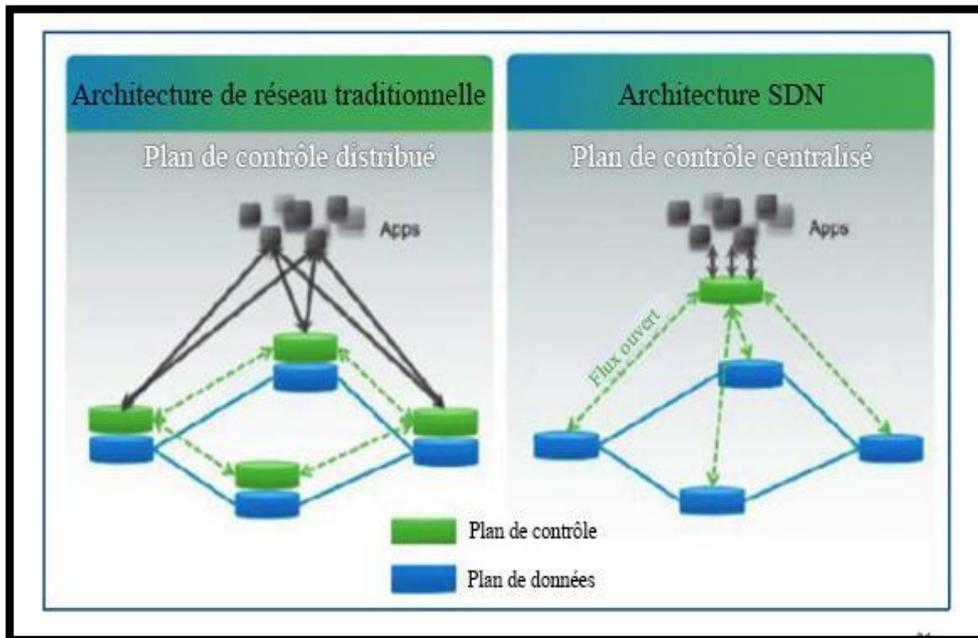


Figure I.4 : Centralisation du plan de contrôle dans un réseau défini par un logiciel (software defined network).

- ✓ Le **NFV**, complémentaire du **SDN**, a pour l'objectif de virtualisation, c'est-à-dire remplacer par du logiciel sur un serveur, le but est d'accélérer les déploiements et permettre des évolutions rapides [6].
- ✓ On a aussi une autre architecture réseau très différente de ce qui se fait actuellement c'est CloudRAN connue sous le nom de centralized-RAN c'est une évolution du SDN. Les unités de traitement du signal des stations de base, actuellement placées au niveau de la station elle-même, sont déportées dans le Cloud et centralisées, elles communiquent avec les têtes de réseau, situées au plus proche de l'antenne, via un réseau fibre optique. Cette centralisation permet une vision d'ensemble de toutes les stations déployées et de coordonner le traitement de signal et gestion des interférences entre cellules et terminaux [6].

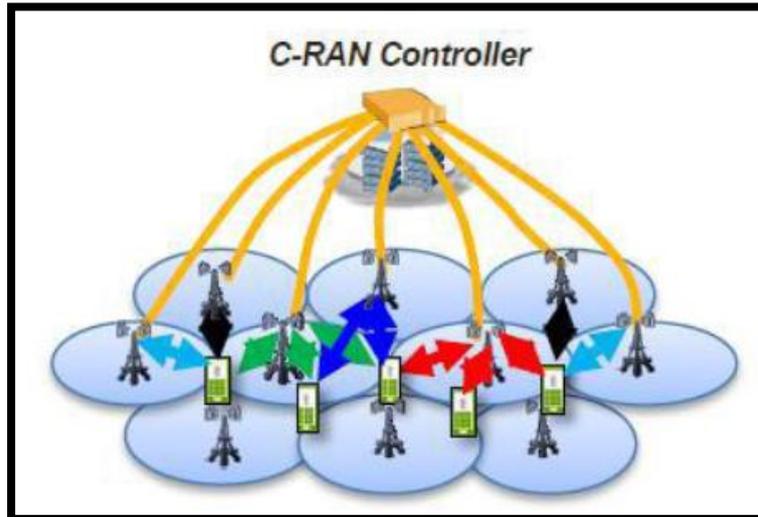


Figure I.5 : Illustration d'une architecture réseau CloudRAN.

L'autre est un ensemble bien défini d'interfaces de programmation d'application (API), qui offre la possibilité d'automatiser le réseau en interne pour un réseau automatisé.

#### I.4.4 La radio Hyper-Connecté

Représente la couche inférieure qui peut fournir une quantité massive de données à la couche "Enabling Platform" d'une manière très efficace et transparente. En raison de l'énorme quantité de données de transmission et des exigences de latence strictes, cette couche inclura non seulement les technologies de réseau radio existantes (à la fois telles quelles et évoluées), mais aussi de nouvelles technologies de réseau radio. Il est nécessaire de développer une gamme de technologies capables d'améliorer le fractionnement des cellules, l'efficacité spectrale, la bande passante de la fréquence du canal et l'efficacité du fonctionnement du réseau.

- ✓ Il y a Plusieurs technologie, parfois concurrent, sont en cours d'étude par les organismes de recherche. Ceux-ci inclus :

##### I.4.4.1 Bandes millimétriques

Il s'agit tout simplement des fréquences supérieures à 6Ghz qui n'ont encore jamais pris pour déploiement des réseaux mobiles pour des raisons de maturité technologique et de qualité de propagation. Pour répondre à l'incessante augmentation des débits et des volumes de données échangés, elle pourraient offrir de telles réserves de spectre et leurs utilisation impose le développement de toutes les technologies nécessaires, miniaturisés bas cout et avec une consommation énergétique compatible avec des terminaux portable (amplificateur ,codeur ,traitement de signal, antenne...) en particulier 1 , la communication par onde millimétrique est

susceptible d'être utilisée pour une couverture extérieure pour des réseaux denses telle que la portée allant jusqu'à 200 à 300 mètre, Chaque cellule aura une couverture réduite, ce qui nécessitera la mise en place de techniques de beamforming(MIMO).

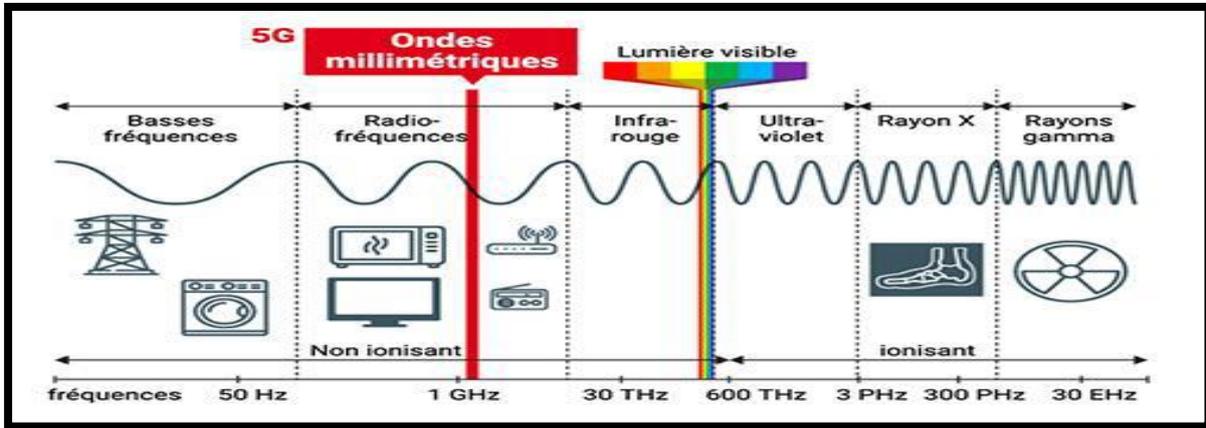


Figure I.6 : Répartition de fréquence sur le spectre électromagnétique.

#### I.4.4.2 MIMO massive

Cette technologie se caractérise par l'utilisation d'un nombre élevé de micro antennes « Intelligentes » sur un seul équipement (de 8 à 128 actuellement, mais le nombre augmentera avec l'utilisation de fréquences à 6Ghz). L'attrait l'utilisation du massive MIMO est double [6] :

- ✓ Permet d'augmenter les débits grâce au multiplexage spatio-temporel.
- ✓ Permet de focaliser l'énergie sur un terminal pour améliorer son bilan de liaison.

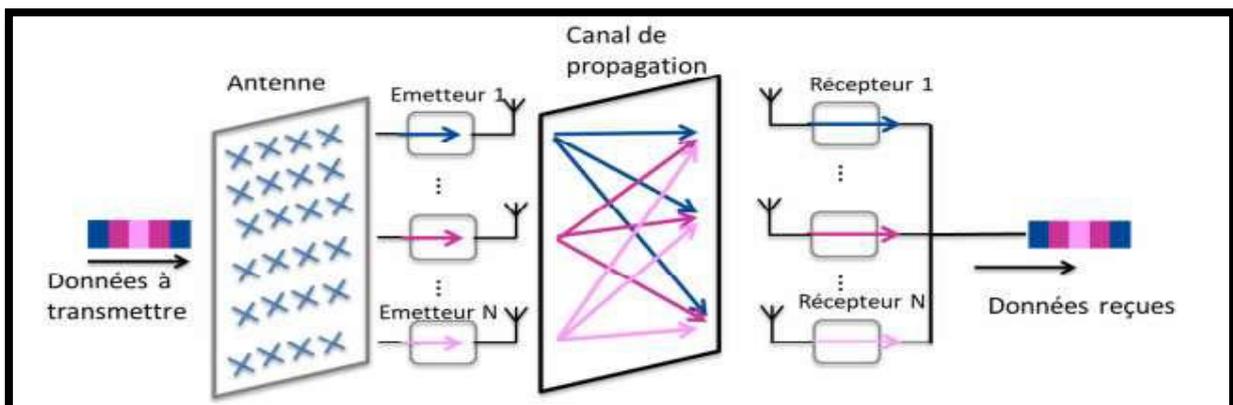


Figure I.7 : MIMO massive.

### I.4.4.3 Méthodes duplex

Pour les communications mobiles, il est important de pouvoir communiquer simultanément ou virtuellement dans les deux sens.

- ✓ Dans les systèmes de téléphonie mobile précédents, cela a été accompli en utilisant des systèmes FDD (parfois appelée semi-duplex, nécessite l'utilisation de deux canaux, un pour la liaison montante (UP) et l'autre pour la liaison descendante (DL), ce système nécessite la largeur de bande complète du canal dans deux zones du spectre. Les caractéristiques de propagation entre les bandes d'émission et de réception seront également légèrement dans des instants différents. L'utilisation des filtres devient de plus en plus difficile et complexe si plusieurs bandes sont utilisées car ils sont nécessaires pour augmenter la taille, le poids, et le coût. Ceci introduit une perte supplémentaire. Et des systèmes TDD (alloue des canaux temporels en fonctions de transmission et de réception dans laquelle la liaison montante (UP) et la liaison descendante (DL) sont reporte sur même canal avec même fréquence. Les canaux sont relativement courts et ce fait la transmission dans les deux directions est pratiquement instantané.
- ✓ Le concept de développé le full duplex 5Gest de pouvoir émettre et recevoir simultanément l'information, sur les mêmes fréquences, au même moment et au même endroit. Ce duplex intégral 5G offre plusieurs avantages :
  - ✓ Efficacité du spectre.
  - ✓ Caractéristique d'évanouissement.
  - ✓ Filtrage.
  - ✓ Nouvelles solutions de relais.
  - ✓ Coordination améliorée des interférences.

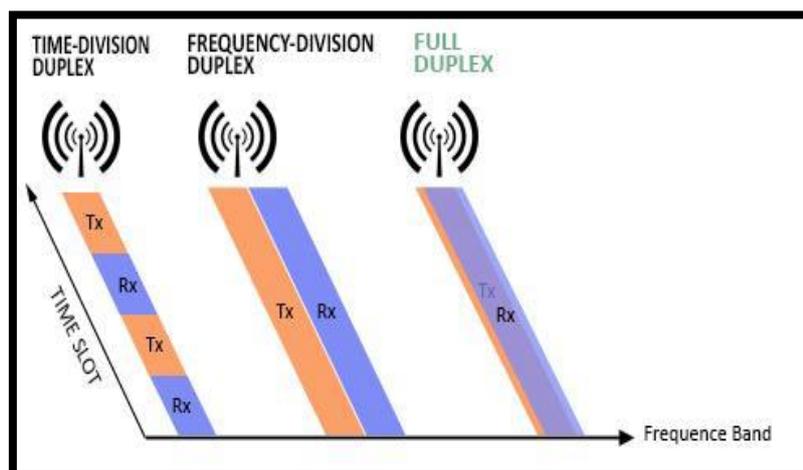


Figure I.8 : Illustration du full-duplex, comparé au FDD et TDD.

## I.5 La couche physique

De nombreux chercheurs de l'industrie et du monde universitaire travaillent activement à répondre aux exigences nécessaires pour une mise en œuvre fiable et robuste de la 5G. Les caractéristiques clés suivantes ont joué un rôle déterminant dans la conception de la couche physique de la 5G NR :

- Prise en charge d'une large gamme de bandes de fonctionnement, d'une variété de largeurs de canal parmi ces bandes et de multiples options de déploiement.
- Prise en charge d'applications caractérisées par une très faible latence, ce qui nécessite des paquets courts et des interférences par rafales et discontinues de la part des transmissions critiques.
- Partage dynamique du spectre afin de fournir des liaisons montantes (UL), descendantes (DL), latérales et de raccordement.

Mise en œuvre d'une technologie multi-antenne (entrées multiples, sorties multiples ou MIMO) pour une efficacité spectrale supérieure.

- Maintien d'un fonctionnement dans un délai limité et d'une utilisation plus efficace de la fréquence pour des déploiements TDD (duplex à répartition dans le temps) et FDD (duplex à répartition en fréquence) plus performants.

### ❖ Futurs physiques :

La nouvelle couche physique MAC présente des possibilités intéressantes dans certain nombre de domaines.

#### a) Formes d'onde :

Bien que l'**OFDM** nécessite l'utilisation d'un préfixe cyclique mais il a eu un grand succès et présente encore de nombreux avantages. Maintenant que la 5G est étudiée, il y a une excellente opportunité de considérer les formes d'onde optimales qui servent à utiliser jusqu'à au moins 2040. Quelques formes d'ondes 5G à l'étude :

- **FBMC** : son principe de base est de diviser le spectre de fréquence en plusieurs sous-porteuses qui sont très étroites et les filtrer individuellement, il est capable de fournir un très haut niveau d'efficacité spectrale.
- **UFMC** : Il diffère de FBMC, au lieu de filtrer chaque sous-porteuse individuellement, UFMC divise le signal en un certain nombre de sous-bandes qu'il filtrera. Ensuite, on peut l'utiliser pour améliorer la protection contre les interférences entre symboles.
- **GFDM** : Est une technique de transmission multi-porteuse flexible qui présente de nombreuses similitudes avec OFDM. La principale différence est que les porteurs ne sont pas orthogonaux entre eux. GFDM fournit un meilleur contrôle des émissions hors bande et réduit le rapport puissance/puissance moyenne.

b) Schémas d'accès multiple :

- ✓ **Multiplexage NOMA** : LTE utilise un multiplexage dit orthogonal, chaque terminal utilise, de manière unique, une partie des fréquences à un instant donné. Pour améliorer l'efficacité spectrale de la 5G par rapport à la 4G des méthodes de multiplexage non orthogonale, c'est-à-dire que plusieurs utilisateurs peuvent recourir aux mêmes fréquences au même moment, sont envisagées. La discrimination entre plusieurs utilisateurs peut se faire en attribuant des codes différents à chaque utilisateur (SCMA, CDMA). [6]

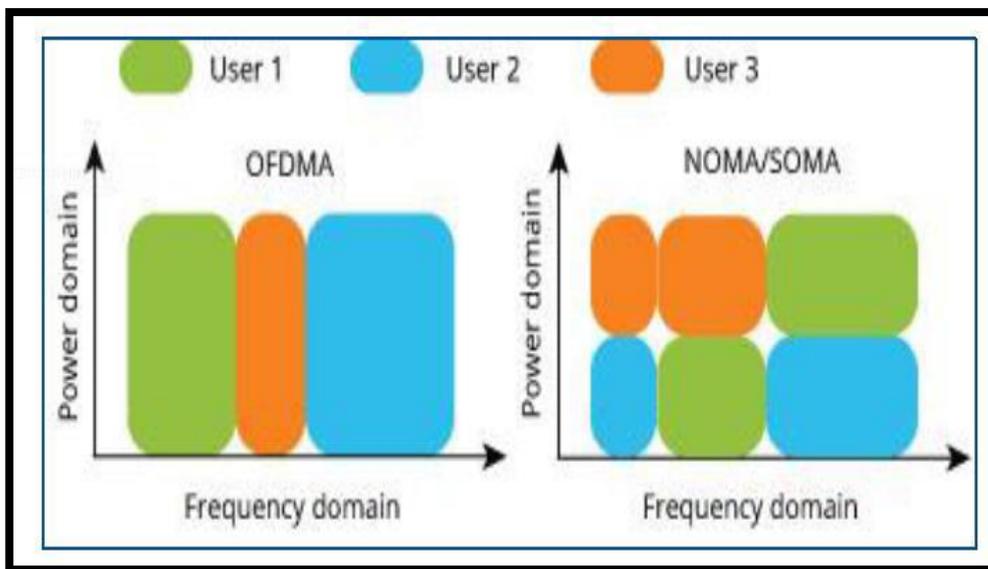


Figure I.9 : Illustration de multiplexage power Domain NOMA.

