

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de Technologie
Département d'électronique et des télécommunications



Projet de Fin d'Etudes Pour l'obtention du diplôme de Master
Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Télécommunications
Spécialité : Réseaux et Télécommunications

Présenté Par : Melle MAZOUZI Aicha Amel

Thème

**Étude comparative des caractéristiques des réseaux
d'accès orthogonal et non orthogonal dans la 5G**

Soutenu le 25/06/2024, devant le jury composé de :

Devant le jury composé de :

Mme Boutkhil malika	MAA	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
Mme Mekami hayet	MCB	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examinateur
Dr Meradi abdelhafid	MCA	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant
Dr Himeur hanane		UAT.B.B (Ain Temouchent)	Co-Encadrante

Année Universitaire : 2023/2024

Remerciement

Je remercie avant tout Allah le Tout-Puissant de m'avoir donné la foi, la volonté et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes encadrants, Monsieur MERADI Abdel Hafid et Mlle HIMEUR Hanane, pour leur précieux encadrement, leur disponibilité et leurs conseils avisés tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Je remercie également les membres du jury, Mme BOUTKHIL Malika et Mme MEKAMI Hayat d'avoir accepté de juger mon travail et pour leurs remarques constructives.

Enfin, je remercie sincèrement tous les enseignants qui ont contribué à ma formation et m'ont soutenu tout au long de ce parcours.

Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

Mes chers parents, pour leur amour inconditionnel, leur soutien constant et leurs sacrifices sans fin. Votre exemple de travail acharné et de persévérance m'a toujours inspiré.

Mes frères, pour leur soutien, leur compréhension et leurs encouragements tout au long de mon parcours académique. Vous avez toujours été là pour moi, et je vous en suis profondément reconnaissant.

Ma famille élargie, pour leur présence réconfortante et leurs encouragements. Votre soutien a été une source de motivation essentielle.

À mes professeurs, pour leur précieux enseignement et leurs conseils avisés.

Merci à vous tous, sans qui cette réalisation n'aurait pas été possible.

Résumé

La génération de réseaux de téléphonie mobile, connue sous le nom de 5G et au-delà, doit répondre à des exigences cruciales telles que la prise en charge d'un grand nombre d'appareils connectés, des débits de données extrêmement élevés et des temps de transmission rapides. Pour atteindre ces objectifs, différentes techniques d'accès multiple ont été développées.

Notre mémoire commence par une description des exigences de la cinquième génération (5G) et explore les schémas d'accès multiples orthogonaux (OMA). Cependant, ces schémas présentent certaines limitations, ce qui a conduit au développement d'une autre technologie prometteuse appelée accès multiple non orthogonal (NOMA).

NOMA est une technologie plus récente qui permet à plusieurs utilisateurs de partager le même bloc de ressources, tels que le temps, la fréquence et le code d'étalement. Les techniques NOMA sont divisées en deux catégories : NOMA dans le domaine de la puissance, et NOMA dans le domaine du code. Nous nous concentrons particulièrement sur l'accès multiple non orthogonal dans le domaine de puissance.

Notre travail vise à évaluer et comparer les performances de NOMA et de l'OMA. Nous effectuons des simulations pour confirmer nos études théoriques et évaluons les débits de données des deux techniques. Notre analyse met en évidence les avantages de NOMA en termes de capacité, de débits et de gestion des ressources, démontrant son potentiel pour la prochaine génération de services mobiles.

Mots clés : 5G, Appareils connectés, Débits de données, Temps de transmission, Techniques d'accès multiple, OMA, NOMA, Domaine de la puissance, Domaine du code, Débits de données, Capacité, Gestion des ressources, Services mobiles

Abstract

The generation of mobile networks, known as 5G and beyond, must meet crucial requirements such as supporting a large number of connected devices, extremely high data rates, and fast transmission times. To achieve these goals, various multiple access techniques have been developed.

Our study begins with a description of the requirements of the fifth generation (5G) and explores Orthogonal Multiple Access (OMA) schemes. However, these schemes have certain limitations, leading to the development of another promising technology called Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA).

NOMA is a newer technology that allows multiple users to share the same block of resources, such as time, frequency, and spreading code. NOMA techniques are divided into two categories: power domain NOMA and code domain NOMA. We specifically focus on Non-Orthogonal Multiple Access in the power domain.

Our work aims to evaluate and compare the performance of NOMA and OMA. We conduct simulations to validate our theoretical studies and assess the data rates of both techniques. Our analysis highlights the advantages of NOMA in terms of capacity, data rates, and resource management, demonstrating its potential for the next generation of mobile services.

Keyword: 5G, Connected Devices, Data Rates, Transmission Time, Multiple Access Techniques, OMA, NOMA, Power Domain, Code Domain, Capacity, Resource Management, Mobile Services.

ملخص

الجيل الخامس 5G من شبكات الهاتف المحمول يجب ان يلبي المتطلبات الحاسمة مثل دعم عدد كبير من الأجهزة المتصلة، وتدفق بيانات عالي للغاية، ونقل سريع الوقت. لتحقيق هذه الأهداف، تم تطوير تقنيات وصول متعددة مختلفة. تبدأ اطروحتنا بوصف متطلبات الجيل الخامس وتكشف أنظمة الوصول المتعدد المتعامد OMA. هذه التقنية لها بعض القيود مما أدى الى تطوير تقنية واعدة أخرى تسمى الوصول المتعدد الغير متعامد.

NOMA هي تقنية أحدث تسمح لعدة مستخدمين بمشاركة نفس مجموعة الموارد، مثل الوقت والتردد وكود الانتشار. تنقسم تقنيات NOMA إلى فئتين: في مجال الطاقة، وفي مجال الكود. نحن نركز بشكل خاص على الوصول المتعدد غير المتعامد في مجال الطاقة.

يهدف عملنا إلى تقييم ومقارنة أداء OMA و NOMA. نقوم بإجراء عمليات محاكاة لتأكيد دراساتنا النظرية وتقييم معدلات البيانات لكلا التقنيتين. يسلط تحليلنا الضوء على مزايا NOMA من حيث السعة والسرعات وإدارة الموارد، مما يوضح إمكاناتها للجيل القادم من خدمات الهاتف المحمول.

الكلمات المفتاحية الأجهزة المتصلة، معدلات البيانات، وقت الإرسال، تقنيات الوصول المتعددة، مجال الطاقة، مجال الكود، السعة، إدارة الموارد، خدمات الهاتف المحمول
5G, OMA, NOMA

Tables des matières

Résumé.....	i
Table des matières.....	iii
Liste des abréviations.....	vi
Liste des figures.....	x
Liste des tableaux.....	xii
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur la 5G.....	3
I.1. Introduction	4
I.2. Evolution des réseaux mobiles	4
I.2.1. La première génération 1G : La naissance de la communication mobile	5
I.2.2. La deuxième génération 2G : L'avènement de la communication numérique	5
I.2.3. La troisième génération 3G : L'ère de l'internet mobile	6
I.2.4. La quatrième génération 4G : L'essor du haut débit mobile	6
I.2.5. La cinquième génération 5G : Plus qu'un simple accès plus rapide à l'internet... ..	7
I.3. Objectif de 5G	7
I.4. Fondements techniques de la 5G.....	9
I.4.1. Spectre radio : utilisation des bandes de fréquences basses, moyennes et hautes	10
I.4.1.1. Fréquences à basse bande 5G : Les fréquences en-dessous de 1GHz	10
I.4.1.2. Fréquences en bande moyenne 5G : Les fréquences de 1 à 6 GHz	11
I.4.1.3. Fréquences à haute bande 5G : au-dessus de 6 GHz	11
I.4.2. Petites cellules (Small cells).....	12
I.4.2.1. Qu'est-ce que la technologie des petites cellules ?.....	12
I.4.2.2. Fonctionnement des émetteurs-récepteurs pour petites cellules.....	13
I.4.2.3. Types de petites cellules.....	13
I.4.3. MIMO Massive (Multiple Inputs - Multiple Outputs).....	14
I.4.4. La formation de faisceaux (Beamforming)	15
I.4.4.1. Qu'est-ce que le beamforming ?	15
I.4.4.2. Pourquoi le beamforming est utilisé dans la 5G ?	15
I.4.5. Full-Duplex	16
I.5. Architecture	16
I.5.1. L'architecture NSA versus SA	17
I.5.1.1. L'architecture (NSA).....	17
I.5.1.2. L'architecture (SA).....	18

I.5.2.	Le réseau central 5G.....	18
I.6.	Application.....	20
I.6.1.	Les familles d'usages de la 5G.....	20
I.6.2.	Exemples d'applications	21
I.6.2.1.	IoT.....	21
I.6.2.2.	Villes intelligentes.....	22
I.6.2.3.	L'industrie	23
I.6.2.4.	Médias intelligents	24
I.6.2.5.	Applications pratiques	25
I.7.	Défis et considérations	25
I.8.	Conclusion.....	26
Chapitre II :	Les techniques d'accès multiples	27
II.1.	Introduction	28
II.2.	L'accès multiple	29
II.3.	L'accès multiples orthogonales OMA	30
II.3.1.	L'orthogonalité	30
II.3.2.	La technique d'accès multiple par une répartition de fréquences (FDMA).....	32
II.3.3.	La technique d'accès multiple à répartition dans le temps (TDMA).....	33
II.3.4.	La technique d'accès multiple par répartition en code (CDMA).....	35
II.3.5.	La technique d'Accès Multiple par répartition orthogonale de fréquence (OFDMA)	36
II.3.6.	La technique d'accès multiple par répartition en fréquence à porteuse unique (SC-FDMA).....	37
II.4.	L'accès multiple non orthogonale.....	38
II.4.1.	Définition	39
II.4.2.	Les technologies clés au NOMA.....	40
II.4.2.1.	Codage de superposition (SC)	40
II.4.2.2.	Annulation d'interférences successives SIC.....	42
II.4.3.	Les principaux schémas NOMA	44
II.4.3.1.	Domaine de puissance NOMA (PD-NOMA)	45
II.4.3.2.	Domaine de code NOMA (CD-NOMA).....	48
II.4.4.	Efficacité spectrale et efficacité énergétique de NOMA.....	48
II.4.4.1.	Efficacité spectrale	48
II.4.4.2.	Efficacité énergétique.....	48
II.5.	Les applications d'OMA et de NOMA	49
II.5.1.	Les applications d'OMA.....	49

II.5.2. Les applications de NOMA.....	50
II.6. Les avantages du NOMA par rapport à l'OMA	52
II.7. Conclusion.....	53
Chapitre III : Simulations et Résultats	54
III.1. Introduction	55
III.2. Modèle de simulation	55
III.3. Paramètres de Simulation	58
III.4. Analyse de capacité :	59
III.4.1. Comparaison de la capacité entre NOMA et OMA pour deux utilisateurs.....	60
III.4.2. Comparaison de la capacité entre NOMA et OMA pour trois utilisateurs	64
III.4.3. Comparaison de la capacité entre NOMA et OMA pour cinq utilisateurs.....	68
III.4.4. Comparaison de la capacité entre NOMA et OMA pour dix utilisateurs	73
III.4.5. Comparaison de la capacité entre NOMA et OMA pour vingt utilisateurs	76
III.5. Conclusion.....	78
Conclusion Générale.....	79
Bibliographie.....	80

Liste des abréviations

- 1G:** First generation
- 2G:** Second generation
- 3D:** Three-dimensional
- 3G:** Third generation
- 3GPP:** The 3rd generation Partnership Project
- 4G:** Fourth generation
- 4K:** 4,000pixels
- 5G:** Fifth generation
- 5G-AN:** 5G Access Network
- 5G Core:** 5G Core Network
- 5G gNB:** 5G Next Generation Node B (base station)
- 5GS:** 5G System
- 8K:** 8K Resolution (7680×4320 pixels)
- AF:** Application Function
- AMF:** Access and Mobility Management Function
- AMPS:** Advanced Mobile Phone System
- AR:** Augmented Reality
- AUSF:** Authentication Server Function
- BDMA:** Beam Division Multiple Access
- BS:** Base Station
- CDMA:** Code Division Multiple Access
- CDMA 2000:** CDMA 2000 (3rd Generation mobile telecommunications standard)
- CD-NOMA :** Code-Domain Non-Orthogonal Multiple Access
- DAB:** Digital Audio Broadcasting
- D-AMPS:** Digital Advanced Mobile Phone System
- DN:** Data Network
- DoF:** Degrees of Freedom
- D-OMA:** Dynamic Orthogonal Multiple Access
- DVB:** Digital Video Broadcasting
- EDGE:** Enhanced Data rates for GSM Evolution
- EE:** Energy Efficiency
- eMBB:** Enhanced Mobile Broadband

EPC: Evolved Packet Core
FMBC: Fixed Mobile Broadband Convergence
FDD: Frequency Division Duplexing
FDD-UE: Frequency Division Duplexing User Equipment
FDM: Frequency Division Multiplexing
FDMA: Frequency Division Multiple Access
FFT: Fast Fourier Transform
Gbit/s: Gigabit per second
Gbps: Gigabits per second
GHz: Gigahertz
GSN: GPRS Support Node
gNB: Next Generation Node B (5G base station)
GPRS: General Packet Radio Service
HMI: Human-Machine Interface
IDMA: Interleave Division Multiple Access
IFFT: Inverse Fast Fourier Transform
IMT-2000: International Mobile Telecommunications-2000
IMT-Advanced: International Mobile Telecommunications-Advanced
IP: Internet Protocol
IoT: Internet of Things
ISI: Inter-Symbol Interference
Kbps: Kilobits per second
LAN: Local Area Network
LAS-CDMA: Large Area Synchronized Code Division Multiple Access
LDS-CDMA: Low-Density Signature Code Division Multiple Access
LDS-OFDM: Low-Density Signature Orthogonal Frequency Division Multiplexing
LTE: Long Term Evolution
MAN: Metropolitan Area Network
Mbps: Megabits per second
MC-CDMA: Multi-Carrier Code Division Multiple Access
MHZ: Megahertz
MIMO: Multiple Input Multiple Output
MIMO-NOMA: MIMO Non-Orthogonal Multiple Access
MMS: Multimedia Messaging Service

mMTC : massive Machine Type Communications
MU-MIMO : Multi-User Multiple Input Multiple Output
MUSA : Multi-User Shared Access
NEF : Network Exposure Function
Network-LMDS : Local Multipoint Distribution Service Network
NMT : Nordic Mobile Telephone
NOMA : Non-Orthogonal Multiple Access
NR : New Radio (5G)
NRF : Network Repository Function
NSA : Non-Standalone (5G architecture)
NSSF : Network Slice Selection Function
OFDM : Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OFDMA : Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
OMA : Orthogonal Multiple Access
PAPR: Peak-to-Average Power Ratio
PCF : Policy Control Function
PDMA : Pattern Division Multiple Access
QoE : Quality of Experience
QoS : Quality of Service
QPSK : Quadrature Phase Shift Keying
RAN : Radio Access Network
SA : Standalone
SBA : Service-Based Architecture
SC : Single Carrier
SC-FDE : Single Carrier Frequency Domain Equalization
SC-FDMA : Single Carrier Frequency Division Multiple Access
SCMA : Sparse Code Multiple Access
SIC : Successive Interference Cancellation
SMS : Short Message Service
SU-MIMO : Single User Multiple-Input Multiple-Output
TACS : Total Access Communication System
TDM : Time Division Multiplexing
TDMA : Time Division Multiple Access
TV : Television

UE : User Equipment

UDM : Unified Data Management

UHF : Ultra High Frequency

UPC : Universal Product Code

URLLC : Ultra-Reliable Low Latency Communications

VHD : Very High Definition

VR : Virtual Reality

WIFI : Wireless Fidelity

WIMAX : Worldwide Interoperability for Microwave Access

WMAN : Wireless Metropolitan Area Network

Liste des figures

Figure I.1- Évolution des réseaux mobiles	4
Figure I.2 - la comparaison entre 4G et 5G	8
Figure I.3 - Ce qui est fait aujourd'hui en une minute sur internet	9
Figure I.4 - Les principales technologies mises en œuvre pour 5G	9
Figure I.5- Le spectre radio	10
Figure I.6- La technologie des petites cellules	12
Figure I.7 - Système Massive MIMO	14
Figure I.8 - La technologie de Beamforming	15
Figure I.9- la technologie Full-Duplex	16
Figure I.10- SA vs NSA	17
Figure I.11- les principaux composants d'un réseau central 5G	19
Figure I.12 - Exemples des cas d'usages couverts par les trois déclinaisons	20
Figure I.13 - Applications de l'IoT	21
Figure I.14 - ville intelligente	22
Figure I.15- Services de mise en œuvre de l'Industrie 4.0	23
Figure I.16 – Le streaming de contenu	24
Figure I.17 - La technologie immersive	25
Figure II.1 - Diagramme schématique sur les technologies d'accès multiples	29
Figure II.2 - Principe de FDM	31
Figure II.3 - Principe de l'OFDM	31
Figure II.4 - Principes des techniques FDMA, TDMA, CDMA	32
Figure II.5 - Principe de la technique OFDMA	36
Figure II.6 - Transmission parallèle et séquentielle des systèmes OFDMA et SC-FDMA	38
Figure II.7- La différence entre l'accès multiple orthogonal (OMA) et l'accès multiple non orthogonal (NOMA)	39
Figure II.8 - Un exemple de codage SC (a) constellation de signaux de l'utilisateur 1 (b) constellation de signaux de l'utilisateur 2 (c) constellation de signal superposé	41
Figure II.9 - Concept du codage de superposition	41
Figure II.10 - Un exemple de décodage SC (a) décodant le signal de l'utilisateur 1 (b) décodant le signal de l'utilisateur 2	42
Figure II.11 – Concept d'annulation d'interférence successives SIC	44
Figure II.12- Liaison descendante NOMA dans une cellule à deux utilisateurs	46

Figure II.13 - Liaison montante NOMA dans une cellule à deux utilisateurs	47
Figure II.14 - Une illustration de NOMA avec formation de faisceaux	51
Figure III.1 - Schéma de m utilisateurs OMA	55
Figure III.2 - Schéma de m utilisateurs NOMA	56
Figure III.3 - capacité du NOMA par rapport à l'OMA pour deux utilisateurs.....	60
Figure III.4 - Capacité du NOMA par rapport à l'OMA pour deux utilisateurs 2	61
Figure III.5 - Capacité du NOMA par rapport à l'OMA pour deux utilisateurs 3	63
Figure III.6 - Capacité du NOMA par rapport à l'OMA pour trois utilisateurs 1.....	65
Figure III.7 - Capacité du NOMA par rapport à l'OMA pour trois utilisateurs 2.....	66
Figure III.8 - Capacité du NOMA par rapport à l'OMA pour trois utilisateurs 3.....	67
Figure III.9 - Capacité du NOMA par rapport à l'OMA pour cinq utilisateurs 1	69
Figure III.10 - Capacité du NOMA par rapport à l'OMA pour cinq utilisateurs 2.....	70
Figure III.11 - Capacité du NOMA par rapport à l'OMA pour cinq utilisateurs 3	71
Figure III.12 - Capacité d'OMA en fonction de la puissance de transmission pour dix utilisateurs	73
Figure III.13 - Capacité de NOMA en fonction de la puissance de transmission pour dix utilisateurs	74
Figure III.14 - Capacité d'OMA en fonction de la puissance de transmission pour vingt utilisateurs	76
Figure III.15 - Capacité de NOMA en fonction de la puissance de transmission pour vingt utilisateurs	77

Liste des tableaux

Tableau I.1 -Type de petites cellules	13
Tableau III.1 – Paramètres de simulation pour le premier cas de deux utilisateurs	60
Tableau III.2 - Paramètres de simulation pour le deuxième cas de deux utilisateurs.....	61
Tableau III.3 - Paramètres de simulation pour le deuxième cas de deux utilisateurs.....	62
Tableau III.4 - Paramètres de simulation pour le premier cas de trois utilisateurs.....	65
Tableau III.5 - Paramètres de simulation pour le deuxième cas de trois utilisateurs.....	66
Tableau III.6 - Paramètres de simulation pour le deuxième cas de trois utilisateurs.....	67
Tableau III.7 - Paramètres de simulation pour le premier cas de cinq utilisateurs.....	68
Tableau III.8 - Paramètres de simulation pour le deuxième cas de cinq utilisateurs.....	70
Tableau III.9 - Paramètres de simulation pour le troisième cas de cinq utilisateurs	71

Introduction générale

Dans le domaine des télécommunications, notamment pour les radiocommunications, les fréquences sont standardisées par les organisations pour coordonner leur utilisation et éviter les conflits de répétition. Cependant, le nombre d'utilisateurs de téléphones mobiles a augmenté récemment. Il est donc nécessaire de partager la ressource pour que chaque utilisateur puisse bénéficier du service, pour résoudre ce problème, des technologies ont été développées pour partager des fichiers de ressources utilisateur, ces technologies sont appelées "techniques d'accès multiple".

De la première à la quatrième génération (1G à 4G) des communications mobiles, les systèmes d'accès multiples ont été la technologie clé qui discrimine les capacités des systèmes sans fil. Des schémas d'accès multiple orthogonal (OMA), tels que l'accès multiple à division de fréquence (FDMA), l'accès multiple à division de temps (TDMA) et l'accès multiple à division de code (CDMA) ont été utilisés dans 1G, 2G et 3G, respectivement. Plus précisément, les domaines de temps, de fréquence et de code sont répartis équitablement entre les utilisateurs actifs.

Avec la 4G, l'accès multiple par répartition orthogonale de la fréquence (OFDMA) a été développé pour l'accès multi-utilisateur (MU) en assignant un sous-ensemble de porteuses à chaque utilisateur. En plus de l'OFDMA, il y a aussi l'accès Multiple à Division de Fréquence à Porteuse Unique (SC-FDMA) qui a été utilisé dans la 4G.

La cinquième génération a été continuée avec ces deux techniques, parce que l'OFDMA et le SC-FDMA maintiennent la flexibilité des ressources et la largeur de bande d'information disponible à la valeur souhaitée. Le principe de base des techniques OMA consiste à séparer les flux de données des utilisateurs afin d'éviter les interférences entre utilisateurs, ce qui permet d'obtenir un gain de multiplexage avec une complexité raisonnable.

La 5G SE est encore plus complexe en raison de la croissance explosive du trafic de données, causée par l'Internet des objets à large bande (WB-IoT), la connectivité massive des réseaux ultra-denses (UDNs), les systèmes cyber-physiques et les communications massives de type machine (mMTC).

Les approches d'allocation orthogonale souffrent d'une distribution inefficace des ressources disponibles et d'une incapacité à prendre en charge une connectivité massive, ce qui pousse vers de nouveaux schémas d'accès ainsi que des techniques de renforcement de capacité, qui puissent répondre à ces exigences. NOMA est envisagé comme une solution prometteuse au problème mentionné en raison du débit élevé, de l'efficacité spectrale et de l'efficacité énergétique de l'ensemble du système sur l'ensemble de la bande passante.

L'objectif principal de ce mémoire est de procéder à une analyse approfondie, à la fois théorique et pratique, en utilisant des simulations, dans le but de comparer deux types d'accès multiples : l'accès multiple orthogonal (OMA) et l'accès multiple non orthogonal (NOMA).

Ce mémoire se compose de trois chapitres distincts :

- Le premier chapitre porte sur une étude générale de l'évolution des réseaux mobiles, en mettant particulièrement l'accent sur la technologie 5G. Nous définirons quelques concepts et technologies pour la cinquième génération.
- Le deuxième chapitre est divisé en deux parties distinctes. La première partie aborde les techniques d'accès multiple orthogonales, tandis que la seconde partie se consacre à une étude approfondie de la technologie d'accès multiple non orthogonal (NOMA). Nous étudierons également les séries de liaisons montantes et descendantes, ainsi que certains concepts et relations mathématiques.
- Le troisième chapitre est consacré à une étude comparative entre deux technologies bien établies dans le domaine des communications sans fil, à savoir la NOMA et l'OMA. Cette comparaison est basée sur des simulations MATLAB. Nous concentrerons sur les résultats graphiques qui examinent les performances des utilisateurs dans chaque technique.

Et nous terminerons par une conclusion générale.

Chapitre I : Généralités sur la 5G

I.1. Introduction

De nos jours, le secteur des télécommunications s'est étendu considérablement afin de satisfaire les demandes grandissantes des clients en matière de rapidité, de variété et de simplicité.

Initialement, les technologies des réseaux mobiles permettaient uniquement de passer des appels et d'envoyer des SMS. Avec l'arrivée des nouvelles générations, de nouvelles applications sont apparues : la connexion à internet, l'accès à des applications, ainsi que la possibilité de passer des appels en vidéo.

À l'instar de ses prédécesseurs, la 5G améliore les services existants et favorise le développement de nouvelles applications. Elle est une technologie en constante évolution, qui se perfectionnera au fil des mises à jour des normes internationales.

Dans ce premier chapitre, nous aborderons l'évolution des réseaux mobiles, en nous concentrant particulièrement sur la comparaison entre la 4G et la 5G. Nous étudierons les objectifs, les principes technologiques, l'architecture, les applications et les défis. Cette étude nous permettra de mieux comprendre les enjeux et les opportunités offertes par cette nouvelle génération de réseaux mobiles.

I.2. Evolution des réseaux mobiles

La figure I.1 illustre l'évolution des réseaux mobiles au fil des ans [1].

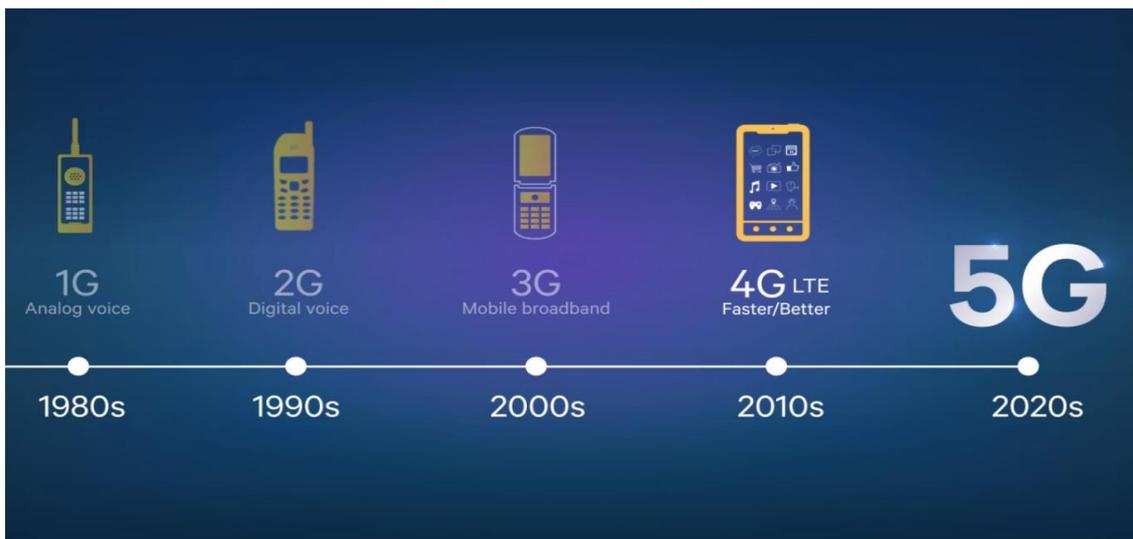


Figure I.1- Évolution des réseaux mobiles [1]

I.2.1. La première génération 1G : La naissance de la communication mobile

Les fondations des réseaux mobiles modernes d'aujourd'hui ont été posées dès les années 1940 avec les premiers services de téléphonie automobile, mais il faudrait un certain temps pour que la technologie elle-même se développe pour un usage personnel. Nous pouvons considérer les années 1980 comme le premier véritable jalon dans le développement des réseaux mobiles utilisés aujourd'hui.

Les premiers réseaux mobiles, désormais connus sous le nom de 1G, utilisaient une technologie analogique [2]. Elle était conçue pour les services vocaux [2], avec un débit de données allant jusqu'à 2,4 kbps [3]. Le système de téléphone mobile avancé (AMPS), le téléphone mobile nordique (NMT) et le système de communication à accès total (TACS) étaient les principaux standards de la première génération de réseaux mobiles (1G) [4].

Elle présente de nombreux inconvénients tels que des canaux limités, une faible qualité de la voix et une faible autonomie de la batterie [5].

I.2.2. La deuxième génération 2G : L'avènement de la communication numérique

La technologie 2G, introduite dans les années 1990, a utilisé des techniques numériques avec la mise en œuvre de techniques d'accès multiple telles que le TDMA.

La 2G offrait des services tels que les messages texte, les messages images et les MMS. La 2G offre une sécurité accrue pour l'expéditeur et le destinataire. Tous les messages texte sont cryptés de manière numérique, ce qui permet le transfert de données de sorte que seul le destinataire prévu puisse le recevoir et le lire [6].

Nous parlons aussi de 2G pour faire référence à la technologie GSM qui marque les débuts du numérique dans la téléphonie mobile [7].

La technologie 2,5G combine les systèmes cellulaires de deuxième génération (2G) avec les services de données généraux par paquets (GPRS), offrant ainsi des fonctionnalités supplémentaires par rapport aux réseaux 2G ou 1G. Les systèmes 2,5G maintiennent les structures des systèmes 2G, mais introduisent la commutation par paquets en plus de la commutation de circuits. Ils permettent des débits de données allant jusqu'à 144 kbps. Les principales technologies 2,5G comprennent le GPRS, l'Enhanced Data Rate for GSM Evolution (EDGE) et le Code Division Multiple Access (CDMA) 2000 [8].

I.2.3. La troisième génération 3G : L'ère de l'internet mobile

La troisième génération de réseau mobile a marqué l'avènement et l'essor des smartphones à la fin des années 2000 [9].

