



**DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**

**MEMOIRE**

**DE FIN D'ETUDES POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN**

**RESEAUX ET TELECOMMUNICATIONS**

**THEME**

**Systeme d'accès Multiple Non orthogonal (NOMA)  
pour la nouvelle génération**

**Présenté par le binôme :**

- Hadji Takoua
- Nousra Rahima

**Devant le jury :**

- |                      |     |           |
|----------------------|-----|-----------|
| - Dr. Bouchemha Amel | MCA | Président |
| - Dr. Djellab Hanane | MCA | Encadreur |
| - Dr. Aouiche Chaima | MAB | Examineur |

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

A decorative floral element consisting of a central flower with several leaves and smaller buds, positioned at the top left of the calligraphic text.

# Remerciements

Nous tenons tout d'abord à exprimer notre gratitude envers Dieu qui nous soutenu, donné la patience et le courage nécessaires tout au long de ces années d'études. nous souhaitons également exprimer nos profonde gratitude envers notre encadreur, **Dr. Djellab Hanane**, pour ses précieux conseils et son assistance. Sa disponibilité et son écoute attentive ont été inestimables pendant la réalisation de ce mémoire.

Nous tenons à remercier sincèrement **Monsieur Saber Manaa**, dont l'aide et la contribution ont été essentielles à l'élaboration de ce mémoire. Sa collaboration précieuse, son soutien constant et ses encouragements ont eu une grande valeur pour nous.

Nous souhaitons exprimer notre gratitude envers la Faculté des Sciences et de la Technologie, en particulier le Département de génie électrique, pour la qualité et la richesse de leur enseignement. Leur engagement envers une formation actualisée est remarquable.

Nos remerciements vont également aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail avec diligence.

Nous ne pouvons pas conclure sans exprimer nos profonde reconnaissance envers mes parents, mes frères et mes sœurs. Leur soutien inestimable, leurs encouragements constants et la confiance qu'ils ont placée en nous avons été la base solide qui sont toujours motivé à nos surpasser et à donner le meilleur de nous-même.

Enfin, nous tenons à adresser mes sincères remerciements à mes chers amis qui m'ont soutenu tout au long de la phase de préparation de ce mémoire.

# Dédicaces

Je suis reconnaissant envers Dieu de m'avoir donné le courage, la volonté et les connaissances nécessaires pour achever mes études. Je dédie humblement ce travail à mes très chères personnes, à celle qui m'a toujours appris à réfléchir avant d'agir, à celle qui m'a soutenu tout au long de ma vie scolaire, à celle qui n'a jamais ménagé ses efforts pour mon bonheur :

**Ma mère bien-aimée.**

**À mon cher père**, qui possède un visage bon et qui est toujours près de mon cœur, à celui qui m'a enseigné le véritable sens de la vie.

**À ma sœur Sirine**, mon ange innocent, dont le cœur blanc et pur est comme une douce rivière qui coule au milieu des fleurs

Mes frères sont des dons de Dieu sur cette terre. Tout ce qui a été dit sur l'amour fraternel n'est que des mots, car aucun mot ne peut décrire pleinement l'amour que j'ai pour : **mes frères Raid, Abdelhak et Hichem.**

À mon fidèle amie, mon doux sourire, mon soutien moral, **Loubna**

À tous mes amies les plus sincères, **Asma, Mariem, Rawnek et Chams.**

À ma binôme pour ce travail, Rahima.

À tous les enseignants et étudiants du département de génie électrique.

Et enfin, à tous mes collègues qui ont partagé cette aventure avec moi.



- *Takoua*

# Dédicace

Je souhaite exprimer ma reconnaissance anticipée à Allah, le Puissant, puis je tiens à remercier chaleureusement mes précieux parents qui ont toujours été à mes côtés avec leurs conseils et leurs prières. Je suis profondément reconnaissant envers mes chers parents pour leur soutien tout au long de mon travail. Enfin, je tiens à adresser mes sincères remerciements à ma famille, en n'oubliant pas nos amis et nos proches. Et bien entendu, je suis reconnaissant envers tous mes collègues pour leur collaboration.



- *Rahima*

# Table des matières

Remerciements	i
Dédicaces	ii
Liste des symboles et abréviations	vii
Liste des tableaux	viii
Table des figures	ix
Introduction générale	1
<b>1 Généralités sur la 5G</b>	<b>3</b>
1.1 Introduction :	4
1.2 Évolution des réseaux mobiles :	4
1.2.1 La première génération (1G):	4
1.2.2 La deuxième génération (2G):	4
1.2.3 La troisième génération (3G):	5
1.2.4 La quatrième génération (4G):	5
1.2.5 La cinquième génération (5G):	5
1.3 Pourquoi la 5G ?	5
1.4 L'objectif de la 5G :	6
1.5 Les standards de la 5G :	7
1.5.1 3GPP:	7
1.5.2 Les catégories d'usage de 5G :	7
1.5.2.1 Communications massives de type machine (mMTC):	8
1.5.2.2 Large bande mobile amélioré(eMBB):	8
1.5.2.3 Communications ultra-fiables à faible latence(URLLC):	8
1.6 Les technologies de la 5G :	9
1.6.1 Les ondes millimétriques (mmWaves):	9
1.6.2 Petites cellules(Small cells):	10
1.6.3 MIMO Massive (Multiple Inputs - Multiple Outputs):	11
1.6.4 La formation de faisceaux (Beamforming):	12
1.6.5 Un duplex plein (Full-Duplex):	12
1.7 L'architecture de la 5G :	13
1.7.1 Aperçu du réseau cœur 5G:	16
1.8 Les applications de la 5G	17
1.9 Les avantages et les inconvénients de la 5G:	20
1.10 Conclusion	21

<b>2</b>	<b>Les techniques d'accès multiples:</b>	<b>22</b>
2.1	Introduction: . . . . .	23
2.2	Les techniques d'accès multiples: . . . . .	23
2.2.1	Les techniques d'accès multiples orthogonales: . . . . .	23
2.2.1.1	Accès multiple par une répartition de fréquences(FDMA): . . . . .	23
2.2.1.2	Accès multiple à répartition dans le temps (TDMA): . . . . .	24
2.2.1.3	Accès multiple par répartition de code (CDMA): . . . . .	25
2.2.1.4	Accès multiple par répartition en fréquence orthogonal(OFDMA):	25
2.2.2	Les techniques d'accès multiple non orthogonaux(NOMA): . . . . .	30
2.2.2.1	Codage de superposition(SC): . . . . .	31
2.2.2.2	Techniques d'accès multiples non-orthogonales dans le domaine de puissance NOMA (PD-NOMA): . . . . .	33
2.2.2.3	Techniques d'accès multiples non-orthogonales dans le domaine de code NOMA (C-NOMA): . . . . .	34
2.3	Les canaux de communication sans fils . . . . .	35
2.3.1	Canal de propagation par multi trajet: . . . . .	35
2.3.1.1	Le canal de Rayleigh: . . . . .	35
2.4	L'efficacité: . . . . .	36
2.5	Les applications de NOMA: . . . . .	37
2.5.1	Dans les réseaux cellulaires: . . . . .	37
2.5.2	Dans les réseaux UAV: . . . . .	38
2.6	Les avantages et les inconvénients de NOMA: . . . . .	39
2.7	Comparaison entre la NOMA et L'OMA: . . . . .	40
2.8	Conclusion: . . . . .	41
<b>3</b>	<b>Simulations et interpretation des résultats</b>	<b>42</b>
3.1	Introduction: . . . . .	43
3.2	Modèle de simulation: . . . . .	43
3.3	Analyse et interprétation des simulations: . . . . .	45
3.4	SIC parfait(Perfect SIC): . . . . .	45
3.4.1	Analyse de capacité: . . . . .	45
3.4.1.1	Comparaison entre deux utilisateur de système NOMA: . . . . .	45
3.4.1.2	Comparaison de la capacité entre NOMA et OMA pour deux utilisateurs: . . . . .	46
3.4.1.3	Comparaison entre deux utilisateurs par rapport l'allocation de puissance (PA): . . . . .	47
3.4.2	Analyse de la probabilité de panne: . . . . .	48
3.4.2.1	Comparaison de la probabilité de panne entre deux utilisateurs de système NOMA: . . . . .	48
3.4.2.2	Comparaison de la probabilité de panne entre NOMA et OMA pour deux utilisateurs: . . . . .	49
3.4.2.3	Comparaison de la probabilité de panne de deux utilisateur par rapport l'allocation de puissance: . . . . .	50
3.5	SIC imparfait(Imperfect SIC): . . . . .	51
3.5.1	Analyse de la capacité de deux utilisateurs: . . . . .	51
3.5.2	Analyse de la probabilité de panne de deux utilisateurs: . . . . .	52
3.6	Conclusion: . . . . .	53
	<b>Conclusion générale</b>	<b>54</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>55</b>

<b>Résumé</b>	<b>57</b>
<b>Abstract</b>	<b>58</b>
	<b>58</b>



# Listes des symboles et abréviations

<b>1G :</b>	First generation.
<b>2G :</b>	Second generation
<b>3G :</b>	Third generation
<b>3GPP :</b>	The 3rd generation Partnership Project
<b>4G :</b>	Fourth generation
<b>5G :</b>	Fifth generation
<b>AMF :</b>	Access and Mobility management Function
<b>BER :</b>	Bit error rate
<b>BS :</b>	Base Station
<b>EDGE :</b>	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
<b>eNB :</b>	eNodeB
<b>EPC :</b>	Enhanced Packet Core
<b>GPRS :</b>	General Packet Radio Service
<b>GSM :</b>	Global System for Mobile Communication
<b>HSPA :</b>	High Speed Packet Access
<b>ICI :</b>	Interférence inter-cluster
<b>LDPC :</b>	Low-Density Parity Check Code
<b>MPA :</b>	Message Passing Algorithm
<b>MMS :</b>	Multimedia Message Service
<b>MME :</b>	Mobility Management Entity
<b>MR :</b>	Mixed Reality
<b>NG-RAN :</b>	Next Generation-Radio Acces Network
<b>NFV :</b>	Network Functions Virtualization
<b>NSA :</b>	Non Stand-Alone
<b>PD-NOMA :</b>	Non-orthogonal multiple access power domain
<b>QoS :</b>	Quality of Service
<b>SA :</b>	Stand-Alone
<b>SBA :</b>	Service-Based Architecture
<b>SBI :</b>	Service-Based Interface
<b>SIC :</b>	Successive-interference cancelLation
<b>SNR :</b>	Signal-to-noise
<b>SCS :</b>	Sub Carriers Spacing
<b>SDN :</b>	Software-Defined Networking
<b>SMF :</b>	Session Management Function
<b>UE :</b>	User Equipment
<b>UPF :</b>	User Plane Function
<b>UHD :</b>	Ultra High Definition
<b>UAV :</b>	Unmanned Aerial Vehicle
<b>UMTS :</b>	Universal Mobile Telecommunications System
<b>VR :</b>	Vertual Reality

# Table des figures

1.1	Évolution des réseaux mobiles. . . . .	4
1.2	Comparaison des technologies 4G et 5G. . . . .	6
1.3	Feuille de route d'évolution de la 5G du 3GPP de 5G à la 5G Advanced. . . . .	7
1.4	Les catégories d'usage de 5G. . . . .	8
1.5	Les principales technologies mises en œuvre pour 5G. . . . .	9
1.6	Répartition de fréquence sur le spectre électromagnétique . . . . .	10
1.7	la technologie des petites cellules. . . . .	10
1.8	Système massive MIMO avec N antennes pour desservir K utilisateurs. . . . .	11
1.9	Type de massive MIMO . . . . .	12
1.10	La technologie beamforming. . . . .	12
1.11	La technologie Full-Duplex. . . . .	13
1.12	Architecture de bout en bout du système 5G. . . . .	14
1.13	L'architecture non autonome NSA. . . . .	14
1.14	L'architecture non autonome SA(L'architecture de 5G global). . . . .	15
1.15	L'architecture du système 5G avec un ensemble de NFs . . . . .	16
1.16	Exemple des applications de l'IoT. . . . .	18
1.17	Quelques exemples d'applications de la ville intelligente. . . . .	18
1.18	Exemple de l'industrie. . . . .	19
1.19	Exemple de la sécurité . . . . .	19
1.20	Exemple d'une application de la santé avec la 5G. . . . .	20
2.1	Les techniques d'accès multiple FDMA, TDMA, CDMA, OFDMA. . . . .	23
2.2	La trame LTE . . . . .	26
2.3	La structure de trame en FDD et FDD half-duplex. . . . .	27
2.4	La structure de trame en TDD. . . . .	27
2.5	Le Bloc ressources LTE. . . . .	28
2.6	La grille ressource de réseau 5G. . . . .	29
2.7	Annulation successive des interférences. . . . .	31
2.8	Allocation de puissance pour la liaison descendante. . . . .	32
2.9	Principe de NOMA dans le domaine de puissance. . . . .	33
2.10	Liaison montante du domaine de puissance NOMA. . . . .	33
2.11	La liaison descendante du NOMA. . . . .	34
2.12	Propagation par multi trajet. . . . .	35
2.13	Exemple de propagation multi trajet NLOS. . . . .	36
2.14	Un exemple de NOMA avec formation de faisceaux. . . . .	37
2.15	Un exemple de système NOMA coopératif à deux utilisateurs et à une BS. . . . .	38
2.16	illustration du jumelage d'utilisateurs dans les réseaux de drones assistés par NOMA. . . . .	39
2.17	Illustration pour les réseaux UAV pris en charge par NOMA. . . . .	39
3.1	Schéma de deux utilisateurs NOMA. . . . .	43
3.2	La capacité de deux utilisateurs NOMA proche et éloigné. . . . .	46

3.3	La capacité des deux systèmes OMA et NOMA. . . . .	47
3.4	La capacité de deux utilisateurs NOMA. . . . .	48
3.5	La probabilité de panne de deux utilisateurs NOMA. . . . .	49
3.6	La probabilité de panne des deux systèmes OMA et NOMA. . . . .	50
3.7	La probabilité de panne de deux utilisateurs en fonction l'allocation de puissance(PA). . . . .	51
3.8	La capacité de deux utilisateurs au cas de SIC imparfait. . . . .	52
3.9	La probabilité de panne de deux utilisateurs au cas de SIC imparfait. . . . .	53

# Liste des tableaux

1.1	Types de petites cellules . . . . .	11
2.1	La structure de la trame temporelle. . . . .	28
2.2	Numérolgie et nombre de symboles par sous-trame. . . . .	30
2.3	Comparaison entre les techniques OMA et NOMA . . . . .	40
3.1	Paramètres de simulations. . . . .	45

---

# Introduction générale

Au fil des décennies passées, les communications sans fil ont connu un développement rapide pour répondre aux besoins croissants en termes de débit, de mobilité des appareils et de gestion des ressources spectrales congestionnées. Cependant, les anciens systèmes de communication sans fil ne sont plus en mesure de répondre de manière optimale à ces besoins en raison de la sélectivité en fréquence des canaux et des multiples trajets qu'un même signal peut emprunter .

Le domaine des réseaux et des communications mobiles évolue rapidement, avec l'émergence de nouvelles technologies plus sophistiquées pour répondre aux demandes croissantes des clients en matière de rapidité et de disponibilité des services. Les opérateurs de télécommunications recherchent des solutions pour augmenter la capacité et la couverture Internet tout en maintenant la connectivité face à une demande croissante. Dans ce contexte, une technologie de nouvelle génération, la 5G, est en cours de développement. Elle représente une rupture majeure dans le domaine des opérateurs de téléphonie mobile et de la communication grand public, offrant de nouvelles perspectives et permettant de regrouper des applications et des usages très diversifiés au sein d'une seule technologie. La 5G apparaît ainsi comme une nouvelle opportunité pour la numérisation de la société et de l'économie, mais également comme une menace potentielle [1].

La 5G est la cinquième génération de la technologie cellulaire, conçue pour augmenter la vitesse, réduire le temps de réponse et améliorer la flexibilité des services sans fil. Elle offre une vitesse maximale théorique de 10 Gbps, tandis que la vitesse maximale pour la technologie 4G est limitée à 1 Gbps. Cette amélioration des performances peut bénéficier aux applications d'entreprise et à d'autres expériences numériques telles que les jeux en ligne, la vidéoconférence et les voitures autonomes. Ainsi, la 5G représente une avancée significative pour les technologies de communication sans fil, offrant des possibilités accrues pour les utilisateurs et les entreprises [2].

La 5G est une norme transversale qui vise à résoudre une série de problèmes, contrairement aux normes précédentes (3G et 4G). Elle comprend plusieurs normes fermes avec différentes modifications et technologies d'accès .

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 :

1-Le premier chapitre porte sur une étude générale de l'évolution des réseaux mobiles, en mettant particulièrement l'accent sur la technologie 5G. Nous examinerons en détail plusieurs concepts clés ainsi que les techniques prometteuses de cette cinquième génération, telles que les ondes millimétriques, le duplex plein(full-duplex), la formation de faisceaux (beamforming), Petites cellules(small cells) et le MIMO Massive.

---

2- 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 examinerons également les aspects liés aux liaisons montantes et descendantes, ainsi que certains concepts et relations mathématiques pertinents.

3-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 reposera sur des simulations réalisées à l'aide de MATLAB, en mettant particulièrement l'accent sur les résultats graphiques qui évaluent les performances des utilisateurs pour chaque technique.

Enfin, nous concluons ce mémoire en résumant les principaux résultats et en tirant des conclusions significatives de notre étude.

# Chapitre 1

## Généralités sur la 5G

## 1.1 Introduction :

Dans ce chapitre, notre attention est principalement portée sur la cinquième génération de communications sans fil (5G). Elle dispose de nombreuses ,il possède de nombreuses fonctionnalités très avancées pour pouvoir résoudre de nombreux problèmes de notre vie moderne . Elle offre des grands débits binaires allant jusqu'à 10Gbps ainsi qu'une latence de 1 ms pour les applications nécessitant une réponse en temps réel, ce qui la rend plus réactive et plus rapide pour les réseaux sans fil. De plus, cela permet une augmentation .

## 1.2 Évolution des réseaux mobiles :

La figure 1.1 illustre l'évolution des réseaux mobiles au fil des ans.[3]

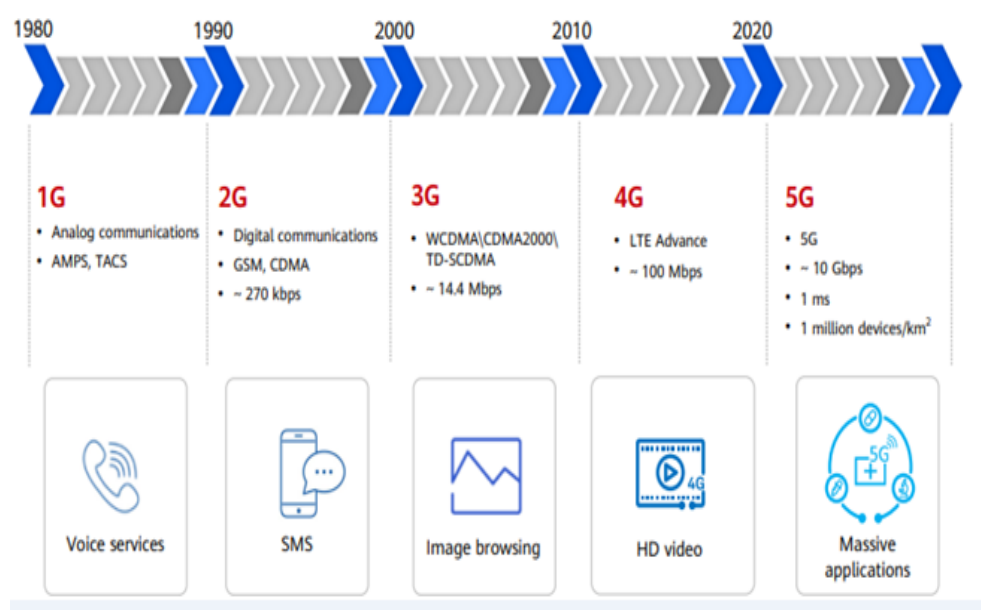


Figure. 1.1 – Évolution des réseaux mobiles.

### 1.2.1 La première génération (1G):

La première génération (1G) était basée sur des systèmes analogiques, alors que la deuxième génération (2G) a introduit des technologies numériques telles que la transmission de données par SMS, Les réseaux 1G utilisaient des signaux analogiques pour transmettre des voix et des données sans fil et ont été introduits pour la première fois dans les années 1980.

Les réseaux mobiles ont été initialement développés pour des applications industrielles,militaires et de recherche. Ils utilisaient des séries de réseaux différents avec une zone de diffusion limitée, ce qui rendait l'utilisation de la 1G réservée à un nombre très restreint d'utilisateurs. Cette technologie offrait un débit d'environ 2,4 kbps [3].