- c) **Type de modulations** : La 4G utilise la modulation d'amplitude en quadrature (QAM). Cette modulation peut atteindre **QAM-64**, c'est-à-dire qu'à chaque instant, 6 bits d'information sont transmis. Grâce à l'amélioration du bilan de liaison de la 5G, via des technologies antennaires ou de traitement de signal, la modulation peut atteindre à l'ordre **QAM-256** (8 bits d'information), ces modulations offrent une excellente efficacité spectrale et ont permis de réaliser des débits de données très élevés.
- d) **Réseaux denses** : La réduction de la taille des cellules permet une utilisation beaucoup plus efficace du spectre disponible. Des techniques permettant de garantir que les petites cellules du macro-réseau sont déployées en tant que femtocells qui peuvent fonctionner de manière satisfaisante.

## I.6 Caractéristiques et la comparaison entre 4G et 5G

L'objectif de la 5G, en tant que successeur de la 4G, sera aussi de pouvoir fournir :

- ✓ Les premiers déploiement 5G offriront de performances en progression mais dans la continuité de ce qu'offrira alors la 4G qui aura évolué en parallèle (4.5G, 4.9G).
- ✓ Les performances continueront d'augmenter avec l'introduction progressive de technologies de rupture, comme par exemple l'utilisation de fréquences millimétriques.
- ✓ Un réseau extrêmement faible, avec des performances plus homogènes, quelle que soit la position de l'utilisateur par rapport à la station de base.
- ✓ Une connexion stable même en mobilité (avec de vitesses de l'ordre de 500km/h).
- ✓ Une augmentation de l'efficacité énergétique.

Selon les objectifs de 5G devra offrir un débit maximal respectivement 10 et 20 fois supérieur à ce qui est disponible actuellement. La densité maximale de connexion sera multipliée par 10 et la latence divisée par au moins 10 (la latence point à point cible est de 1 ms, contre 30 à 40 ms ce jour).

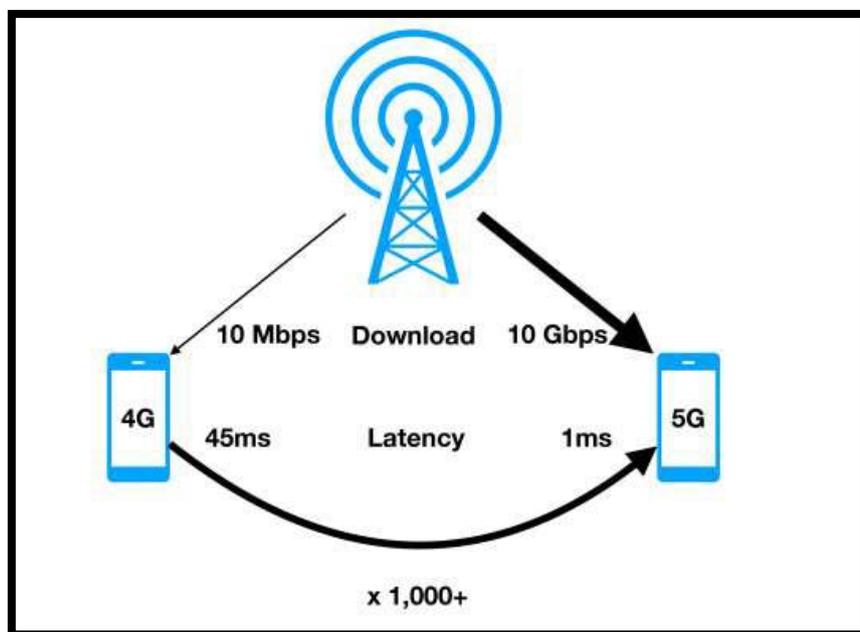


Figure I.10 : Comparaison entre la 4G et la 5G.

Le tableau ci-dessous résume les performances attendues de la 5G et celles qui sont actuellement disponibles avec la 4G :

	4G	5G
1/Débit maximal (Gbit/s)	1	20
2/Débit aperçu par l'utilisateur (Mbit/s)	10	100
3/Efficacité spectrale	1x	3x
4/Vitesse (Km/h)	350	500
5/Latence (ms)	10	1
6/Nombre d'objets connectés sur une zone (quantité d'objets/ km <sup>2</sup> )	10 <sup>5</sup>	10 <sup>6</sup>
7/Efficacité énergétique du réseau	1x	100x
8/Débit sur une zone (Mbit/s/m <sup>2</sup> )	0.1	10

Tableau I.1 : Comparaisons entre les performances de 4G et de la 5G.

## I.7 Les défis de la 5G

La 5G ne devrait ainsi pas échapper à la règle, mais poserait de nouveaux défis au domaine des télécommunications

- Moins de temps de latence.
- Une consommation énergétique minimale.
- Une 5G partout, et à plusieurs vitesses adaptées à un monde ultra-connecté.
- Le principal défi pour 5G est le nombre massif de machines connectées et la croissance de 1000x dans le trafic mobile.

## I.8 La 5G dans le monde

Une course mondiale entre les pays a commencé, en établissant d'abord des expérimentations 5G à grande échelle, puis en lançant des services commerciaux, même s'il s'agit de pré-normes basées sur des spécifications techniques. Ainsi, certains pays travaillent d'arrache-pied et tentent de trouver un accord entre eux afin de promouvoir des spécifications techniques répondant à leurs besoins et d'obtenir le meilleur retour sur investissement à l'international, par exemple en provoquant

beaucoup de remous sur les bandes de fréquences les plus couramment utilisées. 5G. Exemples de Corée du Sud, du Japon, de Chine, d'Europe et des États-Unis

**Japon** : Le Japon veut démontrer son leadership sur la 5G en déployant le premier réseau commercial 5G à être conforme aux spécifications techniques internationales pour les jeux olympiques d'été de Tokyo en 2020.

**Chine** : Tout comme au Japon, la Chine entend montrer son *leadership* avec des premiers déploiements commerciaux dès 2020. Les premiers tests seront faits avant 2020 dans la bande 3400 - 3600 MHz. Les bandes 3300 - 3400 MHz, 4400 - 4500 MHz et 4800 - 4990 MHz sont aussi considérées et à l'étude. Pour de plus hauts débits, les bandes autour de 25 GHz et 40 GHz sont envisagées.

**Corée** : La Corée quant à elle envisage un déploiement pré-commercial de la 5G durant les jeux olympiques d'hiver de P'yöngch'ang 2018. Plusieurs expérimentations sont en cours de préparation pour des démonstrations grandeur nature dans plusieurs villes coréennes dont P'yöngch'ang et Seoul. Les trois opérateurs mobiles nationaux espèrent des fréquences dans la bande 26,5 - 29,5 GHz.

**L'Europe** :

La Commission européenne donne à tous les pays de l'Union un certain nombre d'objectifs chiffrés et ambitieux. Ainsi, un objectif phare pour la 5G serait d'avoir en 2020 au moins une grande ville dans chaque pays d'Europe équipée de cette dernière génération mobile, avec une couverture, à l'horizon 2025, de tous les centres urbains, les autoroutes et les voies ferrées à grande vitesse. Il s'agit là de répondre aux annonces de la Corée du Sud et du Japon qui promettent de faire une démonstration à grande échelle de la 5G respectivement aux JO d'hiver en 2018 à P'yöngch'ang et d'été en 2020 à Tokyo.

**Etats-Unis d'Amérique** : La 5G est considérée comme étant une opportunité sans précédent pour la croissance économique avec de gros impacts sur l'éducation, l'emploi, les transports, etc.... Ces futurs réseaux nécessitent, selon la FCC (Federal Communications Commission), l'agence de régulation américaine) de se pencher sur les 3 éléments suivants : le spectre, l'infrastructure et le réseau de raccordement (backhaul).

## I.9 Conclusion

La 5G devrait avoir d'innombrables cas d'utilisation, dont beaucoup sont inimaginables aujourd'hui. En fait, il est positionné pour répondre aux besoins et à l'environnement des affaires de 2020 et au-delà. Il est nécessaire de fournir un débit plus élevé, une latence plus faible, une fiabilité ultra-élevée, une densité de connexion plus élevée et une plage de mobilité plus élevée. Cela permettra de fournir plus de services que la voix et les données. Les exigences 5G couvrent des considérations de bout en bout, y compris les exigences pour les utilisateurs, les systèmes, les services améliorés, la gestion et les opérations, les équipements et les modèles commerciaux. Il est particulièrement important de maintenir les améliorations dans les domaines suivants : capacité du réseau, expérience client cohérente, flexibilité, efficacité et services innovants.

# *Chapitre I.I*

---

## MIMO-NOMA

## II.1 Multiple Input Multiple Output (MIMO)

### II.1.1 Introduction

Dans les systèmes MU-MIMO, le schéma de détection optimal à maximum de vraisemblance (MLD), qui effectue une détection exhaustive, est le meilleur.

Maximum de vraisemblance (MLD), qui effectue une recherche exhaustive de la carte de la constellation a une complexité exponentielle avec l'augmentation du nombre de flux de données (utilisateurs). Par conséquent, l'étude des schémas de détection sous-optimaux à faible complexité pour les systèmes MU-MIMO qui peuvent se rapprocher de la performance optimale est d'une importance fondamentale.

L'arbre Le décodage de sphère (SD) basé sur la recherche arborescente peut séparer avec succès chaque flux de données avec une complexité réduite par rapport au MLD. Cependant, la complexité du SD a toujours une limite inférieure exponentielle pour un grand nombre de flux de données.

La détection linéaire (LD) basée sur l'erreur quadratique moyenne minimale (MMSE) ou sur l'erreur zéro, est une méthode de détection très efficace.

(MMSE) ou le critère de forçage zéro (ZF) est un schéma à faible complexité, mais la performance d'erreur est inacceptable en raison de l'interférence d'accès multiple (MA). D'autre part, les techniques de détection non linéaires, telles que l'annulation successive d'interférence (SIC) utilisée dans le système vertical de Bell Labs Espace-temps à couches verticales (V-BLAST) ont une faible complexité, tout en obtenant un MAI réduit par rapport à leurs homologues linéaires. Cependant, ces algorithmes de détection par décision souffrent de la propagation d'erreurs et d'une dégradation des performances.

Un nouvel algorithme SIC à rétroaction multiple avec contrainte de zone d'ombre (MF-SIC) pour la détection de signaux multiples. Contraintes de zone d'ombre (MF-SIC) pour la détection d'utilisateurs multiples. Utilisateurs multiples qui nécessitent une faible complexité de calcul. L'algorithme de sélection MF recherche plusieurs points de constellation au lieu d'un seul dans l'algorithme SIC classique. Plutôt qu'un seul point de constellation dans l'algorithme SIC conventionnel, en choisissant le point le plus approprié dans l'algorithme SIC. Par la suite, nous sélectionnons ce point de constellation approprié en tant que retour d'information. En procédant ainsi, un plus grand nombre de points dans l'arbre de décision sont pris en compte et la propagation des erreurs est efficacement atténuée. La procédure de sélection est limitée à un symbole sélectionné dans chaque couche spatiale, contrairement aux décodeurs de sphère qui utilisent une procédure de recherche pour plusieurs couches qui ne peuvent être sélectionnées, ce qui augmente la charge de calcul. En outre, la contrainte de la zone d'ombre (SAC) réduit encore la complexité du calcul en évaluant la qualité des

décisions et en évitant les multiples procédures de retour inutiles pour des estimations fiables.

Le MF-SIC est également combiné à un cadre de traitement multi branche (MB) pour améliorer encore les performances. Une structure de récepteur itératif (turbo) est développée pour les systèmes codés. Pour les systèmes codés et un détecteur SISO (soft-input soft-output) de faible complexité est proposé sur la base du MF-SIC. Les résultats de simulation montrent que les schémas proposés surpassent de manière significative les schémas SIC conventionnels et ont une performance comparable à la limite de l'utilisateur unique.

Les contributions de cet article peuvent être résumées comme suit :

- Un nouveau détecteur MF-SIC à faible complexité est développé.
- Le traitement MB est incorporé dans le MF-SIC proposé afin d'obtenir une meilleure détection.
- MF-SIC proposé afin d'atteindre un ordre de diversité de détection plus élevé et d'obtenir des performances proches de l'optimum.
- Un récepteur à détection et décodage itératifs (IDD) est introduit pour approcher la performance sans MAI dans les systèmes codés.
- Une étude du MF-SIC proposé et de certains schémas de détection existants pour les systèmes MU-MIMO.

### II.1.2 MIMO traditionnel

Un système MIMO peut être défini comme l'utilisation de plusieurs antennes aux extrémités d'émission et de réception d'un réseau de communication sans fil. MIMO fait spécifiquement référence à une technologie pratique qui utilise la propagation par trajets multiples pour envoyer et recevoir simultanément plusieurs signaux de données sur le même canal radio. Le spectre sans fil est une ressource précieuse et limitée. Afin de répondre à la demande croissante de capacité plus élevée, MIMO a été introduit dans les normes sans fil générales telles que IEEE 801.11n, WiMax et LTE. La technologie MIMO peut augmenter la capacité et la fiabilité sans augmenter la puissance ou la bande passante. [7]

### II.1.3 Systèmes à antennes multiples (MIMO)

Plusieurs antennes au niveau de l'émetteur et/ou du récepteur d'un système mobile peuvent augmenter les débits de données et les performances (systèmes à

plusieurs entrées et plusieurs sorties) ou réduire l'ISI et les interférences d'autres utilisateurs (antennes intelligentes).

Les systèmes MIMO sont définis comme des liaisons de communication point à point avec plusieurs antennes au niveau de l'émetteur et du récepteur.

L'utilisation de plusieurs antennes au niveau de l'émetteur et du récepteur offre clairement des performances améliorées par rapport aux systèmes en diversité où l'émetteur ou le récepteur, mais pas les deux, possède plusieurs antennes.

En particulier, des recherches récentes ont montré que les systèmes MIMO peuvent augmenter considérablement les débits de données des systèmes sans fil sans augmenter la puissance de transmission ou la bande passante. Le coût de cette augmentation est le coût supplémentaire du déploiement de plusieurs antennes, l'encombrement de ces antennes supplémentaires (en particulier sur les unités portables de petite taille) et la complexité supplémentaire requise pour le traitement du signal multidimensionnel.

Le travail récent dans les systèmes MIMO inclut la capacité de ces systèmes sous différentes hypothèses concernant la connaissance du canal, le codage et le décodage optimaux pour ces systèmes et les stratégies de transmission pour les systèmes non codés. Un système de communication point à point à bande étroite (évanouissements plats) utilisant  $n$  antennes d'émission et de réception est illustré à la Fig.

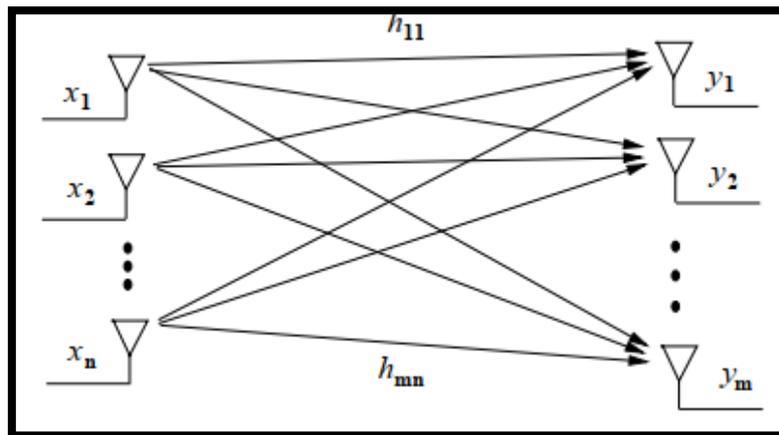


Figure II.1 : Systèmes MIMO.

#### II.1.4 Principes du MIMO

L'idée principale derrière MIMO est que, les signaux échantillonnés dans le domaine spatial à la fois à l'émetteur et au récepteur sont combinés de sorte qu'ils forment de multiples flux de données spatiales parallèles efficaces qui augmentent le débit de données. L'occurrence de la diversité améliore également la qualité qui est le taux d'erreur sur les bits (BER) de la communication. [7]

Lors de l'utilisation de la technologie MIMO, plusieurs antennes de réception et d'émission sont utilisées pour augmenter la capacité grâce au multiplexage spatial sans puissance ni bande passante supplémentaire.