Les réseaux de télécommunication 3G prennent en charge des services qui offrent un débit de transfert d'informations d'au moins 2 Mbps. La 3G n'est pas une norme unique ; c'est une famille de normes qui peuvent toutes fonctionner ensemble. Une organisation appelée 3rd Generation Partnership Project (3GPP) a poursuivi le travail en définissant un système mobile qui répond à la norme IMT-2000 l'Union internationale des télécommunications (UIT). En Europe, il était appelé UMTS (Universal Terrestrial Mobile System), tandis que CDMA2000 est le nom de la variante 3G américaine.

Les réseaux 3G permettent aux opérateurs de réseau d'offrir aux utilisateurs une gamme plus large de services plus avancés tout en augmentant la capacité du réseau grâce à une amélioration [10]. Les capacités de transmission d'informations étendues de la 3G sont trois fois plus rapides que la 2G.

Les caractéristiques augmentées sont la bande passante et le débit de transfert de données pour s'adapter à une application basée sur le web, des fichiers audio, vidéo et des communications IP [11]. 3G offre également aux utilisateurs une meilleure sécurité grâce aux capacités d'authentification des utilisateurs lors de la communication avec d'autres appareils sans fil [12]

I.2.4. La quatrième génération 4G : L'essor du haut débit mobile

La fin des années 2000 a marqué l'introduction du système mobile de quatrième génération, qui était un réseau entièrement basé sur l'IP.

L'objectif principal de la technologie 4G est de fournir des services vocaux et de données, multimédias et Internet sur IP à haute vitesse, de haute qualité, à haute capacité, sécurisés et à bas coût. La raison de la transition vers le tout IP est d'avoir une plate-forme commune pour toutes les technologies développées. Jusqu'à présent, il a la capacité de 100 Mbps et 1 Gbps. Pour utiliser le réseau mobile 4G, les terminaux multimodes des utilisateurs doivent pouvoir sélectionner le système sans fil cible. Pour fournir des services sans fil à tout moment et en tout lieu, la mobilité des terminaux est un facteur clé en 4G. La mobilité des terminaux implique un roaming automatique entre différents réseaux sans fil.

La technologie 4G intègre différentes technologies sans fil existantes et futures (par exemple, OFDM, MC-CDMA, LAS-CDMA et Network-LMDS) pour offrir une liberté de mouvement et un roaming ininterrompu d'une technologie à une autre.

LTE (Long Term Evolution) et WiMAX (Wireless Interoperability for Microwave Access) sont considérés comme des technologies 4G. Le premier essai sur le terrain réussi pour la 4G a été mené au Japon en 2005.[13]

I.2.5. La cinquième génération 5G : Plus qu'un simple accès plus rapide à l'internet

Les tests de base initiaux du réseau de communication mobile 5G, la construction des installations matérielles et le processus de normalisation sont presque terminés, et il sera prochainement utilisé commercialement à travers le monde.

L'objectif de la 5G est de réaliser des avancées révolutionnaires en matière de débits de données, de latence, de fiabilité du réseau, d'EE et de connectivité massive. Il utilise non seulement le nouveau spectre de la bande micro-ondes (3,3-4,2 GHz), mais utilise également de manière innovante la bande millimétrique pour la première fois, augmentant considérablement les débits de données (jusqu'à 10 Gbps). La 5G applique des technologies d'accès avancées, notamment l'accès multiple par répartition spatiale (BDMA) et le multiporteuse à banc de filtres (FBMC).[14]

I.3. Objectif de 5G

La 5G marque une évolution significative par rapport à la 4G, proposant des vitesses plus élevées, une latence réduite, une meilleure capacité, et permettant l'émergence de nouvelles applications et technologies. La figure I.2 illustre la comparaison entre 4G et 5G au niveau des huit indicateurs de performance [15].

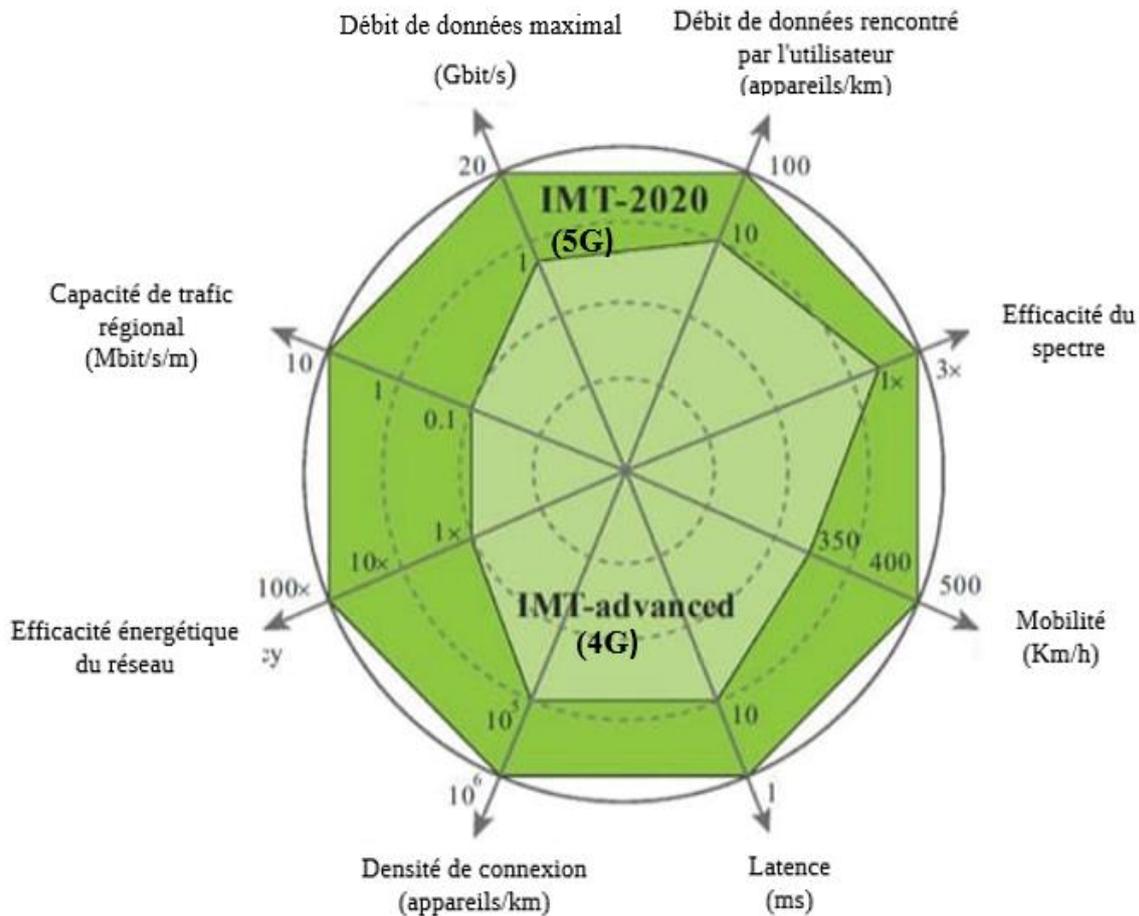


Figure I.2 - la comparaison entre 4G et 5G [15]

1. Des forfaits de donnée plus importants : La quantité de données qui pourra être échangée sur ce réseau de demain devra être 1000 fois supérieure à celle que la norme 4G (LTE) peut supporter.

2. Le nombre d'antennes : le nombre de terminaux pouvant être connectés à chaque antenne doit être multiplié par 100. Cependant, le nombre d'antennes est principalement influencé par les fréquences utilisées, selon lesquelles l'absorption des ondes, comme dans les murs, fluctue. De plus, cette technologie vise principalement à connecter plus d'appareils.

3. 1 Gb/s de débit : Le débit maximum que peut fournir la 4G mobile est dix fois moins rapide que ce que proposera le futur réseau, même si dans certains cas, il équivaut ou dépasse le débit des connexions domestiques sur fibre optique.

4. Réduction du délai de latence : Un délai de latence réduit rendra le réseau plus réactif, améliorant l'expérience utilisateur lors de l'envoi d'informations ou de la navigation sur internet. Comme illustre la figure I.3.

5. Autonomie des terminaux améliorée : Pour que les objets connectés à Internet aient une meilleure autonomie, les fabricants travaillent à l'amélioration de la durabilité des batteries et à la réduction de la consommation énergétique, afin de multiplier par dix la durée de vie des terminaux [16].

La figure I.3 montre ce qui est fait aujourd'hui en une minute sur internet.



Figure I.3 - Ce qui est fait aujourd'hui en une minute sur internet [17]

I.4. Fondements techniques de la 5G

La 5G utilise différentes technologies essentielles comme les ondes millimétriques, le FullDuplex, le Beamforming, les petites cellules, le MIMO Massif, etc., qui offrent la possibilité d'atteindre de nouveaux niveaux de performance et d'efficacité. Comme illustré dans la figure I.4 [18].



Figure I.4 - Les principales technologies mises en œuvre pour 5G [18]

I.4.1. Spectre radio : utilisation des bandes de fréquences basses, moyennes et hautes

La 5G nécessite des fréquences dans trois bandes de fréquences principales afin de garantir une couverture étendue et de répondre à tous les besoins, comme illustré dans la figure I.5

Spectre de radio fréquences 5G

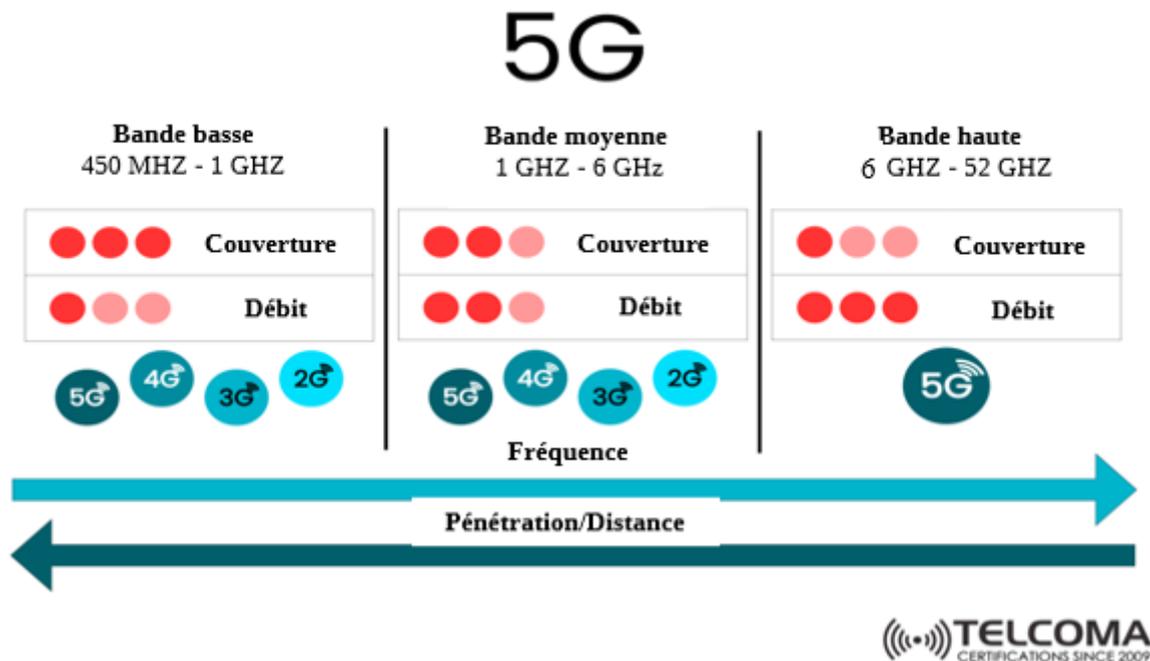


Figure I.5- Le spectre radio [19]

Les trois bandes de fréquences sont : En-dessous de 1 GHz, 1 à 6 GHz et au-dessus de 6 GHz.

I.4.1.1. Fréquences à basse bande 5G : Les fréquences en-dessous de 1GHz

Les fréquences à basse bande 5G comprennent les fréquences inférieures à 1GHz. Pour étendre la couverture 5G ultra-rapide dans les zones urbaines, suburbaines et rurales et favoriser le développement des services IoT, des fréquences inférieures à 1 GHz sont nécessaires. Sans ces fréquences, les services 5G auront du mal à se propager au-delà des centres urbains et à pénétrer les bâtiments. A cet effet, une partie des fréquences TV UHF devrait être libérée via le deuxième dividende numérique. [20]

I.4.1.2. Fréquences en bande moyenne 5G : Les fréquences de 1 à 6 GHz

Les fréquences de 1 à 6 GHz offrent des vitesses plus rapides et une latence plus faible que la bande basse. Cependant, il ne parvient pas à pénétrer dans les bâtiments avec la même efficacité que le spectre de bande basse [21].

Le spectre moyen est couramment utilisé pour la connectivité 5G, car il est conçu pour couvrir de vastes zones dans les banlieues et les villes. Le spectre moyen peut être utilisé dans de nombreuses applications en raison de son équilibre entre vitesse et couverture. [22]

I.4.1.3. Fréquences à haute bande 5G : au-dessus de 6 GHz

Les fréquences au-dessus de 6 GHz sont nécessaires pour atteindre les grandes vitesses très haut débits envisagés pour la 5G. Actuellement les bandes 26 GHz et/ou 28 GHz obtiennent le plus de soutien international dans cette plage de fréquences. Un point clé de la Conférence Mondiale des Radiocommunications de l'UIT en 2019 (CMR-2019) c'est la mise en place d'un accord international sur les bandes 5G au-dessus de 24 GHz.

Les puces mobiles de pointe ont été requises pour leur utilisation, car elles étaient capables de gérer des fréquences et des vitesses de transfert de données élevées. Les fréquences à haut débit sont essentiellement nouvelles dans le domaine des télécommunications sans fil, et elles ont reçu un nouveau nom, « mmWave », en raison de leur longueur d'onde allant de 4 à 12 millimètres.

La 5G à haut débit ou à ondes millimétriques offre des performances de transfert de données sans fil sans précédent. Cette rapidité présente de nombreux bénéfices pour les communications sans fil. Ces fréquences 5G permettent une augmentation de la capacité globale du réseau, une amélioration de la couverture, des débits de données plus rapides aux utilisateurs et la possibilité de connecter plus d'appareils.

Les zones densément peuplées comme les villes, les arènes, les stades, les centres commerciaux, les gratte-ciels et les zones urbaines font appel aux fréquences à large bande. Ces fréquences permettent d'accéder à Internet à un débit très élevé et à faible latence, ce qui permet des applications sans fil comme les véhicules autonomes, l'informatique de pointe, la réalité augmentée et virtuelle, la chirurgie à distance, et bien d'autres pratiques encore. Étant donné leurs fréquences, il est très probable que les signaux en bande haute soient entravés par les arbres, les voitures, les êtres humains et les bâtiments, et leur portée est limitée (environ quelques dizaines de mètres). Pourtant, le secteur des télécommunications a dû faire face aux

difficultés de la transmission en ondes millimétriques en utilisant de nouvelles technologies comme la formation de faisceaux 5G et les technologies de petites cellules qui offrent une connectivité en bande large à plusieurs centaines de mètres d'une station de base 5G [23].

I.4.2. Petites cellules (Small cells)

I.4.2.1. Qu'est-ce que la technologie des petites cellules ?

Le terme générique "5G Small Cell" est employé pour décrire un système de transmission sans fil à faible puissance et à courte portée (ou "station de base") qui couvre de petites zones géographiques ou de petits espaces intérieurs et extérieurs à proximité illustré dans la figure I.6.

Les petites cellules ont les mêmes caractéristiques que les stations de base utilisées par les entreprises de télécommunications depuis de nombreuses années. Cependant, elles sont spécifiquement conçues pour gérer les débits de données élevés du haut débit mobile et les densités élevées de dispositifs à faible vitesse et consommation d'énergie dans l'Internet des objets (IoT). Ces capacités les rendent cruciales pour la planification des cellules 5G afin de fournir :

- Des vitesses ultrarapides
- Un million d'appareils par mile carré
- Des latences dans la plage des millisecondes [24]

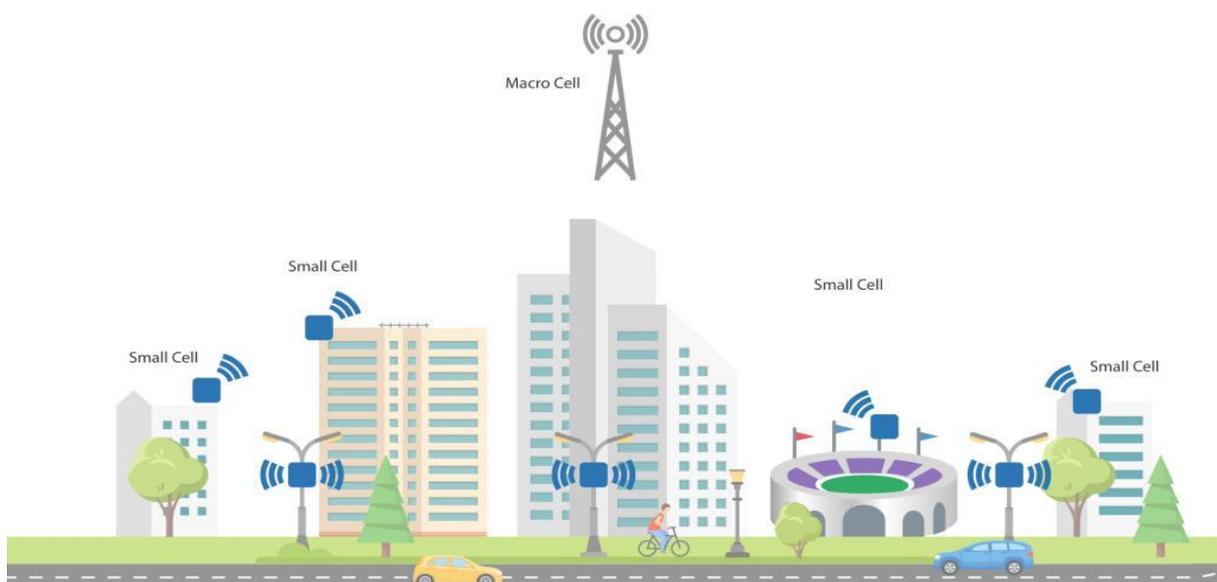


Figure I.6- La technologie des petites cellules [24]

I.4.2.2. Fonctionnement des émetteurs-récepteurs pour petites cellules

Les petites cellules améliorent l'exploitation de la technologie de MIMO (entrées multiples, sorties multiples), du beamforming et des ondes millimétriques (mmWave).

Ce concept simplifie le déploiement des stations de transmission et accélère la mise en œuvre. De plus, ces émetteurs-récepteurs peuvent être montés au mur pour des applications intérieures. Les petites tours et les lampadaires sont employés pour la couverture extérieure. Les connexions de retour sont moins complexes qu'auparavant et se composent habituellement de fibres optiques, de câbles ou de micro-ondes.[25]

I.4.2.3. Types de petites cellules

Il existe aujourd'hui trois types de petites cellules dans l'industrie :

- Les femtocellules
- Picocellules
- Les microcellules.

Chaque type se distingue par sa capacité de couverture et le nombre d'utilisateurs individuels qu'il peut prendre en charge. [25]

Le tableau suivant montre les types de petites cellules [26].

Type de cellule	Nombre d'utilisateurs	Rayon de couverture(km)	Puissance (W)	Zone
Femtocellule	1 à 30	0,01 à 0,1	0,001 à 0,25	Intérieur
Picocellule	30 à 100	0,1 à 0,2	0,25 à 1	Intérieur/ Extérieur
Microcellule	100 à 2000	0,2 à 2	1 à 10	Intérieur/ Extérieur
Macrocellule	> 2000	8 à 30	10 à > 50	Extérieur

Tableau I.1-Type de petites cellules

I.4.3. MIMO Massive (Multiple Inputs - Multiple Outputs)

Afin de répondre aux besoins croissants d'un grand nombre d'utilisateurs, les systèmes sans fil actuels utilisent des techniques MIMO pour atteindre des performances et une efficacité énergétique élevées. Les technologies MIMO nouvellement développées telles que le MIMO mono-utilisateur (SU-MIMO) et le MIMO multi-utilisateur (MU-MIMO) ne suffisent pas à répondre aux besoins croissants, car le nombre d'utilisateurs sans fil a augmenté de manière exponentielle.

MIMO massif (Massive MIMO) est la technologie la plus intéressante pour la 5G et au-delà, combinant des centaines, voire des milliers d'antennes et de stations de base à desservir. Plusieurs utilisateurs en même temps [27]. Elle se caractérise par l'utilisation d'un grand nombre de micro-antennes « intelligentes » sur le même panneau (actuellement 8 à 128, mais ce nombre augmentera avec l'utilisation de mmWave), comme illustré dans la figure I.7.

L'utilisation du massive MIMO présente un attrait double depuis un point de vue technique. Premièrement, cette technologie offre la possibilité d'augmenter les débits grâce à l'application du multiplexage spatiotemporel. Deuxièmement, elle permet de concentrer l'énergie sur un terminal spécifique afin d'améliorer son bilan de liaison en utilisant le beamforming, une technique de formation de faisceau [28]. La figure ci-dessous montre le système Massive MIMO.

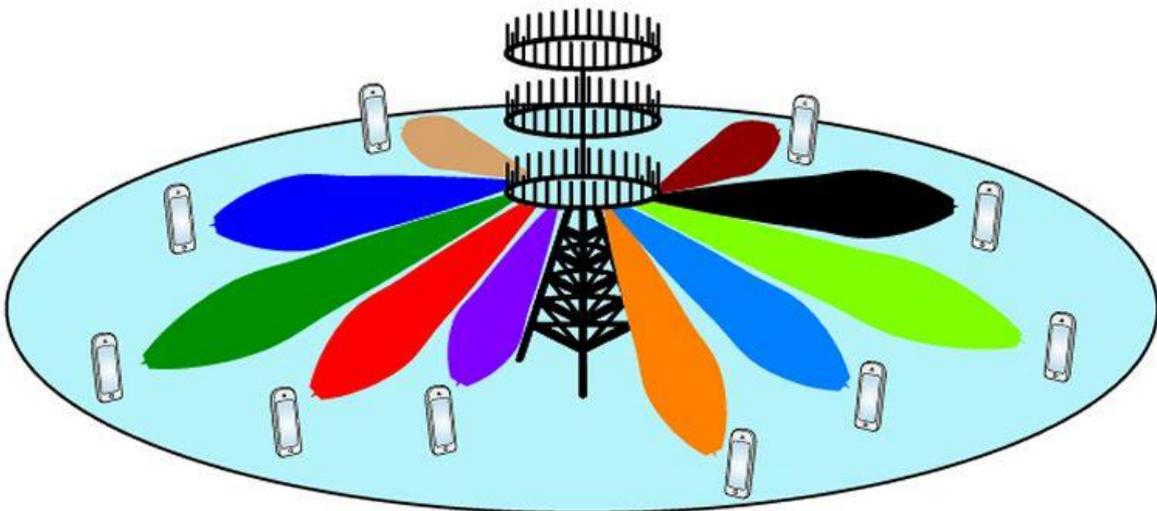


Figure I.7 - Système Massive MIMO [29]

I.4.4. La formation de faisceaux (Beamforming)

I.4.4.1. Qu'est-ce que le beamforming ?

Le beamforming implique l'émission d'ondes synchronisées depuis une antenne sous la forme de faisceaux. Cela permet de cibler des zones avec précision, contrairement aux systèmes de rayonnement traditionnels qui émettent des ondes dans toutes les directions de l'espace. Ce n'est pas une technologie récemment développée, elle est déjà employée depuis longtemps dans le domaine de la communication par satellites et des radars. Mais avec la 5G, elle sera introduite pour la première fois dans les communications mobiles [30].

I.4.4.2. Pourquoi le beamforming est utilisé dans la 5G ?

Le principe de la 5G est de diriger le faisceau radio directement vers l'utilisateur. Le beamforming permet de réduire les interférences entre les ondes radio, d'obtenir un signal plus fiable et d'économiser de l'énergie. Ces trois conditions font partie des exigences essentielles que doit remplir la 5G. Les ondes du signal 5G ont des fréquences plus élevées, elles peuvent donc transmettre plus d'informations plus rapidement. Il est possible d'éviter les encombrements dans les endroits où de nombreuses connexions sont simultanément effectuées, garantissant ainsi un débit optimal.

De plus, le réseau peut être plus varié à l'échelle locale : il est possible que des services totalement différents soient utilisés simultanément sur le même réseau [30]. La figure I.8 montre le principe du beamforming.

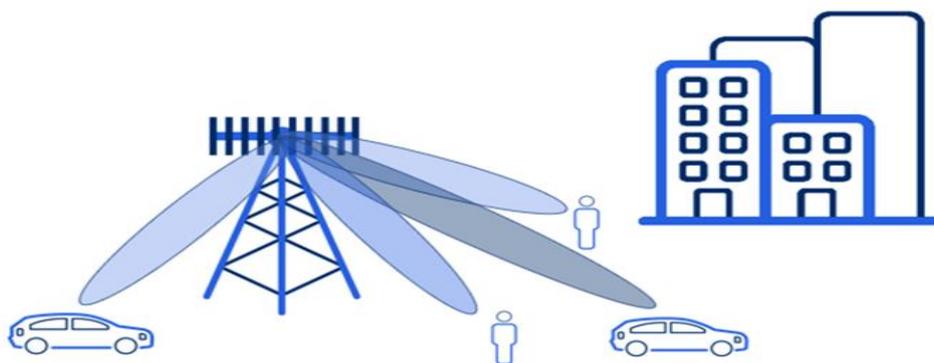


Figure I.8 - La technologie de Beamforming [31]

I.4.5. Full-Duplex

Dans le contexte de la technologie 4G, les flux de données montants et descendants utilisent des fréquences différentes afin d'assurer une transmission correcte des données. En revanche, la 5G est dotée d'un mécanisme permettant de réacheminer les données sur la même fréquence, ce qui contribue à fluidifier le réseau et à améliorer l'expérience utilisateur.[32]

Le canal de communication utilisé pour la 5G est le full duplex. Ce qui signifie que, lorsqu'un appareil mobile est connecté à une antenne, l'antenne et l'appareil pourront tous les deux transmettre ou recevoir des informations simultanément. Ainsi, chaque canal devient beaucoup plus efficace en termes de transmission d'informations [33]. La figure I.9 montre la technologie Full-Duplex.

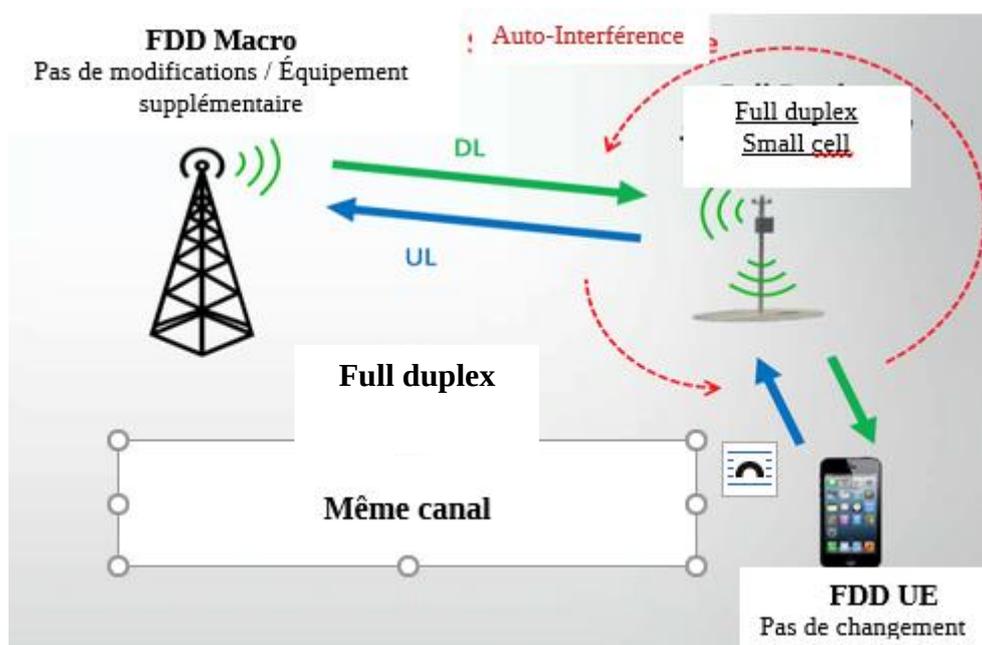


Figure I.9- la technologie Full-Duplex [34]

I.5. Architecture

La 5G se distingue par l'introduction d'une nouvelle interface radio (NR), qui offre une flexibilité permettant de prendre en charge une variété de services distincts. Une autre particularité essentielle de la 5G est que le réseau d'accès 5G peut être connecté non seulement à un nouveau réseau central 5G, mais également au réseau central 4G (LTE). On désigne cette architecture sous le nom de "Non-Standalone" (NSA), tandis que l'architecture où le réseau d'accès 5G est connecté à un réseau central 5G est appelée "Standalone" (SA) [35].

I.5.1. L'architecture NSA versus SA

Deux options de déploiement sont définies pour la 5G : L'architecture (NSA), et l'architecture (SA) sont montrées dans la figure I.10 [36].

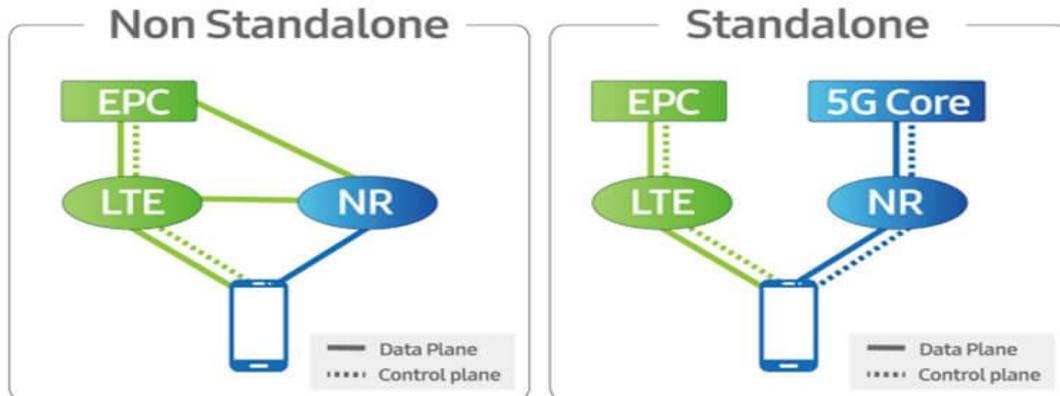


Figure I.10- SA vs NSA [36]

I.5.1.1. L'architecture (NSA)

Définition : NSA « non autonome » est une méthode de déploiement initiale pour la 5G qui repose sur l'infrastructure 4G LTE déjà en place. En mode NSA, le plan de contrôle est basé sur le réseau 4G (LTE), tandis que le plan utilisateur peut utiliser à la fois les ressources 4G et 5G. Cela implique que le réseau central LTE est responsable de la gestion des fonctions de contrôle pour le LTE et la 5G.