### 1.2.2 La deuxième génération (2G):

La technologie 2G, également connue sous le nom de deuxième génération de téléphonie sans fil, a été introduite dans les années 1990 et a utilisé une technologie numérique avec la mise en œuvre de techniques de multiplexage fréquentiel (FDMA) et de découpage temporel des canaux



disponibles (TDMA). Elle était basée sur le système global pour les communications mobiles (GSM) et permettait de passer des appels vocaux, d'envoyer des SMS (Short Message Service) et des MMS (Multimédia Message Service), avec des transferts de données à faible débit. Pour améliorer les débits, le réseau d'accès a été connecté à un réseau de cœur amélioré appelé GPRS (General Packet Radio Service), également appelé 2,5G ou 2G+. Le GPRS est considéré comme le précurseur de l'Internet mobile. Il convient de noter que tous les téléphones portables sont aujourd'hui compatibles avec au moins le réseau 2,5G, offrant un débit moyen de 48 Kbit/s [3]. En complément à cette évolution, la technologie d'accès EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution), également appelée 2,75G, offre un débit moyen de 100 Kbit/s, ouvrant ainsi la porte aux applications multimédias. Cette technologie a facilité la transition entre 2G et 3G.

### 1.2.3 La troisième génération (3G):

La 3G, troisième génération de réseaux mobiles, a été déployée en France à partir de 2004 pour remplacer le réseau GSM. Elle repose sur la technologie UMTS qui utilise une bande de fréquence plus large et un système de transfert de données par paquets, permettant d'atteindre des débits allant jusqu'à 2 Mbps. La 3G a connu trois évolutions successives : la 3G+ ou HSPA (High Speed Packet Access) qui offre un débit moyen de 3,6 Mbit/s et est 7 fois plus rapide que la 3G, le H+ (ou HSPA+) avec un débit moyen de 5 Mbit/s, et enfin le H+ Dual Carrier (ou DC-HSPA+) doté d'un débit moyen de 10 Mbit/s. Grâce à ces améliorations, la 3G permet notamment de télécharger plus rapidement des données, des applications ou des jeux, d'envoyer et de regarder des vidéos, ainsi que de bénéficier du GPS [3].

### 1.2.4 La quatrième génération (4G):

La 4G (quatrième génération de réseaux mobiles) est une technologie de communication sans fil qui utilise la commutation de paquets et la technique de multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM). Elle a été conçue pour fournir une couverture étendue et un débit élevé, répondant ainsi à la demande croissante de « très haut débit mobile », c'est-à-dire des débits théoriques supérieurs à 100 Mbit/s, voire supérieurs à 1 Gbit/s. La norme LTE (Long Term Evolution) est la base de la 4G, offrant un débit théorique pouvant atteindre jusqu'à 150 Mbit/s, soit trois fois plus rapide que la 3G. Les évolutions de la 4G, telles que la 4G+ (ou 4G LTE Advanced) et la 4G++ (ou 4G+ UHD), permettent des vitesses de navigation deux à trois fois plus rapides que la 4G standard [3].

La 4G permet de transférer rapidement des fichiers volumineux tels que des photos, des musiques et des vidéos, ainsi que de réaliser des appels vidéo de meilleure qualité et des vidéos en haute définition[3] .

### 1.2.5 La cinquième génération (5G):

La 5G(La cinquième génération (5G) succède aux les génération précédentes, à la fin de l'année 2020. le nom légal « IMT-2020 » Elle va utiliser plus de fréquences et des fréquences différentes de la 4G.Basée sur plusieurs nouvelles technologies.

La 5G vise un débit accru à 30 Mbit/s et de très faible latence de 1 ms, proche de celui de la fibre optique, permettant de proposer une connectivité performante là où la fibre est absente [3].

## 1.3 Pourquoi la 5G ?

La 4G c'est la quatrième génération de réseaux mobiles. Elle succède à la 3G apparue il y a une dizaine d'années. Chaque génération améliorant les performances, la 4G permet de surfer jusqu'à

10 fois plus vite qu'en 3G avec des débits théoriques de 150 Mbit/s [4]. Cependant, ce dernier fait face à certains inconvénients, notamment:

- Il est incapable de répondre aux exigences d'une densité de trafic élevée.
- Un volume de data limité chez certains opérateurs.
- Elle ne peut pas gérer autant d'appareils par kilomètre carré.

Et en raison des exigences de plus en plus mondiales pour une large couverture à l'avenir et Raisons de l'augmentation du trafic de données mobile, C'est pourquoi il était nécessaire de passer à un La nouvelle génération 5G Comme le montre la figure1.2 [4] .

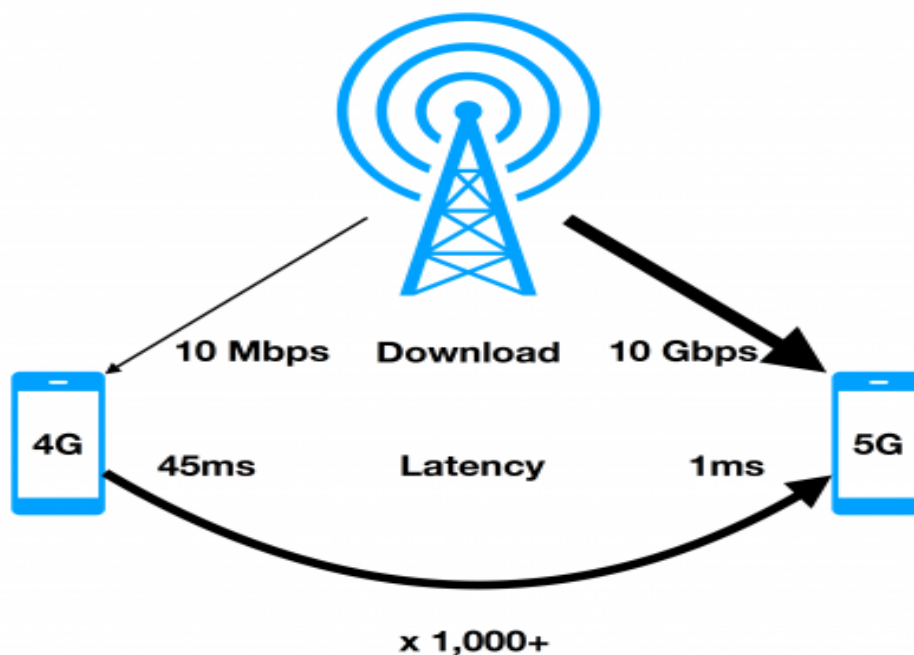


Figure. 1.2 – Comparaison des technologies 4G et 5G.

## 1.4 L'objectif de la 5G :

La 5G est la dernière innovation en matière de téléphonie mobile sans fil, qui succède à la 4G et est rapidement devenue l'une des technologies les plus populaires en matière de communication sans fil. Cette technologie offre une performance remarquable en termes de vitesse, d'efficacité et de polyvalence, ouvrant ainsi la voie à une « société de télécommunications durable ». Cette dernière vise à :

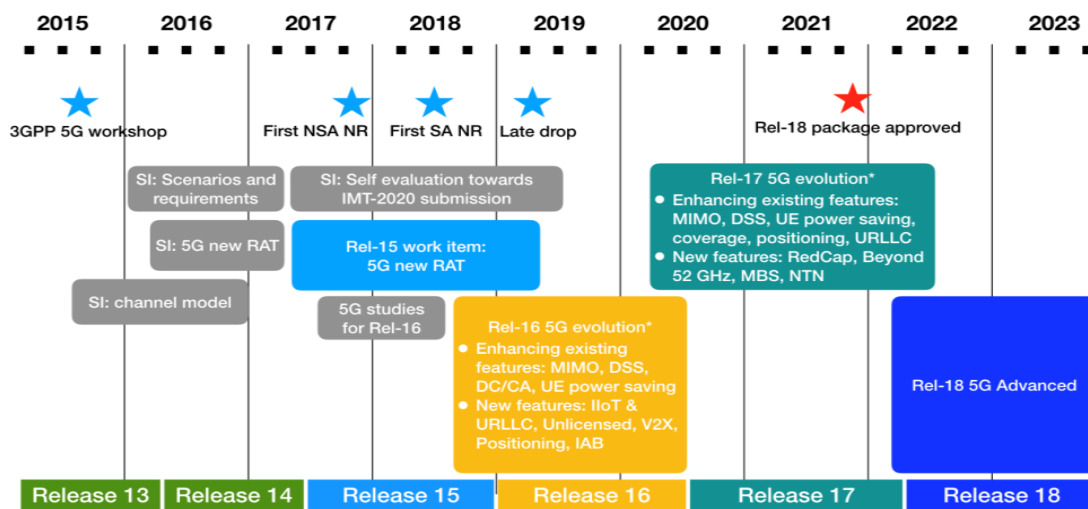
- Jusqu'à 100 fois plus d'appareils connectés par unité de surface (par rapport à la 4G LTE).
- Moins d'antennes.
- Les meilleurs débits (10 Gb par seconde).
- 100 % de couverture du réseau.
- 90 % de réduction en utilisation d'énergie du réseau.
- Plus de batterie, moins de consommation.

## 1.5 Les standards de la 5G :

### 1.5.1 3GPP :

Le projet de partenariat de troisième génération (3GPP) Fondée en 1998 est un projet de collaboration entre des associations de télécommunications dont l'objectif initial est de développer des spécifications applicables au niveau mondial pour les systèmes mobiles.

Le projet de partenariat de 3ème génération (3GPP) a complété la première version de la cinquième génération (5G) de mobile communications dans son Release-15 en juin 2018, qui posait les bases pour les déploiements commerciaux de la 5G dans le monde . Depuis puis, 3GPP a travaillé sur l'évolution de la technologie 5G dans ses versions 16 et 17 pour améliorer encore les performances et répondre à de nouveaux cas d'utilisation, Comme le montre la figure 1.3 [5].



**Figure. 1.3** – Feuille de route d'évolution de la 5G du 3GPP de 5G à la 5G Advanced.

Alors que les spécifications de la version 17 du 3GPP sont en cours de finalisation, le 3GPP a déjà commencé à jeter les bases de la prochaine version, la version 18. Le projet de partenariat de 3e génération (3GPP) devrait publier l'ensemble initial de directives pour la version 18 du 3GPP en décembre 2021. Ils s'attendent à ce qu'une norme complète soit publiée d'ici mars 2024. Il a attiré plus de 500 propositions. Après 6 mois d'intenses discussions. Bien que la version 18 en soit à un stade très précoce, elle devrait se concentrer principalement sur la 5G avancée.

### 1.5.2 Les catégories d'usage de 5G :

La croissance rapide du trafic de données est l'un des principaux moteurs de développement de la 5G. Cependant, pour répondre aux attentes de tous les utilisateurs, la 5G doit relever plusieurs défis, comme illustré dans la figure 1.4 [6].

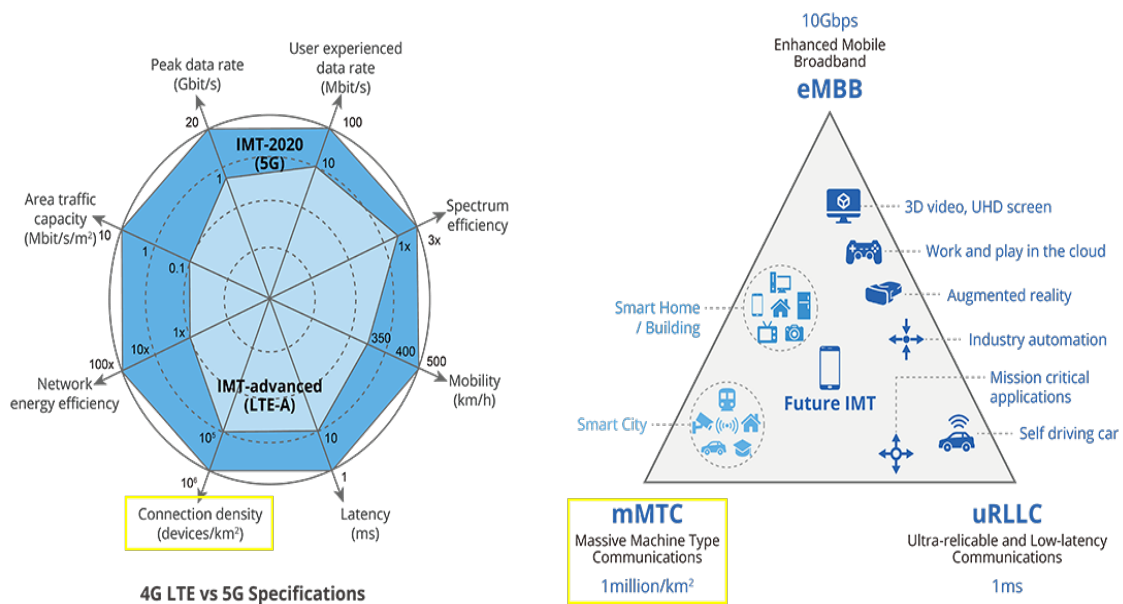


Figure. 1.4 – Les catégories d’usage de 5G.

### 1.5.2.1 Communications massives de type machine (mMTC) :

mMTC prend en charge des densités de connexion allant jusqu’à un million d’appareils par kilomètre carré. C’est plus de dix fois supérieure à la capacité du réseau 4 G LTE. Grâce à cette capacité, la 5G peut fournir l’infrastructure nécessaire pour prendre en charge d’immenses réseaux de capteurs connectés au cellulaire.

La zone de service mMTC est conçue pour les déploiements IoT massifs utilisant un grand nombre d’appareils à faible consommation pour transmettre régulièrement de petites quantités de données. Ces appareils IoT doivent avoir une longue durée de vie de la batterie, potentiellement jusqu’à 10 ans.

### 1.5.2.2 Large bande mobile amélioré(eMBB) :

Le haut débit mobile amélioré (eMBB) est une nouvelle catégorie de service de la 5G qui définit un niveau minimum de taux de transfert de données, promettant de fournir à la fois une bande passante considérablement accrue et une latence réduite par rapport aux services 4G existants. Cet usage se trouve dans la continuité des précédentes générations et permet de répondre à l’augmentation exponentielle de l’utilisation des données mobiles.

Il offre des vitesses allant jusqu’à 10 Gbit/s pour une utilisation à large bande passante comme le streaming vidéo HD ou les jeux VR/AR, offrant des vitesses de téléchargement plus rapides et des expériences utilisateur améliorées.

### 1.5.2.3 Communications ultra-fiables à faible latence(URLLC):

URLLC prend en charge les cas d’utilisation qui nécessitent une haute fiabilité du réseau, supérieure à 99,999 %, et une latence extrêmement faible d’environ 1 milliseconde pour la transmission des données. Par exemple, la conduite autonome nécessiterait une connexion capable de cela, car le risque est si élevé. La conduite autonome présente de nombreux avantages, allant du gain de temps à l’amélioration de la sécurité en éliminant les erreurs de l’utilisateur. Cependant, il faudrait que tous les véhicules soient connectés les uns aux autres de véhicule à véhicule et aux systèmes en bordure de route, de véhicule à infrastructure, tels que les systèmes de feux de signalisation, les services d’urgence et les programmes d’entretien des routes. Les données devraient être partagées

en temps réel, avec une latence minimale, car les exigences de sécurité exigent des connexions ultra-fiables.

Les usines intelligentes et l'industrie 4.0 ont des exigences similaires, où les machines et la robotique doivent interagir les unes avec les autres en temps réel. Ils peuvent également avoir besoin d'informations en temps réel provenant d'autres capteurs dans l'usine de fabrication. Les systèmes à faible latence permettent à ces systèmes commandés par des machines de fonctionner en toute sécurité et efficacement pour améliorer les lignes de production.

## 1.6 Les technologies de la 5G :

La 5G repose sur un ensemble de technologies clés telles que les ondes millimétriques, le Full-Duplex, le Beamforming, Petites cellules (Small cells), Massive MIMO, etc. qui permettent d'atteindre de nouveaux niveaux de performance et d'efficacité. La combinaison de ces technologies va permettre aux communications mobiles de jouer un rôle central dans les systèmes d'accès multiples et d'élargir leur importance [7], comme illustré dans la figure 1.5 [8].



Figure. 1.5 – Les principales technologies mises en œuvre pour 5G.

### 1.6.1 Les ondes millimétriques (mmWaves):

L'utilisation de bandes millimétriques (en anglais mmWaves) constitue l'une des technologies de la 5G. L'appellation "ondes millimétriques" fait référence aux fréquences radio supérieures à 6 GHz qui couvrent la plage de fréquences de 30 à 300 GHz. Le terme "millimétrique" utilisé ici fait simplement référence à la longueur d'onde de ces ondes, qui s'étend entre 1 et 10 mm. Ces ondes permettent de réduire la latence entre les appareils et d'augmenter leur capacité de transfert de données.

La plupart des recherches actuelles se concentrent sur la bande 39 GHz, 37/42 GHz, La bande électronique fournit (10 GHz) et 60 GHz qui fournit (7 GHz), c'est la gamme la plus utilisée au monde aujourd'hui et se situe entre (57GHz/64GHz) car tout le monde peut l'utiliser d'où (applications industrielles, applications scientifiques, applications médicales...etc) Comme montre la figure 1.6.

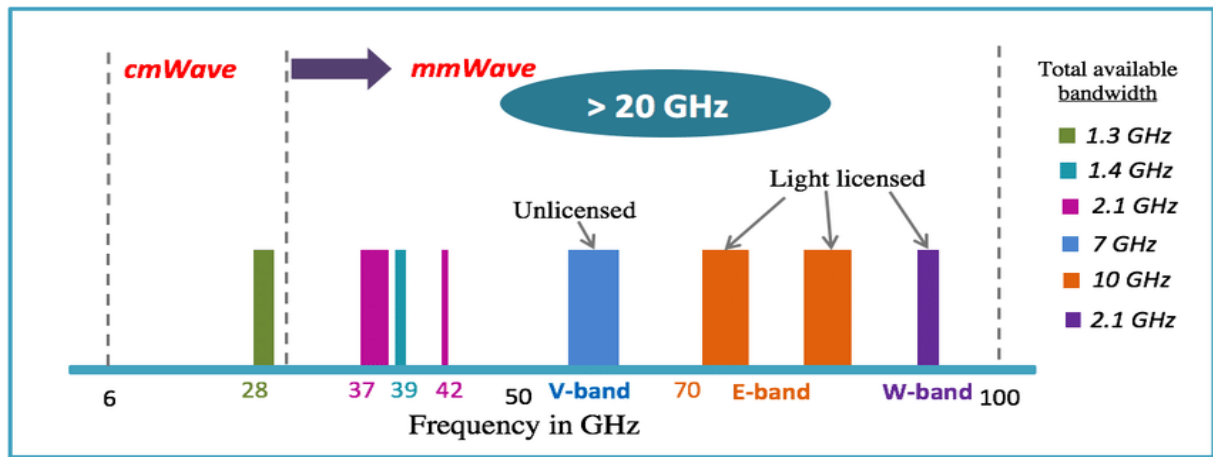


Figure. 1.6 – Répartition de fréquence sur le spectre électromagnétique .

### 1.6.2 Petites cellules(Small cells) :

Les petites cellules vont pallier à la mauvaise propagation des ondes centimétriques avec la multiplication des Small celles, les ondes centimétriques ne se heurteront plus à des obstacles, elles seront donc totalement efficaces les Petites cellules aideront donc à atteindre l'objectif de multiplier par 100 la capacité du réseau en termes de trafic les petites cellules vont participer à la diminution de la puissance d'émission des Smartphones.

Du fait de leur petite taille, elles peuvent être placées dans les zones denses (dans les villes), sur des lampadaires, des abribus, ou des panneaux illustré dans la figure1.7.

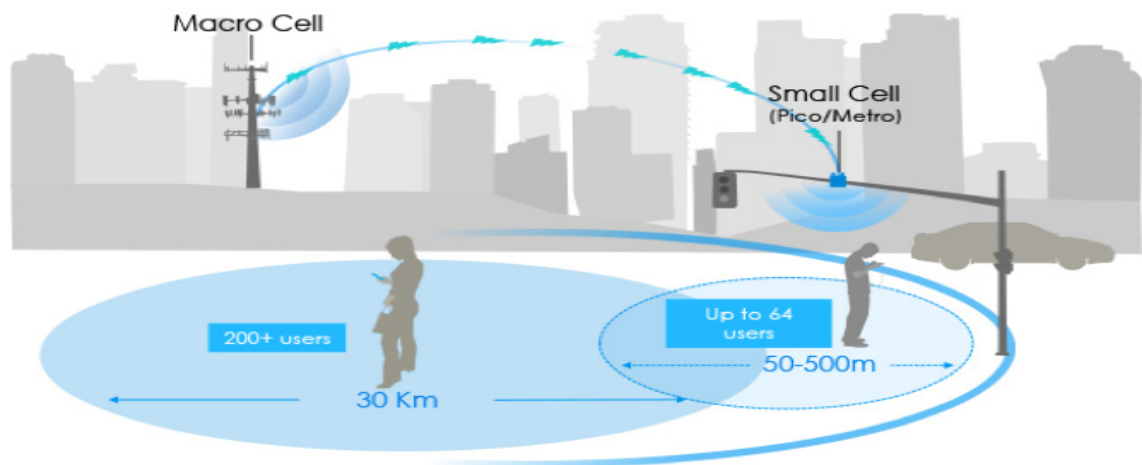


Figure. 1.7 – la technologie des petites cellules.