La capacité évolue linéairement avec le nombre minimum d'antennes utilisées au niveau de l'émetteur ou du récepteur. Avec le pré codage du signal, il est également possible d'étaler les flux sur toutes les antennes d'émission pour obtenir un gain de réseau supplémentaire du signal et / ou simplifier le récepteur. Dans un canal à évanouissement, la diversité spatiale entre les antennes peut également être utilisée pour augmenter la capacité moyenne et réduire la probabilité d'interruption. [8]

### II.1.5 Types de MIMO

Selon le nombre d'antennes présentes dans différents dispositifs d'antenne, on peut distinguer plusieurs configurations (SISO, SIMO, MISO et MIMO) (systèmes). Cependant, ces architectures utilisent différentes fonctions pour traiter les signaux, telles que les techniques de combinaison, le codage spatio-temporel, le multiplexage spatial, etc., dans le but d'atteindre les meilleures performances du dispositif d'antenne. [9]

#### II.1.5.1 SISO (Single Input Single Output)

Dans le type d'antenne SISO, il n'y a qu'une seule antenne émettrice à l'extrémité émettrice et une seule antenne réceptrice à l'extrémité réceptrice. Cela fait de SISO la plus facile à mettre en œuvre et à concevoir parmi les quatre antennes disponibles. Ceci est un schéma fonctionnel du système SISO.

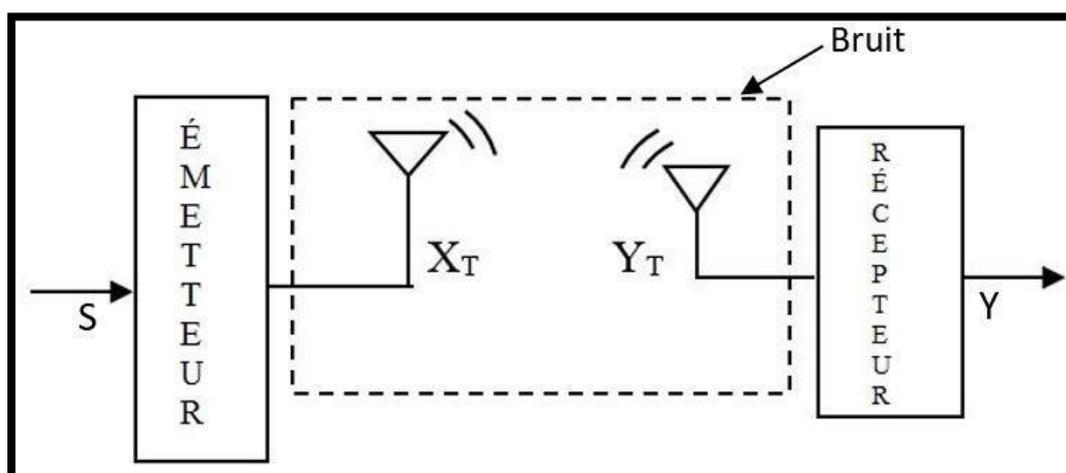


Figure II.2 : SISO - Single Input Single Output.

Dans le schéma ci-dessus,

S : entrée

Y : sortie

$X_T$  : antenne d'émission

$Y_T$  : antenne de réception

Du bruit est introduit dans le système lorsque le signal est en cours de traitement de  $X_T$  à  $Y_R$  (et les atténuations du signal dans cette région pendant qu'il est traité) comme indiqué dans le Diagramme Au-dessus. [10]

### II.1.5.2 SIMO (Single Input Multiple Output)

Dans la technologie SIMO, il n'y a qu'une seule antenne émettrice et quelques antennes réceptrices ; par rapport à SISO, cela permet d'augmenter la diversité de réception. Il s'agit d'un schéma fonctionnel du système SIMO avec une antenne d'émission et deux antennes de réception pour l'analyse (dans ce cas, il n'y en a que deux, ou plus de deux).

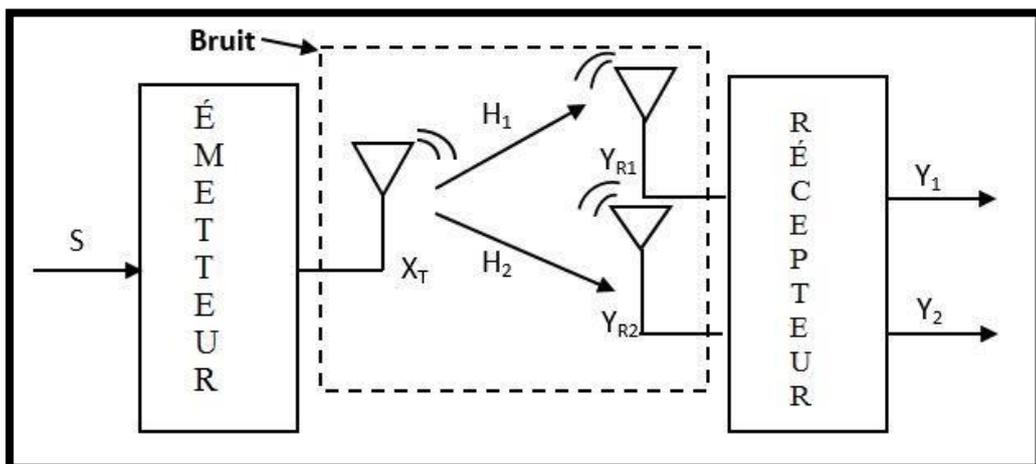


Figure II.3 : SIMO - Single Input Multiple Output.

Dans le diagramme ci-dessus

S : entrée,

Y1 & Y2 : deux sorties de deux antennes de réception

$X_T$  : antenne d'émission

$Y_{R1}$  &  $Y_{R2}$  : deux antennes de réception (les deux antennes de réception auront des coefficients d'évanouissement différents).

SIMO aide à améliorer la diversité de réception de l'antenne car il donne une diversité plus forte que SISO, mais il n'y a pas d'augmentation de l'observateur dans la capacité du canal. [10]

### II.1.5.3 MISO (Multiple Input Single Output)

Dans MISO, il peut y avoir plusieurs antennes émettrices qui peuvent émettre des signaux, et une seule antenne réceptrice peut recevoir des signaux de plusieurs antennes émettrices, ce qui signifie différentes sources sont disponibles, mais une seule destination est disponible [11]. Il s'agit d'un schéma fonctionnel du système MISO avec deux (seulement deux dans ce cas, ou plus de deux) antennes d'émission et une antenne de réception pour l'analyse.

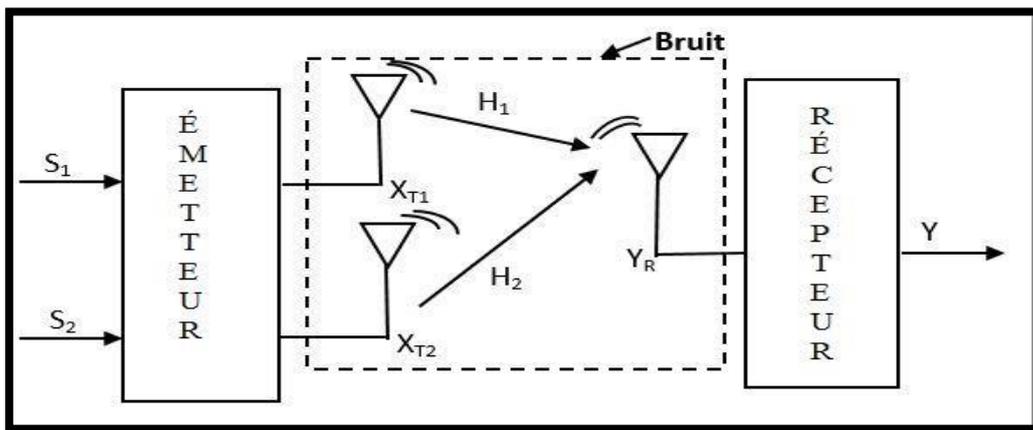


Figure II.4: MISO - Multiple Input Single Output.

Dans le diagramme ci-dessus :

**S1 et S2** : deux entrées de deux antennes d'émission

**Y** : sortie d'antenne de réception.

**XT1 et XT2** : deux antennes d'émission (les deux antennes d'émission auront des coefficients d'atténuation différents)

**YR** : deux antennes de réception.

Ce schéma d'antenne permet de récupérer le signal d'origine à l'extrémité de réception avec une perte de trajet moindre que SISO et SIMO, et l'effet de l'évanouissement par trajets multiples est également moindre que les deux techniques ci-dessus car il y a deux antennes à l'extrémité de transmission. [11]

### II.1.5.4 MIMO (Multiple Input Multiple Output)

Dans MIMO, il peut y avoir plusieurs antennes d'émission à partir desquelles le signal peut être envoyé, et il existe également plusieurs antennes de réception à travers lesquelles le signal peut être reçu. Dans MIMO, comme il peut y avoir plusieurs antennes d'émission, le signal peut être transmis par n'importe quelle antenne et donc le signal peut suivre n'importe quel chemin pour atteindre l'extrémité de réception et

ce chemin suivi par le signal dépend de la position de l'antenne, c'est-à-dire si nous déplaçons l'antenne par petite position, le trajet sera modifié. [11]

L'évanouissement introduit dans le signal provenant de plusieurs trajets peut être qualifié d'évanouissement à trajets multiples. Voici le schéma de principe du système MIMO avec N (dans ce cas seulement deux considérés pour l'analyse pratique, plus de deux également possibles) antenne d'émission et M (dans ce cas seulement deux considérés pour l'analyse pratique, plus de deux également possibles) antenne de réception pour analyse.

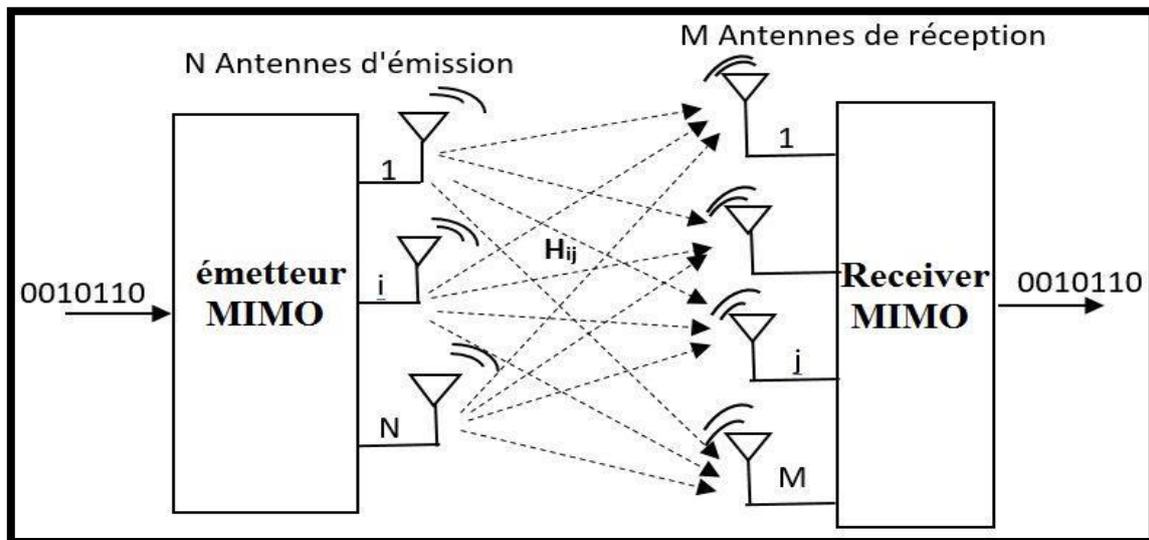


Figure II.5 : MIMO- Multiple Input Multiple Output.

Le canal MIMO est traduit par une matrice H de taille dite matrice de canal  
Un signal MIMO peut être défini par :

$$Y = H X + \eta \quad (II.1)$$

Où :

X : la séquence émit.

Y : la séquence reçue.

N : représente le bruit qui corrompt le signal lors de la traversée du canal.[12]

### II.1.6 La capacité des réseaux MIMO en pratique

Toutes les études mentionnées ne se sont intéressées qu'à la borne théorique de Shannon des systèmes MIMO. Or, même en posant l'hypothèse que l'interférence est assimilable à du bruit blanc et gaussien, cette borne ne peut pas être atteinte en pratique d'une part parce qu'elle implique l'utilisation de mots de code de longueur infinie et d'autre part à cause des contraintes d'implémentation des systèmes de communication réels. Afin d'évaluer les performances d'un réseau cellulaire en tenant

compte de ces contraintes, (Mogensen et al. (2007)) ont introduit un facteur pour tenir compte de la bande passante effective du système et un facteur pour le SNR effectif du système dans le canal de la capacité. Ils ont montré qu'en considérant les détails d'implémentation, le débit possible d'un réseau respectant HSDPA-OFDM en utilisant des antennes MIMO 2x2 se situe entre 1.6 et 3 dB de la capacité de Shannon.

Enfin, bien que la plupart de ces modèles sont présentés par leurs auteurs comme étant réalistes, très peu d'effort a été fait pour les valider expérimentalement et rigoureusement (Correia, 2006). Néanmoins, il est généralement admis qu'il est suffisant de modéliser les atténuations du canal pour estimer les performances d'un système à bande étroite tandis que l'évaluation des systèmes à large bande requiert aussi une modélisation de l'étalement temporel et parfois aussi des directions d'arrivée et de départ des signaux.

### **II.1.7 Modélisation physique des canaux MIMO**

La section précédente a introduit la modélisation mathématique et l'évaluation des performances du canal MIMO. On suppose qu'une matrice de canal déterministe n'a pas de sens. Physicalistes attentifs aux canaux de communication. Cette section montre comment la distribution des correcteurs et certains paramètres physiques du réseau d'antennes affectent la matrice de canal.

## II.2 Techniques d'accès multiples non-orthogonales (NOMA)

### II.2.1 Introduction

Durant la dernière décennie, la demande et les besoins des services de communications sans-fil à haut débit ont explosé, ce qui engendre de nombreuses contraintes énergétiques sur l'implémentation des réseaux et des terminaux. Ce chapitre a pour but d'introduire une nouvelle stratégie d'allocation de ressources basées sur les techniques d'accès multiples non orthogonales (NOMA : Non Orthogonal Multiple Access).

### II.2.2 L'accès multiples

L'accès multiples est une technique permettant à un certain nombre de terminaux ou de stations d'utiliser simultanément les ressources allouées d'une façon prédéterminée. Afin d'augmenter la capacité d'un réseau de communication en nombre des utilisateurs et d'optimiser l'utilisation des ressources, les réseaux mobiles sans fil ont connu une "révolution" en termes de techniques d'accès multiples. Cela concerne, notamment, les technologies de communication sans fil 1G, 2G, 3G et 4G qui utilisent respectivement l'accès multiples par répartition en fréquence (FDMA), l'accès multiples par répartition dans le temps (TDMA), l'accès multiples par répartition en code (CDMA) et l'accès multiples par répartition en fréquence orthogonale (OFDMA) [13]. Selon leurs principes de conception, les techniques d'accès multiples appartiennent à deux catégories. La première consiste en accès multiples orthogonal (OMA) dans laquelle, les ressources sans fil sont allouées orthogonalement à plusieurs utilisateurs dans le domaine temps, fréquences et codes. La deuxième catégorie concerne l'accès multiple non orthogonal (NOMA) où ce travail se concentre le plus.

### II.2.3 Techniques d'accès multiples orthogonales (OMA)

Dans ces technologies, plusieurs utilisateurs transmettent sur des ressources orthogonales, il n'y a donc pas d'interférence entre les signaux de ces mêmes utilisateurs. Dans la technologie OMA, nous avons cité la technologie basée sur la technologie de modulation OFDM. Dans la section suivante, nous examinons son fonctionnement et son utilité.

### II.2.3.1 La modulation multi-porteuses

Contrairement aux techniques mono-porteuses qui modulent sur une porteuse unique à un débit de  $R$ , la modulation numérique multi-porteuse consiste à subdiviser le flux de données en  $N$  sous flux de débit inférieur  $\frac{R}{N}$ , et de les transmettre sur des sous porteuses adjacentes. Ceci peut être considéré comme une transmission parallèle dans le domaine fréquentiel. La figure II.6, illustre la dualité temps-fréquence entre les modulations mono et multi-porteuses. La modulation mono-porteuse réalise un multiplexage temporel alors que la modulation multi - porteuses réalise un multiplexage fréquentiel [14]. Parmi les modulations multi-porteuses les plus célèbres est la modulation OFDM, utilisée largement dans les systèmes de transmission actuels (Wifi, LTE, ...)