Double connectivité : NSA offre la possibilité d'une double connectivité, où un appareil utilisateur peut se connecter simultanément aux réseaux 4G et 5G. En combinant les ressources des deux générations, cela offre des débits de données plus rapides et une capacité réseau améliorée.

Déploiement rapide : La NSA est perçue comme une méthode plus rapide et plus pratique pour mettre en place des services 5G, car elle utilise l'infrastructure 4G déjà en place. Il offre aux opérateurs la possibilité d'intégrer des capacités 5G sans nécessiter un réseau central complètement neuf.

Plan de contrôle LTE : Dans les déploiements NSA, la signalisation du plan de contrôle, y compris la gestion de la mobilité et le contrôle de la connectivité, est gérée par le réseau central LTE. Le plan utilisateur est assuré par la station de base 5G (gNB), ce qui permet d'améliorer les débits de données et la capacité. [37]

I.5.1.2. L'architecture (SA)

Définition : Le déploiement (SA) de la 5G est une architecture indépendante qui ancre à la fois le plan de contrôle et le plan utilisateur dans le réseau central 5G, sans dépendre de l'infrastructure 4G existante, représentant ainsi la vision à long terme des réseaux 5G.

Nouveau réseau central : SA nécessite le déploiement d'un nouveau réseau central 5G avec des fonctionnalités avancées pour optimiser les capacités de la technologie 5G, y compris le découpage du réseau, une latence améliorée et une meilleure prise en charge des services variés.

Fonctionnalités améliorées : (SA) propose des fonctionnalités et des capacités améliorées par rapport au déploiement non autonome (NSA), offrant ainsi une plus grande flexibilité, et efficacité en exploitant pleinement les capacités innées du réseau central 5G.

Découpage du réseau : (SA) offre la possibilité de découper le réseau, permettant aux opérateurs de créer des réseaux virtuels et isolés personnalisés pour répondre aux besoins spécifiques des cas d'utilisation ou des services avec des exigences variables.

Prise en charge de la faible latence : Le déploiement autonome (SA) de la 5G offre une prise en charge améliorée des applications nécessitant une faible latence, ce qui en fait une solution adaptée aux services exigeant une communication ultra-fiable et à faible latence (URLLC), tels que l'automatisation industrielle et les véhicules autonomes.

Vision à long terme : (SA) est considéré comme la vision à long terme des réseaux 5G, et les opérateurs se concentrent de plus en plus sur cette transition pour exploiter pleinement le potentiel des technologies 5G à mesure qu'ils font évoluer leurs réseaux [37].

I.5.2. Le réseau central 5G

Le réseau central 5G, également connu sous le nom de 5GS, est l'un des trois principaux éléments du système 5G, aux côtés du réseau d'accès 5G (5G-AN) et des équipements utilisateurs (UE). Le cœur de la 5G est basé sur une architecture de services (SBA) en nuage, qui assure des fonctionnalités avancées telles que l'authentification, la sécurité, la gestion des sessions et l'agrégation du trafic des appareils connectés. Cette architecture complexe nécessite une interconnexion sophistiquée des fonctions réseau, comme illustré dans le schéma du cœur de la 5G.

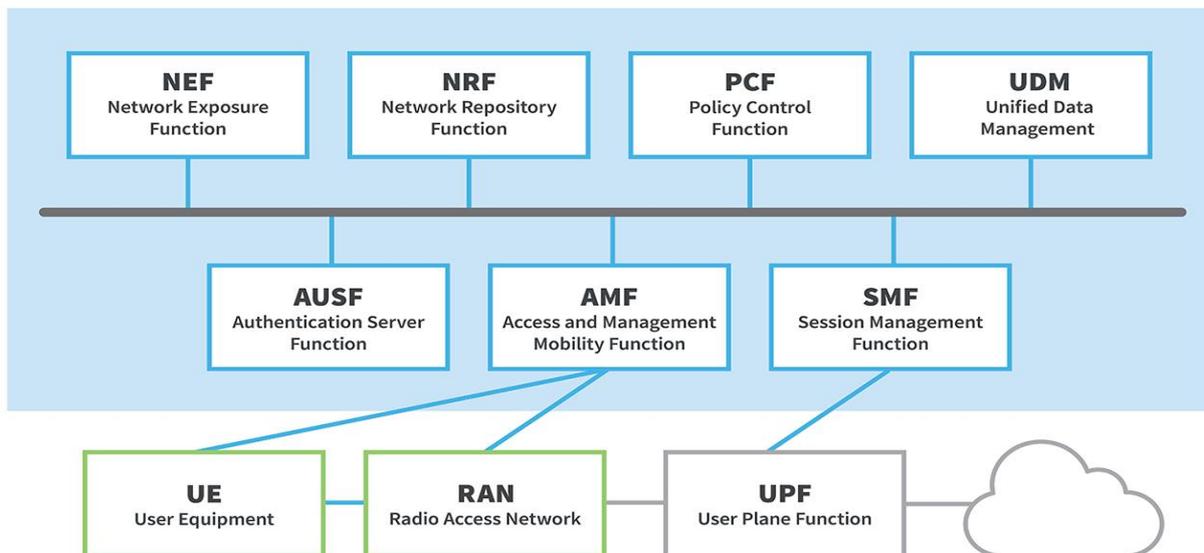


Figure I.11- les principaux composants d'un réseau central 5G [38]

Les composants de l'architecture centrale 5G comprennent :

- Fonction plan utilisateur (UPF)
- Réseau de données (DN), par exemple les services de l'opérateur, l'accès à l'Internet ou les services de tiers.
- Fonction centrale de gestion de l'accès et de la mobilité (AMF)
- Fonction de serveur d'authentification (AUSF)
- Fonction de gestion de session (SMF)
- Fonction de sélection de tranche de réseau (NSSF)
- Fonction d'exposition réseau (NEF)
- Fonction de référentiel NF (NRF)
- Fonction de contrôle des politiques (PCF)
- Gestion unifiée des données (UDM)
- Fonction d'application (AF) [38]

I.6. Application

I.6.1. Les familles d'usages de la 5G

Trois catégories principales d'utilisation (définies par l'UIT, sous le terme IMT-2020(5G)), avec leurs exigences spécifiques et éventuellement incompatibles, sont en train de se développer et pourraient répondre aux besoins professionnels mentionnés précédemment :

- **mMTC – Massive Machine Type Communications** : Communication entre de nombreux objets ayant des exigences de qualité de service différentes. Le but de cette catégorie est de s'adapter à l'augmentation exponentielle de la densité des objets connectés.
- **eMBB – Enhanced Mobile Broadband** : connexion à haut débit en extérieur et en intérieur, assurant une qualité de service uniforme
- **uRLLC – Ultra-reliable and Low Latency Communications** : Des communications extrêmement fiables pour les besoins critiques, avec une latence extrêmement faible, afin d'accroître la réactivité [39].

La figure ci-dessous montre des exemples des cas d'usages couverts par les trois déclinais.

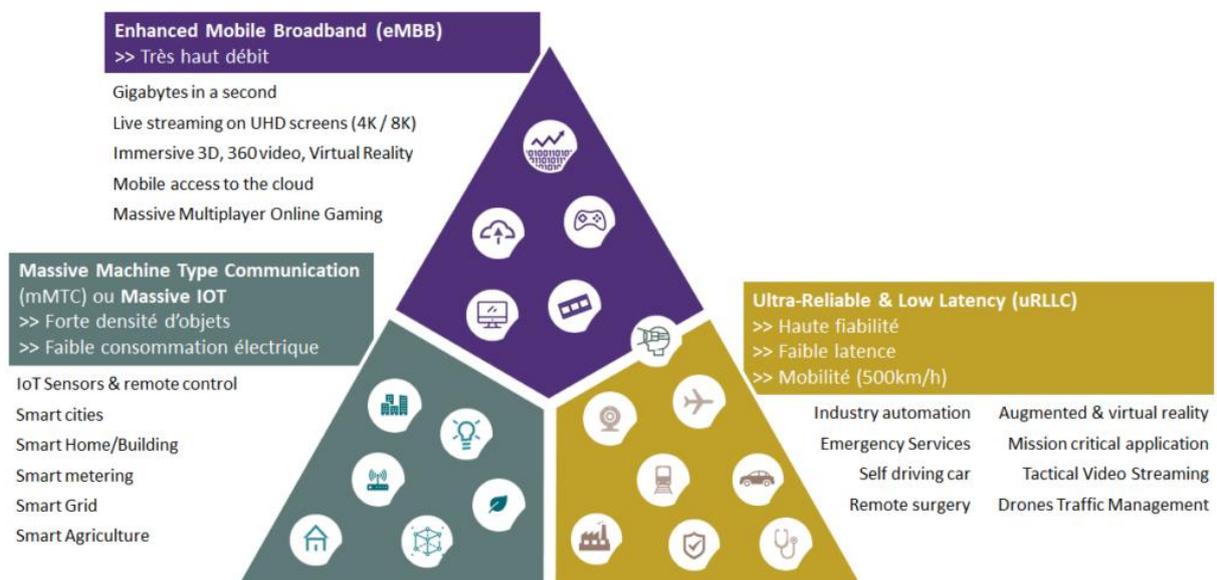


Figure I.12 - Exemples des cas d'usages couverts par les trois déclinaisons [40]

I.6.2. Exemples d'applications

La technologie 5G ouvre la voie à un nouvel ensemble d'applications et de possibilités. En voici quelques exemples :

I.6.2.1. IoT

La 5G assure d'importantes améliorations en ce qui concerne le débit, la latence, la densité de connexion et l'efficacité énergétique. Ces différentes fonctionnalités répondent aux exigences de l'application utilisant la technologie IoT [41].

La communication en temps réel est maintenant possible pour les appareils IoT connectés à la 5G grâce à une faible latence et une bande passante élevée. Cette connectivité avancée ouvre la voie à de nouvelles applications et solutions intelligentes dans plusieurs secteurs. La 5G IoT est parfaite pour des applications essentielles, comme les voitures autonomes, les systèmes de santé connectés en temps réel, les villes intelligentes et bien d'autres encore, car elle permet de connecter simultanément des millions d'appareils sans latence significative [42].

La figure I.13 montre des différentes applications de de l'IoT.

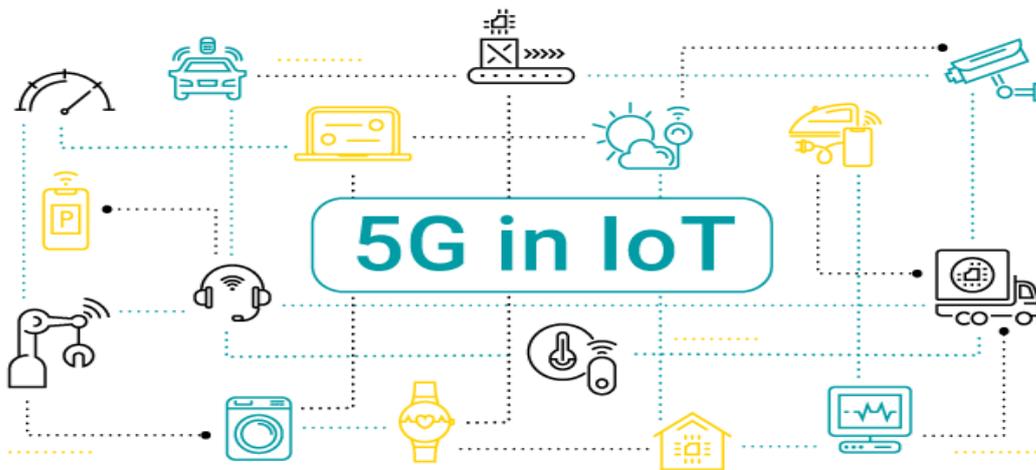


Figure I.13 - Applications de l'IoT [43]

I.6.2.2. Villes intelligentes

La réalisation de la smart city, ou ville intelligente, a été rendue possible grâce à la technologie 5G. La 5G, en offrant une connectivité haut débit à faible latence, permet le déploiement massif de capteurs économes en énergie. Ces capteurs permettent la collecte en temps réel de données cruciales dans divers domaines tels que la circulation, les bâtiments publics, la sécurité publique et l'énergie. La création de répliques numériques de la ville, basées sur ces données, offre une vision globale et détaillée des systèmes urbains, facilitant ainsi leur surveillance et leur gestion optimisée.

Grâce à la 5G, il est possible de surveiller la circulation en haute définition et en temps réel, de contrôler la durée des feux grâce à l'intelligence artificielle, de renforcer la sécurité des bâtiments publics face aux cyber menaces, d'améliorer la surveillance grâce à des caméras plus détaillées et de mieux gérer l'énergie en détectant les pannes et en évitant le gaspillage.

En résumé, la convergence entre la 5G et la smart city ouvre de nouvelles perspectives pour une gestion urbaine scientifiquement avancée et durable [44].



Figure I.14 - ville intelligente [45]

I.6.2.3. L'industrie

La 5G répond aux besoins de l'industrie en termes de gestion des données, offrant fiabilité, sécurité et rapidité. Grâce à sa faible latence, elle permet un échange efficace de données en temps réel, favorisant la prise de décision agile et la maintenance prédictive.

Le Network Slicing permet une réponse ciblée aux besoins spécifiques de l'industrie, en allouant des ressources spécifiques à chaque usage, ce qui permet d'améliorer le débit

L'automatisation en temps réel grâce à la 5G favorise un futur durable en optimisant la production et en réduisant les dépenses énergétiques. Elle améliore également la sécurité et le confort au travail, offrant des solutions telles que des robots mobiles autonomes et des exosquelettes intelligents.

La 5G offre une connectivité rapide et fiable pour créer un environnement de travail plus sûr et agréable [46]. La figure ci-dessous montre les services de l'Industrie 4.0.

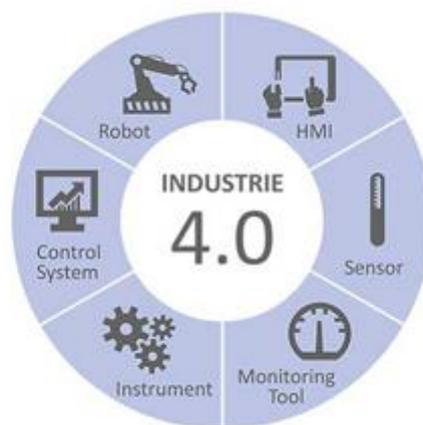


Figure I.15- Services de mise en œuvre de l'Industrie 4.0 [47]

I.6.2.4. Médias intelligents

Streaming de contenu :

La 5G offre des vitesses accrues, ce qui a un impact significatif sur la qualité du streaming vidéo sur les smartphones. Les utilisateurs peuvent profiter d'une expérience de streaming de haute qualité, avec une réduction notable des temps de chargement et des interruptions, même en période de congestion du réseau. De plus, les appareils mobiles dotés d'écrans 4K pourront exploiter pleinement les capacités de la 5G en diffusant du contenu avec une résolution maximale. Cela se traduit par une expérience immersive et détaillée, offrant aux utilisateurs une visualisation optimale de leur contenu vidéo [48].



Figure I.16– Le streaming de contenu [49]

Expériences immersives :

L'immersion offerte par le streaming vidéo sera considérablement améliorée grâce à l'arrivée de la 5G. Grâce à un streaming en temps réel sans latence, la réalité virtuelle (VR) et la réalité augmentée (AR) pourront offrir aux utilisateurs la possibilité de s'immerger encore plus dans les univers virtuels ou d'interagir avec des objets numériques intégrés à leur environnement réel [50]. La figure I.17 montre une expérience immersive.



Figure I.17 - La technologie immersive [51]

I.6.2.5. Applications pratiques

L'intégration des réseaux 5G dans les systèmes éducatifs offre des solutions potentielles pour résoudre les problèmes de connectivité et simplifier la logistique des écoles. Cette avancée technologique permettra d'améliorer la qualité de l'ensemble du processus d'apprentissage en aidant les enseignants à optimiser l'expérience de leurs élèves et étudiants [52]. En médecine, La 5G ouvre la voie à la télémédecine avancée et à la surveillance à distance des patients, améliorant l'accessibilité aux soins médicaux [53].

I.7. Défis et considérations

- **Coûts** : Le déploiement de la technologie 5G implique des coûts significatifs liés à l'acquisition de bandes de fréquences et à l'investissement dans les infrastructures nécessaires. En outre, afin de satisfaire les exigences élevées liées à la 5G, cette technologie repose également sur d'autres avancées technologiques.
- **Interrogations légales** : La 5G et ses avancées en matière de transmission de données soulèvent des inquiétudes quant à la protection des données des utilisateurs.
- **Risques liés à la cybersécurité** : La 5G est utilisée dans d'autres secteurs que la communication grand public (comme l'industrie par exemple). un risque accru d'attaques informatiques pour plusieurs acteurs.

- **La santé** : La santé peut être impactée par le réseau 5G en raison des ondes électromagnétiques qui émettent des ondes millimétriques nocives pour l'organisme. Leur impact peut se traduire par des troubles neurologiques, un stress cellulaire, voire des risques de cancer.[54]

I.8. Conclusion

La 5G devrait être déployée et apporter une connectivité omniprésente aux utilisateurs mobiles. Outre l'augmentation attendue des débits de données en Gbit/s, les plus grands défis de la 5G sont le grand nombre de machines connectées et la multiplication par 1 000 du trafic de données mobiles. Ce chapitre a donné un aperçu du potentiel de la 5G. Mais en bref, la nouvelle génération de technologie 5G devrait faire progresser ces évolutions technologiques en attribuant de nouvelles fréquences aux communications mobiles. Dans le prochain chapitre nous aborderons davantage les réseaux d'accès multiple et leur caractéristique.

Chapitre II :

Les techniques d'accès multiples

II.1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons révélé que l'un des défis majeurs dans le développement des réseaux sans fil de cinquième génération (5G) réside dans la gestion efficace du spectre radioélectrique afin de répondre aux besoins croissants de connectivité et de débit de données.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux techniques d'accès multiples utilisées dans la 5G, en mettant l'accent sur deux approches majeures : l'accès Multiple Orthogonal (OMA) et l'accès Multiple Non Orthogonal (NOMA).

Tout d'abord, nous commencerons par une définition approfondie des accès multiples qui sont des méthodes jouent un rôle crucial dans la gestion efficace des ressources spectrales et dans l'amélioration des performances du réseau.

Ensuite, nous nous concentrerons sur l'OMA, qui repose sur le principe d'orthogonalité. L'orthogonalité fait référence à la séparation claire des ressources spectrales attribuées à chaque utilisateur. Nous explorerons les différentes techniques d'OMA qui ont été utilisées dans les technologies précédentes et dans la 5G.

Par la suite, nous nous tournerons vers le NOMA, une approche révolutionnaire qui vise à exploiter davantage le spectre radioélectrique en permettant à plusieurs utilisateurs de partager les mêmes ressources spectrales simultanément. Nous montrerons les concepts des types NOMA, et nous nous concentrerons sur le domaine de puissance NOMA qui utilise le codage de superposition (SC) au niveau de l'émetteur et l'annulation successive des interférences (SIC) au niveau du récepteur.

Enfin, nous analyserons l'efficacité spectrale et énergétique du NOMA, mettant en lumière ses avantages potentiels par rapport à l'OMA traditionnel. Nous explorerons les applications pratiques de l'OMA et du NOMA.

II.2. L'accès multiple

L'accès multiple est une technique qui permet à plusieurs utilisateurs mobiles de partager efficacement le spectre alloué. Étant donné la limitation du spectre, il est essentiel de partager afin d'améliorer la capacité globale sur une zone géographique. Cela se fait en autorisant l'utilisation simultanée de la bande passante disponible par plusieurs utilisateurs.

Dans les réseaux informatiques et les télécommunications, l'accès multiple permet à plusieurs terminaux de se connecter au même support de transmission multipoint afin de transmettre sur celui-ci et de partager sa capacité [55].

Pour l'accès multiple, parmi les catégories importantes : l'accès multiple orthogonal et l'accès multiple non orthogonal, comme illustré dans la figure II.1.

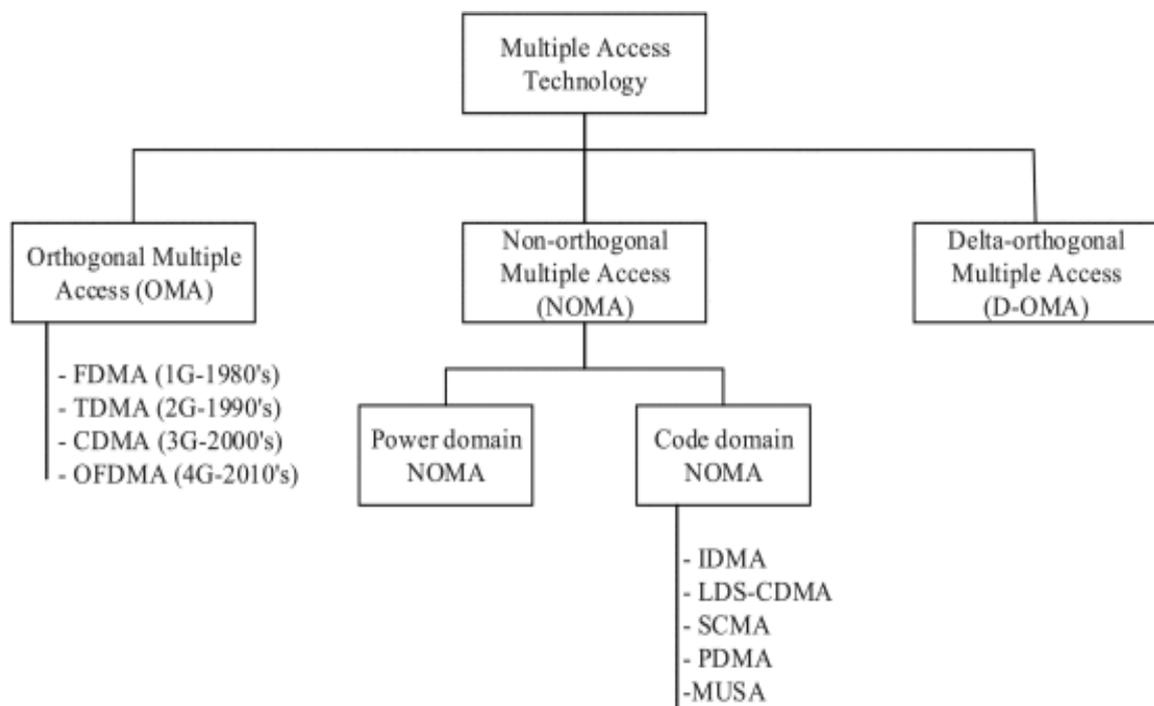


Figure II.1 - Diagramme schématique sur les technologies d'accès multiples [56]

II.3. L'accès multiples orthogonales OMA

II.3.1. L'orthogonalité

Les signaux sont orthogonaux lorsqu'ils sont indépendants les uns des autres. L'orthogonalité est une caractéristique qui facilite la transmission des signaux multiples de l'information sur un canal commun et leur détection sans interférence. La perte d'orthogonalité entraîne des interférences ISI entre ces signaux d'information et dégrade le système de transmission.

Les signaux dans les systèmes FDM et TDM sont orthogonaux.

- **TDM**

Plusieurs canaux de communication à faible débit peuvent être regroupés sur un seul canal à débit plus élevé grâce au multiplexage TDM.

- **FDM**

Le multiplexage par répartition en fréquence (FDM) consiste à diviser une large bande de fréquences en sous-bandes plus étroites [57].

Les techniques de modulation appliquées aux canaux à trajets multiples sont devenues un élément essentiel dans la planification et la construction des futurs réseaux de communication mobiles universels. Pour cela, la technique OFDM est employée dans les communications sans fil 4G en raison de sa grande capacité à résister aux interférences [58].

- **L'OFDM**

Le multiplexage par répartition de fréquence orthogonale est une technique de modulation multi-porteuse qui réalise la multiplication de plusieurs signaux en utilisant des porteuses orthogonales, et étroitement séparées.

L'OFDM ressemble à la technique traditionnelle du multiplexage par répartition en fréquence (FDM), mais elle utilise des fréquences orthogonales les unes par rapport aux autres. Cela permet le chevauchement entre les sous-porteuses et garantit une augmentation significative de l'efficacité spectrale élevée par rapport aux techniques FDM classiques, comme le montre les figures II.2, et II.3.

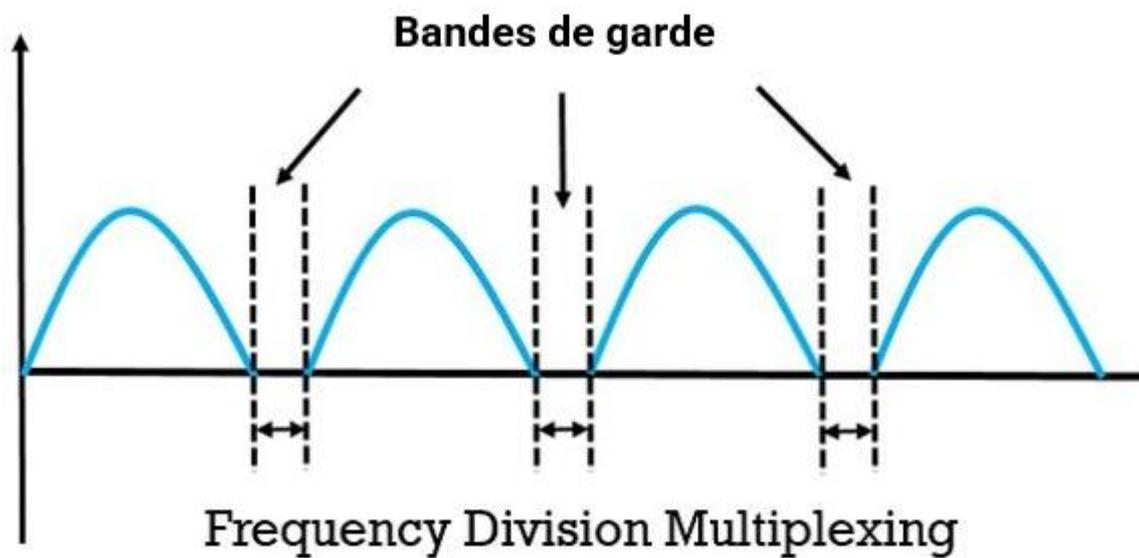


Figure II.2 - Principe de FDM [59]

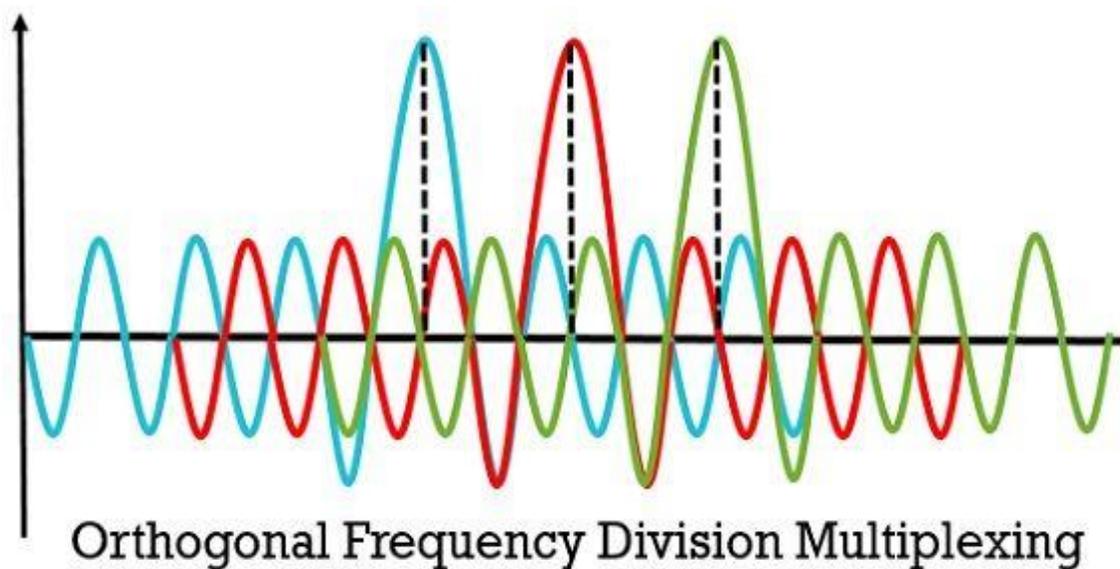


Figure II.3 - Principe de l'OFDM [59]

En FDM, les porteuses sont séparées de manière étroite par des bandes de garde afin de minimiser les interférences possibles entre les canaux adjacents. La présence de ces bandes de garde n'est pas requise en OFDM, car elle permet en réalité le chevauchement des sous-porteuses sans interférences grâce à la propriété de l'orthogonalité fréquentielle spécifique. De cette manière, cela favorise une utilisation optimale de la bande passante disponible [59].

Des Techniques d'accès multiple orthogonal (OMA), tels que l'accès multiple à division de fréquence (FDMA), l'accès multiple à division de temps (TDMA) et l'accès multiple à division de code (CDMA) ont été utilisés dans 1G, 2G et 3G, respectivement. Les principes de ces techniques sont illustrés dans la ci-dessous [60].