On distingue principalement 4 types de petites cellules en fonction de leurs puissances d'émission et de la zone de couverture:

- Femtocellue
- Picocellule
- Microcellule
- Macrocellule

**Tableau. 1.1** – Types de petites cellules .

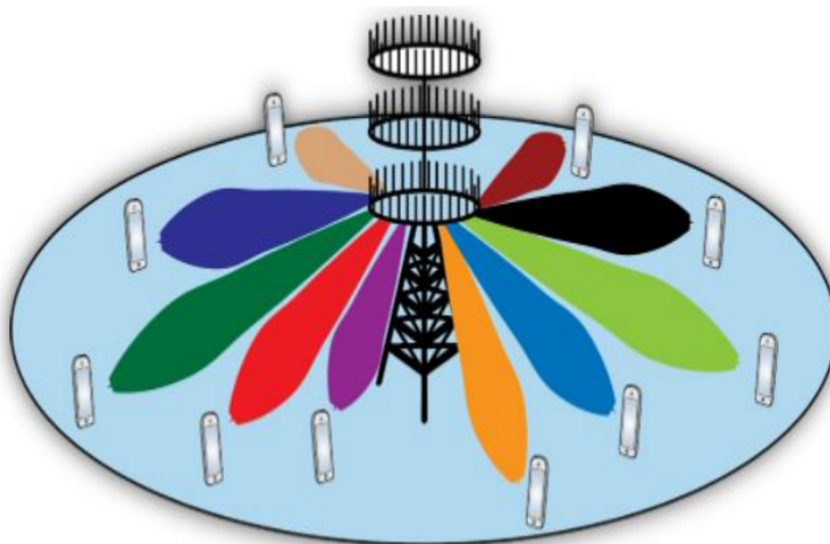
Type de Cellule	Nombre d'utilisateurs	Rayon de couverture(km)	Puissance(W)	Zone
Femtocellule	1 à 30	0,01 à 0,1	0,001 à 0,25	Interieur
Picocellule	30 à 100	0,1 à 0, 2	0,25 à 1	Interieur/Exterieur
Microcellule	100 à 2000	0,2 à 2	1 à 10	Interieur/Exterieur
Macrocellule	> 2000	8 à 30	10 à > 50	Exterieur

### 1.6.3 MIMO Massive (Multiple Inputs - Multiple Outputs):

Pour atteindre les objectifs en termes de débit élevé, de réduction de la consommation énergétique, de latence, etc., la combinaison de différentes technologies sera nécessaire. Une solution envisagée pour la prochaine génération est l'introduction du Massive MIMO, qui consiste à utiliser un grand nombre d'antennes (actuellement de 8 à 128, mais le nombre augmentera avec l'utilisation de fréquences supérieures à 6 GHz), comme illustré dans la figure 1.8. Cette technologie devrait permettre d'atteindre des performances améliorées pour les communications sans fil.

L'intérêt d'utilisation du massive MIMO est :

- d'une part, cette technologie permet d'augmenter les débits, grâce au multiplexage spatio-temporel.
- d'autre part, elle permet de focaliser l'énergie sur un terminal, pour améliorer son bilan de liaison, grâce à la formation de faisceau, ou beamforming.



**Figure. 1.8** – Système massive MIMO avec N antennes pour desservir K utilisateurs.

Il existe quatre modèles de configuration d'antenne de base qui incluent :

- SISO - Entrée unique Sortie unique
- SIMO - Entrée unique Sortie multiple
- MISO - Sortie unique à entrées multiples
- MIMO - Entrée multiple Sortie multiple

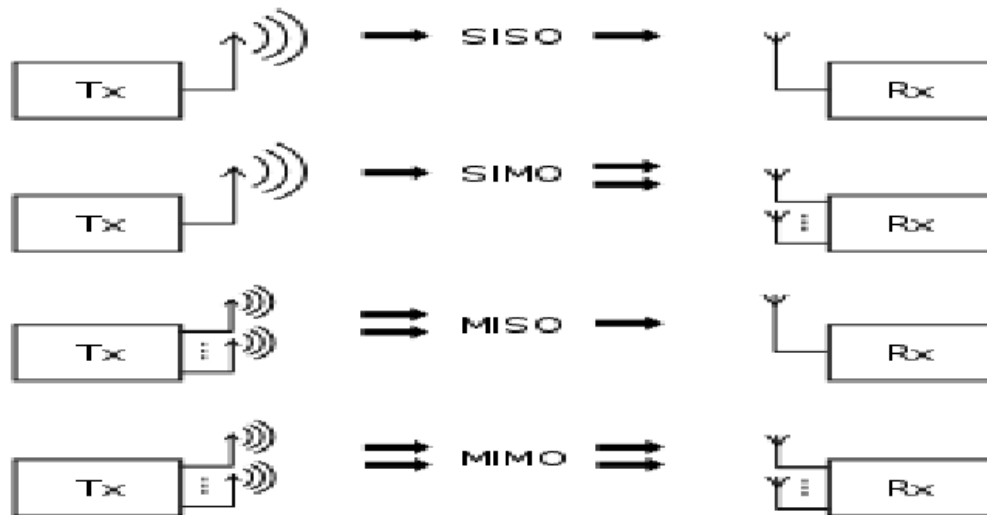


Figure. 1.9 – Type de massive MIMO .

### 1.6.4 La formation de faisceaux (Beamforming):

La formation de faisceaux est une technique qui concentre un signal sans fil vers un appareil de réception spécifique, plutôt que de diffuser le signal dans toutes les directions, à partir d'une antenne d'émission, comme illustré dans la figure 1.10.

La focalisation d'un signal dans une direction spécifique vous permet de fournir une meilleure qualité de signal au récepteur, ce qui signifie alors un transfert d'informations plus rapide et moins d'erreurs, sans avoir à augmenter la puissance de la diffusion. Étant donné que la formation de faisceau peut également être utilisée pour réduire ou éliminer la diffusion dans d'autres directions, elle peut aider à réduire les interférences pour les utilisateurs essayant de capter d'autres signaux [9].

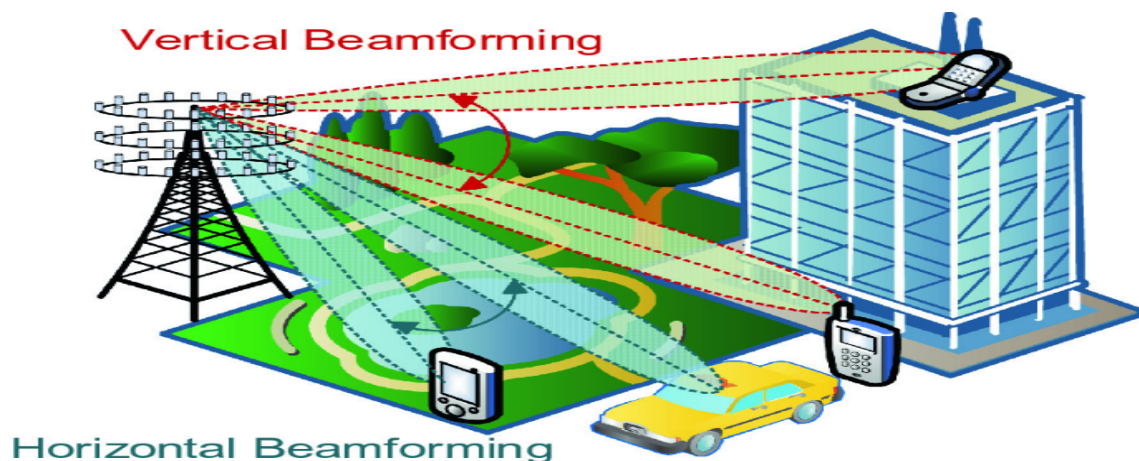


Figure. 1.10 – La technologie beamforming.

### 1.6.5 Un duplex plein (Full-Duplex):

La transmission de données en duplex intégral permet une transmission de données simultanée dans les deux sens le long d'une porteuse de signal. Par exemple, sur un réseau local utilisant la technologie de transmission en duplex intégral, un poste de travail peut envoyer des données tandis



qu'un autre reçoit des données sur la même ligne. La transmission en duplex intégral nécessite une ligne bidirectionnelle qui peut transférer des données simultanément dans les deux directions, comme illustré dans la figure 1.11 [10].

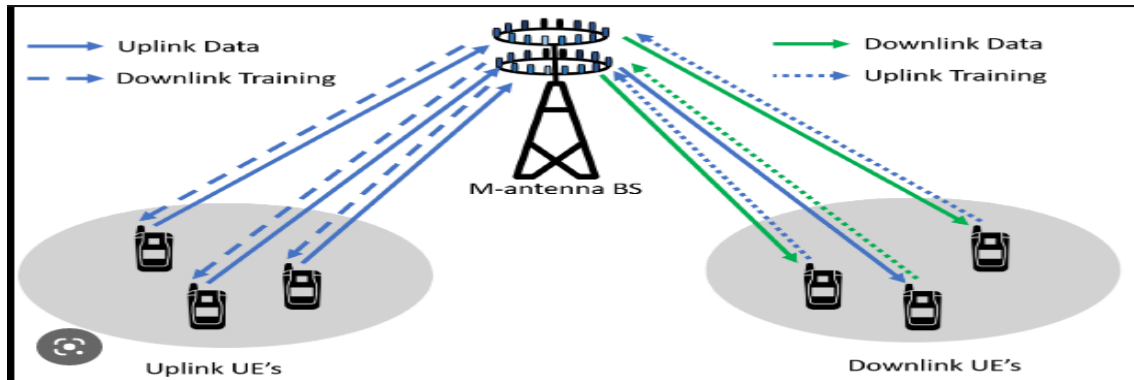


Figure. 1.11 – La technologie Full-Duplex.

## 1.7 L'architecture de la 5G :

Une des fonctions clés des réseaux de communication 5G est de garantir une coexistence centrée sur l'humain avec des applications de type machine, en répondant aux exigences de performance requises. Le cadre de la 5G est dynamique, logique, cohérent et flexible de nombreuses technologies de pointe qui seraient prenant en charge une diversité d'applications. En correspondant à la 3GPP(NR:New Radio), l'ensemble du système architectural du (RAN:Radio Access Network) et le Cœur de Réseau ont été réévalués, et le fonctionnement répartis entre les deux réseaux (CN (Core Network)et RAN). Contrairement à la précédents réseaux de communication mobile, la 5G emploie une architecture plus intelligente qui ne serait plus contrainte par la proximité des stations de base (BS). En plus de contraintes d'infrastructure complexes. Au lieu de cela, il a un flexible déploiement utilisant de nouveaux concepts tels que le découpage en tranches de réseau (NS:Non Stand), le réseau défini par logiciel (SDN) ainsi que le réseau virtualisation des fonctions (NFV:Network Functions Virtualization)[11].

Le projet de partenariat de 3e génération (3GPP) a défini l'architecture du système 3GPP 5G, indiquant la caractéristiques et fonctionnalités nécessaires au déploiement d'un système 5G commercialement opérationnel. Habituellement, les spécifications techniques de la communication mobile évoluent constamment en raison des nouvelles fonctionnalités et des demandes de service, ce qui rend c'est un processus de développement continu, Classiquement, L'architecture mobile du système se compose de deux composants principaux : le Réseau d'accès (AN:access network) et le réseau central (CN).

Le 3GPP a défini l'architecture du système 5G comme une interaction entre l'équipement utilisateur (UE:User Equipment) et un point d'extrémité, ce point de terminaison pourrait être un serveur comme le serveur d'application (AS), ou il pourrait s'agir d'un UE alternatif. Ainsi, le 3GPP système se compose de l'AS, du réseau central 5G (5GC), du NextGeneration Radio Access Network (NG-RAN) et UE , qui établit la communication entre le DN et l'UE via AN et CN. L'architecture bout en bout simple du 5GC est présentée dans la figure 1.12[12]

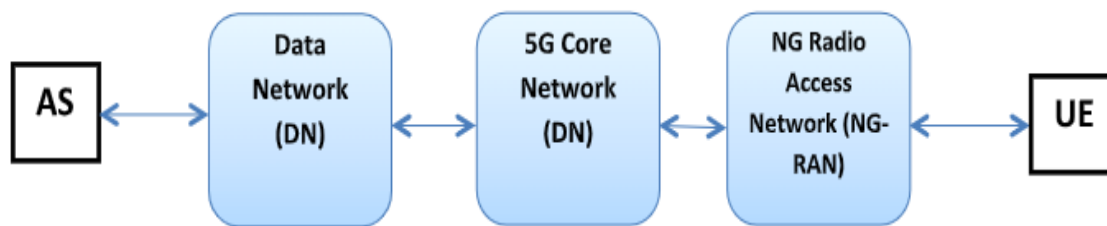


Figure. 1.12 – Architecture de bout en bout du système 5G.

La nouvelle norme radio, appelée Nouvelle Radio (NR), est une caractéristique clé du réseau mobile 5G. Elle offre la flexibilité nécessaire pour prendre en charge une variété de nouvelles fonctionnalités, applications et services. Développée principalement par le 3GPP pour les communications 5G, elle constitue la nouvelle norme mondiale pour l'interface radio des réseaux 5G. Le NR va faciliter les communications entre l'émetteur et le récepteurs dans des bandes de fréquences allant jusqu'à 52,6 GHz. Le NR est destiné être une interface hertzienne évolutive et flexible qui répondrait aux trois exigences (scénarios d'utilisation) pour le mobile 5G communications: communications ultra-fiables et à faible latence (URLLC), communications massives de type machine (mMTC) et haut débit mobile amélioré (eMBB). Le développement de l'interface aérienne NR a été axé sur la facilitation du déploiement des réseaux dans des plages de fréquences inférieures à 6 GHz, ainsi que dans les bandes de fréquences millimétriques (mmWave) et centimétriques (cmWave). Le cadre du NR a été conçu pour prendre en charge des entrées multiples massives et des sorties multiples (MIMO à grande échelle)[13].

Une autre caractéristique importante de l'architecture du système 5G est la distinction entre l'architecture non autonome (NSA) et l'architecture autonome (SA). La NSA permet une connexion du NG-RAN à la fois au 5GC et au CN 4G (LTE), comme illustré dans la Figure 1.13, tandis que la SA connecte uniquement le NG-RAN et le 5GC, comme montré dans la figure 1.14 [14].

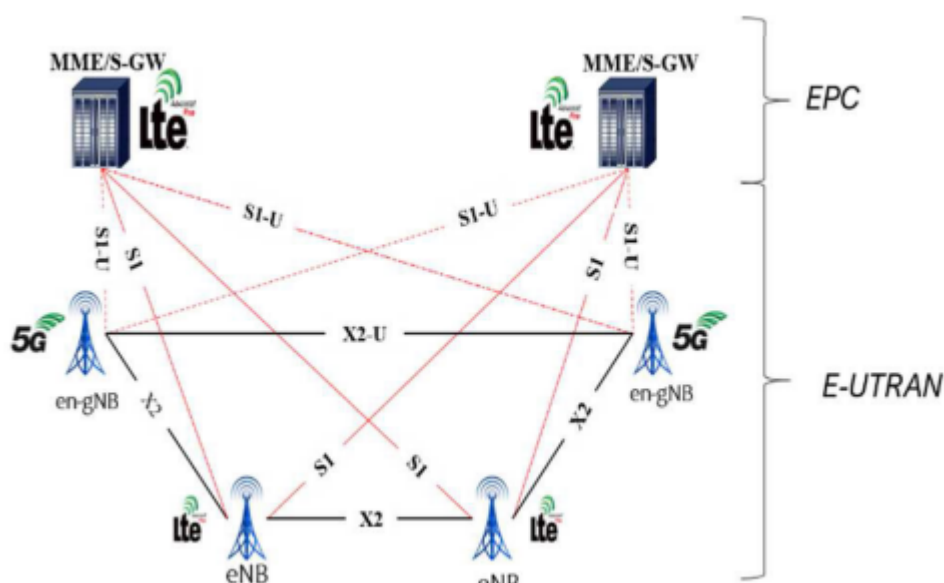


Figure. 1.13 – L'architecture non autonome NSA.

Dans l'architecture NSA, l'interface NG-RAN et NR est utilisée en combinaison avec le réseau d'accès radio 4G existant (AN) et son cœur de réseau (CN). Cela permet de garantir la disponibi-

lité de la technologie 5G NR sans avoir à remplacer complètement le réseau existant. Cependant, seuls les services fournis par la 4G seront disponibles avec les capacités de la 5G NR en termes de latence plus faible, de capacité, etc. Le nœud B de nouvelle génération (en-gNB) de la 5G NR (nœud logique) est utilisé pour cette architecture, des liens vers la 4G/LTE BS, qui est appelée Dans l'architecture NSA, l'interface NG-RAN et NR est combinée avec l'infrastructure existante 4G AN et son réseau central (CN). Cette combinaison permet d'assurer la disponibilité de la technologie 5G NR sans qu'il soit nécessaire de remplacer complètement le réseau. Cependant, seuls les services disponibles sur la 4G seront accessibles avec les capacités de la 5G NR en termes de latence plus faible, de capacité, etc. Le nœud logique de la 5G NR, appelé le nœud B de nouvelle génération (en-gNB), est connecté à la station de base (BS) 4G/LTE, appelée le NodeB amélioré (eNB), via l'interface X2. L'en-gNB est responsable de la connexion entre l'UE et les interfaces 5GC. L'interface S1 connecte l'eNB au cœur de réseau de paquets évolué (EPC) composé de l'entité de gestion de mobilité / passerelle de service (MME / S-GW), tandis que l'interface S1-U connecte l'en-gNB à l'EPC. De plus, l'en-gNB est connecté à d'autres en-gNB via l'interface X2-U [14].

Il est intéressant de noter que la 5G est conçue pour fonctionner de manière autonome (SA), ce qui signifie que le réseau 5G est entièrement autonome et ne nécessite pas l'utilisation de la technologie 4G. Cela permettra de tirer pleinement parti de la capacité et des performances de la 5G, ainsi que d'introduire de nouvelles fonctionnalités et applications. Cependant, en attendant que la technologie 5G SA soit déployée à grande échelle, la 5G NSA peut être utilisée pour fournir des services de 5G à l'aide de l'infrastructure 4G existante.

L'utilisation de la double connectivité peut également améliorer la qualité de service (QoS) pour les utilisateurs de 5G en permettant une commutation transparente entre les réseaux 4G et 5G en fonction de la disponibilité du réseau et des exigences de QoS.

l'architecture de la 5G est conçue pour fournir des performances optimales, une fiabilité et une flexibilité accrues pour répondre aux besoins croissants de connectivité sans fils pour le monde d'aujourd'hui [14].

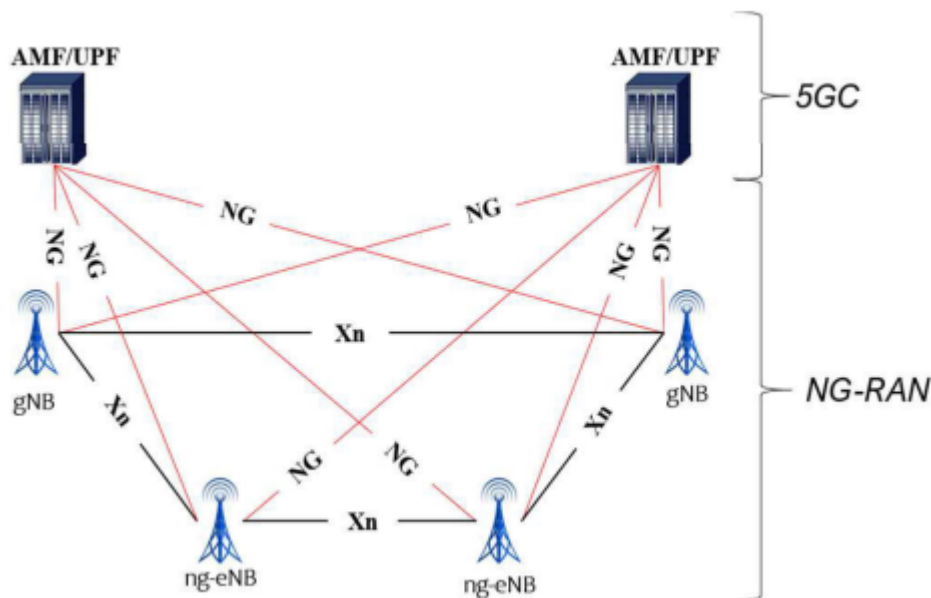


Figure. 1.14 – L'architecture non autonome SA(L'architecture de 5G global).

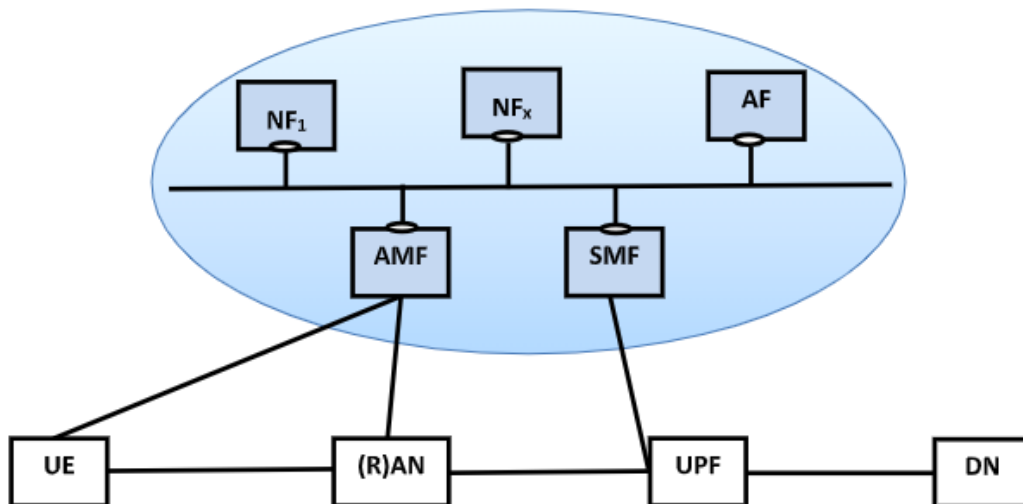
### 1.7.1 Aperçu du réseau cœur 5G :

Le réseau central 5G (5GC) joue un rôle crucial dans la gestion des connexions de données, de voix et d'Internet. Il a été conçu pour répondre aux exigences de service spécifiques de la 5G. Contrairement à l'EPC, où le MME est responsable de la gestion des sessions et de la mobilité, ces fonctions sont prises en charge par la fonction de gestion de session (SMF) et la fonction de gestion d'accès et de mobilité (AMF) dans le 5GS [15].