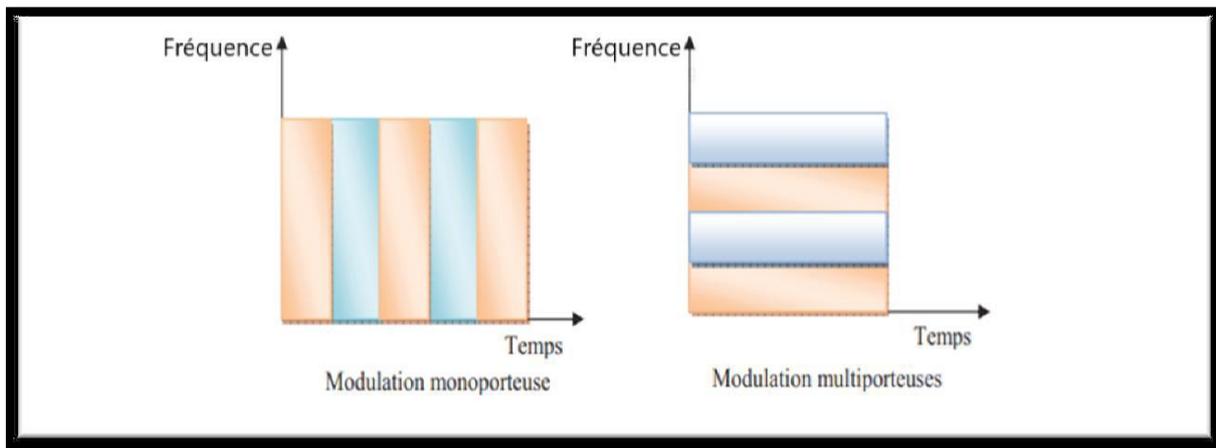


Figure II.6 : Dualité temps-fréquence des modulations. [13]

### II.2.3.2 L'OFDM

Les techniques de modulation sur les canaux à trajets multiples sont devenues un outil nécessaire pour concevoir et construire les futurs réseaux universels de communications mobiles [15]. Pour cela, la technique OFDM est utilisée dans les communications sans fil 4G en raison, de sa grande résistance aux interférences ainsi que l'exploitation des propriétés de la transformée de Fourier discret (DFT) [15]. L'OFDM a trouvé beaucoup d'application notamment pour la télévision numérique terrestre (DVB-T) ou pour la télévision mobile personnelle portable (DVB-H), pour la radio numérique (DAB et DRM) et aussi pour les réseaux sans fil qui s'appuient spécialement sur les normes 802.11a, 802.11g/n (Wifi) et 802.16 (WiMax) [13].

### II.2.3.2.1 Le Principe de la modulation l'OFDM

Le principe de fonctionnement du système OFDM, consiste à diviser la bande passante disponible  $B$  en un certain nombre  $N_{sub}$  de sous -bandes (sous porteuses ou sous canaux). Chaque sous porteuse occupe une largeur de bande  $\Delta f = B/N_{sub}$  ( $B$  : la bande passante disponible) ; de ce fait l'OFDM lutte contre la sélectivité en fréquence du canal multi-trajets (le signal possède une bande de largeur de fréquence plus grande que la bande de cohérence du canal de propagation), c'est pourquoi la durée du symbole devient importante devant l'étalement des retards, où elle est augmentée par un facteur de  $N_{sub}$ . Les données sont transmises avec un débit  $R$  (en bauds), et chaque symbole à une période de  $T_s = \frac{N}{R}$ .

Le signal OFDM dans un intervalle de temps s'exprime comme suit :

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{N_{sub}}} \sum_{k=0}^{N_{sub}-1} C_k e^{i2\pi\Delta f t} ; 0 \leq t \leq T_s \quad (II.2)$$

Sont les vecteurs complexes de données définis à partir d'éléments binaires par une constellation de modulation d'amplitude en quadrature QAM à plusieurs états (4, 16, 64, de façon générale à  $2^m$  états). Ces données sont des symboles M-aires. On peut représenter un modulateur OFDM par le schéma-bloc suivant :

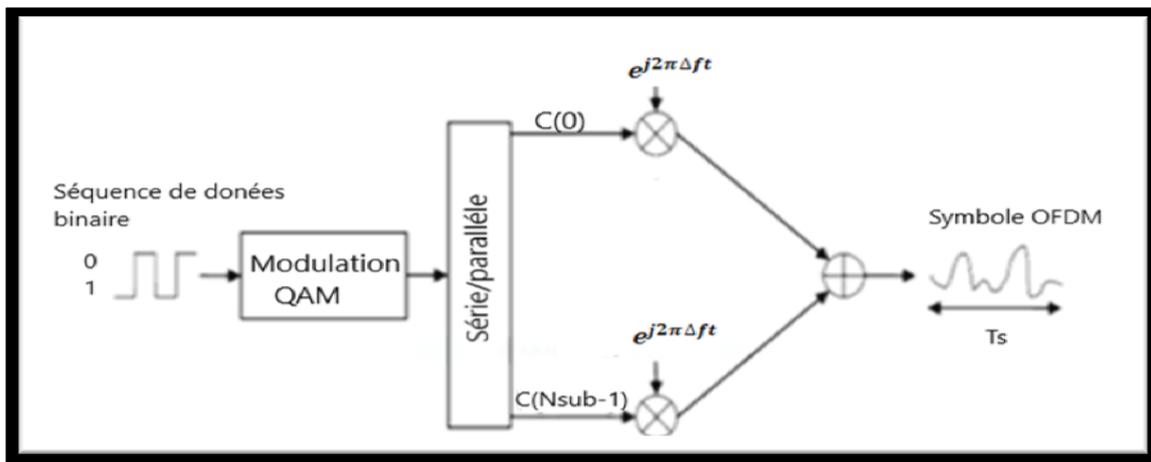


Figure II.7 : Schéma-bloc d'un modulateur OFDM.

Pour la communication sans fil, l'OFDM implique l'efficacité et la rentabilité de la transmission par canal radio mobile dans un environnement à trajets multiples [16]. Il utilise un grand nombre de porteuses pour envoyer des données pour une bande de fréquence très étroite. La fréquence et l'espace de synchronisation de la porteuse sont choisis de manière à ce que les porteuses soient orthogonales pour éviter les interférences. Ce concept de modulation consiste à distribuer des données binaires à haut débit sur des sous-canaux orthogonaux à bas débit, comme si l'on devait

combiner des signaux à transmettre sur un grand nombre de systèmes de transmission indépendants et de fréquences porteuses différentes [16].

### II.2.3.2 Rappel de la notion d'orthogonalité

L'orthogonalité de deux fonctions notées respectivement :  $a(t)$  et  $b(t)$  dans l'intervalle  $[T_n, T_k]$  par la relation suivante :

$$\int_{T_n}^{T_k} a(t) * b(t) dt = 0 \quad (II.3)$$

Cette notion est la propriété principale sur laquelle s'appuie l'OFDM pour transmettre les différents signaux d'informations dans un même canal et de les détecter sans interférence [17].

On peut percevoir la notion d'orthogonalité du signal OFDM dans le domaine fréquentiel où chaque sous porteuse OFDM a une réponse en fréquence sinus cardinal  $\text{sinc}(x)$ . Cette forme a un lobe principal étroit avec de nombreux lobes latéraux. L'orthogonalité dans le domaine fréquentiel est réalisée lorsque le maximum de chaque sous porteuse correspond au minimum des autres sous porteuses. En d'autres termes, le maximum du lobe principal correspond à un "zéro" des autres (Voir figure.II.8). Cette condition permet, ainsi, d'avoir une occupation spectrale idéale et d'éviter les interférences entre sous porteuses. Le spectre total du signal OFDM est la somme des spectres individuels des différentes porteuses.

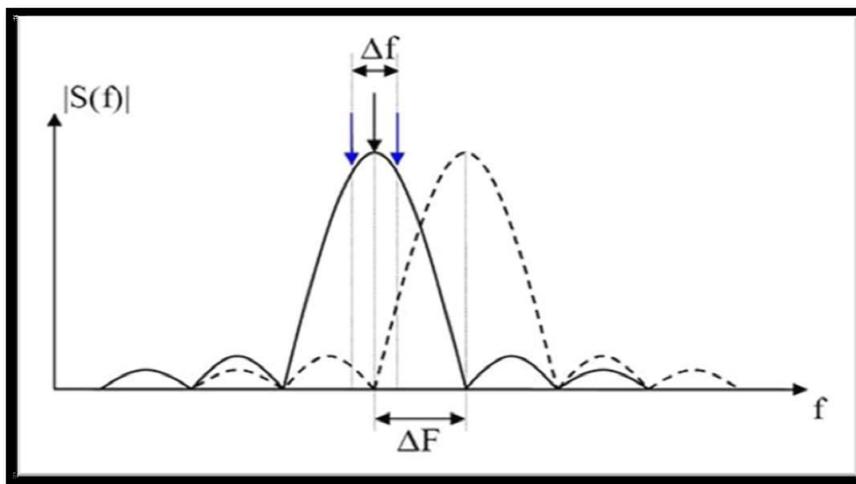


Figure II.8 : Exemple de porteuses orthogonales dans le domaine fréquentiel.

### II.2.3.2.3 La Chaîne de transmission OFDM

La chaîne de transmission OFDM, comme illustrée sur la figure II.9 se compose de trois parties : la partie émission, le canal de transmission et enfin la partie réception.

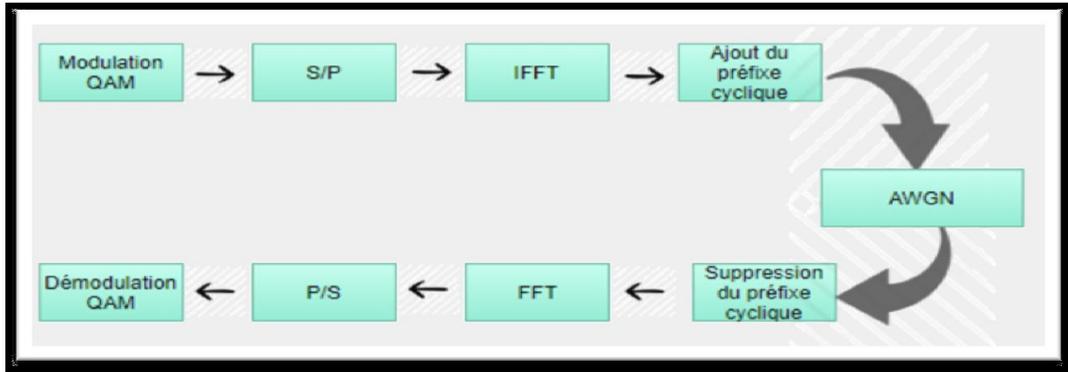


Figure II.9 : Diagramme en bloc de la chaîne de transmission OFDM.

Dans un émetteur OFDM, une séquence de bits de données binaires, qu'on désire transmettre est d'abord générée et mappée en symboles de données complexes, à l'aide de la technique de modulation d'amplitude en quadrature QAM.

Par la suite, les symboles séries  $C_k$  sont convertis en symboles parallèles. Ces derniers sont utilisés comme entrée du bloc IFFT qui amène le signal dans le domaine temporel. Le bloc IFFT a pour rôle de moduler les symboles sur  $N_{sub}$  sous porteuses orthogonales. Pour avoir à la fin, la somme des  $N_{sub}$  symboles modulés qui va aussi former le symbole OFDM [18]. Qui s'écrit sous forme complexe :

$$S_n = \sum_{k=0}^{N_{sub}-1} C_k e^{j\frac{2\pi nk}{N_{sub}}} \quad (II.4)$$

Avec :

$S_n$  : représente un vecteur complexe d'un symbole OFDM.

$C_k$  : représente les symboles de données complexes.

$N_{sub}$  : représente le nombre de sous porteuse

$K$  : représente un indice de sous porteuses égal à  $k = 0, \dots, N_{sub} - 1$

Pour mieux lutter contre les interférences entre porteuses, un préfixe cyclique CP est ajouté à chaque symbole OFDM. Il s'agit, tout simplement, d'insérer une copie de la dernière partie du symbole OFDM avant le symbole considéré. La période du symbole est plus longue grâce à cette extension. Par ailleurs, il faut préciser, que malgré le fait que la période soit plus longue, cela n'a aucun incident sur le spectre fréquentiel du signal. De ce fait l'orthogonalité est maintenue et des interférences éliminées.

$$T_s = T_u + T_{cp} \quad (II.5)$$

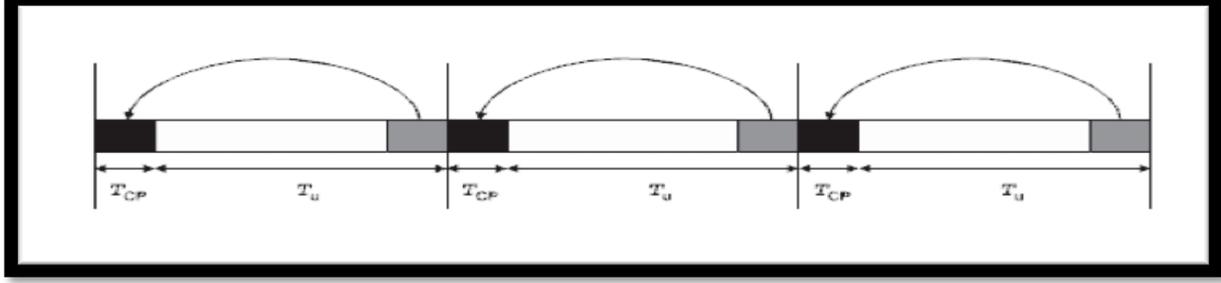


Figure II.10 : Insertion du préfixe cyclique.

Le signal à l'entrée du récepteur s'écrit de la façon suivante :

$$Y_n = \sum_{k=0}^{N_{Sub}-1} C_k H_k e^{j \frac{2\pi n k}{N_{Sub}}} \quad (II.6)$$

Avec :

$H_k$ : Représente la fonction de transfert du canal.

Dans un récepteur OFDM, l'inverse du processus émetteur est appliqué. Après avoir retiré le CP de chaque symbole OFDM, on constate que chaque symbole reçu  $R_k = C_k H_k$ , est converti en symbole du domaine fréquentiel par application de la FFT à  $N_{Sub}$  point qui peut être représenté par :

$$C_k = \sum_{n=1}^{N_{Sub}} R_k e^{-j \frac{2\pi n k}{N_{Sub}}} \quad (II.7)$$

Par la suite, une estimation et une égalisation de canal dans le domaine fréquentiel sont effectuées et les symboles résultants sont démodulés pour récupérer les données.

#### II.2.3.2.4 La technique d'accès multiple OFDMA

L'OFDMA est une technique d'accès dans la liaison descendante (Downlink). Elle combine deux techniques : TDMA et FDMA. Elle est dérivée de la modulation OFDM. Elle permet, par contre, un accès multiple en partageant les ressources radio entre plusieurs utilisateurs.

Son principe consiste à diviser la bande totale en plusieurs sous bandes orthogonales de tailles étroites. Ce processus permet de lutter contre le problème des canaux sélectifs en fréquences et aussi, contre les interférences inter symboles.

Elle autorise également, un débit binaire plus élevé, pour une même largeur spectrale et cela grâce à sa grande efficacité spectrale (nombre de bits transmis par Hertz). Tout

cela s'ajoute à sa capacité de conserver un débit élevé même dans des environnements défavorables avec des échos et des trajets multiples des ondes radio [19].

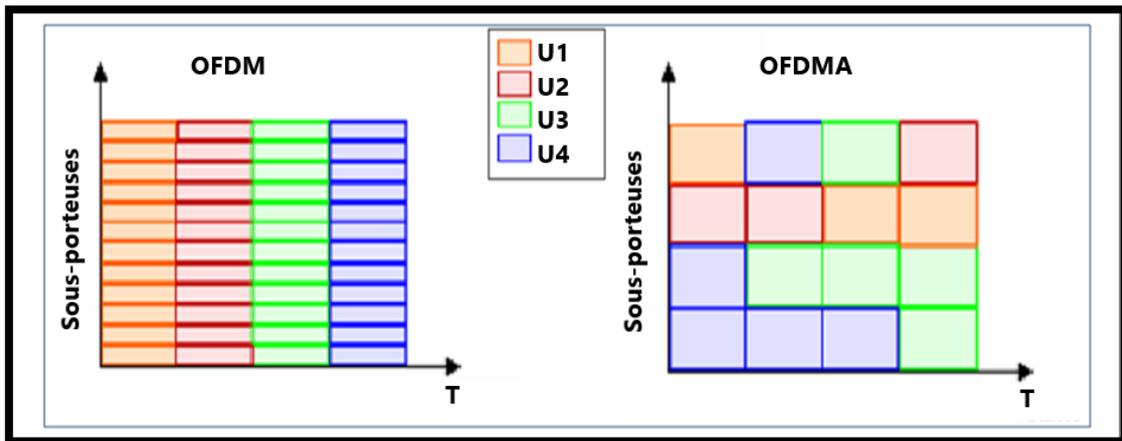


Figure II.11 : Allocation de ressources OFDM/OFDMA.