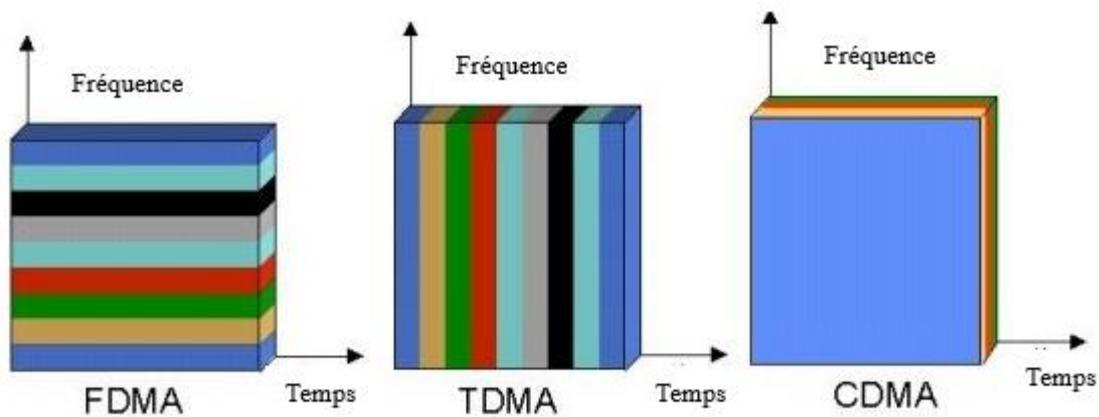


Figure II.4 - Principes des techniques FDMA, TDMA, CDMA [60]

II.3.2. La technique d'accès multiple par une répartition de fréquences (FDMA)

FDMA, l'accès multiple par répartition en fréquence. La technologie par laquelle le domaine fréquentiel est divisé en plusieurs bandes de fréquences, et chaque utilisateur a attribué une bande différente afin d'éviter les chevauchements spectraux. Les utilisateurs peuvent donc transmettre en continu sur une bande de fréquences limitée.

Pour les systèmes de communication sans fil de première génération, l'utilisation du FDMA est simple et abordable. Il est employé dans des systèmes analogiques et il n'est pas nécessaire de synchroniser les utilisateurs. En revanche, cela nécessite l'utilisation d'intervalles de garde entre bandes de fréquences. Cela réduit la bande passante disponible et nécessite l'utilisation de filtres de haute précision pour être efficace. Il ne propose également à chaque utilisateur qu'une largeur de bande relativement étroite [61].

La FDMA présente plusieurs avantages, notamment :

Réduction des coûts : le FDMA réduit les coûts par rapport à d'autres méthodes.

Faible interférence entre symboles : l'égalisation n'est pas nécessaire, ce qui se traduit par une interférence entre symboles plus faible [62].

La synchronisation n'est pas nécessaire : contrairement à certaines autres techniques d'accès multiple, le FDMA ne nécessite pas une synchronisation stricte entre les utilisateurs. Cela simplifie la mise en œuvre du système et réduit la complexité.

Implémentation simple et facile : le FDMA est relativement simple à mettre en œuvre en termes de ressources matérielles et d'algorithmes. Cette simplicité en fait un choix attractif pour les systèmes de communication [63].

Les inconvénients de la FDMA sont les suivants :

La largeur de bande du canal FDMA est étroite : chaque canal FDMA a une bande passante limitée, ce qui peut restreindre la capacité de données pouvant être transmises.

La présence de la bande de garde : le FDMA exige la présence de bandes de garde entre les canaux adjacents pour minimiser les interférences, ce qui réduit l'utilisation efficace du spectre disponible.

Fréquence allouée de façon permanente : une fois les fréquences allouées dans un système FDMA, elles sont attribuées de manière permanente aux utilisateurs, ce qui peut limiter la flexibilité pour s'adapter aux besoins de communication changeants.

Interférence de diaphonie : la diaphonie entre différentes fréquences dans un système FDMA peut causer des interférences et perturber la qualité de transmission [63].

II.3.3. La technique d'accès multiple à répartition dans le temps (TDMA)

L'accès multiple par répartition dans le temps (TDMA) est une technique utilisée dans les communications pour maximiser l'efficacité de la bande passante disponible, et partager un canal de communication entre plusieurs utilisateurs en le divisant en différents time slots. Chaque utilisateur se voit attribuer un time slot spécifique, pendant lequel il peut transmettre et recevoir des données.

Il y a trois parties dans l'intervalle de temps : une pour l'émission, une pour la réception et une troisième pour la transition entre les deux. Lorsqu'un utilisateur n'émet ni ne reçoit, le time slot est laissé libre aux autres utilisateurs. L'intervalle de temps alloué à chaque utilisateur est très court, généralement de l'ordre de quelques millisecondes ou moins, permettant à de nombreux utilisateurs de partager un canal sur une courte période de temps. Cela signifie qu'un grand nombre d'utilisateurs peuvent utiliser un canal de communication limité sans interférer les uns avec les autres.

Le TDMA est utilisé efficacement dans les réseaux de téléphonie mobile, les systèmes radio et les satellites, entre autres applications [64].

La TDMA présente plusieurs avantages, notamment :

Utilisation efficace de la bande passante : En utilisant le TDMA, chaque station dispose d'un créneau horaire dédié pour transmettre des données, assurant ainsi une utilisation efficace de la bande passante. Cela permet aux utilisateurs de consommer une grande quantité de données pendant leur créneau horaire, sans partager la bande passante avec d'autres stations.

Réduction des interférences : L'attribution de créneaux horaires spécifiques à chaque station dans le TDMA réduit les interférences, les collisions et améliore les performances du réseau en évitant les problèmes de nœuds cachés et exposés, ce qui garantit un canal réservé sans interférence d'autres.

Fiabilité améliorée : Le TDMA améliore la fiabilité en éliminant les collisions entre appareils et en utilisant des mécanismes de correction d'erreurs, assurant ainsi la précision et la fiabilité des données transmises. Il est particulièrement adapté aux applications où l'intégrité des données est cruciale, telles que la communication sans fil, la communication par satellite et l'automatisation industrielle [65].

Les inconvénients de la TDMA sont les suivants :

Les créneaux horaires prédéfinis du TDMA peuvent causer des problèmes lors du passage d'une cellule à une autre, avec le risque d'appels coupés si tous les créneaux horaires sont occupés dans la cellule suivante, et l'absence de tonalité d'appel si tous les créneaux horaires sont occupés dans la cellule actuelle.

Distorsion multipath : Une autre limitation du TDMA est sa sensibilité à la distorsion multipath. Les signaux peuvent rebondir sur plusieurs bâtiments avant d'arriver, ce qui entraîne des interférences et des problèmes de réception [66].

La synchronisation est nécessaire dans le multiplexage par répartition dans le temps [67].

II.3.4. La technique d'accès multiple par répartition en code (CDMA)

L'accès multiple par répartition en code (CDMA) est une technologie cellulaire numérique qui utilise des techniques d'étalement du spectre pour transmettre des données.

À la différence d'autres technologies d'accès multiple comme le TDMA ou le FDMA, le CDMA permet à plusieurs utilisateurs de transmettre simultanément sur la même bande de fréquence [68]. Ceci est réalisé en attribuant à chaque utilisateur un code unique, qui est utilisé pour moduler les signaux.

Ensuite, ces signaux modulés sont combinés avec d'autres signaux dans la même gamme de fréquences, mais grâce à leur code unique, ils peuvent être séparés et récupérés par un récepteur approprié [69].

Les avantages du CDMA par rapport aux autres technologies de communication sans fil sont nombreux :

Capacité élevée : la capacité du réseau est considérablement augmentée grâce à la possibilité pour plusieurs utilisateurs de partager la même bande de fréquences grâce au CDMA.

Sécurité améliorée : les codes uniques utilisés par chaque utilisateur améliorent la sécurité des communications, car il est compliqué pour un intrus de déchiffrer les données.

Qualité audio supérieure : la technologie de compression de voix utilisée dans le CDMA permet d'obtenir une qualité audio généralement supérieure à celle d'autres systèmes.

Flexibilité : la technologie du CDMA offre la flexibilité d'être appliquée à diverses plages de fréquences, offrant ainsi aux opérateurs la liberté de sélectionner l'option optimale correspondant à leurs exigences spécifiques [69].

Les inconvénients de la CDMA sont les suivants :

Dégradation des performances avec plus de clients : lorsque le nombre de clients augmente, l'efficacité du système CDMA et la nature globale de l'administration diminuent également.

Une absence d'itinérance mondiale : à la différence du GSM, le CDMA n'offre pas une itinérance mondiale transparente.

Synchronisation requise : le CDMA nécessite une synchronisation temporelle précise [70].

II.3.5. La technique d'Accès Multiple par répartition orthogonale de fréquence (OFDMA)

Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) est une technologie utilisée dans les systèmes de communication sans fil 4G (LTE) et 5G [71]. Cette technique, qui est basée sur l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), permet d'atteindre des débits élevés en exploitant la diversité des multiutilisateurs.

La technique OFDMA est une combinaison de l'OFDM, du TDMA et du FDMA (Frequency Division Multiple Access). La diversité fréquentielle et la robustesse aux multi trajets sont des avantages des techniques basées sur l'OFDM par rapport aux autres. L'OFDMA profite pleinement de cette diversité pour utiliser efficacement toutes les fréquences de la bande [72].

Elle permet le multi-accès à plusieurs utilisateurs en partageant les ressources radio entre eux. Son fonctionnement consiste à diviser la bande totale en plusieurs sous-bandes orthogonales de taille étroite, et plusieurs utilisateurs reçoivent des parties distinctes de la bande fréquentielle. Cette méthode permet de résoudre le problème des canaux sélectifs en fréquences, connu sous le nom d'ISI (Inter Symbol Interference).

De plus, elle permet d'obtenir un débit binaire plus élevé pour une même largeur spectrale grâce à son efficacité spectrale (nombre de bits transmis par Hertz), en plus de sa capacité à maintenir un débit élevé même dans des environnements défavorables [73]. La figure suivante montre l'OFDMA qui basée sur l'OFDM.

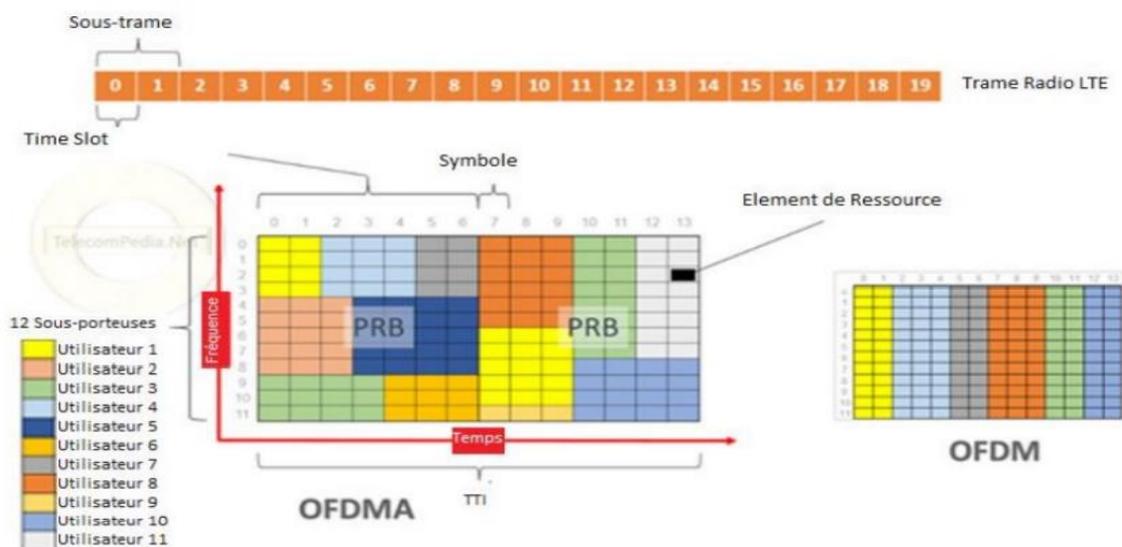


Figure II.5 - Principe de la technique OFDMA [74]

Elle offre également d'autres avantages :

Implémentation matérielle : la modulation et la démodulation OFDM dans un système OFDM sont optimisées pour le matériel, en utilisant des blocs iFFT et FFT, ce qui entraîne une implémentation plus simple.

Interférence intercellulaire : l'orthogonalité entre les sous-porteuses dans l'OFDM empêche à la fois l'interférence entre symboles (ISI) et l'interférence entre les transmissions des cellules voisines.

Flexibilité : elle permet des stratégies de modulation, de codage adaptatif, et de planifier les utilisateurs sur différentes sous-porteuses en fonction de la qualité de service. [75].

Les inconvénients de l'OFDMA sont les suivants :

Synchronisation : l'OFDM nécessite une synchronisation précise du côté récepteur pour la fréquence porteuse et le temps.

Peak-to-Average-Power Ratio (PAPR) : l'OFDM présente un rapport crête-sur-moyenne élevé, ce qui peut entraîner une distorsion du signal, des taux d'erreur élevés et des interférences entre canaux voisins [75].

II.3.6. La technique d'accès multiple par répartition en fréquence à porteuse unique (SC-FDMA)

Le SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Accès), est une technique d'accès multiple qui combine la technique de transmission mono porteuse SC FDE et une allocation de ressource radio par répartition de fréquences FDMA [76].

En raison de la transmission séquentielle sur une porteuse et de l'accès à plusieurs porteuses, le système monoporteuse SC-FDMA offre l'avantage d'avoir un faible PAPR, un critère extrêmement avantageux pour la consommation des batteries dans les téléphones mobiles. En raison de ces qualités, le système SC-FDMA a été choisi comme méthode d'accès multiple pour les communications en voix montante dans la norme LTE ou 5G [77].

La figure ci-dessous montre la différence entre la transmission parallèle et séquentielle des systèmes OFDMA et SC-FDMA.

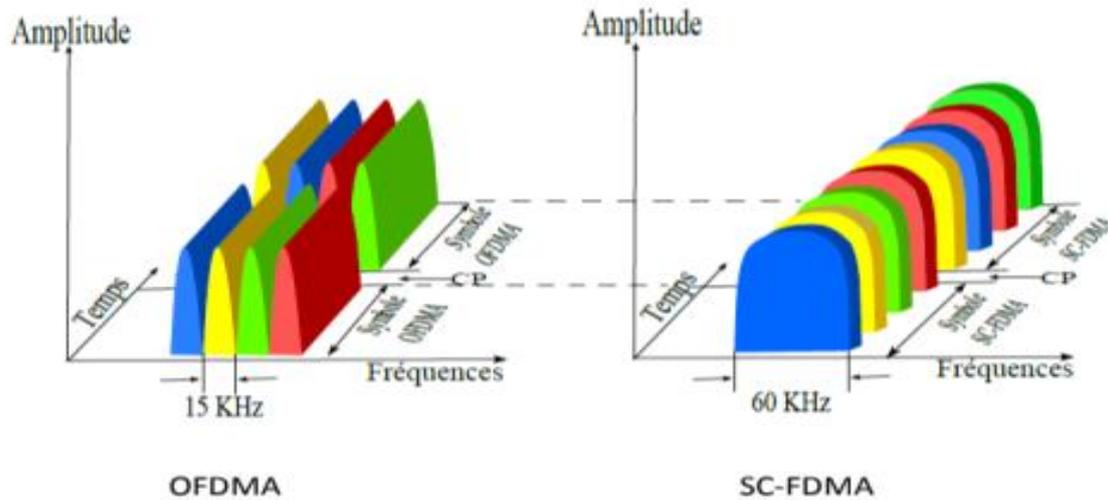


Figure II.6 - Transmission parallèle et séquentielle des systèmes OFDMA et SC-FDMA [77]

Le SC-FDMA est spécialement conçu pour surmonter les limites de l'OFDMA (accès multiple par répartition orthogonale de la fréquence) traditionnel en termes de (PAPR). Dans l'OFDMA, plusieurs utilisateurs partagent le spectre de fréquences disponible en le divisant en sous-porteuses, qui sont ensuite attribuées à différents utilisateurs. Cependant, l'OFDMA souffre d'un PAPR élevé, ce qui signifie que la puissance du signal fluctue considérablement, entraînant une distorsion potentielle et une efficacité réduite des amplificateurs de puissance [78].

II.4. L'accès multiple non orthogonale

OMA est un choix raisonnable pour obtenir de bonnes performances de débit au niveau du système, dans les services de domaine par paquets en utilisant une planification dans les domaines temporels et fréquentiels, tout en tenant compte des canaux avec une simple détection d'utilisateur unique au niveau du récepteur. Cependant, des améliorations supplémentaires de l'efficacité du système et de la QoE, en particulier en bordure de cellule, sont nécessaires à l'avenir. Pour répondre à de telles exigences, l'accès multiple non orthogonal (NOMA) est un nouveau schéma d'accès multiple qui présente des perspectives prometteuses pour une amélioration ultérieure du système.

II.4.1. Définition

NOMA exploite une nouvelle approche de multiplexage utilisateur dans le domaine de puissance qui n'était pas suffisamment utilisée dans les générations précédentes [79]. La figure II.7 montre la différence entre l'accès multiple orthogonal (OMA) et l'accès multiple non orthogonal (NOMA).

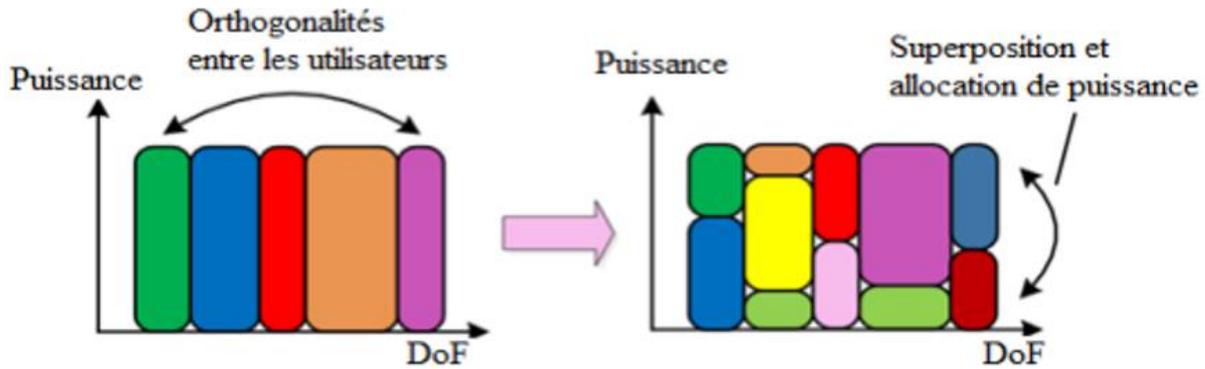


Figure II.7- La différence entre l'accès multiple orthogonal (OMA) et l'accès multiple non orthogonal (NOMA) [80]

Le principe de base du NOMA est de servir simultanément plusieurs utilisateurs sur les mêmes ressources spectrales (c'est-à-dire le temps, la fréquence, et l'espace) mais avec des niveaux de puissance différents, au détriment d'une interférence minimale entre les utilisateurs. Contrairement à l'accès multiple orthogonal (OMA) conventionnel, où chaque utilisateur est servi sur des ressources spectrales exclusivement allouées, NOMA superpose les signaux de message de plusieurs utilisateurs dans le domaine de puissance aux extrémités de l'émetteur en exploitant le gain de canal respectif des utilisateurs. Ensuite, l'annulation successive de l'interférence (SIC) est appliquée au(x) récepteur(s) pour la détection et le décodage multi-utilisateurs. Ça dans le domaine de puissance, mais NOMA contribue également à multiplier les utilisateurs dans le domaine du code.

Pour un exemple, considérons une transmission NOMA en liaison descendante où la station de base (BS) programme m utilisateurs sur les mêmes ressources spectrales B . Supposons également que le signal de message pour l'utilisateur $i^{\text{ème}}$ est x_i , où $\mathbf{E}[|x_i|^2] = 1$, la puissance de transmission est p_i , et que α_i c'est le coefficient de puissance utilisateur.

Le signal superposé au niveau de l'émetteur pourrait être exprimé comme suit :

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

Où

$$\sum_{i=1}^m p_i \leq p_t$$

p_t : La puissance totale émise.

$$\sum_{i=1}^m \alpha_i = 1$$

D'autre part, le signal reçu au le $i^{\text{ème}}$ utilisateur peut être exprimé comme suit :

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{h}_i \mathbf{X} + \mathbf{w}_i \quad (\text{II.2})$$

Où \mathbf{h}_i est le gain de canal complexe entre l'utilisateur i et le BS.

Le terme \mathbf{w}_i désigne le bruit Gaussien du récepteur, y compris les interférences entre les cellules du récepteur de premier ordre de l'utilisateur [81].

II.4.2. Les technologies clés au NOMA

II.4.2.1. Codage de superposition (SC)

Le concept fondamental du SC est qu'il permet à l'émetteur (Base Station : BS) de transmettre simultanément les signaux de plusieurs utilisateurs qui sont codés et modulés de façon indépendante. Chaque utilisateur aura un niveau de puissance relatif à son propre état dans le canal. En effet, plus l'utilisateur est proche de la station de base BS, plus le niveau de puissance alloué à l'utilisateur est faible.

Afin de rendre SC plus pratique, il est nécessaire que l'émetteur encode les informations pertinentes pour chaque utilisateur. Par exemple, pour un scénario à deux utilisateurs, l'émetteur devra être équipé de deux codeurs point à point qui rassemblent leurs entrées respectives dans des séquences à valeurs complexes du signal à deux utilisateurs.

Pour montrer comment SC est effectué, un diagramme schématique est présenté sur la figure II.8, où la constellation de modulation par décalage de phase en quadrature (QPSK) de l'utilisateur 1 avec une puissance d'émission plus élevée est superposée à celle de l'utilisateur 2 qui a une puissance d'émission inférieure. La capacité sur un canal de diffusion Gaussien scalaire est atteinte par SC, un schéma non orthogonal reconnu. [82]

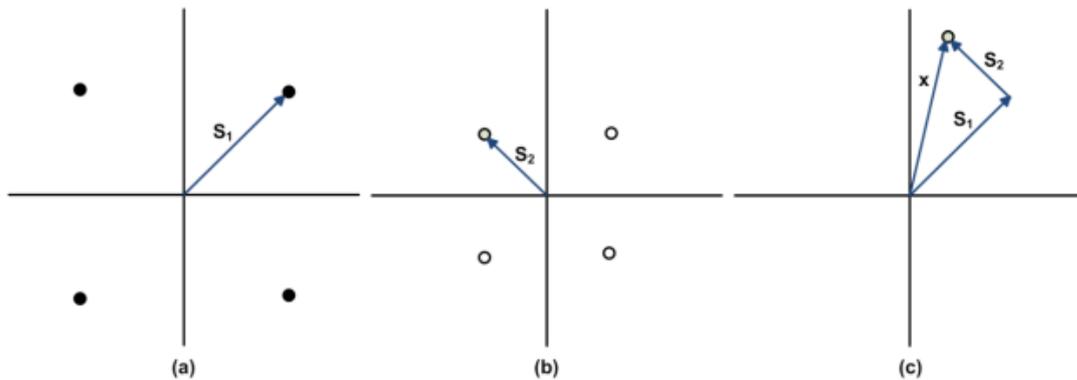


Figure II.8 - Un exemple de codage SC (a) constellation de signaux de l'utilisateur 1 (b) constellation de signaux de l'utilisateur 2 (c) constellation de signal superposé [82]

De façon plus claire, le SC offre la possibilité de coder un message pour un utilisateur aux mauvaises conditions de canal avec un taux de puissance relativement élevé, puis de le combiner avec le signal d'un utilisateur aux conditions de canal plus favorables et coder avec un taux de puissance relativement faible [83]. La figure ci-dessous montre le concept du codage de superposition.

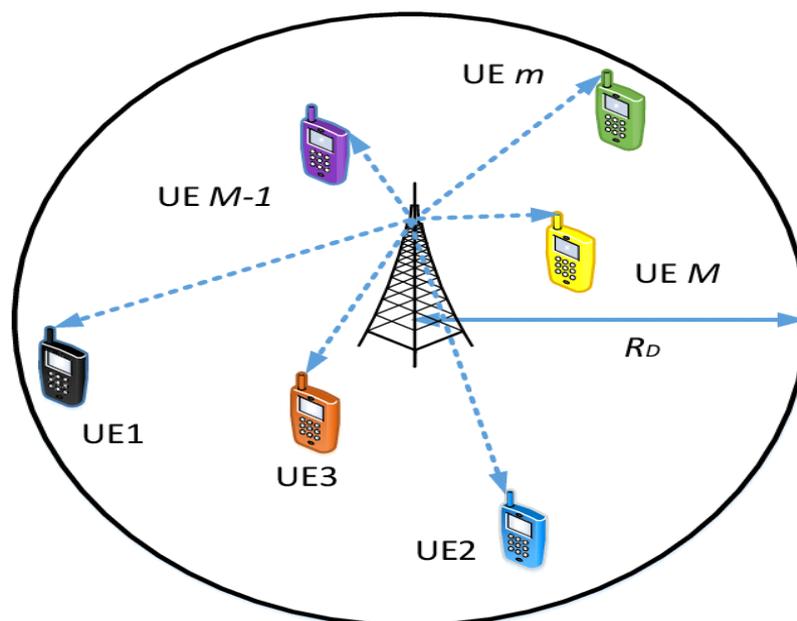


Figure II.9 - Concept du codage de superposition [84]

II.4.2.2. Annulation d'interférences successives SIC

Pour décoder le message utilisateur du signal superposé, le schéma SIC est considéré comme une méthode appropriée. Le principe de fonctionnement clé de SIC repose sur l'exploitation des différences de puissance entre les utilisateurs participant à SC.

Le fonctionnement de SIC peut être expliqué comme suit. Tout d'abord, les utilisateurs sont classés par ordre décroissant de leurs forces de signal, de sorte que le récepteur puisse d'abord décoder le signal le plus fort, le soustraire du signal combiné et isoler le plus faible du résidu [85].

Le décodage est effectué de manière successive. Après le décodage du signal d'un utilisateur, il est soustrait du signal combiné avant que le signal de l'utilisateur suivant ne soit décodé. Lorsque le SIC est appliquée, l'un des signaux des utilisateurs est décodé, traitant l'autre signal utilisateur comme un interférent, mais ce dernier est ensuite décodé avec l'avantage du signal du premier ayant déjà été supprimé.

La figure II.10 présente la technique de décodage du signal superposé (figure II.8) du côté réception. Ici, le point de constellation de l'utilisateur 1 est d'abord décodé à partir du signal reçu. Ensuite, le décodage du point de constellation de l'utilisateur 2 est effectué par rapport au point de constellation décodé de l'utilisateur 1.

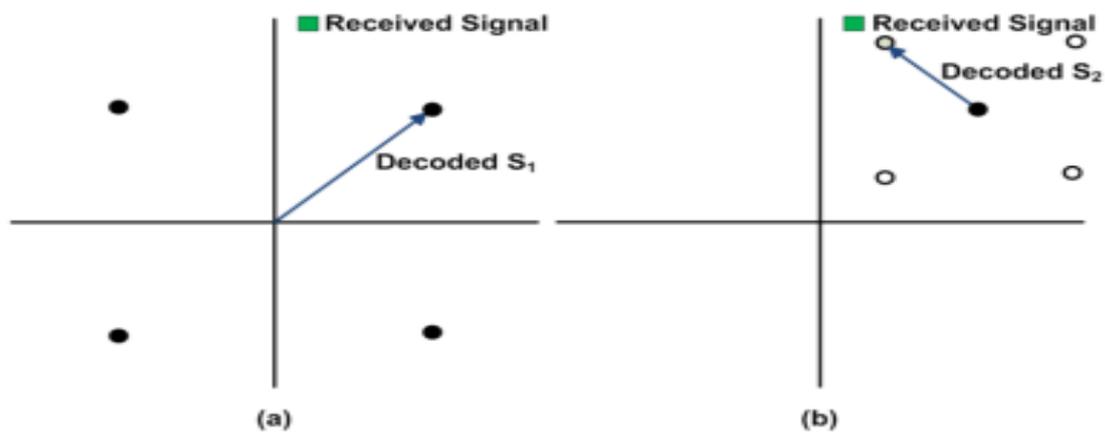


Figure II.10 - Un exemple de décodage SC (a) décodant le signal de l'utilisateur 1 (b) décodant le signal de l'utilisateur 2 [86]

En bref, le processus particulier impliqué dans le décodage des messages superposés peut être exprimé mathématiquement comme suit :

- 1) À l'utilisateur 1, un décodeur mono-utilisateur $g_1: C^T \rightarrow \{0, 1\}^{2^{TR_1}}$ décode le message x_1 en traitant x_2 comme du bruit.
- 2) L'utilisateur 2 effectue les étapes suivantes pour récupérer successivement son message à partir de son signal reçu y_2 .