La connexion du plan de contrôle de l'AN et de l'UE est terminée au niveau de l'AMF, tandis que le lien de connexion entre l'UE et l'AMF via l'AN est appelé la strate de non-accès (NAS). Les fonctions de gestion des sessions sont gérées au fur et à mesure que les données utilisateur réelles sont transmises par l'User Plane Function (UPF).

L'AMF peut accueillir divers AN (3GPP/non-3GPP) en raison de la séparation des fonctionnalités de gestion de la mobilité et de la gestion de session. De même, des accès spécifiques peuvent être réalisés par la SMF. En somme, l'AMF/SMF/UPF délivre les fonctions CP principalement à partir du 5GC. Pour en savoir plus sur les fonctions d'AMF/SMF/UPF, vous pouvez consulter les rapports techniques 3GPP.

La figure 1.15 représente une architecture de système 5G de base (non itinérante) en mode autonome (SA) avec un ensemble de fonctions de réseau (NF) interconnectées dans le 5GC. Les NF offrent des services spécifiques à d'autres NF en utilisant des interfaces d'un cadre commun. Les services peuvent être étendus à tout autre consommateur autorisé par le service. Ainsi, la structure Service-Based Architecture (SBA) offre une réutilisabilité et une modularité accrues et permet un déploiement virtualisé. De plus, l'interface uniforme des connexions entre les NF est appelée Service-Based Interface (SBI)[16].



**Figure. 1.15** – L'architecture du système 5G avec un ensemble de NFs

## 1.8 Les applications de la 5G

Les chercheurs prévoient que les applications 5G auront un impact significatif sur l'économie et la société en général. Voici quelques-uns des avantages attendus :

- **Médias intelligents :**

La 5G offrira un monde virtuel haute définition sur votre téléphone mobile. Le streaming à grande vitesse de vidéos 4K ne prend que quelques secondes et peut prendre en charge une clarté audio cristalline, La 5G peut fournir 120 images par seconde, une haute résolution et une diffusion vidéo à plage dynamique plus élevée sans interruption. L'expérience audiovisuelle sera réécrite après la mise en œuvre des dernières technologies alimentées par la 5G sans fil.

La réalité augmentée et la réalité virtuelle nécessitent une vidéo HD avec une faible latence. Le réseau 5G est suffisamment puissant pour alimenter les technologie XR (AR, VR) avec une expérience virtuelle incroyable .

- AR (Réalité Augmenté): la Réalité Augmentée superpose des éléments virtuels 3D sur un environnement réel. grâce à la caméra de votre smart phone ou tablette. Cette technologie peut être utilisée avec des lunettes de réalité augmentée mais est plutôt appelée MR ou réalité mixte.
- VR (Réalité Virtuelle): la réalité virtuelle est une technologie qui consiste en une immersion complète dans un environnement virtuel créé entièrement en technologie 3D ou à partir d'images et de vidéos à 360 degrés, qui nécessite l'utilisation d'un casque de Réalité Virtuelle .
- MR (Réalité Mixte): est un mélange entre réalité augmentée et réalité virtuelle, C'est une technologie qui consiste à ajouter des éléments virtuels à ce que l'on voit et à pouvoir interagir physiquement avec ces éléments. Cette technologie est utilisée dans les domaines du design, de l'art et de l'éducation (en particulier pour la formation médicale ou militaire), mais aussi dans la fabrication, l'industrie et les services sur le site .

- **Internet des objets (IoT):**

La 5G est une technologie très prometteuse pour l'Internet des objets (IoT), qui permettra de connecter chaque objet, appareil, capteur et application à Internet grâce à un réseau sans fil suralimenté. Grâce à sa flexibilité, la disponibilité du spectre inutilisé et les solutions de déploiement à faible coût qu'elle offre, la 5G est le candidat le plus efficace pour l'Internet des objets. L'IoT peut tirer parti de la 5G dans de nombreux domaines tels que ceux de la fabrication, de l'industrie et des services sur le terrain. La figure1.16 illustre un exemple de cette utilisation [17].

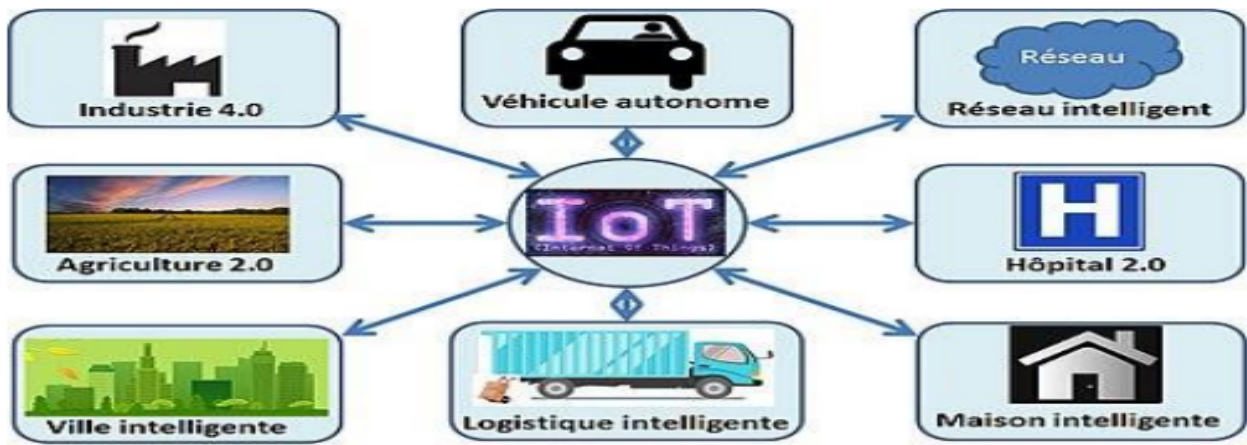


Figure. 1.16 – Exemple des applications de l’IoT.

• **Villes intelligentes:**

La mise en œuvre de la ville intelligente grâce à l’IoT et à la 5G, montrant comment les capteurs connectés à l’IoT peuvent surveiller en temps réel divers aspects de la ville, tels que la circulation, la qualité de l’air, la gestion des déchets et l’éclairage public, permettant ainsi une meilleure gestion et une prise de décision plus rapide. la 5G offre une connectivité rapide et fiable pour l’échange de données en temps réel, ce qui est essentiel pour la gestion efficace de la ville intelligente.



Figure. 1.17 – Quelques exemples d’applications de la ville intelligente.

• **L’IoT industriel :**

Il s’agit de l’application de la technologie IoT dans un cadre industriel, utilisée pour automatiser les fonctions d’instrumentation, de collecte et d’analyse de données, de prise de décision et de reporting pour les processus industriels en s’appuyant sur un système interconnecté de capteurs intelligents. cette technologie a de nombreuses applications dans divers secteurs industriels. les entreprises qui l’utilisent bénéficient de réductions des temps d’arrêt et des coûts de maintenance, d’une productivité accrue et d’une sécurité renforcée sur le lieu de travail. voici un exemple illustré dans la figure1.18.

• **Sécurité et surveillance:**

La technologie sans fil 5G est l’une des meilleures solutions de sécurité et de surveillance en



Figure. 1.18 – Exemple de l’industrie.

raison de sa bande passante élevée et de son spectre sans licence. La détection automatisée des menaces en temps réel et le déploiement de contre-mesures adaptées seront nécessaires pour sécuriser les données échangées par la 5G.

La figure 1.19 illustre un exemple :



Figure. 1.19 – Exemple de la sécurité

- **La santé:**

Grâce à sa vitesse de transmission de données élevée et sa faible latence, la technologie 5G offre d’immenses possibilités dans le domaine de la santé. la télémédecine a été démocratisée grâce à la 5G, améliorant la fiabilité des échanges de contenus haute résolution tels que la vidéo, l’image et l’audio, permettant ainsi aux hôpitaux de limiter les consultations ou visites aux urgences évitables et d’offrir une assistance chirurgicale à distance et robotique. la télémédecine est régulièrement évoquée comme une solution pour faciliter le suivi à distance des malades de certaines régions. bien que l’idée de permettre aux médecins de rencontrer leurs patients en ligne soit séduisante, elle n’est pas encore largement pratiquée. la 5G est en train de révolutionner le secteur de la santé en modifiant les pratiques médicales, en réduisant les distances et les temps de consultation entre médecins et patients, et en offrant un nouvel horizon prometteur pour fournir des services de santé de meilleure qualité. voici un exemple illustré dans la figure 1.20.

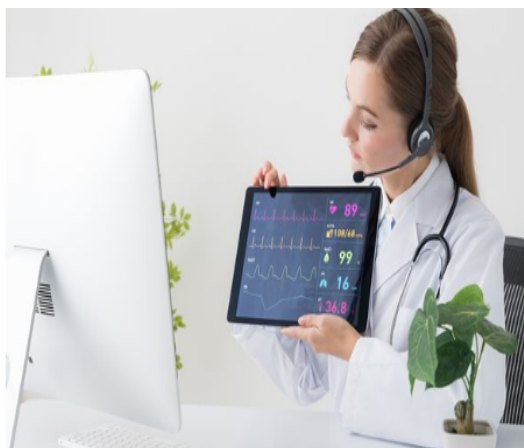


Figure. 1.20 – Exemple d’une application de la santé avec la 5G.

## 1.9 Les avantages et les inconvénients de la 5G:

- **Les avantages de la 5G:**

La technologie 5G offre une bande passante plus large et un débit plus rapide, ce qui permet de nombreux avantages pour les entreprises, notamment l’optimisation du travail mobile et à distance. Les employés peuvent profiter de toutes les suites de Microsoft et Adobe directement sur leur téléphone mobile grâce au réseau 5G de l’entreprise. La 5G permet également de réduire la consommation d’énergie et de télécharger des fichiers volumineux plus rapidement, ce qui facilite le transfert des données.

En outre, la technologie 5G permet des communications à faible latence, telles que les commandes à réaction rapide, ce qui facilite le transfert des données. La densité très élevée de la 5G permet également de prendre en charge un grand nombre de connexions mobiles, tels que des appareils intelligents, des véhicules autonomes, des capteurs, etc. Cela permet de limiter l’engorgement des réseaux.

- **Les inconvénients de la 5G:**

- Des Dangers Pour La Santé: Le réseau 5G est susceptible d’affecter la santé en raison des ondes électromagnétiques, qui émettent à leur tour des ondes millimétriques nocives pour l’organisme. Ces ondes peuvent avoir des effets néfastes sur la santé « troubles nerveux, stress cellulaire et même des risque de cancer...».
- Des Répercussions Environnementales: Toute nouvelle technologie passe nécessairement par de nouveaux équipements: plusieurs antennes, de nouveaux téléphones qu’il est plus chers, des data centers dédiés au stockage des données, De nombreux équipements énergivores sont à l’origine d’émissions potentielles de  $CO_2$ . Il est également possible que la 5G affecte les observations des satellites météorologiques. Cela peut affecter la qualité des prévisions météorologiques.
- L’incompatibilité du réseau avec certains appareils: Pour profiter de cette technologie 5G, les utilisateurs n’auront d’autre choix que d’abandonner leurs anciens appareils et d’en acheter un compatible. Ces appareils sont principalement disponibles dans les pays où la 5G a été lancée. Pour que les nouveaux téléphones soient deux fois plus onéreux. et ce sont des dépenses inattendues qui ont le potentiel de faire exploser de nombreux budgets.



## 1.10 Conclusion

Ce chapitre présente la nouvelle génération de technologie mobile, la 5G. Elle répond aux besoins quotidiens grâce à une bande passante plus large qui permet la connexion d'un plus grand nombre de véhicules et de machines, et offre un faible temps de latence. La 5G améliore les réseaux existants et développe de nouveaux services. Les prochains chapitres aborderont les techniques d'accès multiple orthogonal "OMA" et d'accès multiple non orthogonal "NOMA".

## Chapitre 2

Les techniques d'accès multiples:

## 2.1 Introduction:

Dans le domaine des télécommunications, notamment pour les radiocommunications, les fréquences ils sont standardisés 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 "technique d'accès multiple". Dans ce chapitre, Nous les détaillerons selon l'ordre chronologique de leur apparition dans le réseau mobile ,c'est à dire "frequency division multiple access(FDMA)" ,"time division multiple access(TDMA)" ,"code division multiple access(CDMA)" et "orthogonal frequency division multiple access(OFDMA)" Puis nous présentons quelques concepts et définitions de les techniques d'accès multiples non orthogonales.

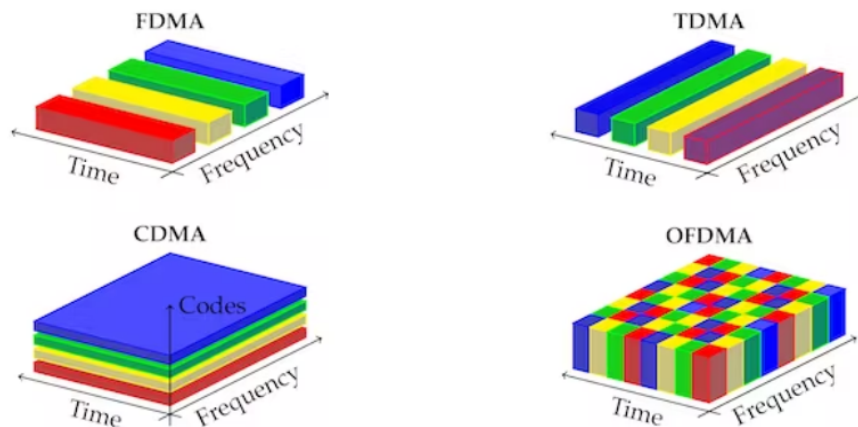
## 2.2 Les techniques d'accès multiples:

L'accès multiple est le moyen le plus efficace de partager les ressources du spectre entre différents utilisateurs d'un système, il permet à plusieurs utilisateurs de partager efficacement un canal de communication.

L'accès multiple peut être classé en deux catégories: l'accès multiple orthogonal et accès multiple non orthogonal.

### 2.2.1 Les techniques d'accès multiples orthogonales:

Dans les systèmes de communication numérique, il existe quatre techniques de base d'accès multiples comme illustré dans la figure 2.1.



**Figure. 2.1** – Les techniques d'accès multiple FDMA, TDMA, CDMA, OFDMA.

#### 2.2.1.1 Accès multiple par une répartition de fréquences(FDMA):

FDMA, qui signifie "Frequency Division Multiple Access" (accès multiple par répartition en fréquence), est la plus ancienne technique d'accès multiple conçue pour les transmissions analogiques. elle est largement utilisée dans les systèmes de communications radiofréquences. l'idée principale de cette technique est de diviser la bande passante du support de communication en bandes de fréquences distinctes. Ainsi, les données du canal 1 sont émises dans la bande A, celles

du canal 2 dans la bande B, et ainsi de suite.

Cependant, avec l'évolution des technologies de communication, FDMA n'est plus largement utilisée dans les systèmes actuels.

La FDMA présente plusieurs avantages, notamment :[18]

- Elle permet aux utilisateurs d'accéder à un seul canal, ce qui facilite la gestion des ressources du spectre.
- Elle se caractérise par la simplicité des appareils mobiles utilisant cette technique.
- Elle offre une certaine immunité contre les problèmes d'étalement temporel, ce qui contribue à une meilleure qualité de transmission.

Les inconvénients de la FDMA sont les suivants :

- La diaphonie peut provoquer des interférences entre les différentes fréquences utilisées, ce qui peut perturber la transmission des données.
- Le coût de fonctionnement du système FDMA est généralement plus élevé, notamment en raison de la nécessité de gérer et de maintenir un grand nombre de canaux de fréquences distincts.
- La ressource fréquentielle utilisée dans la FDMA est limitée. En d'autres termes, il n'est pas possible d'avoir un nombre infini de canaux fréquentiels. Par conséquent, le nombre d'abonnés possibles est également limité par le nombre de canaux de fréquences disponibles. Cela peut entraîner une saturation du réseau lorsque le nombre d'utilisateurs dépasse la capacité des canaux disponibles.

### 2.2.1.2 Accès multiple à répartition dans le temps (TDMA):

L'accès multiple à répartition dans le temps (TDMA) est une technologie qui étend le concept de l'accès multiple à répartition en fréquence (FDMA) en permettant de partager chaque canal FDMA. Cette technique repose sur la répartition des ressources en fonction du temps. Les utilisateurs partagent la même bande passante et transmettent leurs données dans des intervalles de temps distincts, appelés "time slots", qui leur sont attribués. En général, chaque canal est divisé en 8 time slots, et chaque utilisateur émet pendant son intervalle de temps spécifique. L'accès multiple est ainsi réalisé grâce à une combinaison de la dimension temporelle et de la dimension fréquentielle.

La TDMA présente plusieurs avantages, notamment :

- L'utilisation d'une seule fréquence porteuse pour tous les utilisateurs, ce qui permet une utilisation plus efficace du spectre.
- La possibilité d'allouer plusieurs slots temporels à la demande, ce qui permet une utilisation flexible des ressources en fonction des besoins des utilisateurs.
- La capacité de la TDMA à s'adapter à la transmission d'informations telles que la voix, ce qui en fait une technologie adaptée à la communication vocale.
- La capacité de la TDMA à isoler les clients dans le temps, en garantissant qu'il n'y a pas d'obstacles à la transmission simultanée, ce qui réduit les interférences et améliore la qualité de la communication.

Les inconvénients de la TDMA sont les suivants :

- La complexité accrue du traitement numérique nécessaire rend les appareils mobiles plus complexes. ils ne sont plus simplement des émetteurs-récepteurs, mais des dispositifs de communication plus sophistiqués.
- La préparation du signal est requise pour la séparation et la reconnaissance coordonnées des contacts, ce qui ajoute une étape supplémentaire dans le processus de communication.
- La TDMA nécessite une puissance élevée sur la liaison montante lors de la transition entre les intervalles de temps.
- La synchronisation est fortement sollicitée, ce qui signifie qu'une coordination précise dans le temps est essentielle pour éviter les interférences et assurer le bon fonctionnement du système TDMA.

### 2.2.1.3 Accès multiple par répartition de code (CDMA):

L'accès multiple par répartition de code (CDMA) est une méthode d'accès multiple basée sur des techniques d'étalement de spectre. il s'agit d'un système de codage des transmissions et d'une technique de multiplexage plus récente que le TDMA et le FDMA. dans cette technique, les utilisateurs partagent le même espace fréquentiel et transmettent sur les mêmes intervalles temporels. Dans le CDMA, tous les utilisateurs utilisent la même bande de fréquence et le même intervalle de temps, mais chaque utilisateur possède son propre code, appelé séquence de code, qui lui permet de coder ses données pour transmettre les informations tout en évitant les interférences entre les utilisateurs. les codes utilisés sont des codes orthogonaux, et l'étalement du spectre est une technique avantageuse mise en avant dans l'utilisation du CDMA dans les communications radio-fréquences [19].

Les avantages de la CDMA sont les suivants :

- Une meilleure gestion du spectre grâce à l'orthogonalité quasi totale des sous-porteuses, ce qui permet une séparation précise entre elles.
- Un débit de données plus élevé.
- Une réduction des interférences entre les symboles dues aux trajets multiples grâce aux périodes de protection.

Les inconvénients de la CDMA sont les suivants :

- Les codes attribués à chaque utilisateur ne peuvent être utilisés que par ces utilisateurs, ce qui limite le partage des codes.
- L'augmentation du nombre d'utilisateurs connectés peut entraîner une diminution de la qualité de communication.

### 2.2.1.4 Accès multiple par répartition en fréquence orthogonal(OFDMA):

#### • L'OFDM (Orthogonal frequency division multiple):

L'OFDM est une technologie connexe plus ancienne qui permet d'augmenter la capacité et l'efficacité des communication sans fil il s'agit d'un mécanisme de multiplexage par répartition en fréquence (FDM), qui fonctionne en divisant un seul signal à large bande en un grand groupe de sous-porteuses à bande étroite afin que toutes les sous-porteuses perpendiculaires les unes aux autres soient espacées de manière égale [20]

L'OFDM a été utilisé dans des domaines tels que les réseaux cellulaires, les médias de diffusion et dans les versions antérieures du Wi-Fi.

- **L'OFDMA (Orthogonal frequency division multiple acces) :**

L'OFDMA est une technique d'accès utilisée dans les réseaux de téléphonie mobile de quatrième génération et est largement utilisée, y compris dans les réseaux 5G, en tant que système d'accès multiple. pour utiliser l'OFDM, il est nécessaire d'assurer une orthogonalité entre les sous-porteuses. ce type de codage radio combine le multiplexage en fréquence et en temps, essentiellement en combinant les principes du TDMA et du FDMA [21].