#### II.2.3.2.5 Les avantages de l'OFDM

Après avoir décrit et analysé la technique d'accès multiple OFDMA, nous énumérons ses avantages qui sont :

- ✓ La robustesse des signaux OFDM contre les canaux sélectifs : En divisant un canal sélectif, d'une large bande en fréquence, en multiples sous -canaux à bande étroite non sélectifs avec une notion d'orthogonalité entre les canaux très simples à égaliser.
- ✓ La simplicité d'utilisation : l'OFDM exploite les transformées et transformées inverses de Fourier rapide (IFFT et FFT) pour répartir l'information entre un grand nombre de sous porteuses orthogonales qui soient aussi proche que possible les uns des autres.
- ✓ Une exploitation optimale de la bande passante disponible et une haute efficacité spectrale.

#### II.2.3.2.6 Les inconvénients de l'OFDM

La modulation OFDM n'a pas que des avantages. Elle a aussi un certain nombre d'inconvénients qui limitent le développement d'un réseau 5G, dont voici quelques-uns :

- ✓ Le rapport de la puissance maximale et la puissance moyenne du signal OFDM provoque un problème pour l'évaluation du PAPR. Le rapport en question conduit à une saturation de l'amplificateur à l'émission.
- ✓ Sensibilité aux erreurs de synchronisation qui conduit à un taux d'erreurs élevé, et engendre ainsi de l'interférence entre sous porteuses qui peut détruire l'orthogonalité.
- ✓ L'intervalle de garde provoque une perte d'efficacité spectrale.

## II.2.4 Techniques d'accès multiples non-orthogonales NOMA

### II.2.4.1 Introduction

L'accès multiple non orthogonal (NOMA) a récemment été considéré comme une technique clé pour la 5G et au-delà dans les futurs réseaux sans fil. Dans cette partie du chapitre, nous introduisons le concept du NOMA en présentant le principe du système NOMA sur liaison descendante et liaison montante. Nous discutons les opérations clés SC et SIC. De plus, nous présentons une comparaison entre NOMA et OMA. Enfin, nous présentons les avantages et les inconvénients de NOMA.

### II.2.4.2 NOMA liaison descendante

#### II.2.4.2.1 Transmission par superposition

La transmission par superposition est une technique qui permet à un seul émetteur d'envoyer simultanément une combinaison de signaux indépendants à plusieurs utilisateurs. Le signal transmis après application des techniques de superposition pour utilisateurs serait aussi

$$\mathbf{X} = \sum_{i=1}^n \sqrt{p_i} \mathbf{x}_i \quad (\text{II.8})$$

Avec :

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1 \quad (\text{II.9})$$

Où  $x_i$  est le signal correspondant au message de l'utilisateur  $i$ , et  $p_i$  est la puissance allouée à l'utilisateur  $i$ . La différence entre les valeurs de  $p_i$  pour chaque utilisateur doit être suffisamment importante pour garantir un décodage réussi du signal superposé. La figure II.12 illustre un exemple de transmission NOMA pour deux

utilisateurs,  $U_1$  et  $U_2$ . Les messages  $M_1$  et  $M_2$  sont sélectionnés respectivement aux signaux  $x_1$  et  $x_2$ . Ces signaux sont ensuite mis à l'échelle en fonction des valeurs de  $p_1$  et  $p_2$ . Et additionnés pour générer le signal superposé  $X$ , qui est envoyé aux deux utilisateurs avec  $p_1 + p_2 = 1$ . Pendant la transmission, chaque signal est affecté par les conditions de canal de son récepteur [20].

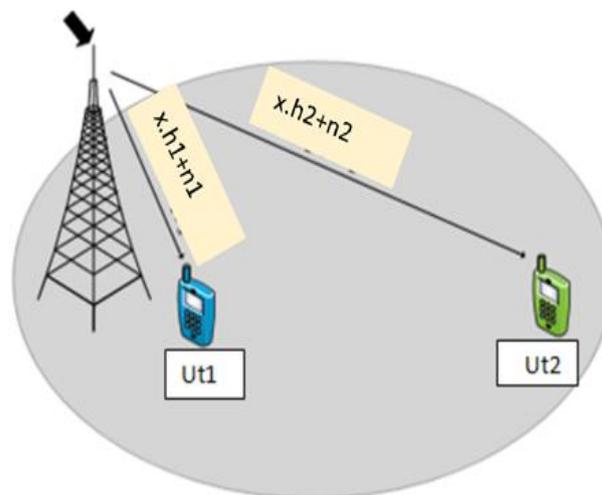
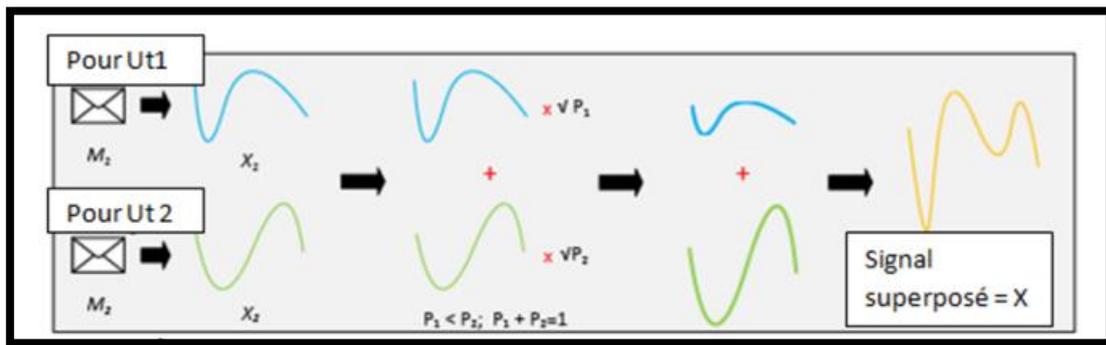


Figure II.12 : Transmission de signaux dans NOMA pour deux utilisateurs [20]

#### II.2.4.2 Successive interférence cancellations (SIC)

Le processus SIC est appliqué au récepteur NOMA afin que chaque utilisateur puisse extraire ses données respectives du signal de superposition reçu comme illustré à la figure II.2

Le signal reçu par l'utilisateur devrait être comme :

$$Y_i = h_i X + n_i \quad (II.10)$$

Où

$h_i$  : Représente les coefficients de canal complexes entre  $U_i$  et BS

$n_i$  : Représente le bruit gaussien plus l'interférence intercellulaire subie par  $U_i$

Le mécanisme de SIC est que l'utilisateur avec les conditions de canal faibles traite le signal de l'utilisateur avec le meilleur canal comme du bruit et décode ses propres données à partir du signal reçu. D'autre part, l'utilisateur avec le meilleur canal exécute SIC, où il décode les données de l'utilisateur le plus faible, puis procède à la soustraction du signal reçu et décode ses propres données [21].

Dans le récepteur  $U_2$ , le décodage se déroulera comme suit :

Le message  $M_2$  est décodé à partir de  $Y_2$ , traitant  $x_1$  comme du bruit. L'interférence causée par  $U_1$  sur  $U_2$  ne devrait pas affecter de manière significative les performances de  $U_2$ , car la puissance d'une telle interférence est susceptible d'être beaucoup plus petite que le signal souhaité. Ceci est valable tant qu'une allocation de puissance effective a été effectuée dans l'émetteur.

Pour  $U_1$ , le processus de décodage est plus complexe et c'est ici que SIC est appliqué :

Le message  $M_2$  est décodé à partir de  $Y_1$ , traitant  $x_1$  comme du bruit. Cette étape est possible du fait que le gain de canal de  $U_1$  est supérieur à celui de  $U_2$ , de sorte que tant que le taux de  $U_2$  est dans les limites de Shannon de son récepteur, il sera également dans les limites du récepteur  $U_1$ .

$x_1$  est régénéré à l'aide d'un encodeur, et avec la connaissance de  $n_1$  et  $p_2$

$$Y'_1 = Y_1 - h_1\sqrt{p_2}x_2 = h_1\sqrt{p_1}x_1 + n_i \quad (11.11)$$

Le message M2 est décodé à partir de  $Y1'$ . La figure II.13 montre un exemple de réception de NOMA pour deux utilisateurs. A partir de la figure II.13, une fois le signal reçu, l'utilisateur éloigné, U2, décode simplement le signal fort, tandis que l'utilisateur proche, U1, applique SIC pour décoder son signal.

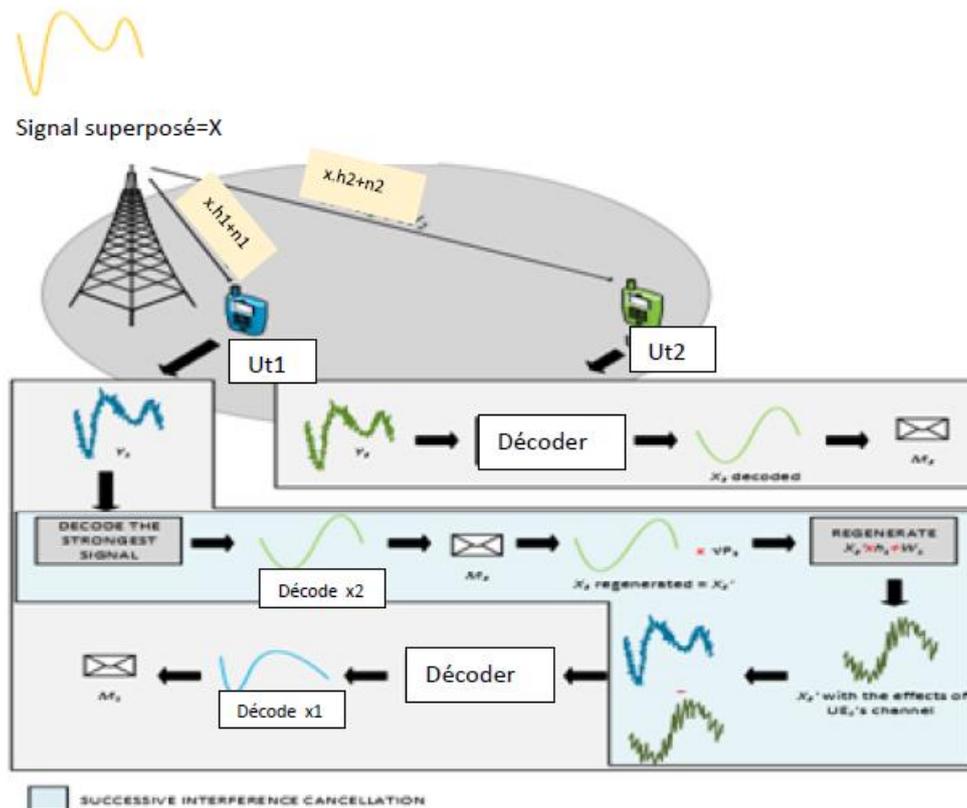


Figure II.13 : Réception des signaux dans NOMA pour deux utilisateurs [20].

### II.2.4.2.3 Capacité de la voie descendante

Théoriquement, on sait que NOMA offre une région de plus grande capacité qu'OMA comme le montre la figure II.14 ; NOMA est donc très efficace pour augmenter la capacité du système lorsque la différence de gain de canal des utilisateurs multiplexés est grande. Cette différence se traduit par un gain de multiplexage. En supposant un décodage réussi et aucune propagation d'erreur, les débits de données

avec NOMA pour U1 et U2, peuvent être représentés par les équations (II.12) et (II.13), respectivement.

$$R_1 = B \log_2 \left( 1 + \frac{p_1 |h_1|^2}{\sigma_1^2} \right) \quad (\text{II.12})$$

$$R_2 = B \log_2 \left( 1 + \frac{p_2 |h_2|^2}{p_1 |h_2|^2 + \sigma_2^2} \right) \quad (\text{II.13})$$

B représente la bande passante disponible, à laquelle les deux utilisateurs ont accès en même temps ;  $\sigma_i, i = 1,2$  est la densité spectrale de puissance de  $n_i$ . Comme les valeurs de  $R_1$  et  $R_2$  dépendent de rapport d'allocation de puissance  $p_1/p_2$ , le gain de débit global de NOMA est étroitement lié au schéma d'allocation de puissance sélectionné. Pour la comparaison, les taux de transmission OMA pour U1 et U2 sont données par les équations suivantes :

$$R_1 = \alpha \log_2 \left( 1 + \frac{p_1 |h_1|^2}{\alpha \sigma_1^2} \right) \quad (\text{II.14})$$

$$R_2 = (1 - \alpha) \log_2 \left( 1 + \frac{p_2 |h_2|^2}{(1 - \alpha) \sigma_2^2} \right) \quad (\text{II.15})$$

$\alpha$  Représente la bande passante attribuée à U1, la bande passante restante étant assigné à U2. La raison du gain de performance de NOMA est que l'effet du facteur multiplicatif (par exemple,  $\alpha$ ) en dehors du logarithme dans les expressions de taux OMA - qui reflète la répartition des ressources de bande passante entre les utilisateurs - est plus dommageable que les changements des facteurs à l'intérieur du logarithme dans les expressions de taux NOMA qui sont dus à l'allocation de puissance et à la bande passante supplémentaire.

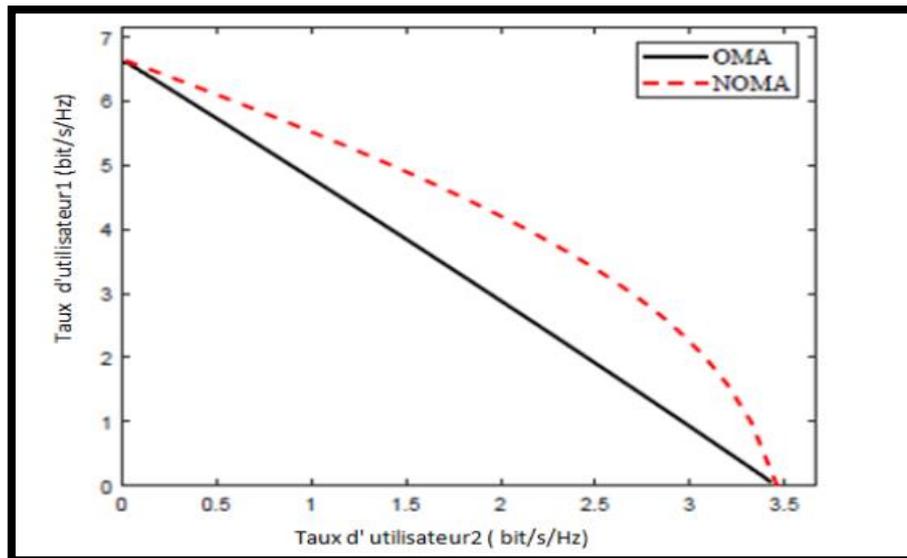


Figure II.14 : Comparaison entre OMA et NOMA dans la voie descendante [22]

La région de débit réalisable de la liaison descendante NOMA est illustrée sur la figure II.14 en comparaison avec celle de l'OMA. En conséquence, NOMA offre une plus grande flexibilité dans l'allocation des ressources pour améliorer l'efficacité spectrale du système [22].

## II.2.4.2 NOMA liaison montante

### II.2.4.2.1 Modèle de la liaison montante

Dans le réseau de liaison montante NOMA, comme le montre la figure II.15, chaque signal de son de transmission mobile à la BS. Au BS, des itérations SIC sont effectuées pour détecter les signaux des utilisateurs mobiles. Les deux utilisateurs transmettent leurs messages dans la même bande de fréquences avec la même puissance d'émission  $p$ . Le signal reçu à la BS est donné par :

$$y = \sum_{i=1}^2 \sqrt{p_i} h_i x_i + n_i \quad (II.16)$$

Où  $p_i$  est la puissance d'émission pour l'utilisateur  $i$ , et  $n_i$  représente bruit blanc Additive Gaussien (additive white gaussian noise : AWGN) [23].

Dans NOMA de liaison montante, le décodage SIC est effectué au niveau de la BS pour récupérer les messages M1 et M2 à partir du signal superposé Y. En particulier, la BS décode d'abord le message de l'utilisateur 1 puis soustrait M1 du signal superposé Y. Ensuite, la BS peut décoder le message de l'utilisateur 2, M2.