- a) Décoder le message de l'utilisateur 1 x_1 en utilisant le décodeur mono-utilisateur

$$g_1 : C^T \rightarrow \{0, 1\}^{2^{TR_1}}$$

- b) Soustraire : $\sqrt{p\alpha_1}h_2x_1$

à partir du signal reçu y_2

$$y'_2 = y_2 - \sqrt{p\beta_1}h_2x_1 \tag{II.3}$$

Où h_2 est le gain de canal complexe à l'utilisateur 2

- c) Décoder les messages de l'utilisateur 2 x_2 en appliquant un autre décodeur mono-utilisateur $g_1 : C^T \rightarrow \{0, 1\}^{2^{TR_1}}$ [86]

Décodage réussi uniquement si :

$$\text{SINR} = \frac{\text{Signal}}{\text{Interférence + Bruit}} = \frac{\text{Signal}}{\text{Interférence} + \text{Bruit}} > \text{Un seuil} \tag{II.4}$$

Le décodage peut échouer en raison de :

$$\text{SINR} = \frac{\text{Signal}}{\text{Interférence + Bruit}} = \frac{\text{Signal}}{\text{Interférence} + \text{Bruit}} < \text{Un seuil} \tag{II.5}$$

La figure ci-dessous montre le principe de SIC :

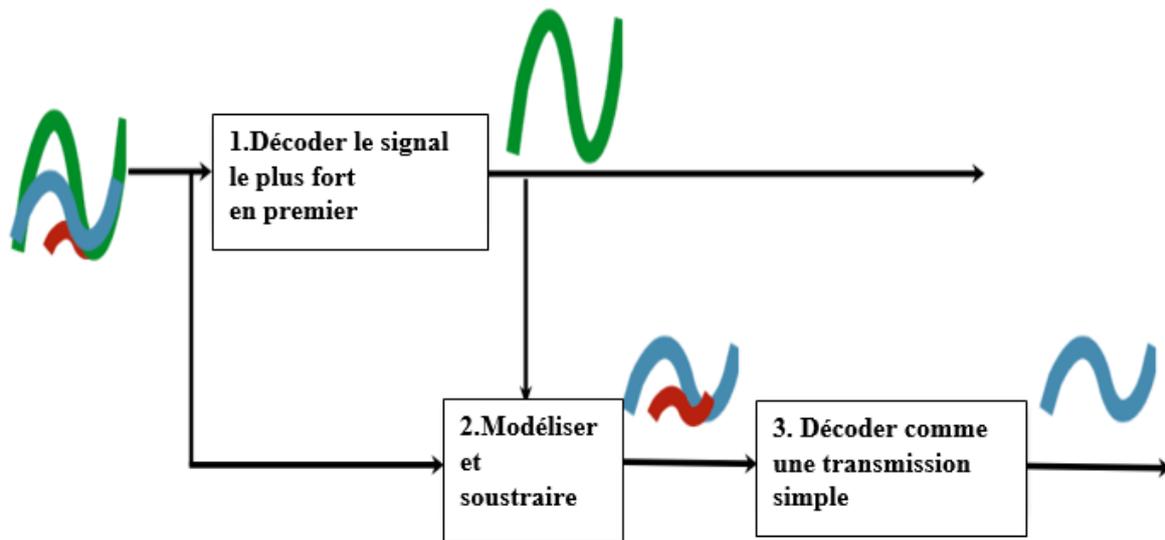


Figure II.11– Concept d'annulation d'interférence successive SIC [87]

L'objectif du SIC est d'améliorer la capacité du système et d'améliorer les performances. Cependant, la propagation des erreurs dans cette procédure, également connue sous le nom de SIC imparfait, peut entraîner une réelle perte de performances. Afin d'y remédier, il est nécessaire de réduire le nombre d'utilisateurs [88].

NOMA avec le codage de superposition (SC) et l'interférence successive (SIC), permet à plusieurs utilisateurs de partager le même spectre en superposant leurs signaux, tandis que OMA alloue des ressources exclusives à chaque utilisateur pour minimiser les interférences. L'accès non orthogonal offre une plus grande capacité d'utilisateurs simultanés mais nécessite un traitement de signal plus complexe, tandis que l'accès orthogonal est plus simple à mettre en œuvre mais limite le nombre d'utilisateurs simultanés.

II.4.3. Les principaux schémas NOMA

Il existe deux principaux schémas NOMA : NOMA dans le domaine de puissance et NOMA dans le domaine de code.

II.4.3.1. Domaine de puissance NOMA (PD-NOMA)

Les méthodes de PD-NOMA offrent la possibilité à de multiples utilisateurs d'accéder à toutes les ressources de fréquence et de temps, ce qui permet à plusieurs utilisateurs de partager le même canal fréquentiel en même temps grâce à un multiplexage activé par une différence de niveau de puissance en fonction de leur distance de la station de base (BS) et afin d'optimiser l'efficacité du spectre. Les techniques de PD-NOMA basées sur le mécanisme de superposition du code (SC) et l'annulation des interférences successives [89].

- **Liaison descendante (Downlink)**

Au niveau de l'émetteur du réseau NOMA en liaison descendante, la station de base transmet le signal combiné, qui est une superposition des signaux souhaités de multiples utilisateurs avec des coefficients de puissance alloués différents à tous les utilisateurs mobiles.

Au récepteur de chaque utilisateur, le processus SIC est supposé être effectué successivement jusqu'à ce que le signal de l'utilisateur soit récupéré. Les coefficients de puissance des utilisateurs sont alloués en fonction de leurs conditions de canal, de manière inversement proportionnelle. L'utilisateur avec une mauvaise condition de canal se voit attribuer une puissance de transmission plus élevée que celui qui a une bonne condition de canal [89].

Le récepteur de l'UE proche décode d'abord le signal de l'UE éloigné car il est le plus fort. Ensuite, le soustrait du signal composite par la technique d'annulation d'interférence successive (SIC) afin de ne garder que son propre signal. Quand le signal composite parvient à atteindre l'UE éloignée, le signal qui était destiné à l'UE proche devient presque nul, ce qui signifie que sa puissance, déjà faible, devient insignifiante en raison des pertes de trajet. Ainsi, le signal composite est décodé directement par l'UE éloignée comme si c'était son propre signal, en considérant le signal de l'UE proche comme du bruit.

Pour expliquer le principe du NOMA via le multiplexage de domaine de puissance, nous choisissons le cas, illustré par la figure II.12 qui présente un système basé sur le PD – NOMA avec deux utilisateurs, chacun est équipé d'une antenne, et une station de base (BS) qui permet de transmettre simultanément deux signaux sur une même fréquence, multiplexés dans le domaine de puissance vers les deux utilisateurs 1 et 2. [90]

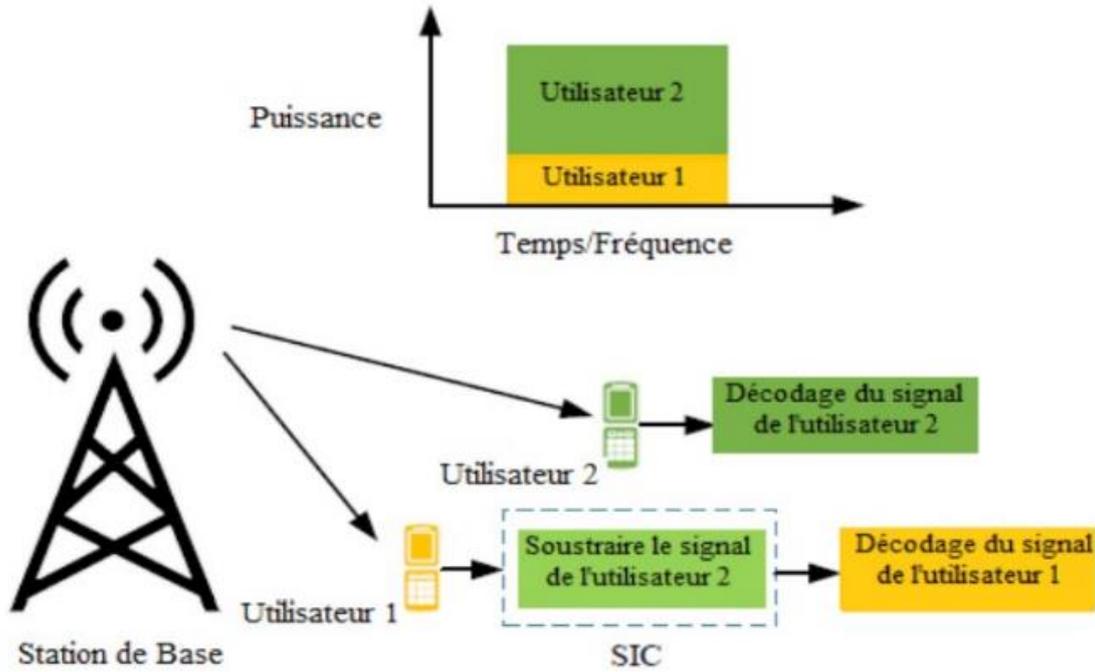


Figure II.12- Liaison descendante NOMA dans une cellule à deux utilisateurs [90]

La BS transmet le signal X avec ses deux composantes codées et superposées sous la forme :

$$X = \sqrt{p_1 \alpha_1} x_1 + \sqrt{p_2 \alpha_2} x_2 \quad (\text{II.6})$$

Où p_1 et p_2 représentent les portions de puissances affectées aux deux utilisateurs. Si la puissance totale émise est P , alors :

$$P = p_1 + p_2 \quad (\text{II.7})$$

Le signal reçu par l'utilisateur 1 est donné par l'équation :

$$y_1 = h_1 \sqrt{P} (\sqrt{\alpha_1} x_1 + \sqrt{\alpha_2} x_2) + w_1 \quad (\text{II.8})$$

Le signal reçu par l'utilisateur 2 est donné par l'équation :

$$y_2 = h_2 \sqrt{P} (\sqrt{\alpha_1} x_1 + \sqrt{\alpha_2} x_2) + w_2 \quad (\text{II.9})$$

L'utilisateur proche (utilisateur 1) décode d'abord le signal de l'utilisateur éloigné (utilisateur 2) pour le soustraire de son propre signal, puis décode son propre signal.

L'utilisateur éloigné (utilisateur 2) décode directement son propre signal en traitant le signal de l'utilisateur proche comme une interférence. [90]

- **Liaison montante (Uplink)**

La figure III.13 présente un schéma de NOMA pour la liaison montante.

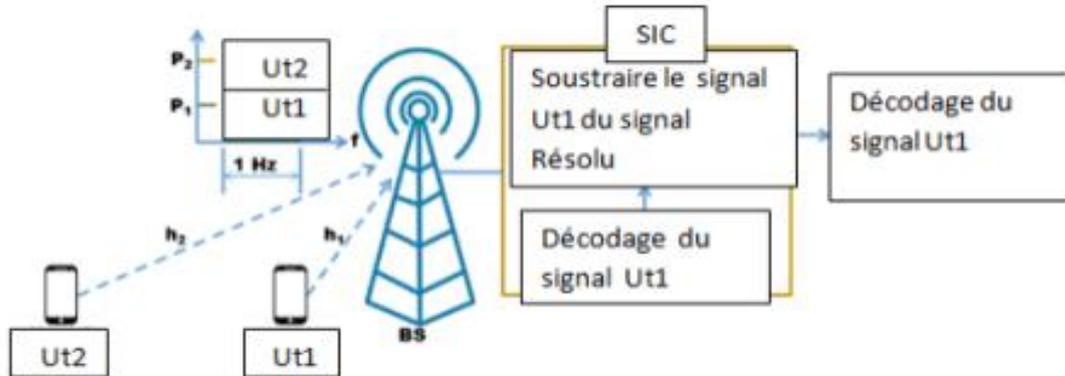


Figure II.13 - Liaison montante NOMA dans une cellule à deux utilisateurs [91]

C'est en fait le processus inverse de la liaison descendante dans laquelle les utilisateurs 1 et 2 transmettent. Leurs signaux x_1 et x_2 avec la même puissance p vers la station de base.

$$y = \sqrt{p_1} h_1 x_1 + \sqrt{p_2} h_2 x_2 + w \quad (\text{II.10})$$

Cela signifie que la BS va traiter l'utilisateur 2 comme une interférence et décoder directement le terme x_1 à partir de y . L'efficacité spectrale au niveau de la BS pour décoder les données de l'utilisateur 1 est :

$$R_1 = \log_2 \left(1 + \frac{p|h_1|^2}{p|h_2|^2 + \sigma^2} \right) \quad (\text{II.11})$$

Où σ^2 est la densité spectrale de puissance du bruit, h_1 et h_2 les coefficients complexes du canal sur les deux trajets. Ensuite, une annulation successive des interférences (SIC) peut être effectuée pour récupérer la composante x_2 . [91]

L'efficacité au niveau de l'utilisateur 2 sera donc :

$$R_2 = \log_2 \left(1 + \frac{p|h_2|^2}{\sigma^2} \right) \quad (\text{II.12})$$

II.4.3.2. Domaine de code NOMA (CD-NOMA)

L'idée de base du NOMA avec multiplexage de domaines de codes est similaire à celle du CDMA, qui attribue différents codes à différents utilisateurs. Les transmissions multi-utilisateurs sont transmises en utilisant les mêmes ressources temps-fréquence. Parmi les solutions existantes dans le domaine de code NOMA, on trouve principalement CDMA d'épandage à faible densité (LDS-CDMA), OFDM d'épandage à faible densité (LDS-OFDM), Accès multiple par code fragmenté (SCMA), Accès partagé multi-utilisateur [92].

Dans NOMA, le partage du code d'accès permet à plusieurs utilisateurs d'utiliser le même code tandis que la différenciation des niveaux de puissance permet de distinguer leurs signaux. En revanche, dans l'OMA chaque utilisateur a un code d'accès distinct et des puissances de transmission différentes pour une isolation claire entre les utilisateurs.

II.4.4. Efficacité spectrale et efficacité énergétique de NOMA

II.4.4.1. Efficacité spectrale

Depuis des décennies, la recherche sur l'amélioration de l'efficacité spectrale a été centrée et continue dans le domaine des communications sans fil, en raison de la rareté et du coût des ressources spectrales.

L'efficacité spectrale quantifie le nombre de bits d'information pouvant être fournis par unité de temps et de bande passante du système (bits/seconde/Hz). Ainsi, en se basant sur la formule célèbre obtenue par Shannon, le SE est défini comme suit :

$$SE = \log_2 \left(1 + \frac{p|h|^2}{\sigma^2} \right) \text{ bit/s/Hz} \quad (\text{II.13})$$

Où σ^2 désigne la puissance de bruit, p représente la puissance d'émission, et $|h|^2$ désigne le gain du canal [93].

II.4.4.2. Efficacité énergétique

L'efficacité énergétique est devenue un élément essentiel et essentiel pour les systèmes de communication sans fil. Généralement, l'énergie électrique (EE) se présente principalement sous la forme d'un rapport avantages-coûts afin d'évaluer la quantité de données livrée en utilisant la ressource énergétique limitée du système (bits/heure).

L'EE est décrit comme suit :

$$EE = \frac{w \cdot SE}{\delta p + PC} \quad (\text{II.14})$$

Où **PC** désigne la consommation d'énergie du circuit statique associée aux communications et $\delta > 1$ capture l'inefficacité de l'amplificateur de puissance d'émission. La bande passante (w) [93].

NOMA permet à plusieurs utilisateurs de partager la même ressource temps-fréquence, ce qui augmente l'efficacité spectrale, tandis qu'OMA alloue des ressources orthogonales distinctes, ce qui peut être moins efficace en termes d'utilisation du spectre.

NOMA est avantageux en termes d'efficacité énergétique, car il permet de servir plusieurs utilisateurs sur la même ressource, réduisant ainsi la consommation électrique globale par rapport à OMA, ce qui est bénéfique pour les appareils alimentés par batterie et les applications IoT.

II.5. Les applications d'OMA et de NOMA

II.5.1. Les applications d'OMA

Pour les techniques d'accès multiple traditionnelles :

FDMA est une technologie de base dans le système de téléphone mobile avancé (AMPS) analogique, Elle est également utilisée dans le système de communication d'accès total (TACS).

TDMA est utilisé par le système de téléphone mobile numérique avancé (D-AMPS) et le système mondial de communications mobiles (GSM). Cependant, chacun de ces systèmes met en œuvre le TDMA de manière quelque peu différente et incompatible.

Le CDMA est utilisé dans les systèmes de téléphone cellulaire à ultra-haute fréquence (UHF) [94].

Pour la technique d'accès multiple qui basée sur l'OFDM :

Le système de radio et télédiffusion : Les normes de radio et de télédiffusion, telles que DAB (Digital Audio Broadcasting) et DVB (Digital Video Broadcasting), ont été parmi les premières à adopter l'utilisation de la technique OFDM.

Les réseaux de communications sans fil : OFDM est largement utilisée dans les réseaux de communications sans fil locaux LAN (Local Area Network, WiFi) et métropolitains MAN (Metropolitan Area Network, WiMAX).

Les réseaux cellulaires : Dans des versions récentes des technologies WiMAX (réseau WMAN) fait appelle au technique OFDMA pour plus de flexibilité.

Dans toutes ses applications, la technique OFDM est liée à un codage du canal. Cela afin d'optimiser la qualité de la liaison en évitant les erreurs de détection causées par les défauts présents dans le canal radio mobile [95].

II.5.2. Les applications de NOMA

Les réseaux cellulaires utilisent la technique de NOMA :

NOMA avec formation de faisceau (NOMA-BF)

NOMA avec formation de faisceau (NOMA-BF) peut exploiter le domaine de puissance ainsi que le domaine spatial pour augmenter l'efficacité spectrale. Pour le voir, nous considérons un système de quatre utilisateurs comme illustré dans la 2. Il y a deux groupes d'utilisateurs. L'utilisateur 1 et l'utilisateur 3 appartiennent au groupe 1, tandis que l'utilisateur 2 et l'utilisateur 4 appartiennent au groupe 2. Dans chaque groupe, les canaux spatiaux des utilisateurs doivent être fortement corrélés afin qu'un faisceau puisse être utilisé pour transmettre des signaux aux utilisateurs du groupe. Grâce à la formation de faisceau, les signaux d'un groupe à l'autre sont supprimés. Ainsi, chez un utilisateur du groupe 1, le signal reçu serait une superposition de x_1 et x_3 , tandis qu'un utilisateur du groupe 2 reçoit une superposition de x_2 et x_4 , où x_k est le signal destiné à l'utilisateur comme le montre la 2, si l'Utilisateur 3 est plus proche de la BS que l'Utilisateur 1, l'Utilisateur 3 décoderait d'abord x_1 et le soustrairait pour décoder x_3 en utilisant le SIC. L'utilisateur 1 décoderait x_1 avec l'interférence, x_3 . Il est clair que le NOMA conventionnel de deux utilisateurs peut être appliqué dans chaque groupe [96].

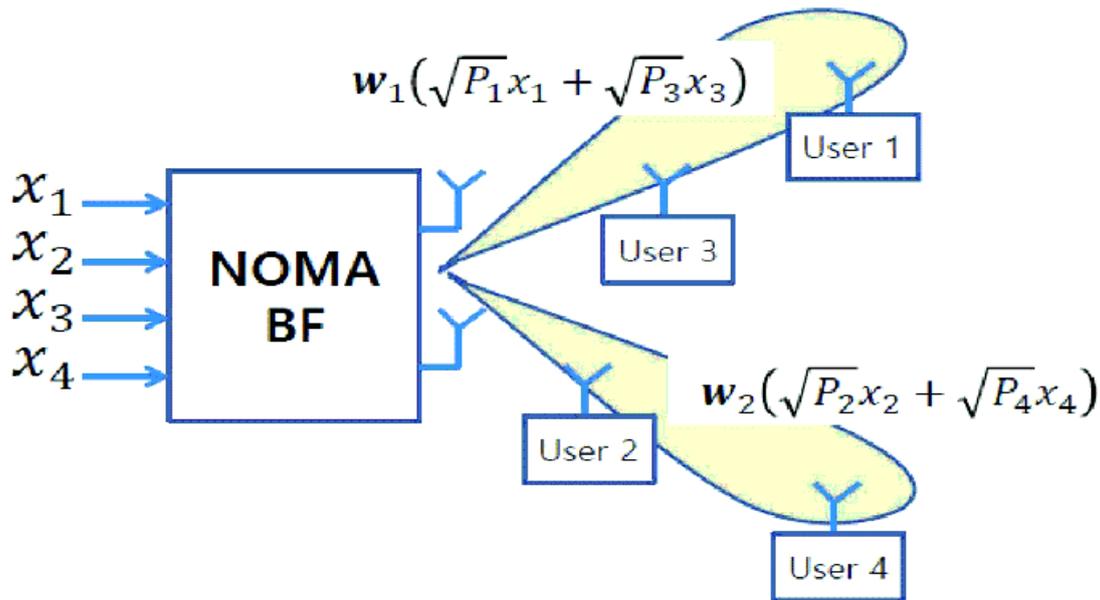


Figure II.14 - Une illustration de NOMA avec formation de faisceaux [96]

MIMO-NOMA (Multiple-Input Multiple-Output Non-Orthogonal Multiple Access)

MIMO-NOMA (Multiple-Input Multiple-Output Non-Orthogonal Multiple Access) combine les avantages des techniques MIMO et NOMA dans la communication sans fil. Il permet à plusieurs utilisateurs de partager les mêmes ressources en même temps, améliorant ainsi l'efficacité spectrale et les performances du système, notamment dans les scénarios avec des canaux corrélés et une information imparfaite sur l'état du canal.

NOMA intégré dans les systèmes au-delà des communications cellulaires :

Réseaux Wi-Fi : NOMA peut être appliqué aux systèmes Wi-Fi, permettant l'admission de plus d'utilisateurs simultanément, surtout dans des zones bondées telles que les aéroports ou les stades.

Systèmes VLC : La communication par lumière visible (VLC) peut bénéficier de l'application de NOMA, permettant de prendre en charge un plus grand nombre d'utilisateurs et d'étendre son utilisation au-delà des scénarios à petite échelle.

Internet des objets (IoT) : NOMA est adapté pour gérer des modèles de trafic diversifiés et des exigences hétérogènes en matière de qualité de service (QoS) dans l'IoT, notamment des applications à large bande passante telles que les caméras de surveillance environnementale et des applications à faible débit de données comme les avertissements d'incidents de véhicule. Il prend également en charge les communications ultra-fiables à faible latence (uRLLC) et améliore la connectivité pour la transmission.

En résumé, le choix entre OMA et NOMA dépend des besoins spécifiques de l'application, notamment en termes d'interférence, d'efficacité spectrale, de densité d'utilisateurs et de symétrie des débits de données. Il est important de noter que les domaines d'application de chaque technique ne sont pas mutuellement exclusifs. Dans certains cas, OMA et NOMA peuvent également être utilisés conjointement ou combinés avec d'autres techniques d'accès multiple pour répondre aux besoins spécifiques des réseaux et des applications [97].

II.6. Les avantages du NOMA par rapport à l'OMA

Équité améliorée : NOMA assure une répartition plus équitable des ressources entre les utilisateurs, contrairement à OMA où les conditions de canal favorables peuvent conduire à une allocation injuste des ressources.

Couverture et fiabilité améliorées : NOMA est plus résistant aux interférences et à l'évanouissement, grâce à l'utilisation de techniques de codage par superposition et d'interférence successive, ce qui améliore la couverture et la fiabilité, surtout dans des conditions de signal difficiles.

Latence réduite : NOMA offre une latence plus faible en permettant à plusieurs utilisateurs de partager simultanément la même ressource, réduisant ainsi les délais d'accès par rapport à OMA où les utilisateurs doivent se battre pour des ressources distinctes.

Compatibilité avec Massive MIMO : NOMA est bien adapté pour fonctionner avec les systèmes Massive MIMO, exploitant efficacement le domaine spatial pour la transmission multi-utilisateurs, ce qui conduit à des gains de performances significatifs en termes de capacité et de couverture.

Pérennité : La capacité évolutive et l'efficacité spectrale de NOMA en font une option durable pour répondre à la demande croissante de capacité et d'efficacité dans les réseaux sans fil, notamment pour les technologies émergentes comme la 5G.

Gestion simplifiée des ressources : NOMA simplifie la gestion des ressources pour les opérateurs en permettant le partage flexible des ressources entre les utilisateurs, réduisant ainsi la complexité de la gestion des interférences. Cela facilite la planification et l'optimisation du réseau [98].

II.7. Conclusion

En conclusion, nous avons examiné en détail les techniques d'accès multiples dans la 5G, en mettant l'accent sur l'OMA et le NOMA. Nous avons souligné l'importance de ces approches pour optimiser l'utilisation du spectre radioélectrique et améliorer les performances des réseaux sans fil. L'OMA utilise des ressources spectrales séparées pour chaque utilisateur, tandis que le NOMA permet à plusieurs utilisateurs de partager les mêmes ressources simultanément. Nous avons exploré les différentes techniques d'OMA et les avantages spécifiques du NOMA en termes d'efficacité spectrale et énergétique. Des comparaisons approfondies ont été faites pour mieux comprendre les forces et les faiblesses de chaque approche.

Ce chapitre a jeté les bases pour le prochain chapitre, qui se concentreront sur les performances des réseaux d'accès orthogonaux et non orthogonaux dans des conditions spécifiques.

Chapitre III : Simulations et Résultats

III.1. Introduction

Dans cette étude comparative des performances entre les systèmes NOMA et OMA, nous nous intéressons à évaluer et à comparer les avantages et les inconvénients de ces deux techniques d'accès multiple. Pour cela, nous utilisons un modèle de simulation précis afin de reproduire les conditions de communication réelles. Ce modèle prend en compte les caractéristiques spécifiques des systèmes NOMA et OMA, telles que l'allocation des ressources, la modulation, le codage, et d'autres paramètres pertinents. Nous présentons d'abord le modèle de simulation. Ensuite, nous présentons les résultats de simulation en termes de capacité. Les simulations informatiques sont faites par le logiciel MATLAB.

III.2. Modèle de simulation

Nous supposons que la station de base (BS) envoie des messages aux utilisateurs, que l'utilisateur soit proche ou éloigné. (Où l'utilisateur 1 est loin de la BS, l'utilisateur 2 est plus proche d'elle, l'utilisateur 3 est plus proche, etc.)

- En OMA

La simulation OMA est basée sur le schéma suivant :

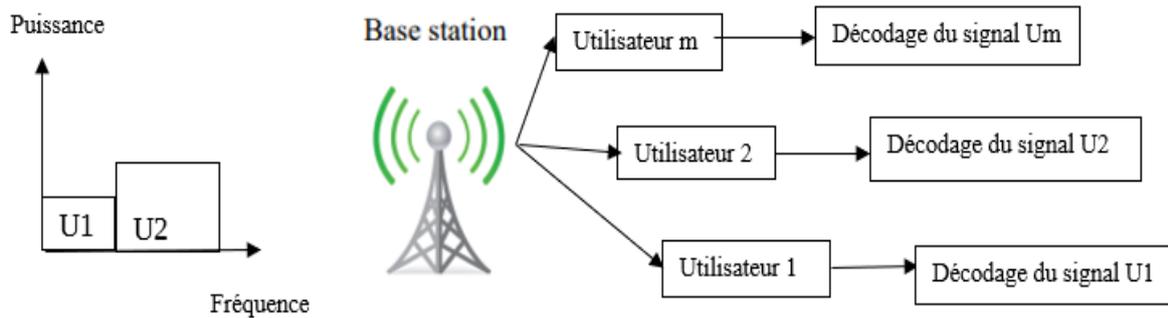


Figure III.1 - Schéma de m utilisateurs OMA

Dans OMA, les messages seront transmis à des utilisateurs successifs avec un décalage temporel distinct. Le signal obtenu par les utilisateurs est représenté de la manière suivante :

$$\mathbf{y}_i = \sqrt{p} \mathbf{h}_i \mathbf{x}_i + \mathbf{w}_i \quad (\text{III.1})$$

Le SNR est exprimé aux utilisateurs comme suit :

$$SNR_{OMA,i} = \frac{p |\mathbf{h}_i|^2}{\sigma^2} \quad (\text{III.2})$$

Où p est la puissance de transmission, \mathbf{h}_i est le gain de canal complexe entre l'utilisateur i et le BS, \mathbf{w}_i Désigne le bruit Gaussien du récepteur et σ^2 désigne la puissance de bruit. [93]

- Dans NOMA

La simulation NOMA est basée sur le schéma suivant :

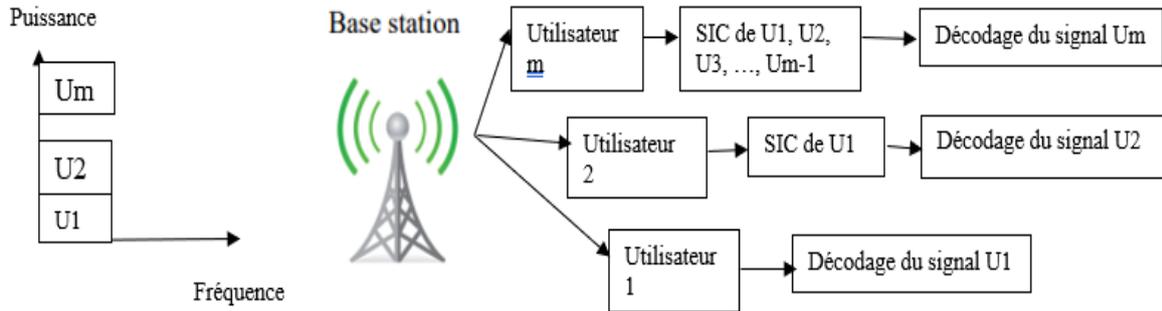


Figure III.2 - Schéma de m utilisateurs NOMA

Dans NOMA, la station envoie un message de codage en superposition qui est une somme des signaux destinés à plusieurs utilisateurs, avec une distribution différente des paramètres de puissance en fonction de la qualité du canal pour chaque utilisateur. Pour puissance l'équité des utilisateurs, plus de puissance est donné à l'utilisateur éloigné et moins de pouvoir à l'utilisateur proche. Comme nous le savons déjà, le signal NOMA codé en superposition transmis par la station de base est le suivant :

$$\mathbf{X} = \sum_{i=1}^m \sqrt{\mathbf{p}_i} \alpha_i \mathbf{x}_i \quad (\text{III.3})$$

Où, α_i c'est le coefficient de puissance utilisateur et \mathbf{p} c'est la puissance d'émission.