L'OFDMA est utilisé dans les systèmes de communication point à multipoint, tant fixes que mobiles, tels que le WiMAX mobile et le LTE. contrairement à l'OFDM qui maintient une puissance identique pour toutes les sous-porteuses, l'OFDMA permet la gestion de la puissance par canal ou sous-porteuse.

Le principe de l'OFDMA consiste à répartir le signal numérique à transmettre sur un grand nombre de sous-porteuses. on peut le considérer comme la combinaison d'un grand nombre de systèmes de transmission indépendants, chacun opérant à des fréquences différentes [20].

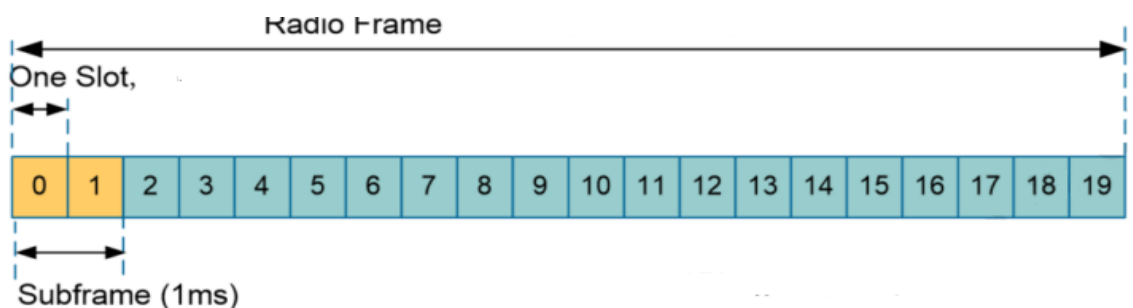
- **SC-FDMA (Signal carrier-FDMA):**

Il s'agit d'une nouvelle technologie d'accès multiple pour le partage de ressources radio dans un système de communication sans fil mobile utilisant l'accès multiple par répartition en fréquence et par répartition dans le temps, qui a été adoptée pour les liaisons montantes (dans le sens terminal vers station de base) de certaines normes 3GPP.

Une caractéristique notable du SC-FDMA est la réduction de l'interférence inter-symbole, car toutes les sous-porteuses sur une période de temps représentent le même symbole. Cette technique consiste à transmettre les différents symboles en série sur une même sous-porteuse [22].

- **Structure de la trame LTE:**

La durée générale de la trame LTE est de 10 ms, divisée en 20 slots de 0,5 ms chacun, numérotés de 0 à 19. la figure 2.2 présente une trame LTE [22]



**Figure. 2.2** – La trame LTE

Il existe deux principaux modes de duplexage, tel que le duplexage utilisés dans l'interface radio du LTE pour attribuer les slots d'émission et de réception :

Le type 1 est adapté au FDD et au FDD half-duplex.

Le type 2 est adapté au TDD.

**Dans la structure de trame de type 1:** chaque sous-trame est divisée en deux slots de 0,5 ms chacun.

En FDD, dix sous-trames sont disponibles pour la canal montante et dix sous-trames sont disponibles pour la canal descendante par période de 10 ms, puisque la voie montante et la voie descendante fonctionnent dans fréquences différentes. et en FDD half-duplex, l'UE ne peut pas transmettre et recevoir à la fois, qui limite le nombre de sous-trames utilisables dans chaque direction de transmission. comme montre la figure 2.3 [23].

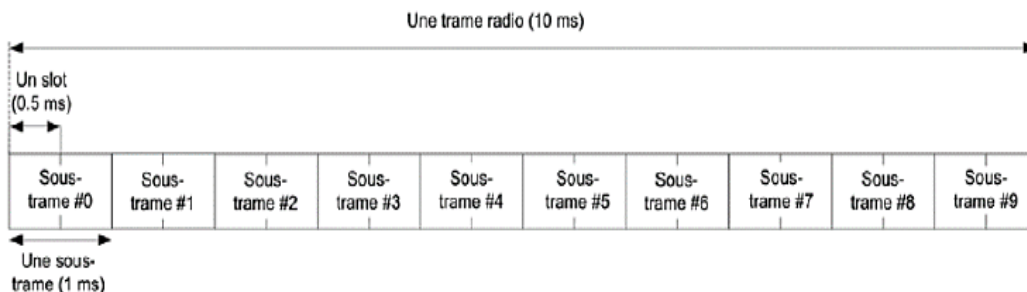


Figure. 2.3 – La structure de trame en FDD et FDD half-duplex.

Dans la structure de trame de type 2 (comme illustré dans la figure 2.4 [23]): Certaines sous-trames sont réservées à la liaison montante tandis que d'autres sont dédiées pour la liaison descendante. en outre, il existe un sous-trames spéciale, cela contient notamment le temps de garde nécessaire pour basculer entre le deux canaux descendante et le canal montante.

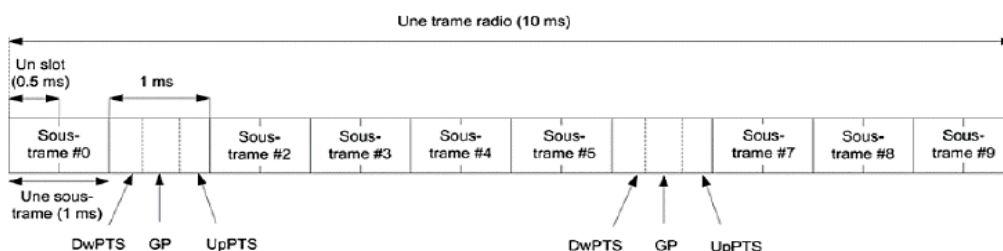


Figure. 2.4 – La structure de trame en TDD.

**Le concept de bloc des réseaux:**

Une trame LTE dure 10 ms. Elle est découpée en 10 sous trames d'une durée de 1 ms. Chaque Sous trame est divisée en deux slots de 0,5ms. Un slot dure donc 0,5 ms, durée pendant laquelle est transmis 7 symboles par bande OFDM. Or, nous avons vu qu'il y avait 12 bandes. Une trame LTE dure 10 ms. elle est découpée en 10 sous trames d'une durée de 1 ms. chaque Sous trame est divisée en deux slots de 0,5ms. un slot dure donc 0,5 ms, durée pendant laquelle est transmis 7 symboles par bande OFDM. or, nous avons vu qu'il y avait 12 bandes.

La figure 2.5 illustre le bloc ressource LTE:

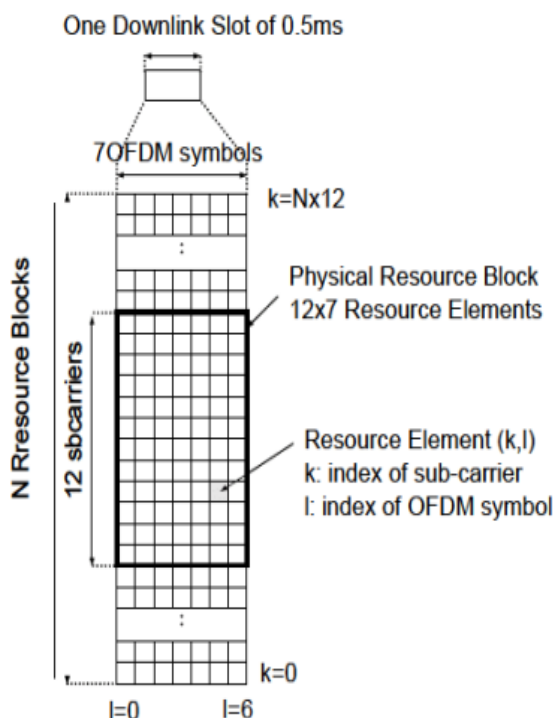


Figure. 2.5 – Le Bloc ressources LTE.

**Structure de la trame 5G:**

En termes de fréquence, un bloc de ressources représente 12 sous-porteuses consécutives. En termes de temps, un slot est composé de 14 symboles consécutifs.

Afin d’organiser la transmission des données et de synchroniser les dispositifs de réception et de transmission la liaison descendante et la liaison montante sont organisées en trames de 10 ms, il est divisé en dix sous-trames de 1 ms chacune. chaque trame est divisée en deux demi-trames de taille égale à cinq sous-trames :

- La demi-trame 0 est composée des sous-trames 0 à 4.
- La demi-trame 1 est composée des sous-trames 5 à 9.

Pour une interface réseau 5G, le slot est composé de 14 symboles OFDM consécutifs ,dans lequel la valeur de l’intervalle de transmission 5G correspond à la durée d’un slot. comme illustré dans le tableau 2.1. Ainsi que la valeur du temps de transmission 5G dépend de l’espacement entre les sous-porteuses [24].

Espacement entre les sous-porteuse	Nombre de slots par sous-trame	Nombre de slots par trame	TTI
15 kHz	1	10	1ms
30 kHz	2	20	0.5ms
60 khz	4	40	0.25ms
120 kHz	8	80	0.125ms
240 Khz	16	160	0.0625ms

Tableau. 2.1 – La structure de la trame temporelle.



L'espacement entre les sous-porteuses SCS (Subcarrier Spacing) est déterminé par la formule suivante: [24]

$$SCS = 2\mu * 15Khz. \tag{2.1}$$

Avec :

$\mu$  : la numérogie .

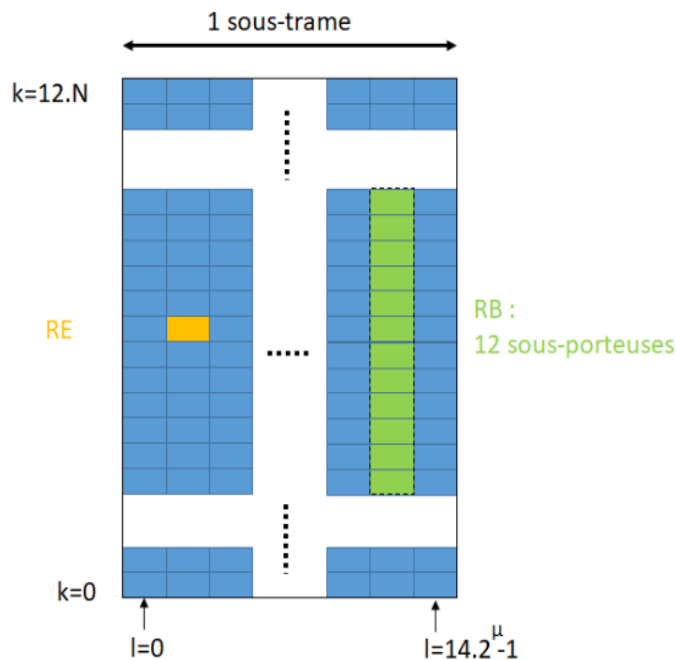
Si :

$\mu =0$  l'espacement est de 15 kHz.

$\mu =1$  l'espacement est de 30 kHz.

**Le bloc de ressource:**

Le bloc de ressource RB (Resource Block) correspond à une allocation de N=12 sous-porteuses contiguës. comme illustré dans la figure 2.6.



**Figure. 2.6** – La grille ressource de réseau 5G.

La grille de ressources est une allocation de ressources tempo-fréquentielles correspondant aux ressources disponibles pour un port d'antenne. elle est constituée d'un ensemble de symboles par sous-trame ( tableau 2.2) dans l'espace temporel et d'un ensemble de sous-porteuses contiguës dans le domaine fréquentiel. la grille de ressources est constituée d'un maximum de 3300 sous-porteuses et elle est transmise à la fois dans chaque direction de transmission et sur chaque port d'antenne [24].

Numérologie	Nombre de symboles par slot	Nombre de slots par sous-trame	Nombre de symboles par sous-trame
0	14	1	14
1	14	2	28
2	14	4	56
3	14	8	112
4	14	16	224

**Tableau. 2.2** – Numérologie et nombre de symboles par sous-trame.

L'OFDM présente plusieurs avantages :

- 1- Simplicité d'utilisation : l'OFDM utilise les transformées de Fourier rapide (FFT) et inverse (IFFT) pour partager les informations entre un grand nombre de sous-porteuses orthogonales, qui sont réparties aussi près que possible les unes des autres. Cela facilite la gestion et la transmission des données.
- 2- Robustesse aux canaux sélectifs en fréquence : l'un des principaux atouts de l'OFDM réside dans sa résistance aux effets des canaux sélectifs en fréquence. En divisant un canal sélectif à large bande en plusieurs sous-canaux à bande étroite non sélectifs, tout en maintenant une orthogonalité entre les canaux, cette modulation permet une égalisation simple et efficace des signaux.
- 3- Exploitation de toute la bande : L'OFDM permet une utilisation efficace de toute la bande de fréquences disponible. En subdivisant le canal en sous-canaux, il est possible de répartir les informations sur l'ensemble de la bande, optimisant ainsi l'utilisation des ressources spectrales.
- 4- Augmentation du débit sur de courtes distances : l'OFDM offre la possibilité d'augmenter le débit de transmission, en particulier sur de courtes distances. Grâce à sa capacité à transmettre simultanément sur plusieurs sous-porteuses, cette modulation permet d'exploiter pleinement les ressources disponibles, ce qui se traduit par des débits plus élevés dans des environnements proches.

• **Les inconvénients de L'OFDMA:**

- L'OFDM est également très vulnérable aux problèmes de synchronisation.
- L'intervalle de garde induit une perte d'efficacité spectrale.
- Il est plus sensible au décalage et à la dérive de la fréquence porteuse que les systèmes à porteuse unique à la fuite du DFT.
- Le signal OFDM a une amplitude semblable à celle du bruit avec une très grande plage dynamique, il nécessite des amplificateurs de puissance RF avec un rapport de puissance crête à moyenne élevé.

### 2.2.2 Les techniques d'accès multiple non orthogonales(NOMA):

NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access) est une méthode de multiplexage non orthogonal qui permet à plusieurs utilisateurs de partager simultanément la même bande de fréquences en utilisant le multiplexage dans le domaine de la puissance et/ou du code. Cela conduit à une amélioration de l'efficacité spectrale, c'est-à-dire une utilisation plus efficace du spectre disponible. NOMA a été proposé comme une technologie d'accès radio potentielle pour les systèmes cellulaires

de cinquième génération (5G). Son objectif est de permettre à un plus grand nombre d'utilisateurs de bénéficier d'une connectivité simultanée dans la même bande de fréquences en utilisant des techniques de multiplexage non orthogonal. Les techniques d'accès non orthogonal peuvent être classées en deux catégories: NOMA basé sur la puissance et NOMA basé sur le code. Ces deux approches utilisent différentes méthodes (puissance ou code) pour différencier les utilisateurs et permettre un partage efficace de la ressource fréquentielle. Annulation successive des interférences(SIC): Le SIC (Successive Interference Cancellation) est une technologie qui permet d'éliminer les interférences de manière récursive en exploitant la dynamique des puissances reçues. le SIC s'est avéré très bénéfique pour les transmissions à bas débit.

Dans le contexte du récepteur NOMA, le processus SIC est appliqué afin que chaque utilisateur puisse extraire ses propres données à partir du signal superposé reçu. (Cela est illustré dans la figure 2.7 [25]), où le récepteur NOMA utilise le SIC pour démêler les signaux et séparer les informations correspondantes à chaque utilisateur [26].

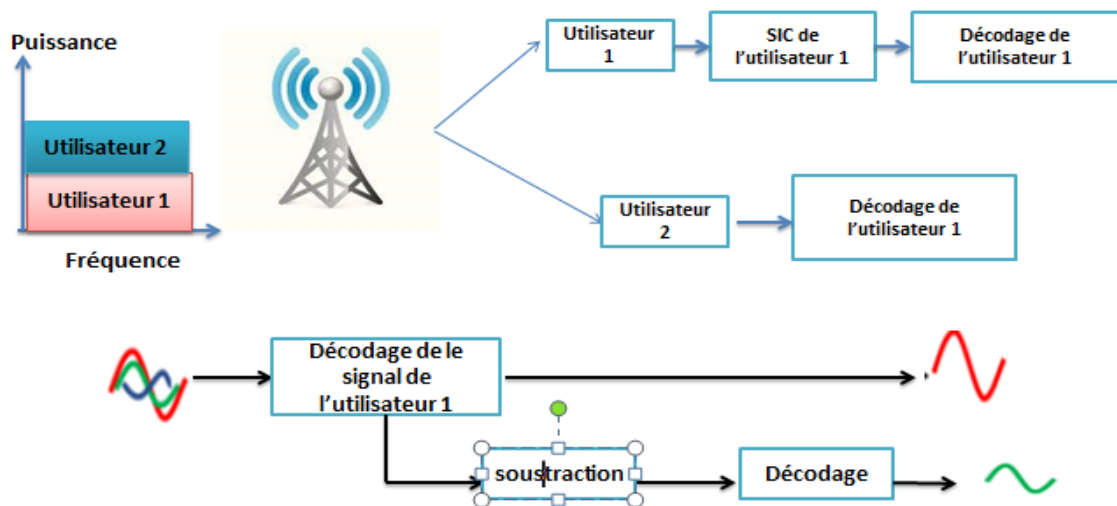


Figure. 2.7 – Annulation successive des interférences.

Le signal reçu correspond les utilisateurs  $i$  est donné par l'équation [26]:

$$y_i = h_i x + n_i \quad (2.2)$$

Avec  $i=1:2$

$n_i$ : Désigne le bruit blanc gaussien additif de puissance  $N_0$ ,  $h_i$  est le coefficient complexe de canal entre les utilisateurs «  $i$  » et la BS.

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

Le mécanisme SIC est que l'utilisateur avec des conditions de canal faibles gère l'utilisateur signal avec le meilleur canal comme bruit et décode ses données du signal reçu, D'autre part, l'utilisateur avec le meilleur canal déclenche le SIC, où il décode les données utilisateur les plus faibles procèdent ensuite à la soustraction du signal reçu en décodant ses données.

### 2.2.2.1 Codage de superposition(SC):

La station de base (BS) peut transmettre simultanément plusieurs signaux d'utilisateurs grâce au SC (Single Carrier). chaque signal individuel des utilisateurs est encodé et modulé de manière

indépendante. ensuite, la BS attribue à chaque utilisateur un niveau de puissance en fonction de l'état de son canal. les utilisateurs situés à proximité de la station de base semblent utiliser des niveaux de puissance plus faibles en raison de meilleures conditions de canal par rapport aux utilisateurs plus éloignés. outre la distance, ces utilisateurs peuvent également être sujets à des phénomènes d'évanouissement et d'affaiblissement . malgré cela, tous les signaux des utilisateurs sont superposés et combinés pour générer un seul signal, représenté par la formule suivante [27] :

$$S = \sum_{i=1}^k \sqrt{P(i)}x(i) \quad (2.3)$$

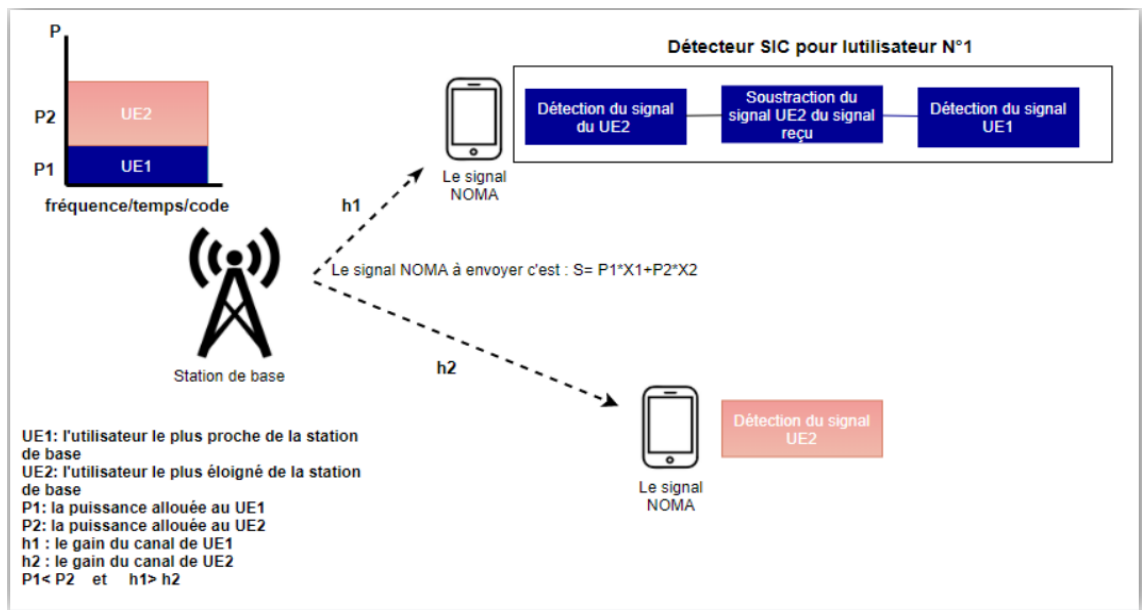
La figure 2.8 présente un système simple de PD-NOMA composé d'une BS et deux utilisateurs. Supposons que  $x_1$  et  $x_2$  sont les signaux à transmettre, respectivement, de la BS à l'utilisateur numéro 1 et numéro 2. La station de base transmet le signal suivant [27] :

$$S = \sqrt{P_1}x_1 + \sqrt{P_2}x_2 \quad (2.4)$$

Avec :

$P_1, P_2$  : La fraction de la puissance allouée aux utilisateurs 1 et 2.