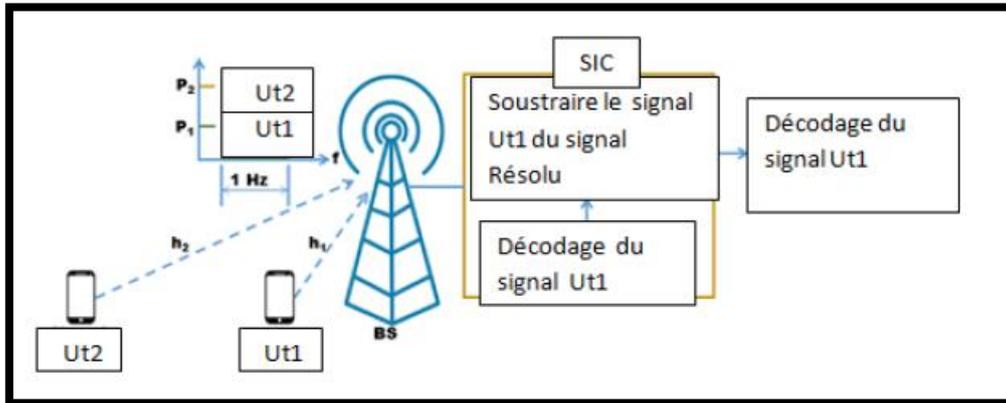


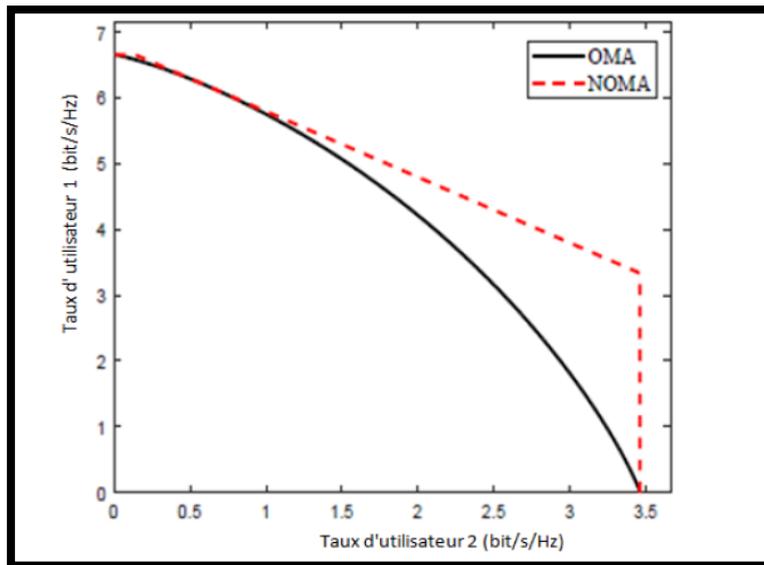
Figure II.15 : Liaison montante du domaine de puissance NOMA [22].

#### II.2.4.2.2 Capacité de la voie montante

La capacité de liaison montante peut être calculée de la même manière que pour la liaison descendante, bien que la formule soit un peu différente. En définissant P1 et P2 comme la puissance reçue au niveau de la BS pour UT1 et UT2, respectivement, le débit de chaque utilisateur en cas d'accès en liaison montante non orthogonale peut être écrit comme suit [21] :

$$R1 = \log_2\left(1 + \frac{P1|h1|^2}{P2|h2|^2\sigma_1^2}\right) \quad (II.17)$$

$$R2 = \log_2\left(1 + \frac{P2|h2|^2}{\sigma_2^2}\right) \quad (II.18)$$



**Figure II.16 :** La région de débit réalisable multi-utilisateurs pour la liaison montante NOMA avec un BS et deux utilisateurs. L'utilisateur 1 est l'utilisateur fort avec  $|h_1| \sqrt{2\sigma^2} = 100$ , tandis que l'utilisateur 2 est l'utilisateur faible avec  $|h_2| \sqrt{2\sigma^2} = 10$  [23].

On peut également montrer que la liaison montante NOMA est supérieure en termes de rapport de données réalisable et de capacité de somme en comparant avec l'homologue OMA dans la figure II.16.

Contrairement à la liaison descendante NOMA, la liaison montante NOMA peut accueillir un nombre relativement important d'utilisateurs, car le BS peut généralement être équipé de la puissance de calcul et de l'énergie nécessaires. De plus, le BS peut appliquer des schémas de décodage plus intensifs en calcul pour réduire l'impact des interférences. Par conséquent, la liaison montante NOMA est préférable à la liaison descendante NOMA pour les communications massives de type machine [24].

### II.2.4.3 Avantages et Inconvénients NOMA

#### II.2.4.3.1 Avantages NOMA

- ✓ **Efficacité de bande passante supérieure :** En exploitant le multiplexage de puissance, la NOMA offre une efficacité spectrale élevée par rapport à ses technologies OMA homologues. Contrairement aux technologies

OMA, NOMA a la capacité d'accueillir plus d'utilisateurs sur la même ressource fréquence / temps pour faire face à la surcharge du réseau [25].

- ✓ **Équité utilisateur améliorée** : dans le multiplexage du domaine de puissance, NOMA attribue une puissance de transmission élevée aux utilisateurs avec des qualités de canal plus faibles, ce qui garantit l'équité de ces utilisateurs par rapport aux autres utilisateurs avec de meilleures qualités de canal. Cette caractéristique de NOMA peut être obtenue en allouant efficacement l'énergie à différents utilisateurs du réseau [26].
- ✓ **Connectivité massive** : les futurs réseaux IoT 5G et B5G devraient connecter des milliards de nœuds IoT, ce qui ne peut être réalisé avec les technologies OMA existantes. NOMA peut accueillir un nombre important d'utilisateurs que l'OMA en utilisant efficacement les ressources de fréquence / temps existantes [27].
- ✓ **Capacité élevée du système** : Il s'agit d'une autre caractéristique importante de la technologie NOMA. Il a été prouvé mathématiquement que les performances de capacité NOMA sont toujours meilleures que n'importe quel système OMA lorsqu'un schéma de gestion efficace des ressources est appliqué aux deux systèmes [28].
- ✓ **Faible latence de transmission et coût de signalisation** : un utilisateur exploitant la technologie OMA a besoin d'une planification, avec BS pour une subvention qui entraîne un retard de transmission et un coût de signalisation élevés. La technologie NOMA, cependant, ne nécessite pas cette planification, ce qui peut réduire considérablement la signalisation supplémentaire et le retard de communication [29].
- ✓ **Prise en charge de diverses exigences de qualité de service** : la technologie NOMA utilisant le multiplexage de puissance a la capacité de prendre en charge plusieurs utilisateurs sur la même ressource de fréquence / temps ayant les diverses demandes de qualité de service

(QoS) [27]. Il s'agit donc de la technologie candidate clé pour les futurs réseaux IoT pour connecter un grand nombre de périphériques avec des exigences de QoS différentes.

- ✓ **Robuste dans les scénarios de mobilité élevée** : dans les scénarios de mobilité élevée, l'accès multiple par répartition orthogonale de la fréquence (OFDMA), qui est l'une des technologies clés OMA, fournit un gain très faible en raison d'informations obsolètes sur l'état des canaux (SCI). La technologie NOMA dépend principalement du CSI côté récepteur et peut donc fournir des gains significatifs dans les scénarios de mobilité élevée [30].
- ✓ **Rentable** : la technologie NOMA ne nécessite pas d'antennes d'émission supplémentaires, ce qui est assez important du point de vue du coût et des limites d'espace des déploiements de petites cellules et de macro cellules dans les réseaux pratiques actuels [31].

#### II.2.4.3.2 Inconvénients NOMA

- ✓ **Frais généraux de retour d'informations sur l'état du canal (CSI)** : Pour organiser un ordre approprié de décodage SIC, la technologie NOMA utilisant le multiplexage de puissance nécessite perfectissime, ce qui peut entraîner une surcharge supplémentaire sur le retour CSI [32].
- ✓ **Complexité de calcul** : En raison du processus SIC Au niveau des récepteurs, la technologie NOMA introduit une complexité de calcul et un délai de traitement élevés par rapport aux technologies OMA conventionnelles. Cette complexité dépend généralement de la densité de l'utilisateur sur la même ressource de bande passante et peut être plus augmentée si le nombre élevé de périphériques partageant la même ressource de bande passante en même temps [33].

- ✓ **Processus SIC réussi** : Le déploiement réussi de la technologie NOMA dépend du processus de décodage efficace de SIC au niveau des récepteurs. Pour que ce processus réussisse, un écart de puissance minimum reçu entre différents utilisateurs sur la même ressource de bande passante est obligatoire [34]. Cependant, la plupart des études théoriques sur la technologie NOMA ne garantissent pas cet écart.
- ✓ **Surcharge de signalisation** : comparé aux technologies OMA conventionnelles, dans la technologie NOMA, un utilisateur fort doit connaître l'allocation de puissance d'un utilisateur faible pour effectuer un SIC, ce qui augmente la surcharge de signalisation [21].
- ✓ **Interférence entre les cellules** : comme indiqué précédemment, NOMA attribue une puissance de transmission élevée à l'utilisateur faible, qui est généralement situé au bord de la cellule de la cellule. Cela peut introduire plus d'interférences intercellulaires dans l'ensemble du réseau [29].

# *Chapitre I.I.I*

---

## ***Simulation et résultats***

### III.1 Introduction

Depuis que le concept de transmission à accès multiple non orthogonal (NOMA) a été proposé, il existe au moins trois catégories d'accès multiple non orthogonal : l'accès multiple en puissance, l'accès multiple en code et l'accès multiple hybride. Et le NOMA à domaine hybride. Dans cet article, nous nous concentrons sur l'accès multiple non orthogonal dans le domaine de la puissance pour les liaisons descendantes.

### III.2 Simulation du BER de l'accès multiple non orthogonal (NOMA) dans le canal AWGN

NOMA utilise le codage de superposition à l'extrémité de l'émetteur et l'annulation des interférences successives à l'extrémité du récepteur.

Nous allons simuler un système NOMA simple à deux utilisateurs à l'aide de MATLAB. Nous allons tracer les performances BER de NOMA dans un canal de bruit gaussien blanc additif (AWGN).

Voici les hypothèses que nous allons faire :

1. Faisons la transmission de liaison descendante de la station de base (BS) à deux utilisateurs (Figure III.1). Nous avons une station de base (BS) au centre. Il transmet simultanément à deux utilisateurs, l'utilisateur 1 et l'utilisateur 2, en utilisant la même porteuse de fréquence en appliquant NOMA.
2. Nous n'utilisons aucun modèle de perte de chemin et nous supposons que les deux utilisateurs sont situés à des distances égales du BS.
3. Nous supposons un canal AWGN
4. Nous allons utiliser la modulation BPSK pour les deux utilisateurs

5. Puisque nous utilisons la modulation BPSK, nous allons considérer uniquement le composant en phase / réel de l'AWGN complexe.

La figure III.2 représente la simulation du BER, nous observons que l'utilisateur 2 a un BER légèrement plus élevé que l'utilisateur 1, en particulier dans le régime de faible SNR.

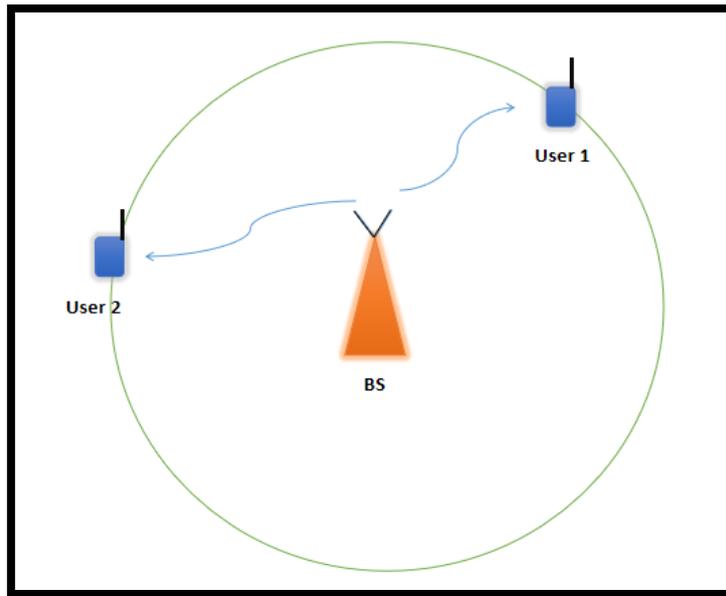


Figure III.1 : Modèle du système.

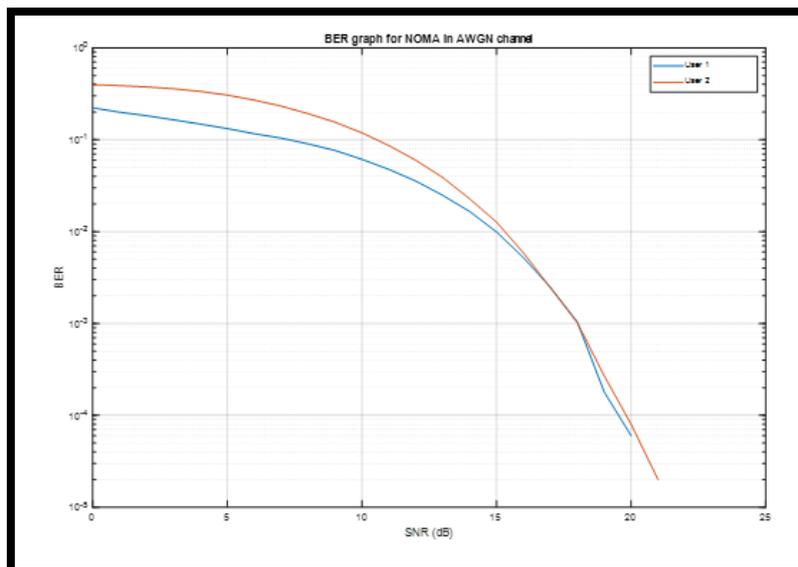


Figure III.2 : simulation du BER en fonction du rapport signal sur bruit SNR.

### III.3 Simulation du BER de l'accès multiple non orthogonal (NOMA) dans le canal de décoloration de Rayleigh

Nous avons vu comment simuler un simple réseau NOMA à deux utilisateurs sur un canal AWGN. Nous avons également tracé les graphiques BER vs SNR des utilisateurs et observé la tendance en cascade. Nous allons simuler la capacité, la panne et les performances BER d'un réseau NOMA à deux utilisateurs en suivant un modèle plus réaliste, à savoir le modèle de décoloration de Rayleigh.

#### III.3.1 Modèle de décoloration de Rayleigh

Le canal sans fil est sujet à la propagation et à la décoloration multi-chemins. Plusieurs modèles de canaux sont disponibles pour capturer les effets de la décoloration. Chaque modèle traite d'un scénario particulier. L'un de ces modèles est le modèle de décoloration de Rayleigh. Le modèle de décoloration de Rayleigh peut être utilisé lorsqu'il n'y a pas de chemin de ligne de visée (LOS) entre l'émetteur et le récepteur. En d'autres termes, tous les composants multi-chemins ont subi des effets de décoloration à petite échelle tels que la réflexion, la diffusion, la diffraction, l'ombrage, etc. Nous allons considérer un cas extrême de décoloration de Rayleigh où chaque bit transmis subit une atténuation et un déphasage différents en raison de la transmission multi-chemin. En d'autres termes, le canal change pour chaque bit. Nous allons simuler le taux d'erreur binaire (BER), la capacité et la panne de NOMA.

#### III.3.2 Modèle de système

Nous envisageons la transmission en liaison descendante de la station de base (BS) aux deux utilisateurs. La figure 3 représente le modèle de système à étudier. L'utilisateur 1 est l'utilisateur lointain/faible car il est loin du BS transmettant. L'utilisateur 2 est l'utilisateur proche/fort.

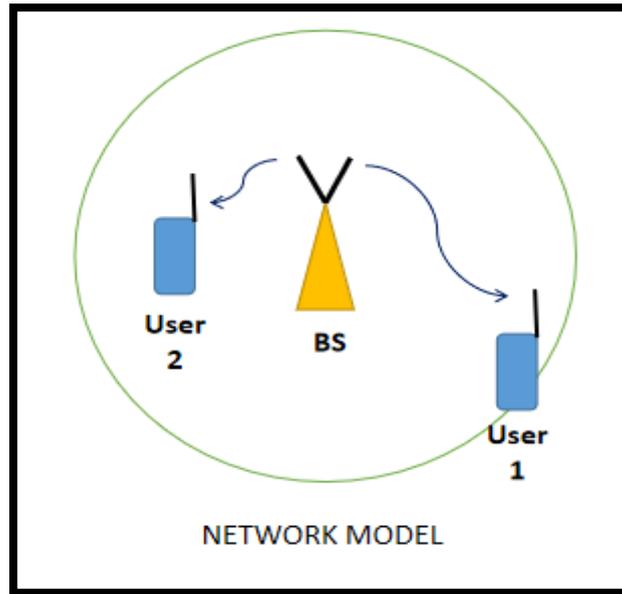


Figure III.3 : Modèle de système

### III.3.3 Modèle de signal

Le BS a deux messages distincts  $x_1$  à l'utilisateur 1 (utilisateur éloigné), et  $x_2$  à l'utilisateur 2 (près de l'utilisateur). Les paramètres  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$  sont les facteurs d'allocation de puissance pour l'utilisateur éloigné et l'utilisateur proche respectivement ( $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ ). Dans NOMA, pour promouvoir l'équité de l'utilisateur, plus de pouvoir est donné à l'utilisateur éloigné et moins de pouvoir à l'utilisateur proche. C'est  $\alpha_1 > \alpha_2$ . Nous utiliserons d'une façon arbitraire  $\alpha_1=0,75$  et  $\alpha_2=0,25$ . Aussi,  $h_1$  et  $h_2$  désignent le canal du BS vers l'utilisateur proche et l'utilisateur éloigné respectivement.