Chaque utilisateur reçoit une version atténuée du signal composite en fonction de son gain de canal et du bruit additif gaussien. Pour le cas général, le signal reçu par les utilisateurs est exprimé comme suit :

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{h}_i \mathbf{X} + \mathbf{w}_i \quad (\text{III.4})$$

Où $\mathbf{p} \mathbf{h}_i$ est le gain de canal complexe entre l'utilisateur i et le BS, et \mathbf{w}_i désigne le bruit Gaussien du récepteur. [93]

Le récepteur décode d'abord le signal de l'utilisateur avec le plus fort rapport signal sur bruit+interférence. Une fois le signal décodé, le récepteur soustrait ce signal du signal composite pour éliminer son interférence. L'utilisateur avec le signal le plus faible (souvent le plus éloigné de la station de base) décode son signal directement, le soustrait du signal composite. Le processus se répète de manière successive pour les autres utilisateurs. Cela permet de décoder tous les signaux des utilisateurs NOMA sans interférence majeure.

Le SNR est exprimé aux utilisateurs comme suit :

Le SNR pour l'utilisateur 1 est exprimé par :

$$SNR_{NOMA,1} = \frac{p\alpha_1|h_1|^2}{\sum_{i=2}^m p\alpha_i|h_1|^2 + \sigma_1^2} \quad (III.5)$$

Le SNR pour l'utilisateur k est exprimé par :

$$SNR_{NOMA,k} = \frac{p\alpha_k|h_k|^2}{\sum_{i=k+1}^m p\alpha_i|h_k|^2 + \sigma_k^2} \quad (III.6)$$

Le SNR pour l'utilisateur proche est exprimé par :

$$SNR_{NOMA,m} = \frac{P\alpha_m|h_m|^2}{\sigma_m^2} \quad (III.7)$$

Par exemple dans le cas de trois utilisateurs, les rapports SNR pour les trois utilisateurs dans le système NOMA sont exprimés comme suit :

$$SNR_{NOMA,1} = \frac{P\alpha_1|h_1|^2}{P\alpha_2|h_1|^2 + P\alpha_3|h_1|^2 + \sigma_1^2} \quad (III.8)$$

$$SNR_{NOMA,2} = \frac{P\alpha_2|h_2|^2}{P\alpha_3|h_2|^2 + \sigma_2^2} \quad (III.9)$$

$$SNR_{NOMA,3} = \frac{P\alpha_3|h_3|^2}{\sigma_3^2} \quad (III.10)$$

Où p est la puissance de transmission, h_i est le gain de canal complexe entre l'utilisateur i et le BS, w_i désigne le bruit Gaussien du récepteur et σ^2 désigne la puissance de bruit. [86]

III.3. Paramètres de Simulation

Les paramètres qui modifient la capacité dans les schémas d'accès multiple orthogonal (OMA) et non orthogonal (NOMA) sont similaires, mais l'impact peut différer en raison des différences fondamentales entre les deux schémas. Voici les paramètres utilisés dans les simulations :

- **Nombre d'utilisateurs** : dans les simulations, nous étudierons des scénarios pour plusieurs utilisateurs.
- **Le rapport signal sur bruit (SNR)** : SNR est une mesure clé pour évaluer les performances du système de communication en termes de capacité pour différentes puissances de transmission et niveaux de bruit. Le SNR est calculé en soustrayant N_0 de P_t . Où P_t c'est la puissance de transmission en dB, allant de -114 dB à -54 dB par incréments de 5 dB, comme défini précédemment, et N_0 c'est la densité spectrale de puissance du bruit en dBm/Hz.
- **Distance des utilisateurs** : les paramètres d_i représentent les distances entre la BS et les utilisateurs [m].
- **Exposant de perte de trajet** : le paramètre η représente l'exposant de perte de trajet, qui décrit comment le signal se propage et s'affaiblit avec la distance. La valeur de l'exposant de perte de trajet est 4, restant la même dans tous les cas de simulation. Cet exposant est utilisé pour calculer les coefficients de fading de Rayleigh.
- **Les coefficients de fading de Rayleigh (h_i)** : par exemple h_1 et h_2 sont les coefficients de fading de Rayleigh pour les deux utilisateurs.
- **Les gains de canal (g_i)** : ils sont calculés à partir des coefficients de fading. Les gains de canal entre les utilisateurs ont un impact significatif sur la capacité de transmission.
- **La bande passante (BW)** : le paramètre représente la largeur de bande du système.
- **Puissance du bruit (N_0)** : c'est la puissance du bruit dans le système de communication, exprimée en dBm. Elle est calculée à partir de la largeur de bande.
- **Les coefficients d'allocation de puissance (α_i)** : ce sont les coefficients de puissance utilisés dans le système NOMA pour allouer la puissance entre les utilisateurs. Ces coefficients déterminent la répartition de la puissance entre les utilisateurs.

L'allocation optimale de puissance dépend du scénario spécifique et peut varier en fonction des conditions du canal.

Il est important de noter que les performances et l'impact de ces paramètres peuvent varier en fonction des conditions du canal, de l'algorithme de décodage utilisé et des exigences du système. Il convient de noter que ces paramètres peuvent interagir et que leur impact sur la capacité dépendra de la configuration spécifique du système et des conditions du canal. Les simulations utilisant ces paramètres permettent d'évaluer et de comparer les performances des systèmes OMA et NOMA dans différentes situations. Nous considérons l'impact des variations du nombre d'utilisateurs, de leur distance à la station de base, de la bande passante, des coefficients de puissance et du SNR sur la capacité.

III.4. Analyse de capacité :

Dans cette section, nous effectuons une comparaison entre OMA et NOMA en termes de capacité pour plusieurs scénarios.

La capacité des utilisateurs d'OMA et NOMA est exprimée comme suit :

$$C_{OMA,i} = \frac{1}{m} \log_2(1 + SNR_{OMA,i}) \quad (\text{III.11})$$

$$C_{NOMA,i} = \log_2(1 + SNR_{NOMA,i}) \quad (\text{III.12})$$

Où m c'est le nombre d'utilisateurs [93].

La capacité de l'OMA (Orthogonal Multiple Access) est la somme des taux de capacité de tous les utilisateurs du système. Elle est donnée par la formule suivante :

$$C_{OMA} = \sum_{i=1}^m C_{OMA,i} \quad (\text{III.13})$$

La capacité du NOMA (Orthogonal Multiple Access) est la somme des taux de capacité de tous les utilisateurs du système. Elle est donnée par la formule suivante :

$$C_{NOMA} = \sum_{i=1}^m C_{NOMA,i} \quad (\text{III.14})$$

III.4.1. Comparaison de la capacité entre NOMA et OMA pour deux utilisateurs

Les figures III.3 ; III.4 et III.5 montrent la comparaison des capacités de NOMA et OMA pour deux utilisateurs, en fonction du rapport signal sur bruit (SNR).

Pour chaque figure, la courbe rouge représente la capacité du NOMA tandis que la courbe bleue représente la capacité d'OMA.

- L'axe des y représente la capacité en bits par seconde par Hertz (bps/Hz).

- L'axe des x représente le SNR en décibels (dB).

- **Le premier cas**

Dans le premier cas de comparaison des capacités de NOMA et OMA pour deux utilisateurs, illustré dans la figure III.3, nous basons notre analyse sur ces paramètres :

Distance des utilisateurs [m]	$d_1 = 6, d_2 = 4$
Coefficients d'allocation de puissance	$\alpha_1 = 0.7, \alpha_2 = 0.3$
Bande passante (BW) [Hz]	$BW = 10^6$
SNR [dB]	0 : 10 : 60

Tableau III.1 – Paramètres de simulation pour le premier cas de deux utilisateurs

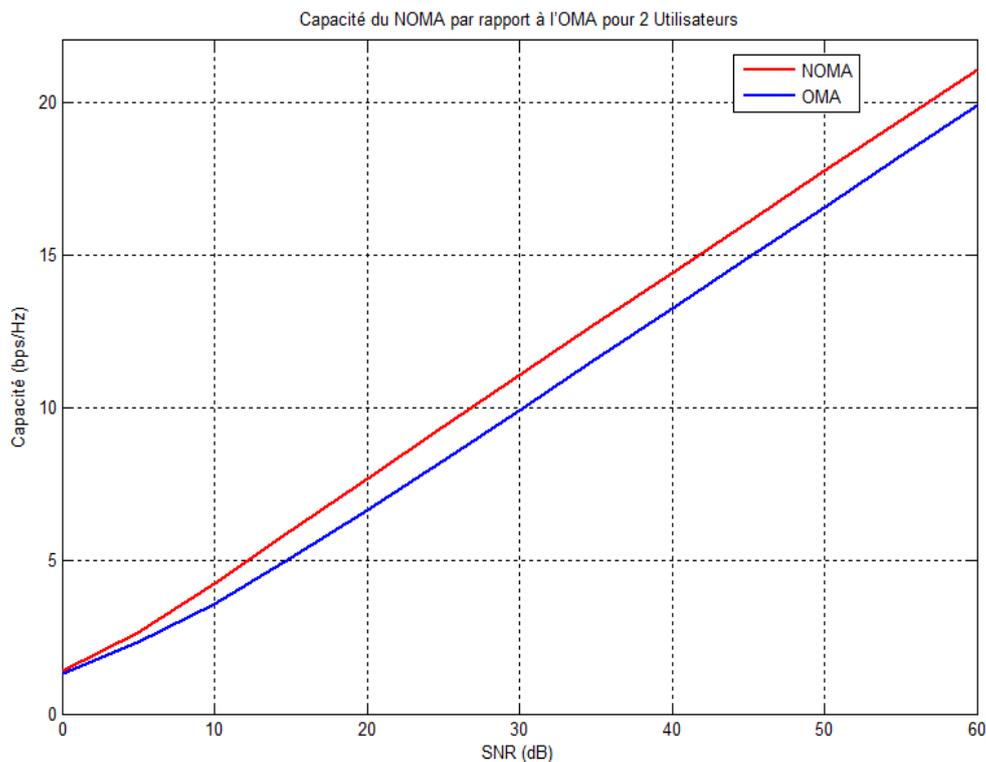


Figure III.3 - capacité du NOMA par rapport à l'OMA pour deux utilisateurs

À partir de cette figure, nous observons une augmentation de la capacité dans les deux systèmes avec l'augmentation du SNR, ce qui est attendu. Cependant, NOMA montre une capacité légèrement supérieure par rapport à OMA sur la plage de SNR. Cette différence significative de capacité entre les deux systèmes est justifiée par la bande passante (BW) divisée en deux pour le cas d'OMA par contre la bande passante en tout entier est utilisée par chaque utilisateur pour le cas de NOMA.

- **Le deuxième cas**

Afin de savoir comment les changements de bande passante affectent les résultats, nous augmentons la bande passante et analysons les résultats.

Dans ce cas, les paramètres de simulation deviennent comme ceci :

Distance des utilisateurs [m]	$d_1 = 6, d_2 = 4$
Coefficients d'allocation de puissance	$\alpha_1 = 0.7, \alpha_2 = 0.3$
Bande passante (BW) [Hz]	$BW = 10^9$
SNR [dB]	-30 : 10 : 30

Tableau III.2 - Paramètres de simulation pour le deuxième cas de deux utilisateurs

Les résultats sont présentés dans la figure III.4.

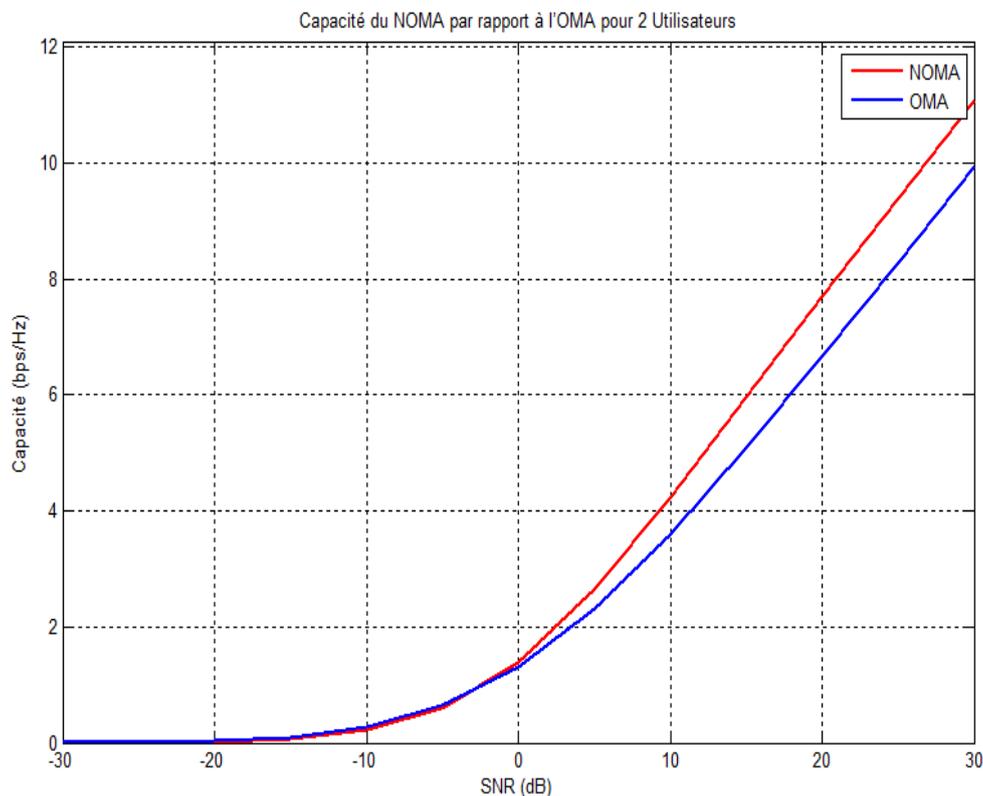


Figure III.4 - Capacité du NOMA par rapport à l'OMA pour deux utilisateurs 2

Après la comparaison, nous constatons que les capacités en fonction de SNR dans la figure III.3, sont dans la plage du SNR de 0 à 60 dB, tandis que les résultats de la figure III.4 montrent la plage de SNR -30 jusqu'à 30 dB, cette gamme est plus spécifique aux scénarios où le bruit est un facteur significatif car elle inclut des SNR négatifs, ce qui correspond à des environnements où le bruit est plus puissant que le signal.

La bande passante fait référence à la plage de fréquences utilisée pour transmettre un signal. Lorsque la bande passante (BW) augmente, le niveau de bruit (N_0) augmente, ce qui entraîne une diminution du SNR si la puissance de transmission (P_t) reste constante. Le rapport signal sur bruit (SNR) est un facteur clé qui influence la capacité de transmission dans les systèmes de communication.

Lorsque $SNR < 0$ dB, les capacités de NOMA et OMA sont presque les mêmes. Cela est dû au fait que le SNR est relativement faible, donc l'avantage du NOMA n'est pas très marqué. Lorsque le SNR est faible, les effets de l'allocation de puissance et de la superposition des signaux dans NOMA ne procurent pas encore un avantage significatif par rapport à OMA.

À partir de la figure III.4, il est clair que les bénéfices du NOMA apparaissent bien dans la partie positive du SNR. Lorsque $SNR > 0$ dB, la capacité du NOMA est supérieure à celle de OMA. Cela s'explique par le fait que NOMA est plus efficace que OMA lorsque le SNR est élevé. NOMA permet une meilleure utilisation des ressources spectrales en superposant les signaux des deux utilisateurs, tandis que OMA les sépare, ce qui est moins efficace lorsque le SNR est élevé.

- **Le troisième cas**

Dans ce dernier cas, nous avons augmenté les distances des utilisateurs par rapport aux figures précédentes. Les utilisateurs sont maintenant à des distances de 30 et 20. Les coefficients d'allocation de puissance et la bande passante restent les mêmes que sur la figure précédente.

Dans ce cas nous adoptons les paramètres de simulation mentionnés dans le tableaux III.3.

Distance des utilisateurs [m]	$d_1 = 30, d_2 = 20$
Coefficients d'allocation de puissance	$\alpha_1 = 0.7, \alpha_2 = 0.3$
Bande passante (BW) [Hz]	$BW = 10^9$
SNR [dB]	0 :5 :30

Tableau III.3 - Paramètres de simulation pour le deuxième cas de deux utilisateurs

La figure III.5 représente la comparaison des capacités de NOMA et OMA pour cette configuration spécifique. Nous pouvons observer comment les performances des deux systèmes varient avec une distance accrue entre les utilisateurs.

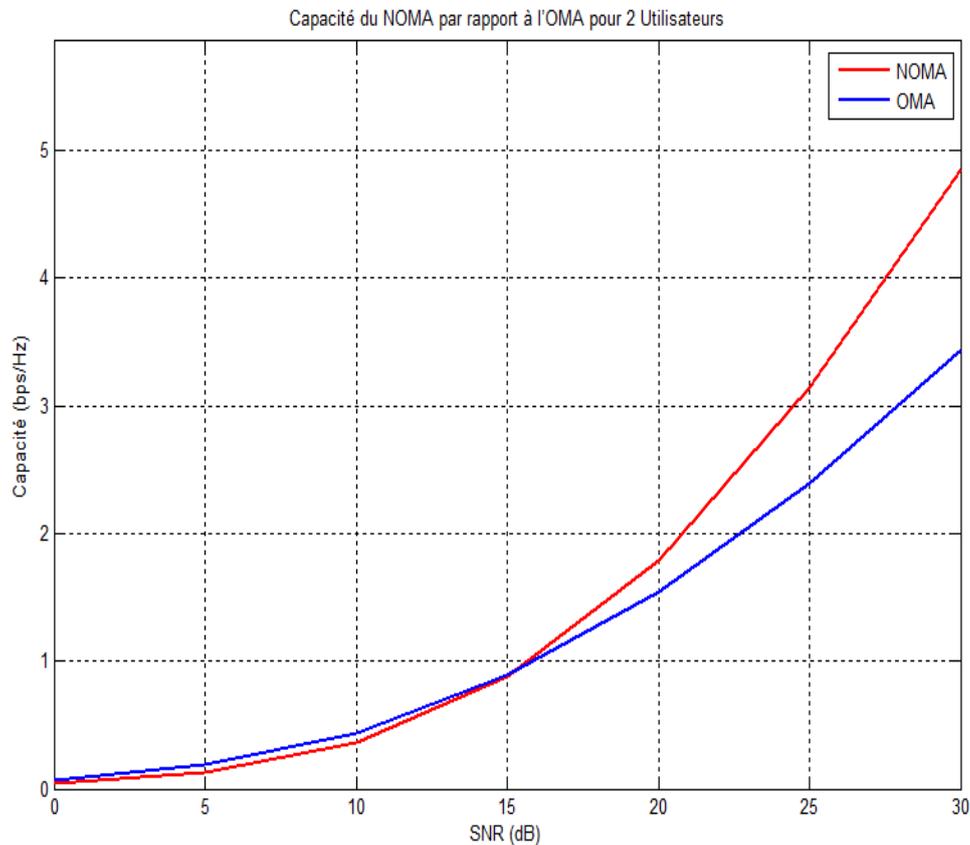


Figure III.5 - Capacité du NOMA par rapport à l'OMA pour deux utilisateurs 3

Dans l'intervalle de SNR de 0 à 16 dB où il y a une certaine quantité de bruit perceptible, la capacité des deux systèmes commence à augmenter. Nous observons que les capacités du NOMA et OMA sont proches.

Cela s'explique par le fait que, à ces niveaux de SNR, les avantages de NOMA ne sont pas pleinement exploités. Les effets bénéfiques de l'allocation de puissance et de la superposition des signaux dans NOMA ne procurent pas encore un gain de capacité significatif par rapport à OMA.

En plus, cela est dû à des conditions de propagation défavorables et à une distance accrue entre les utilisateurs et la station de base, ce qui limite les avantages de NOMA dans cette configuration.

Dans l'intervalle de SNR de 16 à 30 dB où les effets du bruit diminuent, la capacité du NOMA devient supérieure à celle de l'OMA. Cela s'explique par l'efficacité accrue de NOMA lorsque le SNR augmente. En effet, NOMA permet une meilleure utilisation de la ressource radio en superposant les signaux des utilisateurs et en les séparant au niveau du récepteur. Cela se traduit par un gain de capacité par rapport à OMA qui alloue orthogonalement les ressources et limite l'efficacité spectrale comparée à NOMA.

En comparant la figure III.5 avec les figures précédentes, nous remarquons que le changement dans les distances a affecté la capacité de l'OMA et du NOMA. Nous observons que les valeurs de capacité de la figure III.5 sont inférieures à celles des figures III.3 et III.4.

Lorsque la distance entre les utilisateurs et la station de base augmente, cela peut entraîner une diminution de la capacité du système, en raison de la diminution des coefficients de propagation du canal et de la puissance reçue par les utilisateurs.

En comparant les différentes figures, nous pouvons observer l'effet des variations des paramètres sur les capacités de NOMA et OMA. Ces variations influencent les performances des deux systèmes d'accès multiple, et l'analyse comparative nous permettra de mieux comprendre les avantages et les inconvénients de chaque approche dans différentes situations. Les résultats montrent que NOMA a tendance à offrir une capacité supérieure à OMA dans diverses configurations, mais l'ampleur de cette amélioration dépend des conditions spécifiques du canal et des paramètres.

En résumé, les différences de performances entre OMA et NOMA s'expliquent par leur gestion différente des ressources spectrales, qui se traduit par un avantage de NOMA lorsque le SNR est élevé. Nous confirmerons la validité de ces résultats auprès d'un plus grand nombre d'utilisateurs.

III.4.2. Comparaison de la capacité entre NOMA et OMA pour trois utilisateurs

Les figures III.6 ; III.7 et III.8 montrent la comparaison des capacités de NOMA et OMA pour trois utilisateurs, en fonction du rapport signal sur bruit (SNR). Pour chaque figure la courbe rouge représente la capacité de NOMA tandis que la courbe bleue représente la capacité d'OMA.

- L'axe des y représente la capacité en bits par seconde par Hertz (bps/Hz).

- L'axe des x représente le SNR en décibels (dB).

- **Le premier cas**

Dans le premier cas de comparaison des capacités du NOMA et l'OMA pour trois utilisateurs, illustré dans la figure III.6, nous basons notre analyse sur ces paramètres :

Distance des utilisateurs [m]	$d_1 = 6, d_2 = 4, d_3 = 2$
Coefficients d'allocation de puissance	$\alpha_1 = 0.7, \alpha_2 = 0.2, \alpha_3 = 1 - (\alpha_1 + \alpha_2)$
Bande passante (BW) [Hz]	$BW = 10^6$
SNR [dB]	0 :10 :60

Tableau III.4 - Paramètres de simulation pour le premier cas de trois utilisateurs

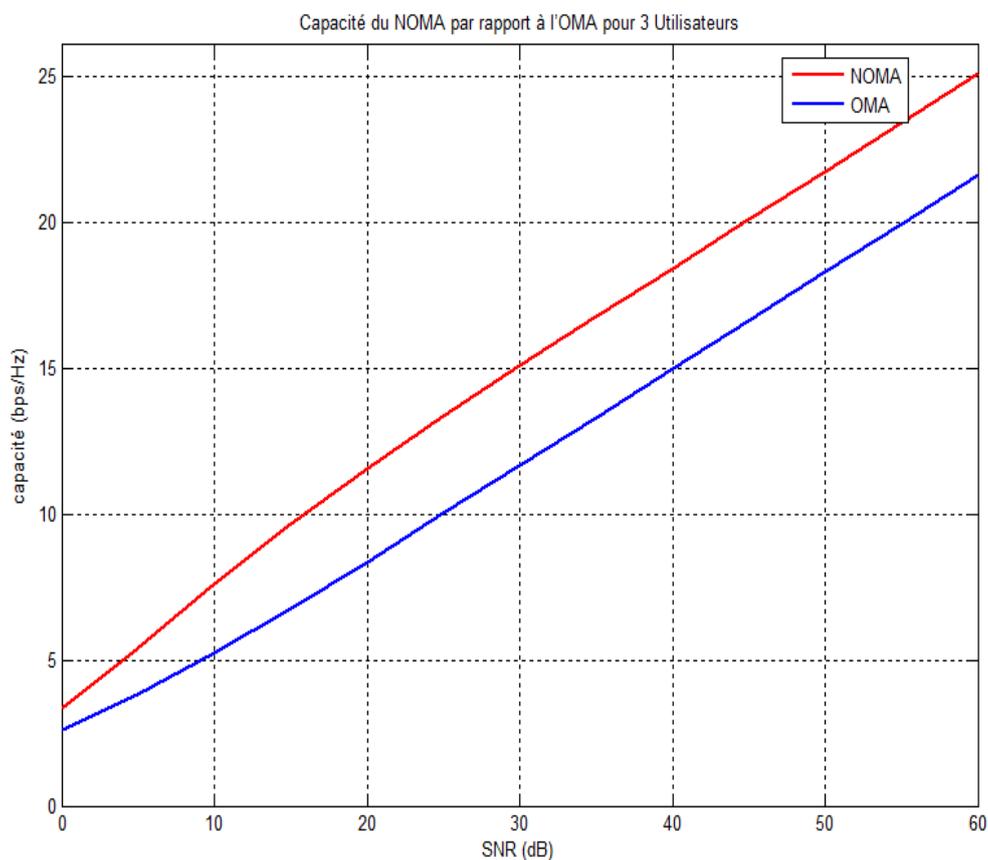


Figure III.6 - Capacité du NOMA par rapport à l'OMA pour trois utilisateurs 1

Sur la base de cette figure, les résultats obtenus montrent clairement que la capacité totale du système NOMA est supérieure à celle du système OMA, à mesure que le SNR augmente. Comme dans le scénario à deux utilisateurs, la principale raison qui conduit à ces résultats est la gestion différente des ressources spectrales pour OMA et NOMA.

- **Le deuxième cas**

Nous augmentons la bande passante et observons les résultats obtenus indiqués sur la figure III.7. Dans ce cas, les paramètres de simulation deviennent comme ceci :

Distance des utilisateurs [m]	$d_1 = 6, d_2 = 4, d_3 = 2$
Coefficients d'allocation de puissance	$\alpha_1 = 0.7, \alpha_2 = 0.2, \alpha_3 = 1 - (\alpha_1 + \alpha_2)$
Bande passante (BW) [Hz]	$BW = 10^9$
SNR [dB]	0 :5 :30

Tableau III.5 - Paramètres de simulation pour le deuxième cas de trois utilisateurs

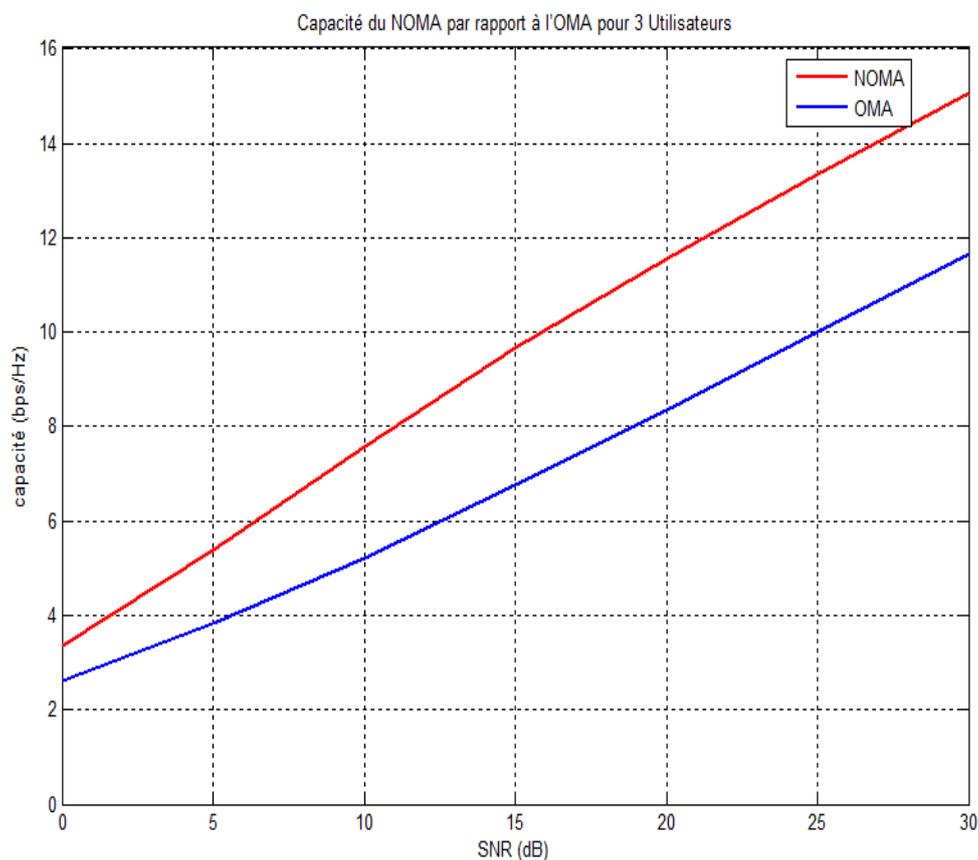


Figure III.7 - Capacité du NOMA par rapport à l'OMA pour trois utilisateurs 2

Les capacités des deux systèmes sont présentées en fonction du SNR dans la plage 0 à 30 dB. Les valeurs de capacité dans cette plage de SNR sont similaires à celles de la figure III.7 malgré l'augmentation de la bande passante. Cela suggère que la limitation principale dans cette plage est la qualité du signal (SNR), plutôt que la bande passante, parce que d'autres paramètres comme la distance n'ont pas changé.

Les capacités de NOMA sont toujours meilleures que celles de OMA en raison de son approche non orthogonale, de l'optimisation de l'allocation de puissance entre les utilisateurs et du décodage successif des signaux.

La figure III.7 n'affiche pas de données pour les SNR entre 30 et 60 dB comme la figure III.6. Par conséquent, il n'est pas possible de comparer directement les capacités à des niveaux de SNR élevés après l'augmentation de la bande passante.