$P_1 + P_2 = P$  : La puissance d'émission totale.



**Figure. 2.8** – Allocation de puissance pour la liaison descendante.

Dans un réseau à  $k$  utilisateurs, le signal reçu par le  $k$ -ième utilisateur est représenté par [27]:

$$Y_k = \sum_{i=1}^k h_k S + w_k \quad (2.5)$$

$$Y_k = h_k \sum_{i=1}^k \sqrt{P(i)} X(i) + w_k \quad (2.6)$$

Avec :

$h_k$  : Le gain du canal du  $k$ -ième utilisateur.

$w_k$  : Le bruit blanc additif gaussien. Chaque utilisateur reçoit un signal qui contient ses données et celles des autres utilisateurs.

**2.2.2.2 Techniques d'accès multiples non-orthogonales dans le domaine de puissance NOMA (PD-NOMA):**

Les techniques de PD-NOMA permettent à de nombreux utilisateurs d'avoir accès à toutes les ressources de fréquence et de temps, qui permet à plusieurs utilisateurs de partager le même canal fréquentiel simultanément par un multiplexage activé par une différence de niveau de puissance en fonction de leurs distances qui les sépare de la station de base (BS).et pour améliorer l'efficacité spectrale. Pour assurer la détection des signaux, les techniques de PD-NOMA utilisent l'annulation des interférences successives en appliquant le détecteur SIC qui effectue la séparation des signaux au niveau de récepteur [28] on peut illustrer cette nouvelle technique par la figure 2.9:

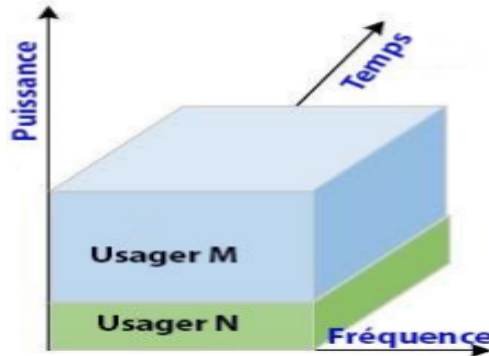


Figure. 2.9 – Principe de NOMA dans le domaine de puissance.

• **Liaison montante:**

Le canal est différent pour chaque utilisateur et les signaux reçus à la station de base sont différents même si les utilisateurs utilisent la même puissance d'émission.

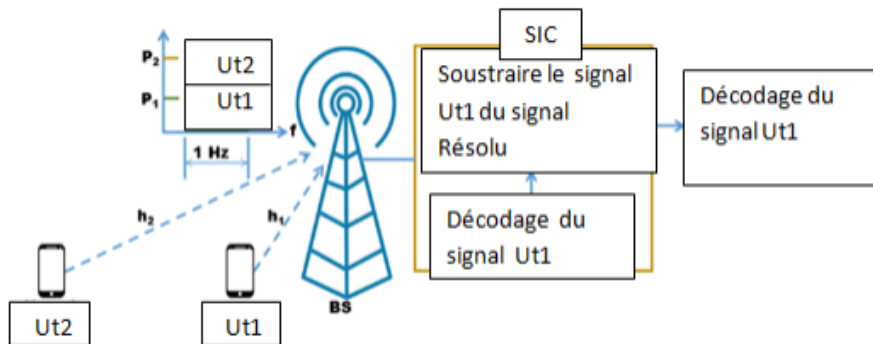


Figure. 2.10 – Liaison montante du domaine de puissance NOMA.

Comme le montre la figure 2.10, dans le réseau de liaison montante NOMA, chaque mobile transmet un signal vocal à la station de base. dans BS, les itérations SIC sont faites pour détecter les signaux des utilisateurs mobiles. Les deux utilisateurs envoient leurs messages dans la même bande de fréquence avec la même puissance d'émission p, et le signal reçu en BS est donné par :[29]

$$Y = \sum_{i=1}^2 \sqrt{p_i} h_i X_i + n_i \tag{2.7}$$

Où :

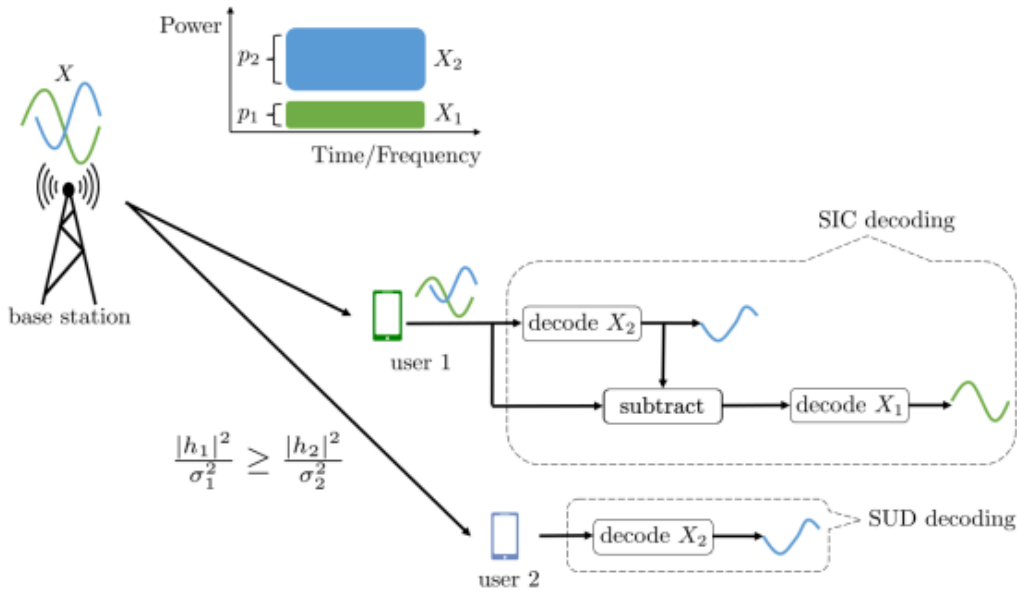
$p_i$ : est la puissance d'émission pour l'utilisateur  $i$ .

$n_i$ : représente bruit blanc additive Gaussien (additive white gaussian noise: AWGN).

En liaison montante NOMA, le décodage SIC est effectué à la station de base pour la récupération des messages  $M_1$  et  $M_2$  du signal superposé  $Y$ .

- **Liaison descendante:**

La figure 1.11 présente un schéma de NOMA pour la liaison descendante et Chacun est équipé d'une antenne et d'une station de base (BS) qui lui permet deux signaux sont transmis en même temps sur la même fréquence, avec leur multiplexage dans le domaine de puissance vers les deux utilisateur 1 et utilisateur 2 avec différentes puissances d'émission  $p_1$  et  $p_2$  sur la même bande de fréquence respectivement [30].



**Figure. 2.11** – La liaison descendante du NOMA.

Le signal transmis correspondant est représenté par:

$$Y = \sqrt{p_1}x_1 + \sqrt{p_2}x_2 \quad (2.8)$$

Où :

$X$ : est le signal correspondant au message de les utilisateurs  $i$ .

$p$ : est la puissance alloué au utilisateurs.

Alors :

$$p_1 + p_2 = P$$

Si la puissance totale émise est  $P$ .

### 2.2.2.3 Techniques d'accès multiples non-orthogonales dans le domaine de code NOMA (C-NOMA):

Le domaine de code NOMA permet de prendre en charge plusieurs transmissions au sein d'un même bloc de ressources temps-fréquence en attribuant des codes différents à chaque utilisateur. Cela offre des avantages en termes de gain de diffusion et de gain de mise en forme, mais nécessite une bande de signal supplémentaire par rapport au domaine de puissance NOMA. Parmi les

solutions existantes dans le domaine de code NOMA, on trouve principalement l'étalement CDMA (LDS-CDMA), IDMA, MUSA, D-OMA et l'accès multiple à code clairsemé (SCMA) [31].

## 2.3 Les canaux de communication sans fils

Pour le concept d'un système de communication, il comprend également des dispositifs qui permettent d'adapter le signal pour la transmission au canal et réduire les erreurs de transmission, il est nécessaire de construire des modèles mathématique caractérisant le milieu de propagation. On citer les modèles très utilisés dans la communication sans fils:

### 2.3.1 Canal de propagation par multi trajet:

Dans le canal de propagation Multi-Trajet le récepteur peut recevoir le même signal de plusieurs chemins différents , c'est-à-dire plusieurs répliques du même signal transmis atteignent le récepteur , ces différents phénomènes s'appliquent simultanément au trajet d'un signal [32] :(voire la figure 2.12 [33]:)

- La réflexion.
- La diffraction.
- La réfraction.
- La diffusion.
- Le guidage d'onde.

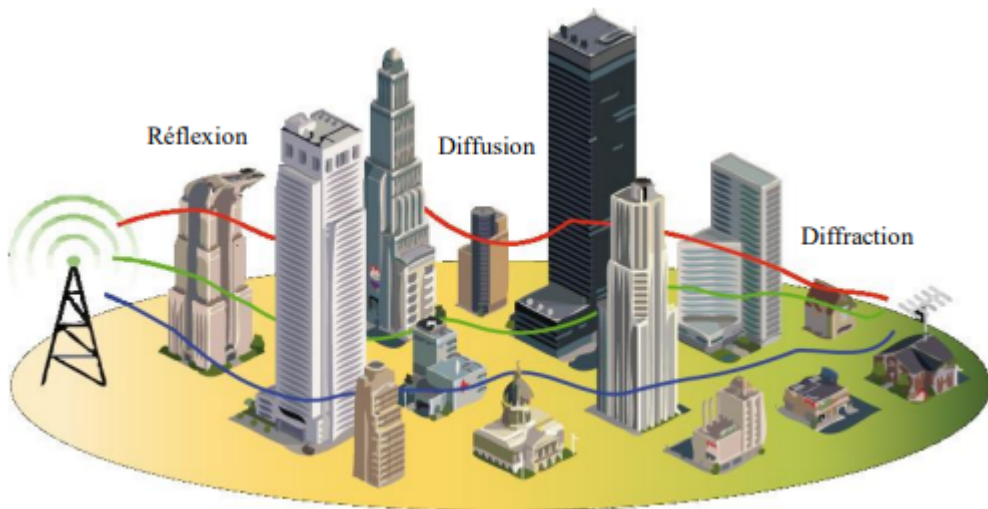


Figure. 2.12 – Propagation par multi trajet.

#### 2.3.1.1 Le canal de Rayleigh:

La diffusion de rayleigh est une mode de diffusion des ondes que se caractérise par le terme NLOS (None Line Of Sight) où il n'y a pas de visibilité direct entre l'émetteur et le récepteur dans ce cas la densité de probabilité de l'amplitude d'évanouissement du signal reçu suit une loi de rayleigh définie par l'équation suivante, tel que le signal reçu est constitué d'un grand nombre de trajet indirect, ayant des amplitudes et des phases aléatoires [30] :

$$P(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp(-x^2/2\sigma^2) \quad (2.9)$$

Avec :

$\mathbf{x}$ : est l'enveloppe du signal complexe reçu , $\mathbf{x}=\mathbf{y}+iz$ .

$\sigma$ : est l'écart type réelle( $y$ )ou la partie imaginaire ( $iz$ ).

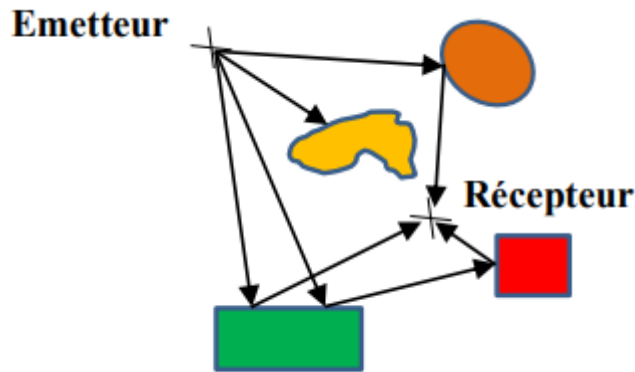


Figure. 2.13 – Exemple de propagation multi trajet NLOS.

## 2.4 L'efficacité:

Dans les réseaux de nouvelle génération, il faut chercher un juste milieu entre l'efficacité spectrale et l'efficacité énergétique, nous introduisons les définitions de base de l'efficacité spectrale (SE) et l'efficacité énergétique (EE).

- **Efficacité spectrale (SE):**

L'amélioration de l'efficacité spectrale est l'un des sujets de recherche actuels dans le domaine des communications numériques sans fil. depuis des décennies, en raison de la rareté et le cout de les ressource spectrale.

L'efficacité spectrale est définie comme le nombre de bits par seconde par unité de bande passante pouvant être transmis à système de communication.

Le SE est défini par la formule suivante[34]:

$$SE = \log_2\left(1 + \frac{p|h|^2}{\sigma^2}\right) (\text{bit/s/Hz}) \quad (2.10)$$

Avec:

$p$ : Désigne la puissance d'émission.

$|h|^2$ : Désigne le gain du canal.

$\sigma$ : Désigne la puissance de bruit.

- **Efficacité énergétique (EE):**

L'efficacité énergétique est le rapport énergétique entre la quantité d'énergie fournie et la quantité d'énergie absorbée, pour qu'il y ait moins de pertes et une meilleure efficacité dans l'utilisation de l'énergie, nous pouvons donc dire que l'efficacité énergétique est liée à l'obtention de performances maximales.

Ainsi, l'augmentation de l'efficacité énergétique permet de réduire la consommation d'énergie. il peut être défini de plusieurs manières, il peut également être défini aussi comme le rapport de la capacité sur la puissance total utilisé par la station de base[34].

L'EE est défini comme suit:



$$EE = \frac{D_T}{P_{totale}} = SE \frac{w}{P_{totale}} (\text{bit/joule}) \quad (2.11)$$

Avec:

$P_{totale}$  : la puissance d'émission totale de la station de base.

$w$  : la bande passante.

## 2.5 Les applications de NOMA:

### 2.5.1 Dans les réseaux cellulaires :

Dans les réseaux cellulaires, le déploiement de NOMA peut être effectué sur des communications montantes et descendantes. Dans la liaison montante transmission, NOMA est adopté à la BS dans laquelle le mécanisme SC effectue la sommation des signaux reçus de utilisateurs transmis avec différents niveaux de puissance. sinon, dans la transmission en liaison descendante, la source envoie le signal combiné à utilisateurs avec une puissance différente pour chaque signal individuel tandis que le récepteur applique la technique SIC pour détecter et décoder leur propre signal. NOMA peut fournir une efficacité spectrale et une équité améliorées entre les utilisateurs par rapport au réseau cellulaire précédent générations telles que 1G à 4G. De plus, NOMA peut être exploité dans le cas de plusieurs antennes, comme on dit MIMO NOMA. La technique à antennes multiples vise à obtenir deux objectifs. La première consiste à générer une formation de faisceaux, ce qui entraîne une réduction de la rapport signal sur interférence plus bruit (SINR) . l'autre consiste à créer un multiplex spatial, ce qui se traduit par une amélioration de la débit . Pour le NOMA à formation de faisceaux, l'efficacité spectrale est augmentée en améliorant le SINR. la figure 1.15 illustre un système NOMA avec formation de faisceau composé de quatre utilisateurs et de deux antennes dans lequel deux antennes pour la formation de faisceau sont équipées pour la BS et le numéro d'antenne pour chaque utilisateur est un revanche, en utilisant plusieurs antennes, NOMA avec multiplexage spatial peut augmenter son gain. Etant donné qu'un flux de données indépendant est envoyé par une antenne d'émission, le débit réalisable dans ce type de NOMA peut être amélioré en fonction du numéro d'antenne d'émission. Une autre application de NOMA est la communication entre la station de base et les utilisateurs avec l'aide du relais utilisateur/relais dédié, À la Figure 2.16, l'utilisateur 2 est masqué par le obstacle et ne peut donc pas recevoir le signal émis par la BS. Par conséquent, l'utilisateur 1 aide la BS à transmettre le signal décodé à l'utilisateur 2 [35].

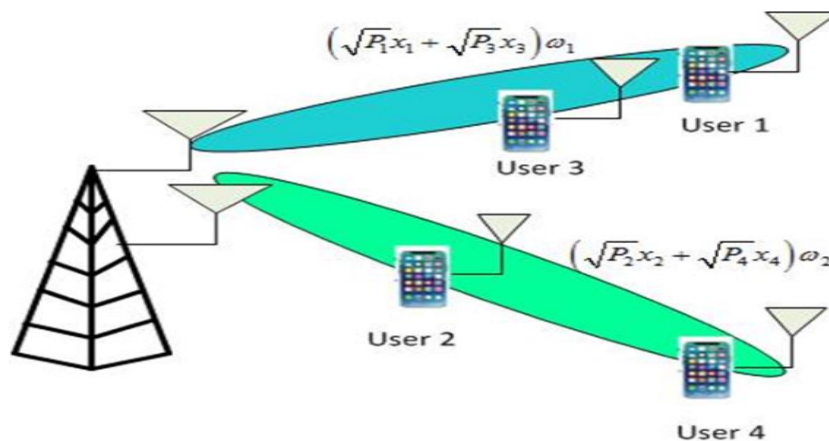
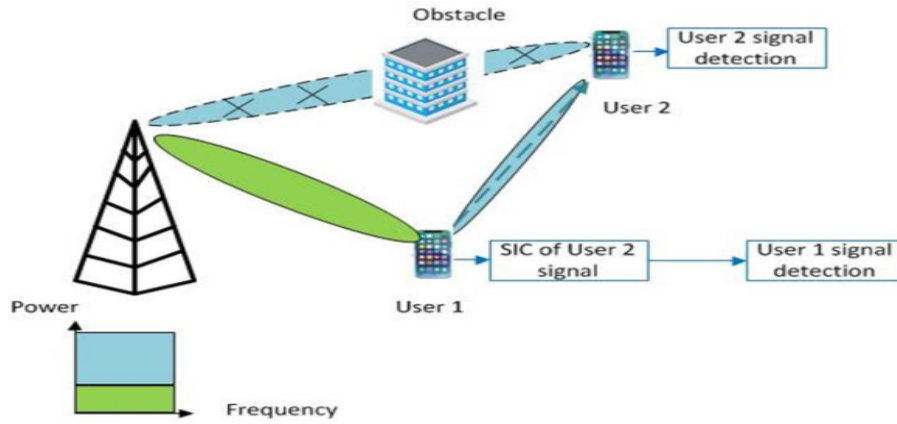


Figure. 2.14 – Un exemple de NOMA avec formation de faisceaux.



**Figure. 2.15** – Un exemple de système NOMA coopératif à deux utilisateurs et à une BS.

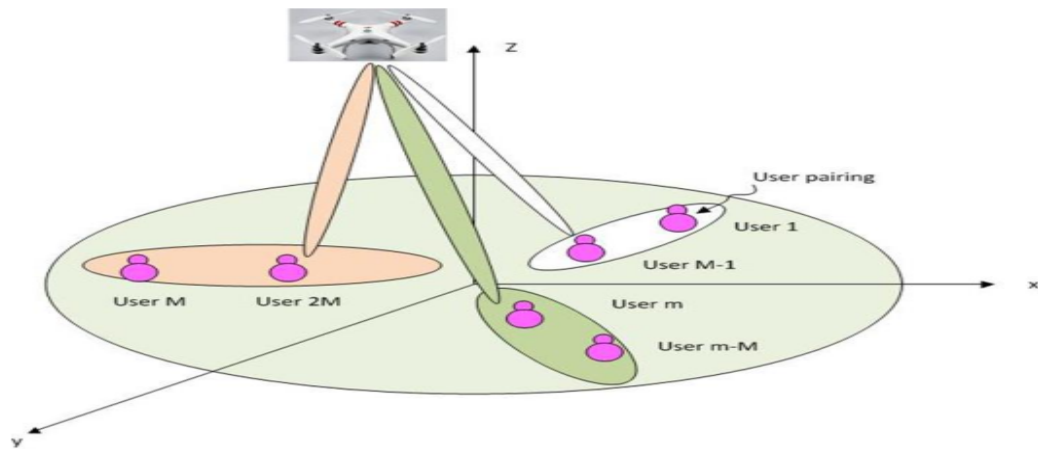
### 2.5.2 Dans les réseaux UAV :

Actuellement, les véhicules aériens sans pilote (UAV) ont progressivement prouvé leur potentiel dans des applications civiles telles que la photographie aérienne, amélioration de la distribution du fret et gestion des incendies de forêt, catastrophes. La communication assistée par drone est devenue un potentiel application dans les domaines industriels et universitaires. Pour intégrer les drones dans les réseaux 5G et futurs, la technique d'accès multiple est devenue un composant critique. NOMA est l'un des candidats importants dans ces réseaux en raison de ses caractéristiques écrasantes, par ex. efficacité spectrale supérieure, latence réduite et connectivité massive. Premièrement, certaines caractéristiques clés des réseaux UAV sont décrit comme suit.