Les performances de NOMA varient selon les différents choix de  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$ . Ces derniers peuvent être optimiser afin d'améliorer les performances de NOMA.

### III.3.4 Codage et transmission NOMA

Comme nous le savons déjà, le signal NOMA codé par **superposition** transmis par le BS est,

$$x = \sqrt{p}(\sqrt{\alpha_1}x_1 + \sqrt{\alpha_2}x_2) \quad (III.1)$$

Où  $p$  est la puissance d'émission. La copie de  $x$  reçu à proximité de l'utilisateur après propagation à travers le canal  $h_1$  est

$$y_1 = h_1x + w_1 \quad (III.2)$$

De même, la copie de  $x$  reçu à l'utilisateur éloigné après propagation à travers le canal  $h_2$  est

$$y_2 = h_2x + w_2 \quad (III.3)$$

### III.3.5 Décodage NOMA à l'utilisateur 1 (utilisateur éloigné)

Étendre le signal reçu à l'utilisateur 1,

$$\begin{aligned} y_1 &= h_1x + w_1 \\ &= h_1\sqrt{P}(\sqrt{\alpha_1}x_1 + \sqrt{\alpha_2}x_2) + w_1 \\ &= \underbrace{h_1\sqrt{P}\sqrt{\alpha_1}x_1}_{\text{désiré et dominant}} + \underbrace{h_1\sqrt{P}\sqrt{\alpha_2}x_2}_{\text{Interférence et faible puissance}} + \underbrace{w_1}_{\text{le bruit}} \end{aligned} \quad (III.4)$$

Depuis  $\alpha_1 > \alpha_2$ , décodage direct de  $y_1$  donnerait  $x_1$ . Le terme contenant le  $x_2$  sera traité comme une interférence. Le rapport signal sur bruit d'interférence pour l'utilisateur éloigné est,

$$\gamma_1 = \frac{|h_1|^2 P \alpha_1}{|h_1|^2 P \alpha_2 + \sigma^2} \quad (III.5)$$

et son débit de données réalisable est,

$$R_1 = \log_2(1 + \gamma_1) = \log_2\left(1 + \frac{|h_1|^2 P \alpha_1}{|h_1|^2 P \alpha_2 + \sigma^2}\right) \quad (III.6)$$

### III.3.6 Décodage NOMA à l'utilisateur 2 (près de l'utilisateur)

Extension du signal reçu à l'utilisateur 2,

$$\begin{aligned}
 y_2 &= h_2 x + w_2 \\
 &= h_2 \sqrt{P} (\sqrt{\alpha_1} x_1 + \sqrt{\alpha_2} x_2) + w_2 \quad (III.7) \\
 &= \underbrace{h_2 \sqrt{P} \sqrt{\alpha_1} x_1}_{\text{désiré et dominant}} + \underbrace{h_2 \sqrt{P} \sqrt{\alpha_2} x_2}_{\text{Interférence et faible puissance}} + \underbrace{w_2}_{\text{le bruit}}
 \end{aligned}$$

L'utilisateur 2 doit d'abord effectuer une annulation d'interférence successive (SIC) avant de décoder son propre signal. La SIC est effectuée comme suit :

1.  $y_2$  est directement décodé pour obtenir  $x_1$  ou plutôt, une estimation de  $x_1$  c'est  $\tilde{x}_1$ .
2.  $y'_2 = y_2 - \sqrt{\alpha_1} \tilde{x}_1$  est calculé.
3.  $y'_2$  est décodé pour obtenir une estimation de  $x_2$ .

Nous faisons ici une hypothèse SIC parfaite. Que se passe-t-il si le SIC est imparfait. Le rapport signal sur bruit d'interférence chez l'utilisateur 2 pour le décodage du signal utilisateur 1 (avant SIC) est,

$$\gamma_{1,2} = \frac{|h_2|^2 P \alpha_1}{|h_2|^2 P \alpha_2 + \sigma^2} \quad (III.8)$$

Le débit de données réalisable correspondant est,

$$R_{1,2} = \log_2(1 + \gamma_{1,2}) = \log_2\left(1 + \frac{|h_2|^2 P \alpha_1}{|h_2|^2 P \alpha_2 + \sigma^2}\right) \quad (III.9)$$

Après annulation du signal de l'utilisateur 1 à l'aide de SIC, le rapport signal sur bruit à l'utilisateur 2 pour le décodage de son propre signal est,

$$\gamma_2 = \frac{|h_2|^2 P \alpha_2}{\sigma^2} \quad (III.10)$$

Le débit de données réalisable correspondant est,

$$R_2 = \log_2(1 + \gamma_2) = \log_2\left(1 + \frac{|h_2|^2 P \alpha_2}{\sigma^2}\right) \quad (III.11)$$

La figure III. 4 trace la variation de la capacité en fonction de la puissance d'émission.

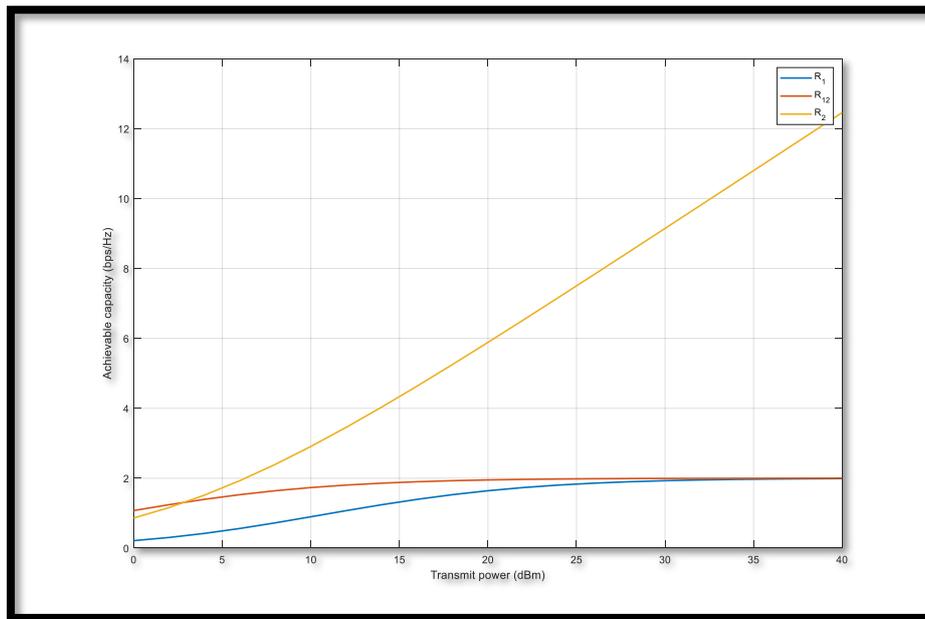


Figure III.4 : Variation de la capacité en fonction de la puissance d'émission.

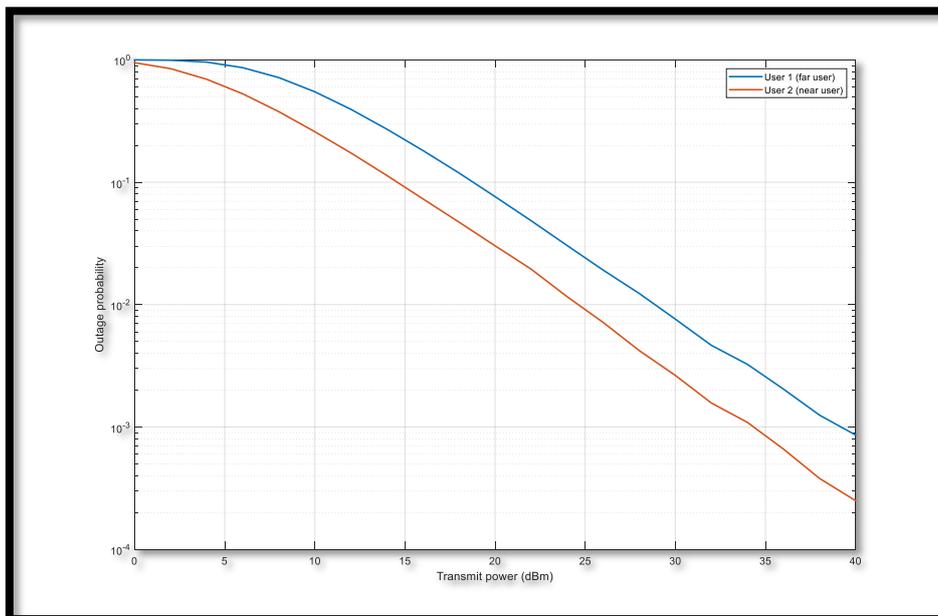


Figure III.5 : Variation de la probabilité de panne en fonction de la puissance d'émission.

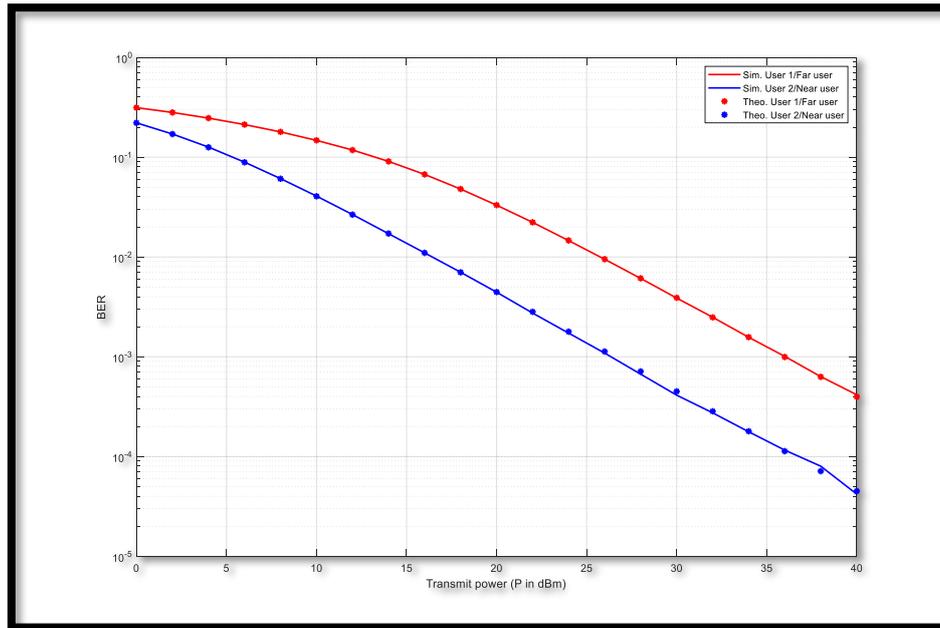


Figure III.6 : Variation du BER en fonction de la puissance d'émission.

Ici, nous n'avons considéré que deux utilisateurs NOMA. Nous pouvons également multiplexer plus de deux utilisateurs dans la même porteuse de fréquences pour accueillir plus d'utilisateurs dans notre réseau.

### III.4 Etude d'un système MIMO-NOMA

NOMA est une technologie polyvalente car elle peut être combinée avec de nombreuses autres techniques telles que la communication coopérative, SWIPT, MIMO, etc. Nous avons déjà discuté de l'intersection de NOMA avec les réseaux coopératifs et SWIPT. Dans cet article, voyons comment fonctionne NOMA dans un réseau MIMO simple

#### III.4.1 Modèle de système

Considérons un système MIMO de liaison descendante 2 x 1 comme illustré à la Figure III.7. Laissez  $d_1$  et  $d_2$  désignent les distances de U1 et U2 respectivement par rapport à l'émetteur MIMO. Ici, nous supposons  $d_1 > d_2$ . C'est-à-dire que U1 est l'utilisateur faible et U2 est l'utilisateur fort.

Nous savons que MIMO peut être utilisé pour le multiplexage spatial (augmentation du taux réalisable) ou le gain de diversité (diminution du BER). Ici, nous utilisons MIMO pour obtenir un gain de diversité. Par conséquent, les antennes d'émission 1 et 2 transmettent les mêmes informations.

Laissez  $x_1$  et  $x_2$  désignent les informations destinées à U1 et U2. En suivant les conventions de notation de MIMO, laissez  $h^{rt}$  désigne le canal de décoloration de Rayleigh entre le  $t^{\text{th}}$  antenne d'émission et  $r^{\text{th}}$  récepteur.

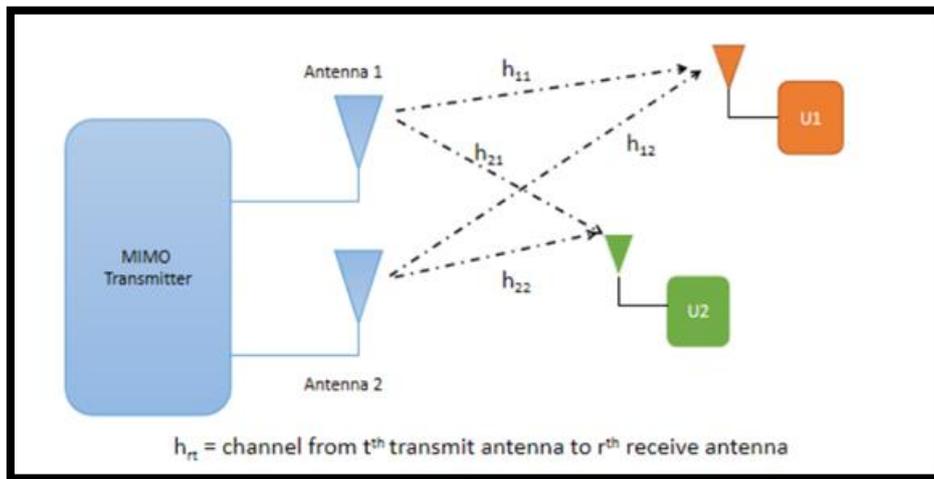


Figure III.7 : Modèle de système MIMO-NOMA

### III.4.2 Modèle de signal

#### III.4.2.1 Signal émis

Le signal transmis par les deux antennes d'émission est donné par,

$$x = \sqrt{P} (\sqrt{\alpha_1} x_1 + \sqrt{\alpha_2} x_2) \quad (\text{III.12})$$

Où  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$  sont les coefficients d'allocation de puissance NOMA. Puisque U1 est l'utilisateur faible, nous avons  $\alpha_1 > \alpha_2$ .

### III.4.2.2 Signal reçu

$x$  est transmis simultanément par les deux antennes d'émission. Par conséquent, le signal reçu à U1 est,

$$y_1 = xh_{11} + xh_{12} + n_1 = x(h_{11} + h_{12}) + n_1 \quad (\text{III.13})$$

De même, le signal reçu par U2 est donné par,

$$y_2 = xh_{21} + xh_{22} + n_2 = x(h_{21} + h_{22}) + n_2 \quad (\text{III.14})$$

Expansion

$$y_1 = \underbrace{\sqrt{P} \sqrt{\alpha_1 x_1} (h_{11} + h_{12})}_{\text{Souhaité}} + \underbrace{\sqrt{P} \sqrt{\alpha_2 x_2} (h_{11} + h_{12})}_{\text{Interférence}} + n_1 \quad (\text{III.15})$$

Maintenant, nous pouvons écrire l'équation SINR pour U1 en décodage  $x_1$  comme suit

$$\gamma_1 = \frac{P\alpha_1 |h_{11} + h_{12}|^2}{P\alpha_2 |h_{11} + h_{12}|^2 + \sigma^2} \quad (\text{III.16})$$

Par conséquent, le taux réalisable à U1 est donné par,

$$R_2 = \log_2(1 + \gamma_1) \quad (\text{III.17})$$

#### - Décodage à l'utilisateur 2

U2 doit décoder  $x_2$  de  $y_2$ . Puisque U2 est l'utilisateur fort, son signal,  $x_2$  se voit allouer moins d'énergie. Par conséquent, dans  $y_2$ , le pouvoir de  $x_1$  sera dominant. Ainsi, U2 effectuera d'abord un décodage direct sur  $y_2$  pour obtenir  $x_1$ . Ensuite, l'annulation des interférences successives (SIC) est effectuée pour supprimer  $x_1$ . Alors  $x_2$  est décodé.