- **Le troisième cas**

Dans ce dernier cas, nous avons augmenté les distances des utilisateurs par rapport aux figures précédentes. La figure III.8 qui représente la comparaison des capacités de NOMA et OMA, résultant à partir de de ces paramètres :

Distance des utilisateurs [m]	$d_1 = 30, d_2 = 20, d_3 = 10$
Coefficients d'allocation de puissance	$\alpha_1 = 0.7, \alpha_2 = 0.2, \alpha_3 = 1 - (\alpha_1 + \alpha_2)$
Bande passante (BW) [Hz]	$BW = 10^9$
SNR [dB]	0 :5 :30

Tableau III.6 - Paramètres de simulation pour le deuxième cas de trois utilisateurs

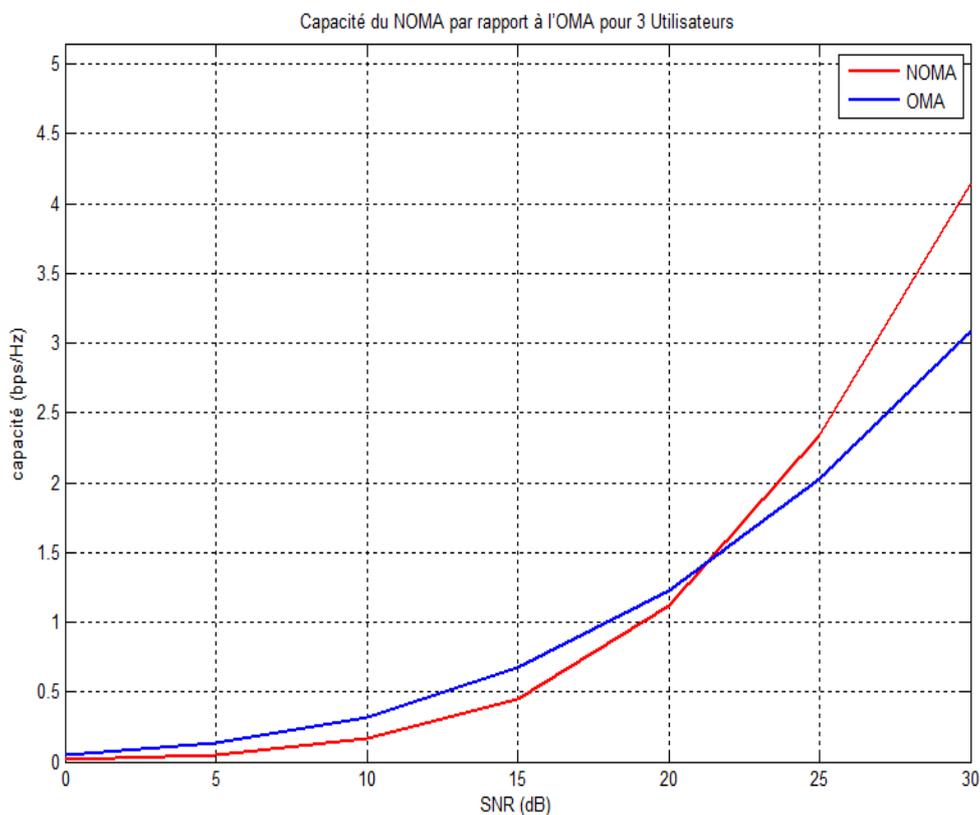


Figure III.8 - Capacité du NOMA par rapport à l'OMA pour trois utilisateurs 3

Dans la plage SNR de 0 à 22 dB, la capacité de l'OMA est meilleure que celle du NOMA. Cela est justifié par la difficulté de faire l'annulation d'interférence (SIC) pour plusieurs utilisateurs. L'algorithme SIC se caractérise par sa complexité ainsi la non-fiabilité dans les niveaux de bruit élevé (SNR bas), dont c'est difficile d'extraire le signal qui convient à un utilisateur et ne peut pas distinguer les signaux superposés aux petites valeurs de SNR, par contre OMA permet une bonne gestion des interférences et reçoit les signaux sous une forme orthogonaux.

Lorsque le SNR = 22 dB, les performances d'OMA et NOMA sont les mêmes.

Dans la plage SNR de 22 à 30 dB, La performance du NOMA est supérieure à celle d'OMA car NOMA utilise la détection successive des interférences (SIC) pour décoder les signaux des utilisateurs, permettant ainsi une meilleure réutilisation du spectre et des gains de capacité plus importants.

En comparant la figure III.8 avec la figure III.7, nous observons que les valeurs de capacité de la figure III.8 sont inférieures à celles de la figure III.7. Lorsque la distance entre les utilisateurs et la station de base augmente, cela peut entraîner une diminution de la capacité du système en raison de l'atténuation du signal, de l'augmentation de l'interférence et des caractéristiques de propagation du signal.

III.4.3. Comparaison de la capacité entre NOMA et OMA pour cinq utilisateurs

Les figure III.9 ; III.10 et III.11 montrent les capacités de NOMA et OMA pour cinq utilisateurs, en fonction du rapport signal sur bruit (SNR). Pour chaque figure la courbe rouge représente la capacité de NOMA tandis que la courbe bleue représente la capacité d'OMA.

- **Le premier cas**

La figure III.9, dépend de ces paramètres :

Distance des utilisateurs [m]	$d_1 = 6, d_2 = 4, d_3 = 3, d_4 = 2, d_5 = 1$
Coefficients d'allocation de puissance	$\alpha_1 = 0.7, \alpha_2 = 0.15, \alpha_3 = 0.1, \alpha_4 = 0.03$ $\alpha_5 = 1 - (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4)$
Bande passante (BW) [Hz]	$BW = 10^6$
SNR [dB]	0 : 10 : 60

Tableau III.7 - Paramètres de simulation pour le premier cas de cinq utilisateurs

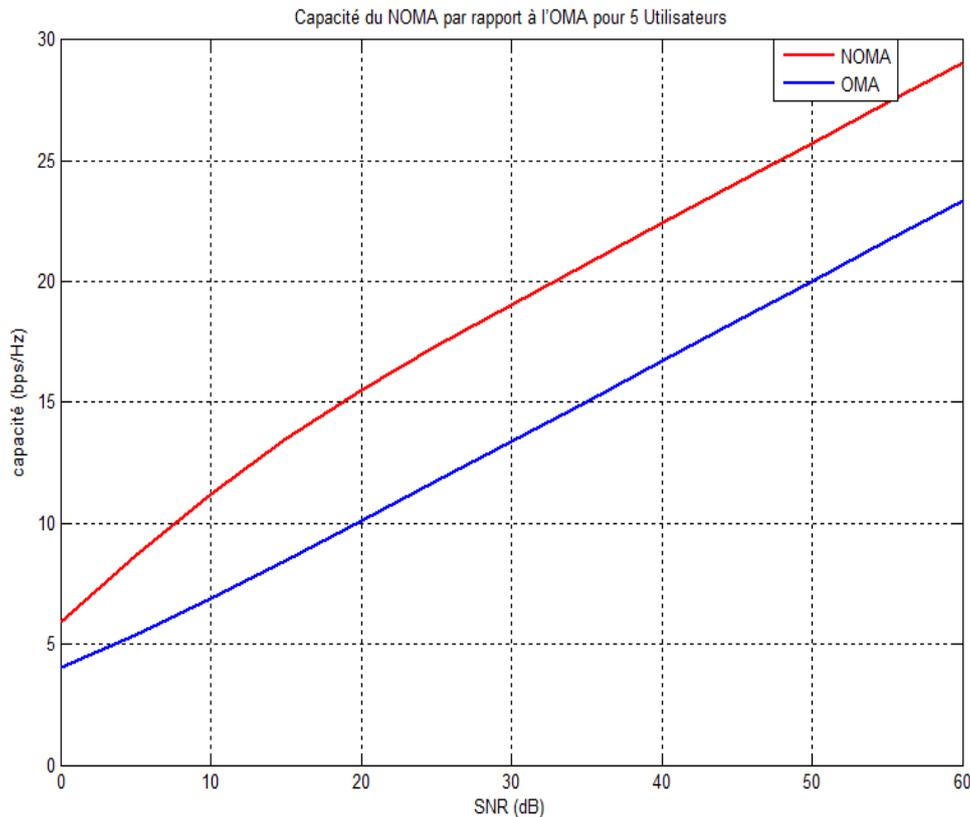


Figure III.9 - Capacité du NOMA par rapport à l'OMA pour cinq utilisateurs 1

Les capacités des deux systèmes sont présentées en fonction du SNR dans la plage 0 à 60 dB. Cette plage de SNR représente des conditions de canal où le rapport signal sur bruit est relativement bon à excellent.

La comparaison de la capacité montre comment chaque technique se comporte à des niveaux de signal de plus en plus forts. Cependant, Le système NOMA présente une croissance plus rapide et atteinte des niveaux plus élevés par rapport au système OMA en utilisant un multiplexage non orthogonal, une gestion efficace de l'interférence et une allocation adaptative des ressources, ce qui permet une utilisation optimale du spectre et une augmentation de la capacité du système.

- **Le deuxième cas**

La figure III.10 est réalisée après augmentation de la bande passante par rapport à la figure précédente. Les paramètres sont les suivants :

Distance des utilisateurs [m]	$d_1 = 6, d_2 = 4, d_3 = 3, d_4 = 2, d_5 = 1$
Coefficients d'allocation de puissance	$\alpha_1 = 0.7, \alpha_2 = 0.15, \alpha_3 = 0.1, \alpha_4 = 0.03$ $\alpha_5 = 1 - (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4)$
Bande passante (BW) [Hz]	$BW = 10^9$
SNR [dB]	0 : 5 : 30

Tableau III.8 - Paramètres de simulation pour le deuxième cas de cinq utilisateurs

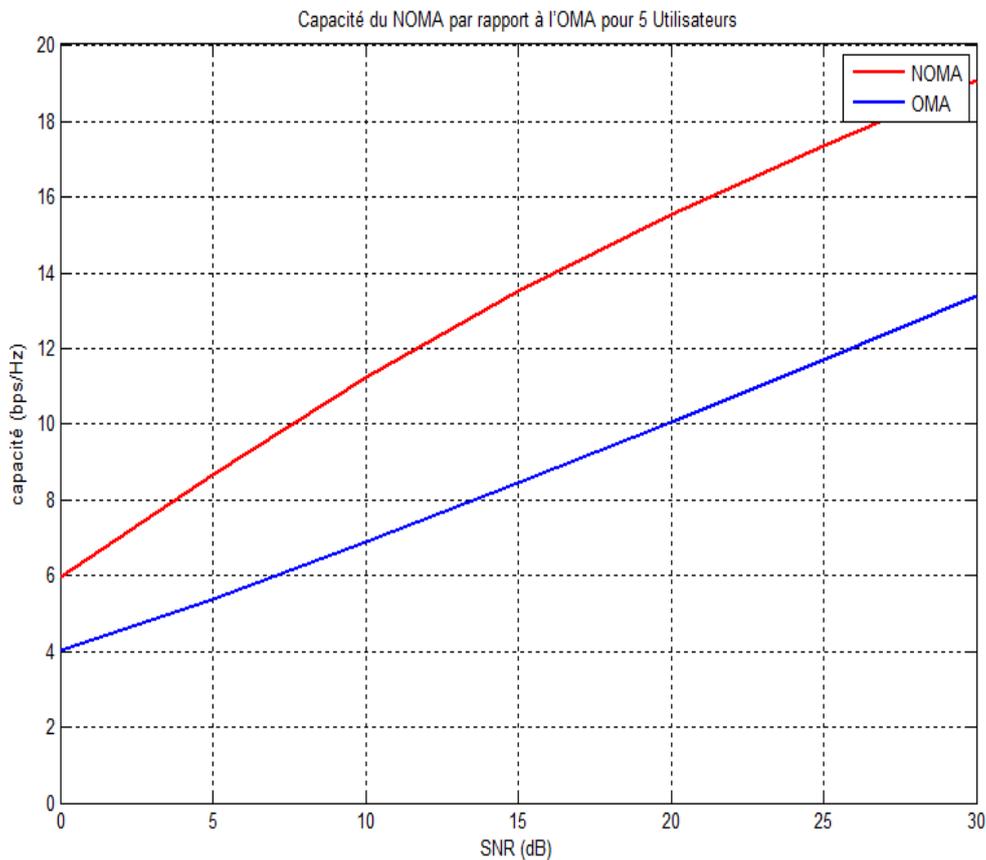


Figure III.10 - Capacité du NOMA par rapport à l'OMA pour cinq utilisateurs 2

Lorsque la bande passante augmente, la puissance totale du bruit augmente, ce qui tend à diminuer le SNR si la puissance du signal reste inchangée. Donc, les capacités des deux systèmes dans la figure III.10 sont présentées en fonction du SNR dans la plage 0 à 30 dB. Les valeurs de capacité dans cette plage de SNR sont similaires à celles de la figure III.9.

Les ressources orthogonales permettent une bonne gestion des interférences, mais l'efficacité spectrale est moindre par rapport à NOMA, comme dans les résultats précédents. Cela est justifié par la bande passante (BW) divisée en cinq pour le cas d'OMA par contre la bande passante en tout entier est utilisée par chaque utilisateur pour le cas du NOMA.

La figure III.10 n'affiche pas de données pour les SNR entre 30 et 60 dB comme la figure III.9. Par conséquent, il n'est pas possible de comparer directement les capacités à des niveaux de SNR élevés après l'augmentation de la bande passante.

• **Le troisième cas**

La figure III.11 qui représente la comparaison des capacités de NOMA et OMA, résultant après l'augmentation de la distance entre les utilisateurs et la station de base.

Distance des utilisateurs [m]	$d_1 = 50, d_2 = 40, d_3 = 30, d_4 = 20, d_5 = 9$
Coefficients d'allocation de puissance	$\alpha_1 = 0.7, \alpha_2 = 0.15, \alpha_3 = 0.1, \alpha_4 = 0.03$ $\alpha_5 = 1 - (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4)$
Bande passante (BW) [Hz]	$BW = 10^9$
SNR [dB]	0 : 5 : 30

Tableau III.9 - Paramètres de simulation pour le troisième cas de cinq utilisateurs

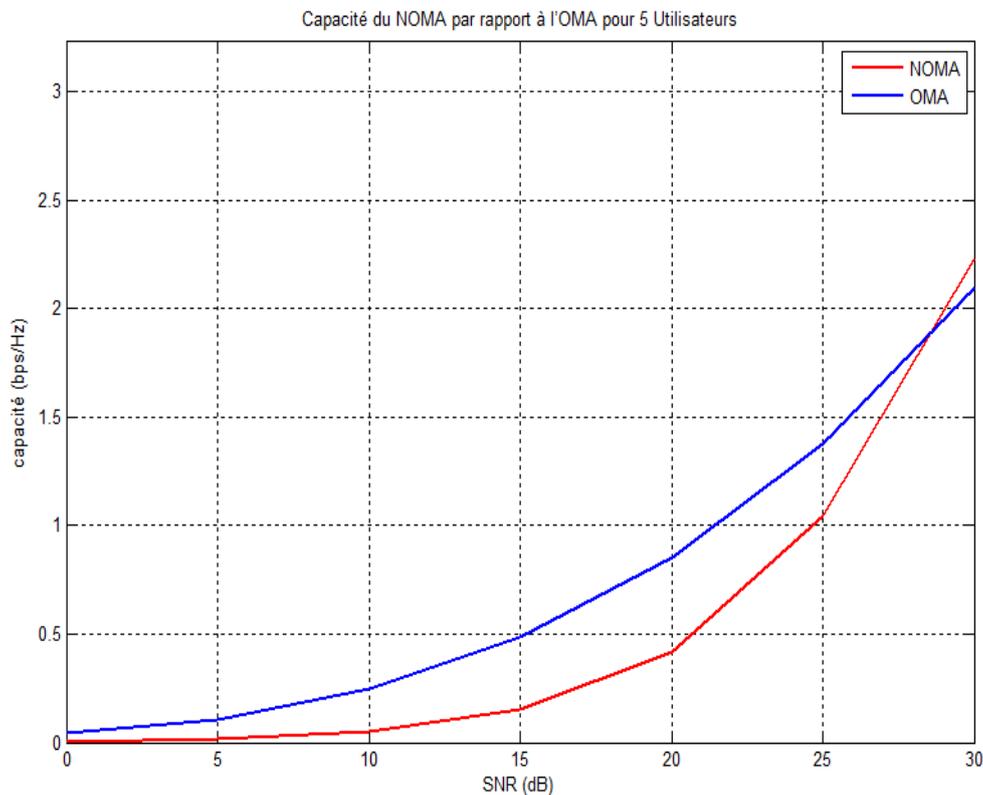


Figure III.11 - Capacité du NOMA par rapport à l'OMA pour cinq utilisateurs 3

Nous remarquons que les performances de l'OMA et du NOMA augmentent lentement avec l'augmentation du rapport signal/bruit (SNR), et que les capacités de l'OMA sont meilleures que celles du NOMA, mais à un certain moment, le NOMA devient meilleur que l'OMA.

En comparant la figure III.11 avec la figure III.10, nous remarquons clairement que les valeurs de capacité dans la figure III.11 sont moins que ceux dans la figure III.10.

Lorsque les utilisateurs sont éloignés de la station de base dans les deux systèmes, la capacité diminue en raison de l'atténuation du signal et la nécessité d'une puissance de transmission plus élevée, ce qui réduit la qualité du signal reçu et entraîne une utilisation inefficace de la puissance.

De plus, les interférences inter-utilisateurs deviennent plus prononcées, rendant plus difficile la détection et l'annulation d'interférence, ce qui peut réduire l'efficacité et la fiabilité de la SIC et diminuer la capacité du système NOMA.

Dans ce cas, OMA peut être plus avantageux que NOMA en raison de sa capacité à mieux gérer l'interférence, de sa simplicité de mise en œuvre et de sa robustesse contre les effets de la distance sur le canal de communication.

III.4.4. Comparaison de la capacité entre NOMA et OMA pour dix utilisateurs

Dans le but d'explorer de nouvelles perspectives, nous analysons maintenant un scénario distinct des précédents, qui consiste à comparer la capacité entre NOMA et OMA pour un grand nombre d'utilisateurs en fonction de la puissance de transmission.

La figure III.12 représente la capacité d'OMA en fonction de la puissance de transmission pour dix utilisateurs.

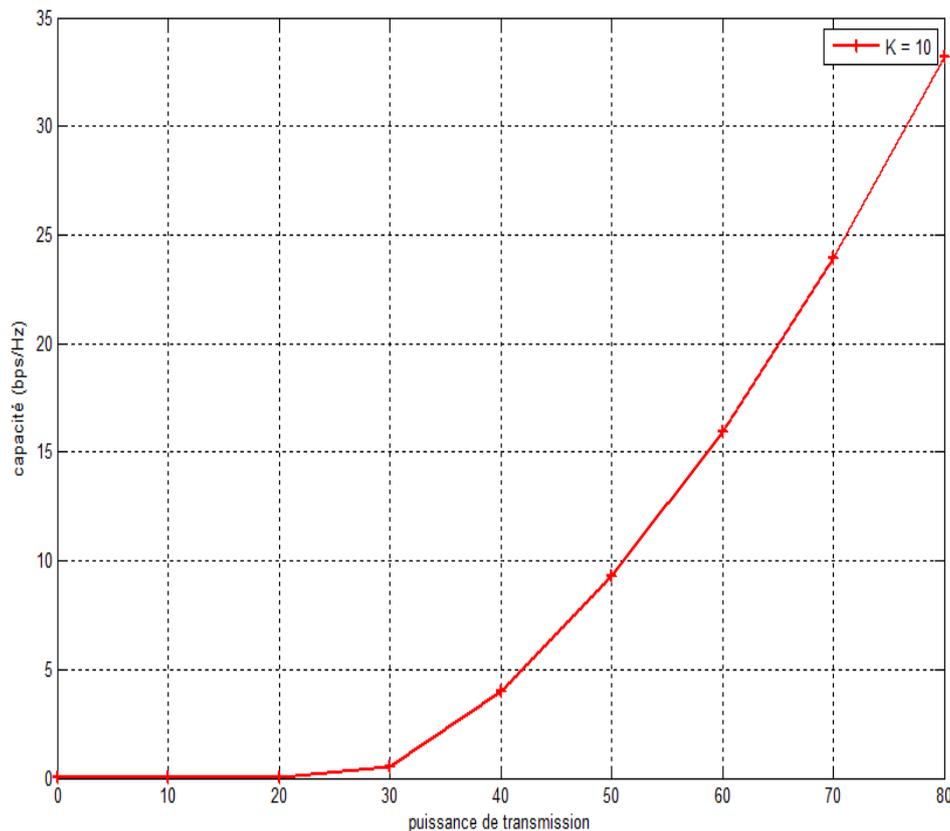


Figure III.12 - Capacité d'OMA en fonction de la puissance de transmission pour dix utilisateurs

Intervalle de puissance de transmission de 0 à 21 :

Dans cette plage, la capacité d'OMA est inexistante. Cela peut s'expliquer par le fait que la puissance de transmission est insuffisante pour permettre une communication fiable entre la station de base et les utilisateurs distants. Les utilisateurs ne reçoivent pas un signal assez fort pour établir une connexion stable. La faible puissance peut entraîner une atténuation du signal pendant sa propagation, entraînant une capacité nulle.

Intervalle de puissance de transmission de 21 à 30 :

Dans cette plage, la capacité d'OMA est plus proche de zéro ou presque nulle. Cela signifie que même avec une augmentation de la puissance de transmission, les interférences et les pertes de signal peuvent encore prédominer. La capacité d'OMA reste très faible pour les utilisateurs éloignés.

Intervalle de puissance de transmission de 30 à 60 :

Dans cette plage de puissance de transmission, la puissance de transmission atteint un niveau avec lequel la capacité d'OMA devient significative. Le signal devient plus fort par rapport au bruit et aux interférences, permettant une meilleure transmission des données et donc une capacité plus élevée. La communication entre les émetteurs et les récepteurs devient plus stable et efficace, ce qui se traduit par une augmentation de la capacité.

En résumé, la figure III.12 montre une relation entre la puissance de transmission et la capacité d'OMA. Aux faibles niveaux de puissance, la capacité est nulle ou très proche de zéro, indiquant une communication difficile. Cependant, à mesure que la puissance augmente, la capacité s'améliore progressivement, suggérant une meilleure transmission des données.

La figure III.13 représente la capacité de NOMA en fonction de la puissance de transmission pour dix utilisateurs.

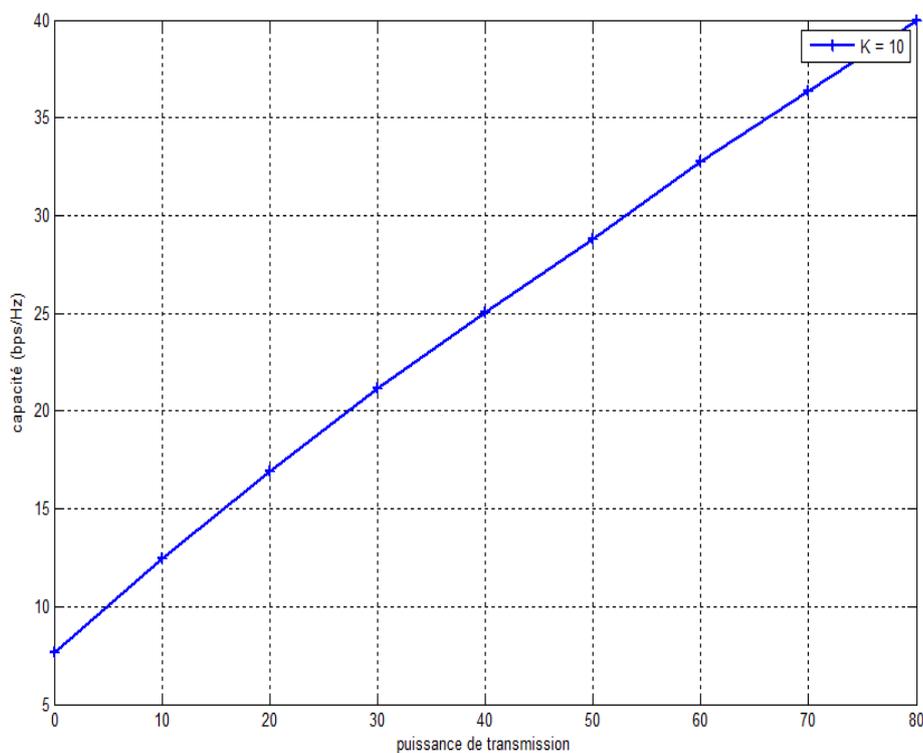


Figure III.13 - Capacité de NOMA en fonction de la puissance de transmission pour dix utilisateurs

Contrairement à la précédente pour OMA, dans ce cas, la capacité de NOMA ne commence pas à zéro. Elle commence à une valeur initiale de 5 bps/Hz. Cela indique que même avec une puissance de transmission très faible, le NOMA est capable de fournir une certaine capacité de communication. Cela peut être dû aux techniques d'attribution de puissance et de multiplexage non orthogonal utilisées dans le NOMA, qui permettent une meilleure utilisation des ressources spectrales.

À mesure que la puissance de transmission augmente, la capacité de NOMA augmente également. Cela montre l'efficacité de NOMA dans l'utilisation de la puissance de transmission pour maximiser la capacité. Les gains en capacité sont probablement dus à une meilleure gestion des interférences et à une utilisation plus efficace des ressources disponibles.

- **Comparaison :**

Après avoir comparé la figure III.13 et la figure III.12, nous obtenons les résultats suivants :

- **Capacité initiale :**

NOMA est capable de fournir une capacité initiale significative même à faible puissance, ce qui n'est pas le cas pour OMA. Cela démontre l'efficacité de NOMA dans des conditions de faible puissance de transmission.

- **Réponse à l'augmentation de la puissance de transmission :**

OMA nécessite une certaine puissance de transmission minimale pour commencer à offrir une capacité significative, tandis que NOMA peut tirer parti de toute augmentation de puissance de manière plus efficace et immédiate.

- **Efficacité :**

NOMA est intrinsèquement plus efficace pour gérer les ressources de transmission, ce qui le rend plus adapté aux scénarios où la puissance de transmission est limitée ou doit être utilisée de manière optimale.

En conclusion, NOMA offre des avantages significatifs par rapport à OMA en termes de capacité initiale et d'efficacité avec l'augmentation de la puissance de transmission. Cette comparaison met en évidence la supériorité de NOMA dans les environnements de communication modernes où l'efficacité spectrale et la gestion des ressources sont cruciales.

III.4.5. Comparaison de la capacité entre NOMA et OMA pour vingt utilisateurs

La figure III.14 montre une augmentation linéaire de la capacité d'OMA avec la puissance de transmission pour vingt utilisateurs.

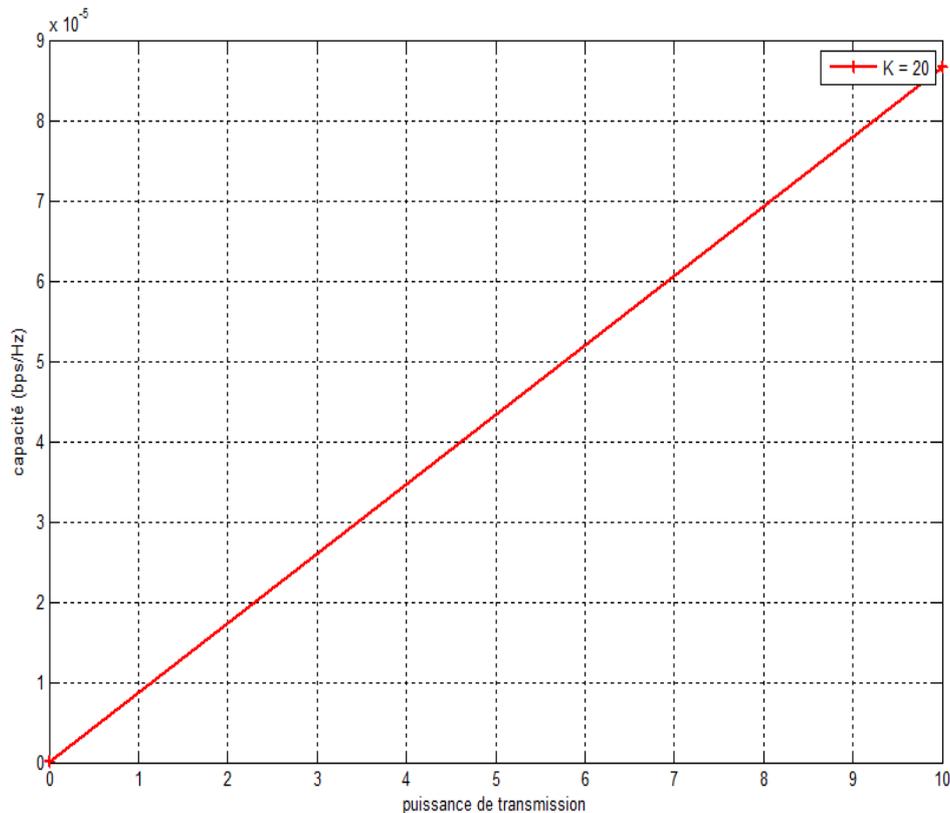


Figure III.14 - Capacité d'OMA en fonction de la puissance de transmission pour vingt utilisateurs

Dans un système OMA, chaque utilisateur dispose de ressources orthogonales (temps, fréquence, ou code). Lorsque la puissance de transmission augmente, la qualité du signal reçu s'améliore, ce qui permet une meilleure détection et décodage des données transmises. Pour vingt utilisateurs, l'effet combiné de l'augmentation de la puissance de transmission pour chaque utilisateur se traduit par une augmentation linéaire globale de la capacité du système.

Les valeurs très faibles de capacité de l'ordre de 10^{-5} suggèrent que, malgré l'augmentation linéaire, la performance en termes de capacité est encore limitée. Cela peut être attribué à plusieurs facteurs :

- Interférences
- Puissance de transmission limitée : La plage de puissance de transmission (0 à 10) est relativement faible, ce qui ne permet pas d'atteindre des capacités plus élevées.

- Effet d'échelle : Avec vingt utilisateurs, chaque utilisateur a une part réduite des ressources disponibles, ce qui limite la capacité par utilisateur.

Ce comportement indique que, bien que l'OMA puisse offrir une augmentation prévisible de la capacité avec l'augmentation de la puissance de transmission, les gains en capacité sont limités par la configuration et les ressources disponibles. Pour améliorer la capacité dans des systèmes avec un grand nombre d'utilisateurs, des techniques plus avancées comme le NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access) pourraient être nécessaires.