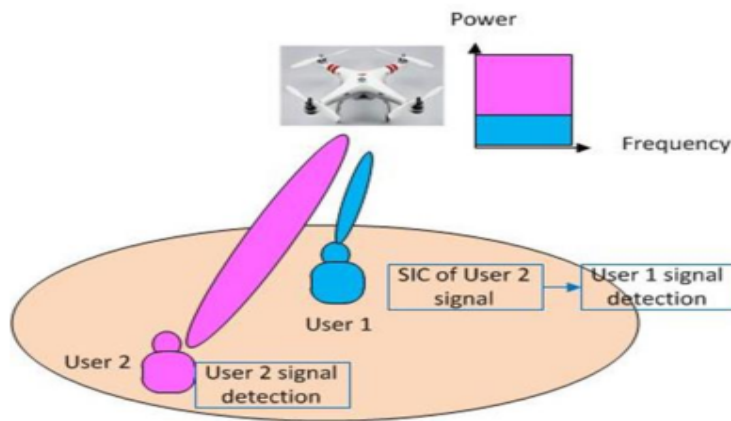
- **Mobilité** : les zones de couverture d'un drone changent toujours lorsqu'il vole. Ainsi, il peut prendre en charge de nombreux utilisateurs au sol.
- **Perte de trajectoire** : l'effet de l'ombrage et de l'évanouissement sur l'UAV n'est pas significatif car les éléments d'obstacle n'apparaissent pas dans le air. Ainsi, les liens entre l'UAV et les utilisateurs pris en charge sont généralement modélisés en ligne de mire.
- **Agilité** : le déploiement des drones peut être rapidement réalisé. Les emplacements de ces drones peuvent être gérés dynamiquement dans une zone 3D en fonction des besoins en temps réel de l'utilisateur. De ce fait, il offre aux usagers au sol un accès plus flexible et plus on-service à la demande à un coût inférieur à celui des BS terrestres.

NOMA peut aider la connectivité massive dans les réseaux basés sur les UAV en adoptant PD NOMA pour aider les utilisateurs qui partagent le même ressource fréquence/temps. En raison des liaisons LoS, il n'y a donc pas de variations évidentes de gain de canal entre les UAV et les utilisateurs au sol. Par conséquent, les réseaux d'UAV assistés par NOMA doivent être repensés pour tenir compte des écarts d'évanouissement à grande échelle entre NOMA utilisateurs, telles que les approches d'appariement d'utilisateurs (voir Figure 2.17).

Prenons un exemple comprenant un UAV et deux utilisateurs couverts 1 et 2 comme le montre la figure 2.18. L'UAV transmet un signal superposé à deux utilisateurs.



**Figure. 2.16** – illustration du jumelage d'utilisateurs dans les réseaux de drones assistés par NOMA.



**Figure. 2.17** – Illustration pour les réseaux UAV pris en charge par NOMA.

## 2.6 Les avantages et les inconvénients de NOMA:

Les avantages de la NOMA sont les suivants :

- Une efficacité spectrale plus élevée à cause de l'utilisation de plusieurs utilisateurs sur la même ressource temps-fréquence.
- Une réduction significative de la latence de transmission ce qui améliore l'équité entre les utilisateurs.
- Une Connectivité élevée qui lui permet d'accueillir un grand nombre d'utilisateurs sans limitation d'appareils ne se limite pas au nombre de ressources disponibles.
- Une grande flexibilité par rapport à d'autres techniques, car elle repose sur l'allocation de plusieurs utilisateurs à un seul bloc de ressources.
- La NOMA est une technique complémentaire aux techniques d'accès multiple orthogonales (OMA), car elle utilise une nouvelle dimension, à savoir le domaine de puissance.

Les inconvénients de NOMA sont les suivants:

- En cas d'erreur au niveau du SIC, cela peut entraîner un décodage incorrect des informations des autres utilisateurs, ce qui peut compromettre les performances du récepteur. Cela limite

le nombre maximal d'utilisateurs pouvant être desservis, car une erreur dans le processus de décodage peut affecter les données de plusieurs utilisateurs simultanément.

- Chaque utilisateur est tenu de fournir des informations sur le gain du canal à la station de base sous forme de retour, de sorte que NOMA est suffisamment sensible à obtenir ces mesures.
- Chaque utilisateur doit décoder les informations de tous les autres indépendamment de l'état du canal au niveau du groupe, Cela entraîne des complications destinataire. De plus, la consommation d'énergie est plus élevée.
- Afin de garantir la fonctionnalité requise du concept de domaine de puissance en NOMA au niveau du récepteur, il est essentiel que la différence de gain entre les canaux des utilisateurs soit suffisamment importante. Cela limite le nombre de paires d'utilisateurs pouvant être desservies par les clusters, car une différence de gain insuffisante peut entraîner des interférences entre les utilisateurs et une détérioration des performances du système.

## 2.7 Comparaison entre la NOMA et L'OMA:

Le tableau 1.3 représente une comparaison entre les deux types d'accès NOMA et OMA [36] , [37]:

Caractéristique	NOMA	OMA
Efficacité spectrale	Plusieurs utilisateurs utilisent la même ressource avec de bonnes et de mauvaises conditions de canal en même temps. codes attribués à l'utilisateur faible est également utilisé pour l'utilisateur expérimenté, qui causer des interférences qui sont traités par SIC	Chaque utilisateur se voit attribué à une ressource sans tenir compte de l'état du canal, qu'il soit bon ou mauvais, et par conséquent, une diminution de l'efficacité spectrale et donc de débit est enregistrée dans le système
Équité pour l'utilisateur, faible latence et connectivité massive	NOMA sert de nombreux utilisateurs en même temps selon différentes conditions de canal, ce qui offre une équité pour l'utilisateur, un temps de réponse réduit et une connectivité élevée.	Dans OMA, l'utilisateur avec un bon état de canal a une priorité plus élevée à se servir tandis que l'utilisateur avec un mauvais état de canal doit attendre l'accès, ce qui entraîne un problème d'équité et une latence relativement élevée. Cette approche ne peut pas supporter une connectivité massive.
Complexité du récepteur	Élevée	Faible
Consommation d'énergie	Plus	Moins
Nombre d'utilisateurs/Cluster	Inférieur	Supérieur
Nombre de paires d'utilisateurs	Moin	Plus

**Tableau. 2.3** – Comparaison entre les techniques OMA et NOMA

## 2.8 Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes techniques d'accès multiple, en commençant par une description des techniques d'accès multiple orthogonales (TDMA, FDMA, CDMA, OFDMA). Ensuite, nous avons approfondi l'étude de l'accès multiple non orthogonal (NOMA) et ses techniques basées sur la puissance et l'étalement (code). Nous avons également défini l'efficacité et conclu que l'efficacité énergétique est liée à l'efficacité spectrale. De plus, nous avons examiné les avantages et les inconvénients de ce nouveau mode d'accès, NOMA. Enfin, nous avons effectué une comparaison entre les deux catégories de techniques d'accès multiple, à savoir OMA et NOMA.

Dans le chapitre suivant, nous aborderons une étude comparative des performances entre les systèmes NOMA et OMA.

## Chapitre 3

# Simulations et interpretation des résultats

### 3.1 Introduction:

Dans cette étude comparative des performances entre les systèmes NOMA et OMA, nous nous intéressons à évaluer et 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.

Les performances des systèmes NOMA et OMA sont évaluées selon plusieurs critères clés. La capacité du système, qui mesure la quantité maximale d'informations pouvant être transmises, est l'un des principaux indicateurs. Nous analysons également la probabilité de panne, qui représente la fiabilité du système, les résultats de nos simulations sont présentés de manière claire et précise, mettant en évidence les différences et les performances relatives des systèmes NOMA et OMA dans différentes conditions de communication. Nous utilisons le logiciel MATLAB, reconnu pour sa fiabilité et sa flexibilité, pour mener ces simulations.

### 3.2 Modèle de simulation:

Nous supposons qu'un message est envoyé par la station de base (BS) à deux utilisateurs différents : l'un éloigné de la BS (utilisateur 1) et l'autre proche (utilisateur 2).

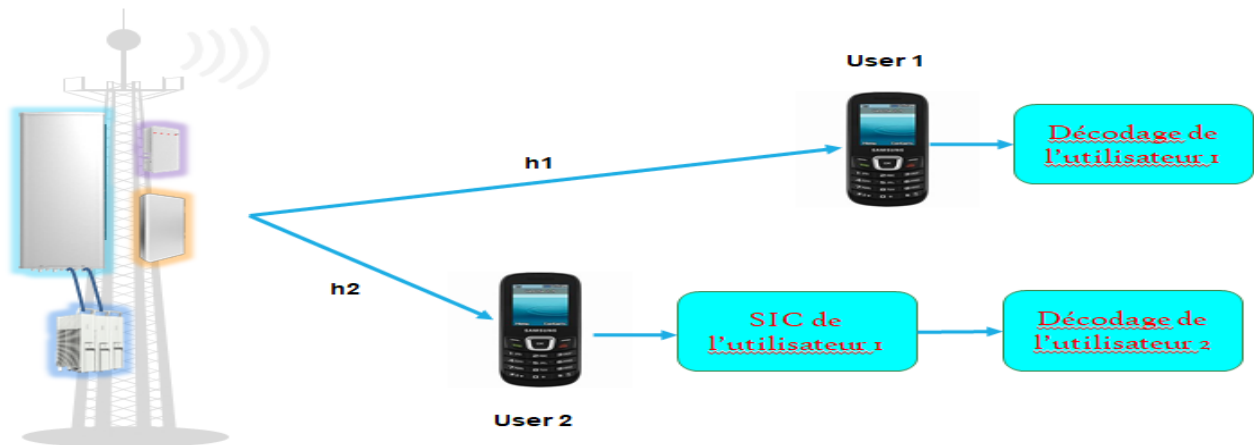


Figure. 3.1 – Schéma de deux utilisateurs NOMA.

La station de base (BS) a deux messages distincts  $x_1$  pour l'utilisateur 1 (utilisateur distant) et  $x_2$  pour l'utilisateur 2 (utilisateur proche). Et  $a_1$  et  $a_2$  sont les facteurs d'allocation de puissance respectifs pour l'utilisateur éloigné et l'utilisateur proche ( $a_1 + a_2 = 1$ ). Dans NOMA, pour puissance l'équité des utilisateurs, plus de puissance est donné à l'utilisateur éloigné et moins de pouvoir à l'utilisateur proche. C'est-à-dire que  $a_1 > a_2$ . Nous utiliserons  $a_1=0,8$  et  $a_2=0,2$ . C'est un choix arbitraire. Soit  $h_1$  et  $h_2$  désignent respectivement le canal allant de la BS à l'utilisateur proche et à l'utilisateur distant.

Comme nous le savons déjà, le signal NOMA codé en superposition transmis par la station de base est le suivant :

$$x = \sqrt{P}(\sqrt{a_1}x_1 + \sqrt{a_2}x_2). \quad (3.1)$$

où,  $P$  est la puissance d'émission.

La copie de  $x$  reçue par l'utilisateur éloigné après avoir propagé à travers le canal  $h_1$  est la suivante:

$$y_1 = h_1x + w_1. \quad (3.2)$$

De même, le signal reçu par l'utilisateur proche après sa propagation à travers le canal  $h_2$  est également une copie de  $x$ , et peut être exprimé comme suit :

$$y_2 = h_2x + w_2. \quad (3.3)$$

• **Pour l'utilisateur 1 (far user):**

Pour étendre le signal reçu par l'utilisateur 1 ce qui donne :

$$y_1 = h_1x + w_1, \quad (3.4)$$

$$= h_1\sqrt{P}(\sqrt{a_1}x_1 + \sqrt{a_2}x_2) + w_1, \quad (3.5)$$

$$= h_1\sqrt{P}\sqrt{a_1}x_1 + h_1\sqrt{P}\sqrt{a_2}x_2 + w_1. \quad (3.6)$$

Puisque  $a_1 > a_2$ , le décodage direct de  $y_1$  donnerait  $x_1$ . Le terme contenant la composante  $x_2$  sera traité comme une interférence.

- Le rapport signal sur bruit (Signal to noise SNR) est le rapport entre la puissance du signal utile  $P_s$  et la puissance du bruit  $N$ . Il permet d'évaluer la contribution du bruit ainsi que son impact sur la dégradation du signal.

$$\gamma = \frac{P_s}{N}. \quad (3.7)$$

Le rapport signal sur bruit d'interférence pour l'utilisateur distant est[38] :

$$\gamma_1 = \frac{|h_1|^2 P a_1}{|h_1|^2 P a_2 + \sigma^2}. \quad (3.8)$$

et son capacité est:

$$C_1 = \log_2(1 + \gamma_1) = \log_2\left(1 + \frac{|h_1|^2 P a_1}{|h_1|^2 P a_2 + \sigma^2}\right). \quad (3.9)$$

• **Pour l'utilisateur 2 (Near user):**

Pour étendre le signal reçu à l'utilisateur 2:

$$y_2 = h_2x + w_1, \quad (3.10)$$

$$= h_2\sqrt{P}(\sqrt{a_1}x_1 + \sqrt{a_2}x_2) + w_2, \quad (3.11)$$

$$= h_2\sqrt{P}\sqrt{a_1}x_1 + h_2\sqrt{P}\sqrt{a_2}x_2 + w_2. \quad (3.12)$$

L'utilisateur 2 doit d'abord effectuer une annulation d'interférences successives (SIC) avant de décoder son propre signal. le SIC s'effectue comme suit :

- $y_2$  est directement décodé pour obtenir  $x_1$  ou plutôt, une estimation de  $x_1$ , soit  $\tilde{x}_1$ .
- $y_2' = y_2 - \sqrt{a_1}\tilde{x}_1$  est calculé.
- $y_2'$  est décodé pour obtenir une estimation de  $x_2$ .

Le rapport signal sur bruit d'interférence au niveau de l'utilisateur 2 pour décoder le signal de l'utilisateur 1 (avant SIC) est [38] :

$$\gamma_{1,2} = \frac{|h_2|^2 P a_1}{|h_2|^2 P a_2 + \sigma^2}. \quad (3.13)$$



La capacité correspondant est:

$$R_{1,2} = \log_2(1 + \gamma_{1,2}) = \log_2\left(1 + \frac{|h_2|^2 P a_1}{|h_2|^2 P a_2 + \sigma^2}\right). \quad (3.14)$$

Après l'annulation du signal de l'utilisateur 1 à l'aide de SIC, le rapport signal sur bruit de l'utilisateur 2 pour décoder son propre signal est [38]:

$$\gamma_2 = \frac{|h_2|^2 P a_2}{\sigma^2}. \quad (3.15)$$

La capacité correspondant est:

$$R_2 = \log_2(1 + \gamma_2) = \log_2\left(1 + \frac{|h_2|^2 P a_2}{\sigma^2}\right). \quad (3.16)$$

### 3.3 Analyse et interprétation des simulations:

On suppose que la station de base envoie (BS) deux messages différent ,l'un est distant et l'autre est proche à la BS ,tel que le premier utilisateur à une longue distance et d'une coefficient de puissance  $\alpha_1$  et l'autre à une distance loin et d'une facteur de puissance  $\alpha_2$ .

Le tableau (3.1) présente les paramètres utilisés dans les simulations :

Paramètres	Valeur
d1	2
d2	1
Les facteurs	$\alpha_1 = 0,8, \alpha_2 = 0,2$ .
éta(exposant de perte de chemin)	4
SNR	0:2:40
Le taux de transmission	rate1=2,rate2=2.
Canal	rayleigh

**Tableau. 3.1** – Paramètres de simulations.

### 3.4 SIC parfait(Perfect SIC):

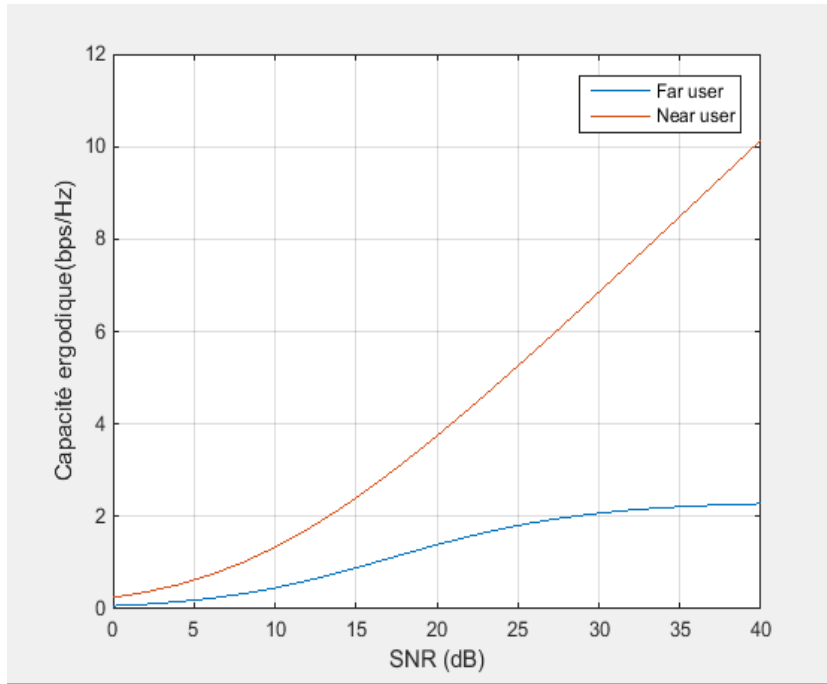
#### 3.4.1 Analyse de capacité:

##### 3.4.1.1 Comparaison entre deux utilisateur de système NOMA:

La capacité des utilisateurs de NOMA est exprimée par:

$$C_{NOMA,i} = \log_2(1 + SNR_{NOMA,i}). \quad (3.17)$$

La figure 3.2 illustre une comparaison des capacités des deux utilisateurs dans le système NOMA en fonction du rapport signal sur bruit (SNR). Les résultats obtenus révèlent des comportements distincts pour chaque système.



**Figure. 3.2** – La capacité de deux utilisateurs NOMA proche et éloigné.

Dans le système NOMA, il est remarqué que la capacité de l'utilisateur 1 augmente progressivement jusqu'à ce qu'il atteigne un rapport signal sur bruit (SNR) de 30 dB. En contraste, la capacité de l'utilisateur 2 continue d'augmenter à mesure que le SNR augmente. En outre, il est observé que la capacité de l'utilisateur 2 dépasse celle de l'utilisateur 1 dans ce système.

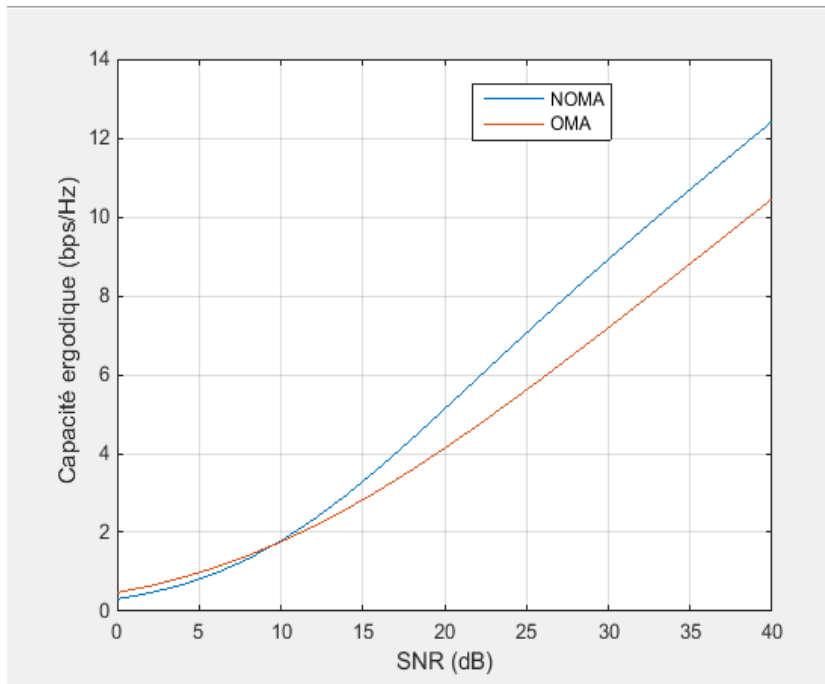
#### 3.4.1.2 Comparaison de la capacité entre NOMA et OMA pour deux utilisateurs:

Les équations suivantes sont utilisées pour calculer la capacité totale des systèmes NOMA et OMA :

$$C_{NOMA} = C_{NOMA,1} + C_{Noma,2}. \quad (3.18)$$

$$C_{OMA} = C_{OMA,1} + C_{oma,2}. \quad (3.19)$$

La figure 3.3 présente une comparaison des capacités totales des systèmes NOMA et OMA en fonction du rapport signal sur bruit (SNR). 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.



**Figure. 3.3** – La capacité des deux systèmes OMA et NOMA.

Nous observons une augmentation de la capacité dans les deux systèmes avec l'augmentation du SNR, ce qui est attendu. Cependant, la courbe de capacité du système NOMA présente une croissance plus rapide et atteint des niveaux plus élevés par rapport au système OMA.

Cette différence significative de capacité entre les deux systèmes met en évidence l'avantage de la technique NOMA dans l'utilisation efficace des ressources disponibles. En permettant la superposition des signaux et l'allocation dynamique des ressources, le système NOMA parvient à augmenter la capacité totale du système par rapport au système OMA, où les ressources sont réparties de manière orthogonale.

### 3.4.1.3 Comparaison entre deux utilisateurs par rapport à l'allocation de puissance (PA):

- L'allocation de puissance dans les systèmes non-orthogonaux d'accès multiple (NOMA) fait référence à la distribution de la puissance entre les utilisateurs qui partagent une même ressource radioélectrique.

Dans les systèmes NOMA, plusieurs utilisateurs peuvent être servis simultanément sur la même fréquence, en utilisant des techniques de multiplexage non-orthogonal. Pour ce faire, la puissance est allouée de manière dynamique entre les différents utilisateurs, en fonction de leur qualité de signal et de leur demande en bande passante.