Substitution de x en (III.14), nous obtenons,

$$y_2 = \underbrace{\sqrt{P} \sqrt{\alpha_1 x_1} (h_{21} + h_{22})}_{\text{Indésirable et dominant}} + \underbrace{\sqrt{P} \sqrt{\alpha_2 x_2} (h_{21} + h_{22})}_{\text{Souhaité}} + n_2 \quad (\text{III.18})$$

Le SINR à U1 pour le décodage direct de  $x_1$  est

$$\gamma_{12} = \frac{P \alpha_1 |h_{21} + h_{22}|^2}{P \alpha_2 |h_{21} + h_{22}|^2 + \sigma^2} \quad (\text{III.19})$$

Après SIC, le premier terme de (III.18) sera supprimé et le signal restant sera,

$$y'_2 = \underbrace{\sqrt{P} \sqrt{\alpha_2 x_2} (h_{21} + h_{22})}_{\text{Souhaité}} + n_2 \quad (\text{III.20})$$

Maintenant, le SNR pour que U2 décode son propre signal est donné par,

$$\gamma_2 = \frac{P \alpha_2 |h_{21} + h_{22}|^2}{\sigma^2} \quad (\text{III.21})$$

Enfin, les taux réalisables à U2 pour le décodage  $x_1$  et  $x_2$  sont donnés par,

$$R_{12} = \log_2(1 + \gamma_{12}) \quad (\text{III.22})$$

$$R_2 = \log_2(1 + \gamma_2) \quad (\text{III.23})$$

Les paramètres de simulation suivants ont été utilisés :  $d_1=500\text{m}$ ,  $d_2=200\text{m}$ , l'exposant de perte de chemin  $\eta=4$ ,  $\alpha_1=0.75$ ,  $\alpha_2=0.25$  et la Bande passante = 1 MHz. La Figure 8 représente la variation de la probabilité de panne en fonction de la puissance d'émission.

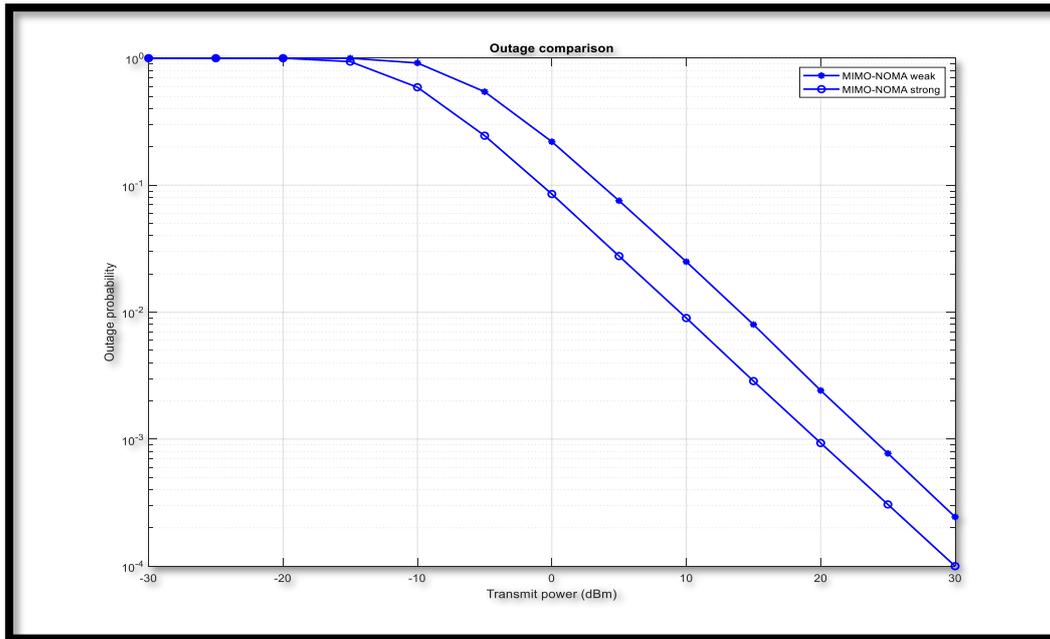


Figure III.8 : Variation de la probabilité de panne en fonction de la puissance d'émission.

La figure III.9 représente les taux individuels réalisables. On peut remarquer que l'utilisateur faible souffre d'une saturation de son débit réalisable après une puissance d'émission de 10 dBm.

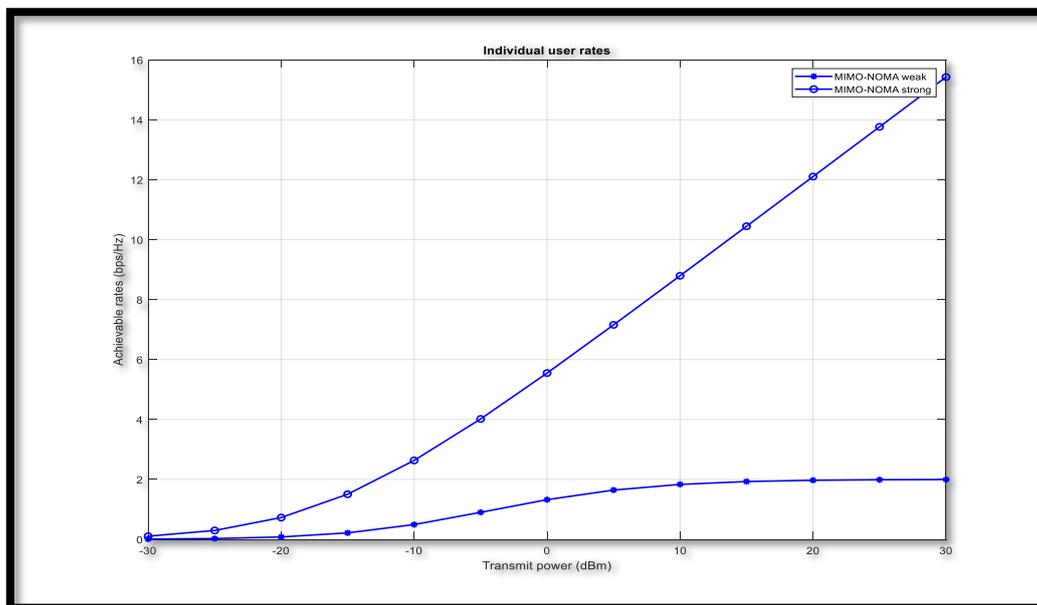


Figure III.9 : Variation de la probabilité de panne en fonction de la puissance d'émission.



# *Conclusion Générale*

La technologie de la cinquième génération (5G) a des exigences spéciales parmi les quelles C'est l'efficacité spectrale élevée en desservant plusieurs utilisateurs en même temps et avec la même ressource de fréquence, et pour cela ce projet a été dédié à l'étude des performances de la technique NOMA dans le domaine de puissance et nous avons fait le traitement théorique des mécanismes de cette technique.

Les schémas de NOMA présentés dans ce mémoire réalisent le multiplexage des signaux dans le domaine de puissance et aussi la variation de la probabilité de panne en fonction de la puissance d'émission.

L'un des principaux avantages de la technique NOMA est la possibilité de la pénétrer et la combiner dans les autres réseaux mobiles et avec d'autres techniques y compris MIMO cette combinaison rend la technique NOMA plus pratique et ses limites seront surmontées.

En perspective à ce travail, d'autres études peuvent être réalisées en se basant sur le NOMA hybride.

## *Références bibliographiques*

- [1] FRENCHWEB.FR. Les nombreux défis de la 5G [en ligne] ( Modifier le 30 juillet 2020) Disponible sur : < <https://www.frenchweb.fr/les-nombreuxdefis-de-la-5g/317383#gsc.tab=0> > (Consulté le (12/05/2021).
- [2] INT SPOTLIGHT. Massive Machine Type Communication in 5G and beyond network. Disponible sur : <<https://itnspotlight.com/massivemachine-type-communication-in-5g-and-beyond-network/>> (Consulté le 12/05/2021).
- [3] Colloque Avicca. Couverture mobile : les défis des zones blanches... et de la 5G. 23 mai 2017 Rémi Stefanini Directeur « Mobile et innovation » page12.
- [4] Opinions Libres le blog d'olivier Ezratty. Les nombreux défis de la 5G [en ligne] (Modifier le 1 mars 2018). Disponible sur:<<https://www.oezratty.net/wordpress/2018/nombreux-defis-5g/>>(Consulté le 12/05/2021).
- [5] Cisco Blogs. Three Services from 5G: More, Better! [en ligne] (modifier le 20 septembre 2019) Disponible sur :<<https://blogs.cisco.com/sp/5gwebplayers>> (Consulté le 12/05/2021).
- [6] Les enjeux de la 5G - mars 2017.
- [7] Emil Björson, Björn Ottersten. A framework for training-based estimation in arbitrary correlated Rician MIMO channels with Rician disturbance. IEEE transaction on signal processing 2010;58(3)1807.
- [8] Rundstedt, Karl. "Measurements and Channel Modelling of Microwave Line-of-Sight MIMO Links." (2015).
- [9] DEHEMCHI MARWA BOUHAFER ASMA (thèse de master )Etude et Analyse de Méthodes de Beamforming pour des Systèmes Multi-utilisateurs Pour la 5G
- [10] Nimay Ch Giri, Anwesha Sahoo, J. R. Swain, P. Kumar, A. Nayak, P. Debgoswami,Lecturer, Department of ECE,B.Tech Scholar, Centurion University of Technology and Management, Odisha, India, Capacity & Performance Comparison of SISO and MIMO System for Next Generation Network (NGN), International Journal of

[11] Kritika Sengar, Nishu Rani, Ankita Singhal, Dolly Sharma, Seema Verma, Tanya Singh, Banasthali University, Newai, India, Amity Institute of Information and Technology University, Noida, India, Study and Capacity Evaluation of SISO, MISO and MIMO RF

Wireless Communication Systems, International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT) – Volume 9 Number 9 - Mar 2014.

[12] DEHEMCHI MARWA BOUHAFER ASMA (thèse de master) Etude et Analyse de Méthodes de Beamforming pour des Systèmes Multi-utilisateurs.

[13] Linglong D , Bichai W, Zhiguo D, Zhaocheng W, Sheng Ch, Lajos H. A Survey of Non Orthogonal Multiple Access for 5G. In : IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, VOL. 20, NO. 3, THIRD QUARTER 2018.

[14] SOLTANI Samira. Etude de performances des modulations multi porteuses OFDM dans un canal radio mobile. Mémoire de master. Université de MSILA Faculté de technologie. Département : Electronique. Juin 2012.

[15] GAL YNA PISKONOVA . Transmission OFDM pour la téléphonie. Thèse de doctorat. Ecole de technologie supérieur université du QUÉBEC. 19 Décembre 2013.

[16] H BEN HNIA, A KACHOURI, O BEN BELGHITH, L KAMOUN. Etude des performances de la modulation OFDM pour l'utilisation dans les systèmes de communication sans fils de la 4G. In : SETIT 2004. International Conference: Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications. 4 pages.

[17] R. W. Chang, "Synthesis of Band -limited Orthogonal Signals for Multichannel Data Transmission," The Bell System Technical Journal, pp.1775–1796, Decembre 1966.

[18] Annick Le Glaunec . MODULATIONS MULTIPORTEUSES. Centrale Supélec. Université paris-Saclay. 17 pages.

[19] BENDAOU F, ABDENNEBI M, DIDI f. Allocation des ressources radio en LTE. In : International Congress on Telecommunication and Application"14 University of A.MIRA Bejaia , Algeria, 23-24 APRIL 2014. 6 Pages.

[20] A. Marcano, "Capacity Dimensioning for 5G Mobile Heterogeneous Networks," p. 147, 2018, [Online]. Available: [www.fotonik.dtu.dk/](http://www.fotonik.dtu.dk/).

- [21] H. Tabassum, M. S. Ali, E. Hossain, M. J. Hossain, and D. I. Kim, "Uplink Vs. Downlink NOMA in Cellular Networks: Challenges and Research Directions," *IEEE Veh. Technol. Conf.*, vol. 2017-June, 2017, doi: 10.1109/VTCSpring.2017.8108691.
- [22] S. M. Riazul Islam, M. Zeng, O. A. Dobre, and K. S. Kwak, "Non-orthogonal multiple access (NOMA): How it meets 5g and beyond," *arXiv*, 2019, doi: 10.1002/9781119471509.w5gref032.
- [23] Z. Wei, "Performance Analysis and Design of Non-orthogonal Multiple Access for Wireless Communications," no. June, 2019, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1910.00946>.
- [24] M. Aldababsa, M. Toka, S. Gökçeli, G. K. Kurt, and O. Kucur, "A tutorial on nonorthogonal multiple access for 5G and beyond," *arXiv*, vol. 2018, 2019, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1155/2018/9713450>.
- [25] W. U. Khan, F. Jameel, T. Ristaniemi, B. M. Elhalawany, and J. Liu, "Efficient power allocation for multi-cell uplink NOMA network," *IEEE Veh. Technol. Conf.*, vol. 2019-April, pp. 1–5, 2019, doi: 10.1109/VTCSpring.2019.8746316.
- [26] S. Timotheou and I. Krikidis, "Fairness for Non-Orthogonal Multiple Access in 5G Systems," *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 22, no. 10, pp. 1647–1651, 2015, doi: 10.1109/LSP.2015.2417119.
- [27] M. Shirvanimoghaddam, M. Dohler, and S. J. Johnson, "Massive Non-Orthogonal Multiple Access for Cellular IoT: Potentials and Limitations," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 9, pp. 55–61, 2017, doi: 10.1109/MCOM.2017.1600618.
- [28] Z. Chen, Z. Ding, X. Dai, and R. Zhang, "An Optimization Perspective of the Superiority of NOMA Compared to Conventional OMA," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 65, no. 19, pp. 5191–5202, 2017, doi: 10.1109/TSP.2017.2725223.
- [29] L. Dai, B. Wang, Y. Yuan, S. Han, C. L. I, and Z. Wang, "Non-orthogonal multiple access for 5G: Solutions, challenges, opportunities, and future research trends," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 9, pp. 74–81, 2015, doi: 10.1109/MCOM.2015.7263349.
- [30] A. Li, Y. Lan, X. Chen, and H. Jiang, "Non-orthogonal multiple access (NOMA) for future downlink radio access of 5G," *China Commun.*, vol. 12, pp. 28–37, 2015, doi: 10.1109/CC.2015.7386168.
- [31] M. Vaezi, G. A. Aruma Baduge, Y. Liu, A. Arafa, F. Fang, and Z. Ding, "Interplay

between NOMA and Other Emerging Technologies: A Survey," *IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw.*, vol. 5, no. 4, pp. 900–919, 2019, doi: 10.1109/TCCN.2019.2933835.

[32] S. M. R. Islam, N. Avazov, O. A. Dobre, and K. S. Kwak, "Power-Domain Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in 5G Systems: Potentials and Challenges," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 721–742, 2017, doi: 10.1109/COMST.2016.2621116.

[33] J. Zhao, Y. Liu, K. K. Chai, A. Nallanathan, Y. Chen, and Z. Han, "Spectrum Allocation and Power Control for Non-Orthogonal Multiple Access in HetNets," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 16, no. 9, pp. 5825–5837, 2017, doi: 10.1109/TWC.2017.2716921.

[34] Z. Ali, G. A. S. Sidhu, M. Waqas, and F. Gao, "On fair power optimization in nonorthogonal multiple access multiuser networks," *Trans. Emerg. Telecommun. Technol.*, vol. 29, no. 12, pp. 1–16, 2018, doi: 10.1002/ett.3540.

[35] Y. Liu, Z. Qin, M. ElKashlan, Z. Ding, A. Nallanathan, and L. Hanzo, "Non-orthogonal multiple access for 5g and beyond," *arXiv*, vol. 105, no. 12, pp. 2347–2381, 2018.

[36] S. Chinnu and N. Hariharan, "A Survey on Coded Cooperative Communication," vol.19, no. 1, pp. 85–89, 2017, doi: 10.9790/0661-1901048589.

[37] F. Kara and H. Kaya, "The error performance analysis of the decode-forward relayaided-NOMA systems and a power allocation scheme for user fairness," *J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.*, vol. 35, no. 1, pp. 97–108, 2020, doi: 0.17341/gazimmfd.441452.

[38] Z. Yang, Z. Ding, Y. Wu, and P. Fan, "Novel relay selection strategies for cooperative NOMA," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 66, no. 11, pp. 10114–10123, 2017, doi: 10.1109/TVT.2017.2752264.

[39] M. Xu, F. Ji, M. Wen, and W. Duan, "Novel Receiver Design for the Cooperative Relaying System with Non-Orthogonal Multiple Access," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 20, no. 8, pp. 1679–1682, 2016, doi: 10.1109/LCOMM.2016.2575011.

[40] D. T. Do and T. T. T. Nguyen, "Exact outage performance analysis of amplify-and-forward-aware cooperative NOMA," *Telkomnika (Telecommunication Comput. Electron. Control)*, vol. 16, no. 5, pp. 1966–1973, 2018, doi: 10.12928/TELKOMNIKA.v16i5.9823.

[41] TAO Y, LIU L, LIU S, ZHANG Z A Survey: Several Technologies of Non-Orthogonal Transmission for 5G China Communications October 2015.