La figure III.15 montre une augmentation de la capacité du NOMA avec la puissance de transmission pour vingt utilisateurs.

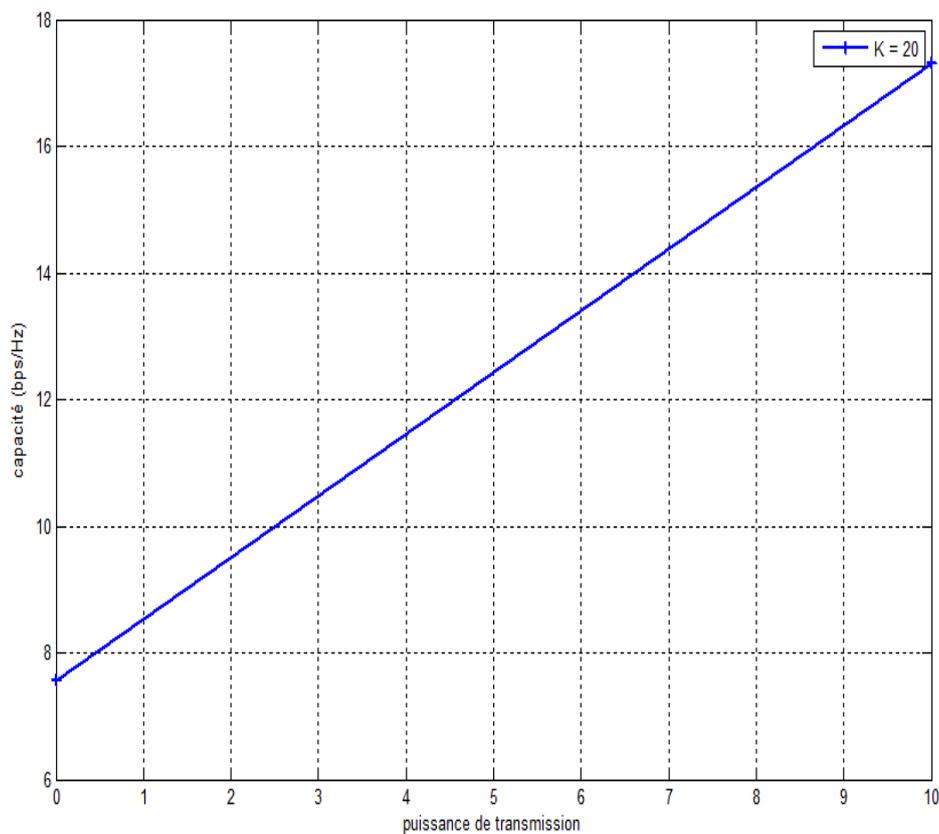


Figure III.15 - Capacité de NOMA en fonction de la puissance de transmission pour vingt utilisateurs

La figure III.15 de capacité de NOMA en fonction de la puissance de transmission pour vingt utilisateurs montre que la capacité commence à partir d'une valeur initiale de 7.5 bps/Hz. La capacité augmente de manière continue avec l'augmentation de la puissance de transmission. Cela indique que même avec une puissance de transmission relativement faible, NOMA est capable de fournir une capacité de communication initiale, et cette capacité augmente proportionnellement à mesure que la puissance de transmission augmente.

III.5. Conclusion

Ce chapitre présente une comparaison approfondie des performances entre les systèmes NOMA (Accès non orthogonal multiple) et OMA (Accès multiple orthogonal). En utilisant un modèle de simulation spécifique et en analysant différents scénarios, nous avons évalué les capacités des deux systèmes. Les résultats obtenus démontrent de manière concluante que le système NOMA surpasse le système OMA en termes de capacité. Ainsi, nous pouvons conclure que le système NOMA offre de meilleures performances par rapport au système OMA dans les scénarios étudiés.

Conclusion générale

La 5G représente une évolution majeure dans le domaine des communications mobiles, apportant des améliorations significatives en termes de vitesse, de latence et de capacité. Elle ouvre la voie à de nouvelles applications et à des usages innovants, transformant divers secteurs tels que l'Internet des Objets (IoT), les villes intelligentes, l'industrie et les médias.

Premièrement, nous avons examiné les généralités sur la 5G, en explorant son évolution depuis les générations précédentes (1G à 4G). Chacune de ces générations a apporté des avancées technologiques notables, menant à la 5G qui se distingue par son utilisation efficace du spectre radio, ses petites cellules, le MIMO massif, le beamforming et le full-duplex.

Deuxièmement, nous avons étudié les techniques d'accès multiple, en distinguant les accès multiples orthogonaux (OMA) et non orthogonaux (NOMA). La 5G utilise des techniques avancées pour optimiser l'efficacité spectrale et énergétique, rendant possible une communication plus dense et plus rapide. Des technologies comme l'annulation d'interférences successives (SIC) et le codage de superposition (SC) jouent un rôle crucial dans l'amélioration des performances du NOMA par rapport aux techniques traditionnelles de l'OMA.

Enfin, la simulation et les résultats ont montré que le NOMA offre une capacité supérieure à celle de l'OMA, en particulier lorsqu'il y a un nombre élevé d'utilisateurs. Les simulations ont démontré des gains significatifs en termes de capacité et d'efficacité, confirmant le potentiel du NOMA pour répondre aux exigences croissantes des réseaux mobiles de nouvelle génération.

En conclusion, la 5G, grâce à ses avancées technologiques et ses nouvelles techniques d'accès, est bien positionnée pour répondre aux besoins futurs en matière de communication mobile. Elle est non seulement une évolution naturelle des générations précédentes, mais aussi une révolution qui transformera notre manière de communiquer, de travailler et de vivre. Les résultats de ce projet de fin d'étude démontrent clairement les avantages et les potentialités de la 5G, en particulier avec l'adoption des techniques d'accès multiples non orthogonales. Il est évident que la 5G jouera un rôle déterminant dans le futur des technologies de l'information et de la communication.

Bibliographie

Chapitre 01

- [01] *Téléphone portable : tout savoir sur le nouveau réseau 5G*. SEB117 [Internet]. 08.07.2020. Disponible sur : <https://seb117.fr/blog/telephone-portable-tout-savoir-sur-la-5G>
- [02] Moore K. *From 1G to 5G: The Evolution of Mobile Communications*. MPIRICAL [Internet]. 2023. Disponible sur : <https://www.mpirical.com/blog/the-evolution-of-mobile-communication>
- [03] Mills M. *Évolution et différences des réseaux de télécommunications : de 1G à 5G*. ITIGIC [Internet]. itigic.com. 2020. Disponible sur : https://itigic.com/fr/evolution-and-differences-networks-from-1g-to-5g/?expand_article=1
- [04] *Définition et Différence entre les réseaux mobiles 1G 2G 3G 4G et 5G*. Jil Network [Internet]. 2019. Disponible sur : <https://www.jilnetwork.com/2019/07/definition-des-reseaux-mobiles-1g-2g-3g-4g-5g.html>
- [05] *Différence entre 1G et 2G*. WayToLearnX [Internet]. 2018. Disponible sur: <https://waytolearnx.com/2018/07/difference-entre-1g-et-2g.html#:~:text=1G%20est%20incapable%20de%20fournir%20un%20service%20Internet,vix%20et%20la%20faible%20autonomie%20de%20la%20batterie>
- [06] Bartlett M. *The Evolution of Mobile Wireless Technology from 0G to 5G*. Medium [Internet]. 2019. Disponible sur : <https://medium.com/@Matt.Bartlett/the-evolution-of-mobile-wireless-technology-from-0g-to-5g-cf98c80e2323>
- [07] Mouchet J. *UMTS et GSM : signification et différences*. Echos du Net [Internet]. 2024. Disponible sur : <https://www.echosdunet.net/reseau-mobile/difference-gsm-umts#:~:text=On%20parle%20aussi%20de%202G%20pour%20faire%20r%C3%A9f%C3%A9rence>
- [08] Gupta A, Jha R. K. "A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies". IEEE Access. vol. 3, pp. 1206-1232, 2015, doi: 10.1109/ACCESS.2015.2461602. Disponible sur : <https://ieeexplore.ieee.org/document/7169508>
- [09] *Réseau mobile : définition et différences entre 2G, 3G, 4G et 5G*. Echos du Net [Internet]. Disponible sur : <https://www.echosdunet.net/reseau-mobile>
- [10] SHARMA P. *Evolution of mobile wireless communication networks-1G to 5G as well as future prospective of next generation communication network*. International Journal of Computer Science and Mobile Computing. 2013;2(8):47-53. Disponible sur: <https://ijcsmc.com/docs/papers/August2013/V2I8201317.pdf>

[11] SALIH AA, ZEEBAREE SR, ABDULRAHEEM AS, et al. Evolution of mobile wireless communication to 5G revolution. *Rapports technologiques de l'Université du Kansai*. 2020;62(5):2139-2151.

Disponiblesur:https://www.researchgate.net/publication/342549960_Evolution_of_Mobile_Wireless_Communication_to_5G_Revolution

[12] Kalra B. A Comparative Study of Mobile Wireless Communication Network: 1G to 5G. *International Journal of Computer Science and Information Technology Research* 2014;2(3):430-433 .Disponible sur:

https://www.researchgate.net/publication/318673817_A_Comparative_Study_of_Mobile_Wireless_Communication_Network_1G_to_5G

[13] Gawas AU. An Overview on Evolution of Mobile Wireless Communication Networks: 1G-6G. *International journal on recent and innovation trends in computing and communication*. 2015;3(5):3130-3133. Disponible sur : <https://fr.scribd.com/document/281725987/An-Overview-on-Evolution-of-Mobile-Wireless-Communication-Networks-1G-6G>

[14] SHEIKH TA, BABUL FR. Evolution of Mobile Communication Networks. Dans : *National Conference on Recent Trends in Electronics and Communication Engineering*; 2020. p. 75.

Disponible sur : https://www.researchgate.net/publication/353795623_Evolution_of_Mobile_Communication_Networks

[15] Mechaileh JA. Releases 3GPP para 5G. *edge.uol* [Internet]. 2023. Disponible sur : <https://edge.uol/pt/insights/artigos/releases-3gpp-para-5g/>

[16] Romain P. Téléphonie mobile: les cinq objectifs de la 5G. *terrafemina* [Internet]. 2013. Disponible sur : <https://www.terrafemina.com/vie-pratique/economie-a-bourse/articles/33447-telephonie-mobile-les-cinq-objectifs-de-la-5g.html>

[17] Desai R. 5G. Dr Rajiv Desai [Internet].

Disponible sur : <https://drrajivdesaimd.com/2019/12/01/5g/>

[18] Rajiv. What are the difference between 4G and 5G technology - RF Page [Internet].

2022. Disponible sur: <https://www.rfpage.com/what-are-the-difference-between-4g-and-5g-technology/>

[19] 5G NR CA (Carrier Aggregation). *TELCOMA Training & Certifications* [Internet]. Disponible sur : <https://telcomatraining.com/5g-nr-ca-carrier-aggregation/>

[20] Spectre 5G Position de Politique Publique de la GSMA [Internet]. 2018 .12p. Disponible sur : <https://www.gsma.com/latinamerica/wp-content/uploads/2019/03/5G-Spectrum-Positions-FRA.pdf>

[21] Castro R. Los diferentes tipos de 5G y cómo funcionan. *WikiVersus* [Internet]. 2020. Disponible sur : <https://www.wikiversus.com/moviles/bandas-frecuencias-5g/>

[22] 5G Bands Explained: How They Work & Why They Matter. *www.celona.io* [Internet]. Disponible sur : <https://www.celona.io/5g-lan/5g-bands>

- [23] Bandes de fréquences 5G : 3 bandes primaires de la 5G et quand les utiliser. Arrow.com [Internet]. 2023. Disponible sur : <https://www.arrow.com/fr-fr/research-and-events/articles/5g-frequency-bands-explained#:~:text=La%20technologie%205G%20fonctionne%20dans%20trois%20bandes%20de,%C3%A0%20une%20nouvelle%20%C3%A8re%20de%20connectivit%C3%A9%20sans%20fil>
- [24] 5G Small Cell. IoT Industriel [Internet]. Disponible sur : <https://iotindustriel.com/glossaire-iiot/5g-small-cell/>
- [25] Khan S. The 5G Network Backbone: A Guide to Small Cell Technology. Telit Cinterion [Internet]. 2020. Disponible sur : <https://www.telit.com/blog/5g-networks-guide-to-small-cell-technology/>
- [26] Hadji T. Nousra R. Système d'accès Multiple Non orthogonal (NOMA) pour la nouvelle génération. Mémoire de master. Tebessa : Université d'Echahid Cheikh Larbi Tebessi, 2023, 71p.
- [27] BASSAID F. BENHABIB G. Etude et conception d'une antenne à base de méta-matériaux pour les applications sans fil 5G. Memoire de master. TLEMCEN : UNIVERSITE ABOU BAKR BELKAID, 2021,83p.
- [28] Introduction à la 5G. EFORT <http://www.efort.com> [Internet]. 2019. Disponible sur : <https://pdfcoffee.com/5g-efort-pdf-free.html>
- [29] Mundy J. Kavanagh S. What Is Massive MIMO Technology? 5g.co.uk [Internet]. 2019. Disponible sur : <https://5g.co.uk/guides/what-is-massive-mimo-technology/>
- [30] Quèsaco le beamforming ? I'MTech [Internet]. 2021. Disponible sur : <https://imtech.imt.fr/2021/03/01/quesaco-le-beamforming/#:~:text=Pourquoi%20le%20beamforming%20est%20utilis%C3%A9,faire%20des%20%C3%A9conomies%20d%27%C3%A9nergie>
- [31] Hoffmann M. Beamforming and Open RAN . RIMEDO Labs [Internet]. 2022. Disponible sur: <https://rimedolabs.com/blog/beamforming-and-open-ran/>
- [32] Les principales innovations de la 5G [Internet]. Caissedesdepots.fr [Internet].2020. Disponible sur : <https://www.icdc.caissedesdepots.fr/actualit%C3%A9s/les-principales-innovations-de-la-5g>
- [33] La 5G : une disruption technologique ? -LE M PAR VERBAT'EM [Internet]. 2020. Disponible sur : <https://le-m-verbatim.fr/la-5g-une-disruption-technologique/>
- [34] Full-Duplex Comm Almost Here. EE Times[Internet]. 2015. Disponible sur : <https://www.eetimes.com/author/r-colin-johnson/>
- [35] ETSI TR 121 915 V15.0.0 (2019-10) 3GPP TR 21.915 version 15.0.0 Release 15. Disponible sur : https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/121900_121999/121915/15.00.00_60/tr_121915v150000p.pdf

[36] What is the Difference Between NSA and SA? Which is Better? Router switch [Internet]. 2021. Disponible sur : <https://blog.router-switch.com/2021/08/what-is-the-difference-between-nsa-and-sa-which-is-better/>

[37] Quelle est la différence entre SA et NSA ? | TELETOPIX.ORG [Internet]. 2024. Disponible sur : <https://teletopix.org/fr/quelle-est-la-difference-entre-sa-et-nsa/#:~:text=La%20principale%20diff%C3%A9rence%20entre%20SA%20et%20NSA%20r%C3%A9side>

[38] Remmert H. Qu'est-ce que l'architecture de réseau 5G ? fr.digi.com [Internet]. 2021. Disponible sur : <https://fr.digi.com/blog/post/5g-network-architecture>

[39] Essid C. Réseaux 3G/4G/5G. Tunisie : Faculté Des Sciences De Tunis .

[40] Jacquemin A. La 5G, introduction et présentation générale des concepts techniques . DigitalCorner [Internet]. 2020. Disponible sur : <https://www.digitalcorner-wavestone.com/2020/06/la-5g-introduction-et-presentation-generale-des-concepts-techniques/>

[41] SALHANE I, RIFI M. La technologie 5G pour les objets connectés. En: Colloque sur les Objets et systèmes Connectés-COC'2021. 2021. Disponible sur : <https://hal.science/hal-03593719/document>

[42] 5G Internet des Objets : La Révolution de la Connectivité Intelligente . 5glab.orange.com [Internet]. Disponible sur : <https://5glab.orange.com/fr/5g-internet-des-objets-la-revolution-de-la-connectivite-intelligente/>

[43] Macharla M. 10 Innovations in IoT Using 5G . IoTEDU [Internet]. 2021. Disponible sur : <https://iot4beginners.com/10-innovations-in-iot-using-5g/>

[44] Georges. 5G : déploiement, caractéristiques et usages pour l'IoT . matooma Wireless Logic Group [Internet]. Disponible sur : <https://www.matooma.com/fr/s-informer/actualites-iot-m2m/5g-nouvelle-generation-nouveaux-usages>

[45] El Fayedh A. Qu'apporte la 5G à l'IoT ? IoT Industriel Blog [Internet]. 2019. Disponible sur : <https://iotindustriel.com/iot-iiot/quapporte-la-5g-a-liot/>

[46] Meurgues N. 4 bénéfices de la 5G dans l'industrie. ericsson.com [Internet]. 2021. Disponible sur : <https://www.ericsson.com/fr/blog/3/2021/7/4-benefices-5g-industrie>

[47] Industry 4.0 and Industry 5.0 Implementation Services. SRDRROBOTIK [Internet]. Disponible sur : <https://srdrobotik.com/en/urunler/industry-4-0-and-industry-5-0-implementation-services/>

[48] Basu S. How 5G will Affect the Video Streaming Industry. MUVI [Internet]. 2022. Disponible sur : <https://www.muvi.com/blogs/how-5g-will-affect-the-video-streaming-industry/>

[49] Best Free Online Streaming Websites In 2020. Henri Le Chat Noir [Internet]. 2020. Disponible sur : <https://henrilechatnoir.com/best-free-online-streaming-websites-in-2020/8255/>

[50] 5G et streaming : la combinaison qui va révolutionner votre smartphone ! PC EXPERT. 2023. Disponible sur : <https://www.pceexpertlemag.fr/5g-et-streaming-la-combinaison-qui-va-revolutionner-votre-smartphone/>

[51] Paule L. Les progrès de la mobilité grâce à la réalité virtuelle et augmentée. Le Blog de Laval Virtual I Actus VR/AR [Internet]. 2021. Disponible sur : <https://blog.laval-virtual.com/les-progres-de-la-mobilite-grace-a-la-realite-virtuelle-et-augmentee/>

[52] JAGANNATHAN S. La 5G, ou l'éducation réinventée. Banque mondiale | Blogs [Internet]. 2021. Disponible sur : <https://blogs.worldbank.org/fr/voices/la-5g-ou-leducation-reinventee>

[53] L'IMPACT DE LA 5G SUR L'INTERNET DES OBJETS (IOT). ITS IBELEM [Internet]. 2023. Disponible sur: <https://www.itsibelem.com/limpact-de-la-5g-sur-linternet-des-objets-iot/>

[54] Msalmi S, Aloui N, Bdiri F. La technologie du 5G

Chapitre 02

[55] Rouse M. Multiple Access. Techopedia [Internet]. 29 Juin 2023. Disponible sur : <https://www.techopedia.com/definition/8469/multiple-access>.

[56] Shah AFMS, Qasim AN, Karabulut MA, Ilhan H, Islam MdB. Survey and Performance Evaluation of Multiple Access Schemes for Next-Generation Wireless Communication Systems. IEEE Access [Internet]. 2021 [cité];9: 113428-113442. Disponible sur: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9512046/>

[57] Piskonova G. TRANSMISSION OFDM POUR LA TÉLÉPHONIE CELLULAIRE. LA MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE. MONTRÉAL : L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE, 19 DÉCEMBRE 2003. 201 p.
Disponible sur: https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/783/1/PISKONOVA_Galyna.pdf

[58] FERHI,W. Réseaux d'accès multiples non orthogonales NOMA pour la 5G. thèse de MASTER . Tlemcen : Université : Aboubakr Belkaïd , 2019/2020, 116 p.
[TOXI-INFECTIIONS ALIMENTAIRES \(theses-algerie.com\)](https://theses-algerie.com)

[59] Tech Differences. Difference Between FDM and OFDM. Tech Differences. [Internet]. Disponible sur: <https://techdifferences.com/difference-between-fdm-and-ofdm.html>.

[60] LAWAS NEWS. <https://teorilawas.blogspot.com/2013/01/komunikasi-data-pada-teknologi-cdma.html>

[61] THÉRIAULT M. ÉTUDE DES PERFORMANCES D'UN SYSTÈME DS-SS-CDMA AVEC RÉCEPTEUR RAKE DANS LE CONTEXTE UWB. Thèse de maîtrise en génie électrique . Laval: Université : FACULTÉ DES SCIENCES ET DE GÉNIE UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC, Octobre 2005, 89p .

[62] Advantages and Disadvantages of Frequency-division multiple access (FDMA). geeksforgeeks [Internet]. 02 Mar, 2021. Disponible sur : <https://www.geeksforgeeks.org/advantages-and-disadvantages-of-frequency-division-multiple-access-fdma/>

- [63] Advantages and disadvantages of FDMA.ECSTUFF4U for Electronics Engineer [Internet]. 22 Décembre 2017. Disponible sur : <https://www.ecstuff4u.com/2017/12/advantages-and-disadvantages-of-fdma.html>
- [64] Accès multiple par répartition dans le temps (TDMA) - Qu'est-ce que c'est et comment ça marche - Polaridad.es [Internet]. Disponible sur: <https://polaridad.es/fr/acceso-multiple-por-division-de-tiempo-tdma-que-es-y-como-funciona/>
- [65] Advantages and Disadvantages of TDMA [Internet]. Disponible sur: <https://www.tutorialspoint.com/advantages-and-disadvantages-of-tdma>
- [66] Time Division Multiple Access (TDMA). The International Engineering Consortium: 13p.Disponible sur:<https://cdn.preterhuman.net/texts/underground/telephony/cellular/tdma.pdf>
- [67] Polytechnic Hub [Internet]. 2017 . Advantages and disadvantages and applications of time division multiplexing (TDM). Disponible sur: <https://www.polytechnichub.com/advantages-disadvantages-applications-time-division-multiplexing-tdm/>
- [68] TECHWATCH.de. Comprendre la technologie CDMA : un test de guide complet 2024 [mai] • Techwatch.de [Internet]. 2023 . Disponible sur: <https://techwatch.de/fr/Articles/comprendre-la-technologie-cdma-un-guide-complet/>
- [69] CDMA (Code Division Multiple Access) : Tout ce que vous devez savoir sur cette technologie de communication.LENON [Internet]. Disponible sur: <https://lemon.fr/lexique/cdma-code-division-multiple-access-tout-ce-que-vous-devez-savoir-sur-cette-technologie-de-communication/>
- [70] Avantages et inconvénients du CDMA – StackLima [Internet]. juillet 5, 2022. Disponible sur: <https://stacklima.com/avantages-et-inconvenients-du-cdma/>
- [71] Telecom Trainer [Internet]. 2023 ofdma 4g. Disponible sur: <https://www.telecomtrainer.com/ofdma-4g/>
- [72] Lengoumbi C. Accès multiple OFDMA pour les systèmes cellulaires post 3G: allocation de ressources et ordonnancement .Thèse de doctorat d'université. [Télécom ParisTech]; 2008. p. 198. Disponible sur : <https://pastel.hal.science/pastel-00003747/document>
- [73] BENDAOU F, ABDENNEBI M, DIDI fedoua. Allocation des ressources radio en LTE. International Congress on Telecommunication and Application'14 University of A.MIRA Bejaia, Algeria, 23-24 APRIL 2014 ,6 p . Disponible sur : https://www.researchgate.net/publication/262380605_Allocation_des_ressources_radio_en_LTE
- [74] OFDMA [Internet]. Telecompedia. 2018. Disponible sur : <https://telecompedia.net/ofdma/>
- [75] Chaudhari Q. Advantages and Disadvantages of OFDM - A Summary [Internet]. Wireless Pi. 2022. Available from: <https://wirelesspi.com/advantages-and-disadvantages-of-ofdm-a-summary/>

- [76] Abdellatif K. ETUDE ET PERFORMANCE D'UN SYSTEME DE COMMUNICATION SANS FIL A BASE D'OFDMA MIMO [Internet].Thèse de doctorat d'université. [Université Ferhat Abbas – Sétif -1-]; 2017. 207p. Disponible sur : <http://dspace.univ-setif.dz:8888/jspui/bitstream/123456789/1104/1/THESE%20KHELIL.pdf>
- [77] Sienpégnou Hippolyte Y, Sharif A. EVALUATION DES PERFORMANCES DES TECHNIQUES D'ACCÈS OFDMA ET SC-FDMA DANS LA TECHNOLOGIE LTE [Internet]. [Tlemcen Abou Backr Belkaid]; 2012. p. 91. Available from: <https://theses-algerie.com/3184719636260830/memoire-de-master/universite-abou-bekr-belkaid---tlemcen/evaluation-des-performances-des-techniques-d-acc%C3%A8s-ofdma-et-sc-fdma-dans-la-technologie-lte>
- [78] SC-FDMA (Single Carrier – Frequency Division Multiple Access) [Internet]. Telecom Trainer. 2023. Disponible sur : <https://www.telecomtrainer.com/sc-fdma-single-carrier-frequency-division-multiple-access/>
- [79] HIGUCHI K, BENJEBBOUR A. Non-orthogonal Multiple Access (NOMA) with successive interference cancellation for future Radio Access. IEICE Transactions on Communications. 2015;E98.B(3):403–14. doi:10.1587/transcom.e98.b.403 Disponible sur : https://www.researchgate.net/publication/276393975_Non-orthogonal_Multiple_Access_NOMA_with_Successive_Interference_Cancellation_for_Future_Radio_Access
- [80] Power Allocation Scheme for Non-Orthogonal Multiple Access in Underwater Acoustic Communications - Scientific Figure on ResearchGate. Disponible sur : https://www.researchgate.net/figure/The-difference-between-orthogonal-multiple-access-OMA-and-non-orthogonal-multiple_fig2_320680888
- [81] Md Shipon, A. Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for Cellular Wireless Communications. Thèse de master .Winnipeg : Université du Manitoba, 2017, 143 p. Disponible sur : <https://mspace.lib.umanitoba.ca/server/api/core/bitstreams/aeaff842-dd40-4dce-a209-dd82c717c18c/content>
- [82] Islam SM, Avazov N, Dobre OA, Kwak K. Power-domain Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in 5G systems: Potentials and challenges. IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2017;19(2):721–742. doi:10.1109/comst.2016.2621116 . Disponible sur : <https://arxiv.org/pdf/1609.06261>
- [83] Liu Y, Qin Z, El Kashlan M, Ding Z, Nallanathan A, Hanzo L. "Nonorthogonal Multiple Access for 5G and Beyond". Proceedings of the IEEE. 2017 Dec;105(12):2347-2381. doi: 10.1109/JPROC.2017.2768666. Disponible sur : <https://ieeexplore.ieee.org/document/8114722>
- [84] A Survey on Application of Non-Orthogonal Multiple Access to Different Wireless Networks. Electronics. 2019 . Disponible sur : <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Survey-on-Application-of-Non-Orthogonal-Multiple-Anwar-Seet/5ec4dfb81b3adc2b8a48a8490b9a2e3698d5d57b>
- [85] Anwar A, Seet BC, Hasan MA, Li XJ. A Survey on Application of Non-Orthogonal Multiple Access to Different Wireless Networks. Electronics [Internet]. 15 nov 2019 ;8(11):1355. Disponible sur: <https://www.mdpi.com/2079-9292/8/11/1355>

- [86] Necib A . Debbeche H . Comparaison des performances entre NOMA et OFDM pour le réseau 5G . Thèse de master . El-Oued : Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued , 2021,87p.
- [87] Sen S, Santhapuri N, Choudhury RR, Nelakuditi S. Successive Interference Cancellation: A Back of the Envelope Perspective. Southcarolina : Université Duke
- [88] CHAOU W. DJOUADI F. Etude de la Technique d'Accès Multiple Non Orthogonal NOMA . these de Master . BEJAIA : UNIVERSITE A. MIRA ,2020,68 p.
- [89] Aldababsa M, Toka M, Gökçeli S, Kurt GK, Kucur O. A Tutorial on Nonorthogonal Multiple Access for 5G and Beyond. Wireless Communications and Mobile Computing [Internet]. 2018. Disponible sur: <https://www.hindawi.com/journals/wcmc/2018/9713450/>
- [90] Aouissi F.Evaluation d'un système MIMO-NOMA de communication sans fil 5G.these de master. Guelma : Université 8Mai 1945 ,2022,89p.
- [91] WEI Z. Performance analysis and design of non-orthogonal multiple access for wireless communications. arXiv preprint arXiv:1910.00946. 2019.
- [92] Traia,M.Étude des méthodes d'accès dans les réseaux 5G .Rapport de Fin d'Année. Kef : Institut Supérieur de l'Informatique du Kef , 2021, 46p.
- [93] Barir A , Gherbi L, Zair S . Analyse des Performances d'un Système d'Accès Multiple Non Orthogonale (NOMA) . these de master .El-Oued : Université Echahid Hamma Lakhdar , 2021, 61p.
- [94] [Internet]. Disponible sur :https://www.wirelessapplications.com/pdf/1f/fd_td_cdma.pdf
- [95] DAHOUMANE T. Applications de l'OFDM . these de master . Alger : Ecole Nationale Polytechnique, 2012, 71p .
- [96] Ding Z , Liu Y, Choi J , Sun Qi, Elkashlan M .Application of non-orthogonal multiple access in LTE and 5G networks." - IEEE Communications Magazine, 2017 , vol. 55, no 2, p. 185-191.
- [97] Vaezi M, Poor HV, Ding Z. Multiple access techniques for 5G wireless networks and beyond. Cham, Suisse : Springer ; 2019.
- [98] Quels sont les avantages du noma par rapport à L'Oma? [Internet]. Disponible sur <https://teletopix.org/fr/quels-sont-les-avantages-du-noma-par-rapport-a-loma/>