- L'allocation de puissance est une étape cruciale dans la conception des systèmes NOMA, car elle permet de maximiser l'efficacité spectrale et d'optimiser la qualité de service pour les utilisateurs. Les techniques d'allocation de puissance dans les systèmes NOMA sont souvent basées sur des algorithmes d'optimisation, qui prennent en compte différents paramètres tels que la qualité de signal, la demande en bande passante, les contraintes de puissance et les objectifs de performance.

La figure 3.4 présente une comparaison de la capacité ergodique en fonction de l'allocation de puissance (PA) pour les utilisateurs (1 et 2) proche et éloignée de la BS 'a haute et basse SNR, les courbes bleues représentent la capacité ergodique à faible SNR tandis que les courbes rouges représentent la capacité ergodique à haute SNR.

Nous pouvons remarquer que la capacité de l'utilisateur proche est plus grand que l'utilisateur éloigné .

Cependant, la capacité de l'utilisateur 1 (éloigné) augmente rapidement avec l'augmentation de l'allocation de puissance, tandis que la capacité de l'utilisateur 2 (proche) diminue.

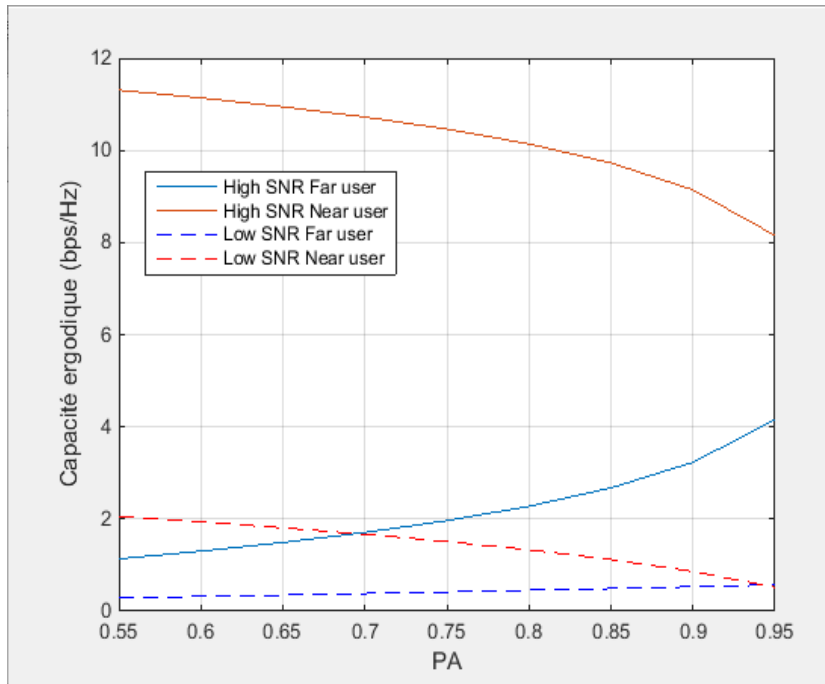


Figure. 3.4 – La capacité de deux utilisateurs NOMA.

### 3.4.2 Analyse de la probabilité de panne:

#### 3.4.2.1 Comparaison de la probabilité de panne entre deux utilisateurs de système NOMA:

- La probabilité de panne d'un canal de communication est la probabilité qu'un débit d'information donné ne soit pas pris en charge, en raison de la capacité variable du canal. La probabilité de panne est définie comme la probabilité que le débit d'information soit inférieur au débit d'information d'un seuil requis. c'est la probabilité qu'une panne se produise dans un délai spécifié en termes de débit.

La probabilité de panne de système NOMA est exprimée par :

$$\log_2(1 + SNR_{NOMA,i}) < R. \quad (3.20)$$

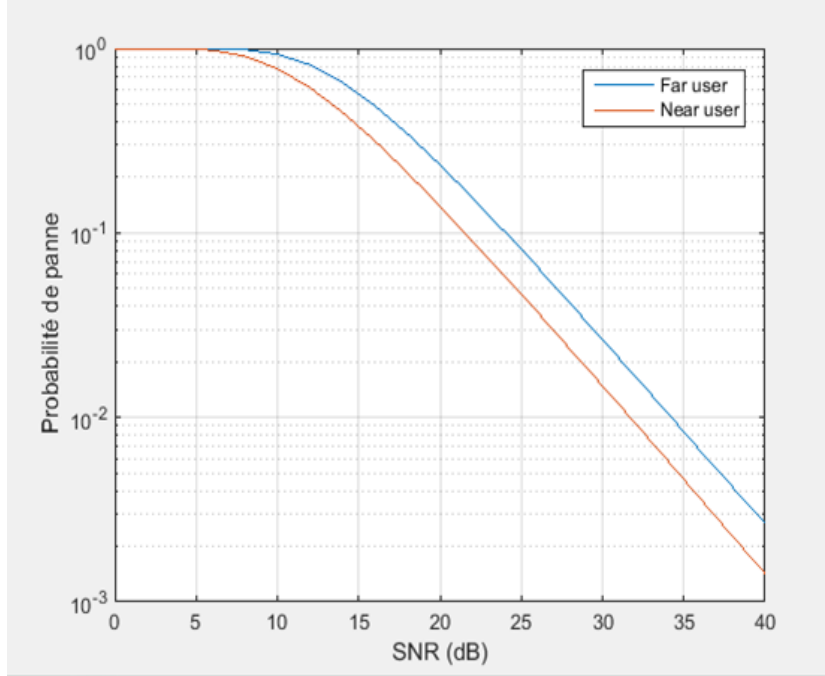
$$SNR_{NOMA,i} < 2^R - 1. \quad (3.21)$$

$$P_{outNOMA,i} = P(\log_2(1 + SNR_{NOMA,i}) < R). \quad (3.22)$$

$$P(SNR_{NOMA,i} < 2^R - N). \quad (3.23)$$

Tel que : le  $\mathbf{R}$  est Le taux de transmission.

La figure 3.5 illustre une comparaison de la probabilité de panne pour les deux utilisateurs dans le système NOMA en fonction du rapport signal sur bruit (SNR). nous observons que la probabilité de panne diminue à mesure que la valeur de SNR augmente pour tous les résultats.



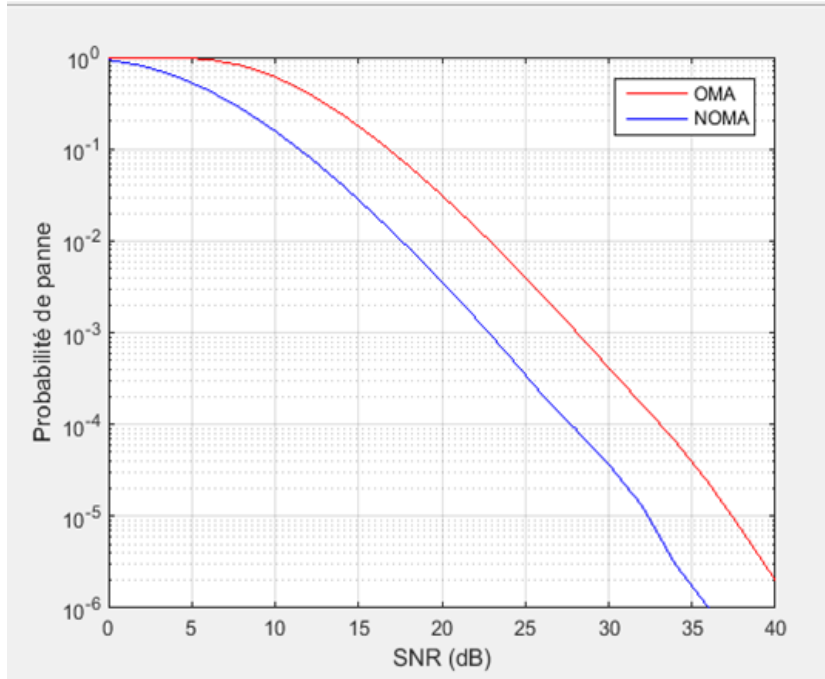
**Figure. 3.5** – La probabilité de panne de deux utilisateurs NOMA.

De plus, nous remarquons que la probabilité de panne de l'utilisateur 1 “éloigné” est supérieure à celle de l'utilisateur 2 “proche” dans ce système. cela indique que l'utilisateur 2 bénéficie d'une meilleure fiabilité de transmission par rapport à l'utilisateur 1, ce qui peut être attribué à de meilleures conditions de canal ou à une allocation de puissance plus favorable.

Ces résultats mettent en évidence l'importance du SNR dans la probabilité de panne du système NOMA. une valeur plus élevée de SNR conduit à une diminution de la probabilité de panne pour les deux utilisateurs, mais l'utilisateur 2 présente une probabilité de panne encore plus faible que l'utilisateur 1.

#### 3.4.2.2 Comparaison de la probabilité de panne entre NOMA et OMA pour deux utilisateurs:

La figure 3.6 présente une comparaison de la probabilité de panne pour les deux utilisateurs dans les systèmes NOMA et OMA en fonction du rapport signal sur bruit (SNR). nous observons que, pour les deux systèmes, la probabilité de panne diminue à mesure que le SNR augmente.



**Figure. 3.6** – La probabilité de panne des deux systèmes OMA et NOMA.

Cependant, il est important de noter que la probabilité de panne dans le système OMA est légèrement plus élevée que celle dans le système NOMA pour les deux utilisateurs. cela suggère que, dans des conditions similaires de SNR, le système NOMA présente une meilleure performance en termes de probabilité de panne.

### 3.4.2.3 Comparaison de la probabilité de panne de deux utilisateur par rapport l'allocation de puissance:

Une probabilité de panne plus faible indique une meilleure performance du système, car cela signifie que le système a plus de chances d'atteindre les objectifs de performance souhaités.

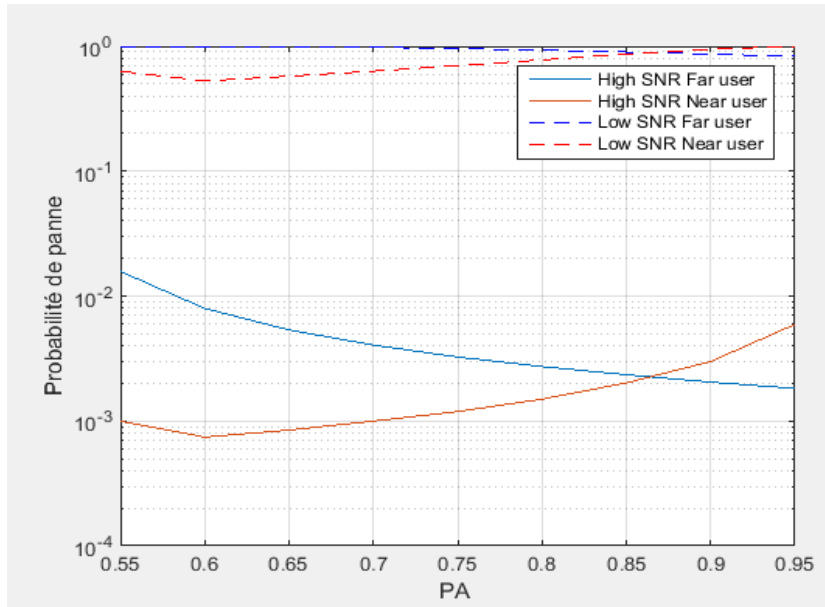
La Figure 3.4 présente une comparaison de la probabilité de panne pour un système NOMA à deux utilisateurs de la station de base (BS) en fonction de l'allocation de puissance (PA), avec deux cas : un cas de haute SNR (SNR élevé = 40 dB) et un cas de basse SNR (SNR faible = 10 dB). Les courbes en bleu représentent la probabilité de panne de l'utilisateur éloigné "Far user", tandis que les courbes en rouge représentent la probabilité de panne de l'utilisateur proche "near user".

Nous observons que la probabilité de panne de l'utilisateur 1 diminue progressivement de manière significative avec une augmentation de l'allocation de puissance dans des conditions de rapport signal sur bruit (SNR) élevé. En revanche, dans des conditions de faible SNR, la probabilité de panne diminue légèrement.

Cependant, la probabilité de panne de l'utilisateur 2 augmente lentement avec l'augmentation de l'allocation de puissance, tant dans le cas de faible SNR que dans le cas de haute SNR. Cela indique que la capacité de l'utilisateur 2 est moins sensible à l'allocation de puissance et n'augmente que de manière marginale.

Ces résultats mettent en évidence l'importance de l'allocation de puissance dans le système NOMA, en particulier pour l'utilisateur 1 qui bénéficie davantage de l'augmentation de l'allocation de puissance. cela montre également que l'allocation de puissance peut avoir un impact différencié

sur les différents utilisateurs en fonction de leurs conditions de canal.



**Figure. 3.7** – La probabilité de panne de deux utilisateurs en fonction l’allocation de puissance(PA).

## 3.5 SIC imparfait(Imperfect SIC):

### 3.5.1 Analyse de la capacité de deux utilisateurs:

La figure 3.8 présente la capacité ergodique pour les deux utilisateurs (le distant et le proche) en fonction du SNR, avec trois niveaux d’imperfection du SIC ( $0, 10^{-2}$  et  $10^{-3}$ ) représentés par des courbes distinctes.

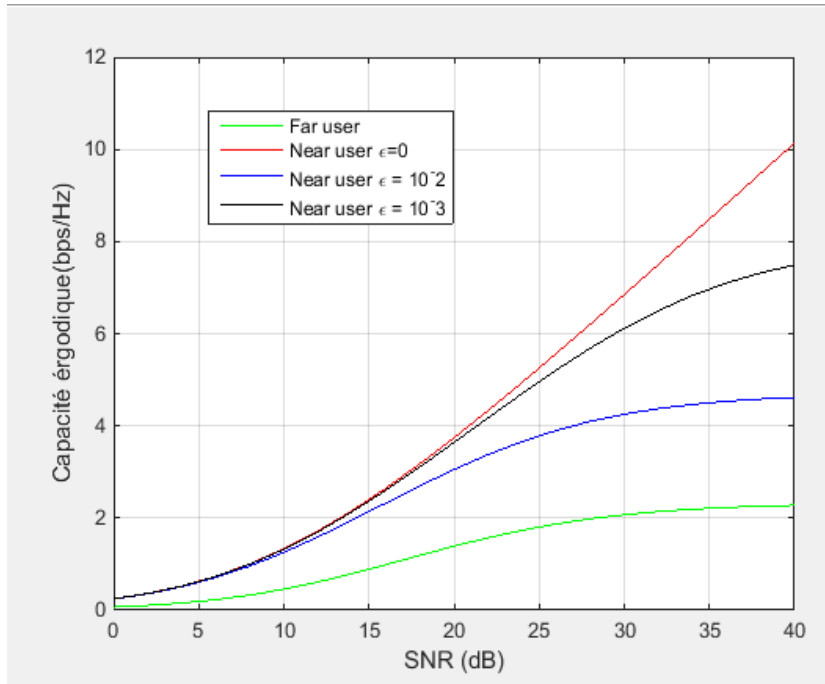
En examinant la figure, nous pouvons observer que la capacité ergodique augmente à mesure que le SNR augmente pour les deux utilisateurs. Cela indique que des niveaux plus élevés de SNR permettent une transmission de données plus efficace, conduisant à une capacité accrue.

De plus, nous constatons que l’effet de l’imperfection du SIC est plus prononcé pour le proche utilisateur que pour le distant utilisateur. cela signifie que les performances du proche utilisateur sont plus sensibles à l’imperfection du SIC, ce qui peut entraîner une diminution plus significative de la capacité ergodique. En revanche, le distant utilisateur est moins affecté par l’imperfection du SIC.

Il est également important de noter que lorsque la valeur de l’imperfection du SIC augmente, la valeur de la capacité diminue progressivement. cela souligne l’impact négatif de l’imperfection du SIC sur les performances du système NOMA. Des niveaux plus élevés d’imperfection du SIC entraînent une diminution de la capacité ergodique, ce qui peut avoir un impact sur l’efficacité de la transmission des données.

En résumé, la figure 3.8 met en évidence l’augmentation de la capacité ergodique avec l’augmentation du SNR pour les deux utilisateurs dans les systèmes NOMA. de plus, elle souligne l’importance de l’imperfection du SIC, qui a un effet plus significatif sur le proche utilisateur.

une diminution de la capacité ergodique est observée lorsque la valeur de l'imperfection du SIC augmente. ces résultats soulignent l'importance de minimiser l'imperfection du SIC pour optimiser les performances du système NOMA.



**Figure. 3.8** – La capacité de deux utilisateurs au cas de SIC imparfait.

### 3.5.2 Analyse de la probabilité de panne de deux utilisateurs:

La figure 3.9 présente la probabilité de panne pour les deux utilisateurs en fonction du SNR, avec les mêmes niveaux d'imperfection du SIC ( $0, 10^{-2}$  et  $10^{-3}$ ) représentés par des courbes distinctes.

En examinant la figure, nous observons que la probabilité de panne diminue à mesure que le SNR augmente pour les deux utilisateurs. cela indique que des niveaux plus élevés de SNR améliorent la fiabilité de la transmission, réduisant ainsi la probabilité de panne.

De plus, nous constatons que l'effet de l'imperfection du SIC est plus marqué pour le proche utilisateur que pour le distant utilisateur. cela signifie que l'imperfection du SIC a un impact plus important sur les performances du proche utilisateur, ce qui peut entraîner une augmentation plus significative de la probabilité de panne. En revanche, le distant utilisateur est moins affecté par l'imperfection du SIC.

Nous notons également que chaque fois que la valeur de l'imperfection du SIC augmente, la valeur de la probabilité de panne augmente également, ce qui entraîne une distorsion dans le système. ces résultats mettent en évidence l'importance d'une estimation précise du SIC pour améliorer les performances du canal de liaison descendante avec SIC.

En résumé, cette analyse montre que l'imperfection du SIC peut avoir un impact significatif sur les performances du système NOMA, en particulier pour le proche utilisateur. une estimation précise du SIC est donc essentielle pour améliorer les performances et réduire la probabilité de



panne dans ce système.

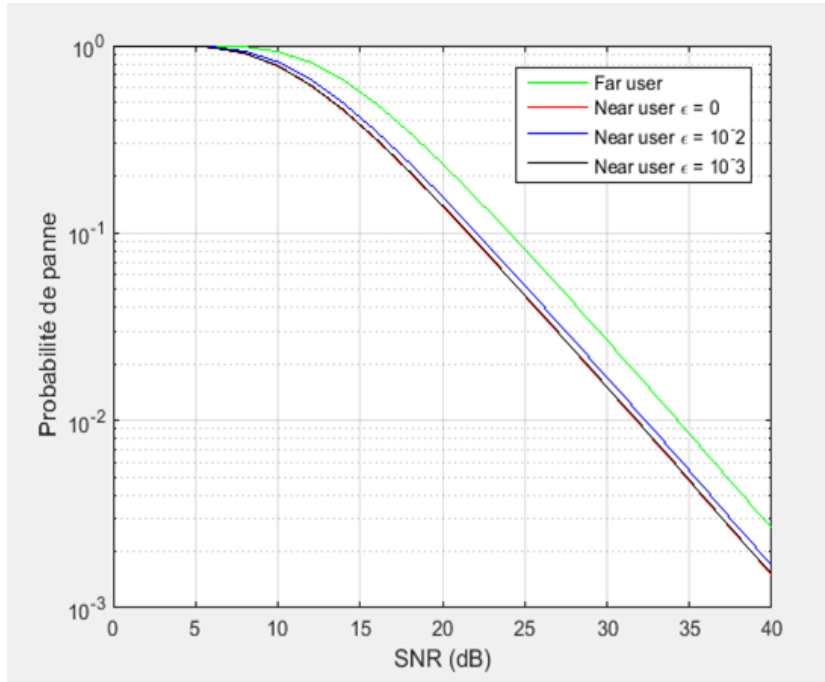


Figure. 3.9 – La probabilité de panne de deux utilisateurs au cas de SIC imparfait.

### 3.6 Conclusion :

Ce chapitre présente une comparaison des performances des systèmes NOMA (Accès non orthogonal multiple) et OMA (Accès multiple orthogonal). tout d'abord, nous introduisons le modèle de simulation utilisé, suivi d'une comparaison des capacités entre NOMA et OMA dans deux scénarios : le SIC parfait (perfect SIC) et le SIC imparfait (imperfect SIC). ensuite, nous évaluons les performances des deux systèmes en termes de probabilité de panne et capacité ergodique.

Les résultats montrent que le système NOMA présente une meilleure capacité que le système OMA, et que la probabilité de panne de l'utilisateur éloigné est plus faible que celle de l'utilisateur proche dans le système NOMA. Cependant, la probabilité de panne est plus élevée pour OMA que pour NOMA.

En conclusion, les performances du système NOMA sont meilleures que celles du système OMA. de plus, nous avons simulé l'allocation de puissance pour maximiser la capacité et minimiser la probabilité de panne. Enfin, nous avons étudié le cas où le SIC imparfait. Nous avons constaté qu'à mesure que la valeur de SIC imparfait augmente, la capacité diminue et la probabilité de panne augmente.

## Conclusion générale

L'accès sans fil est une technologie clé de la communication sans fil. Récemment, l'accès multiple non orthogonal (NOMA) a été introduit en tant que technique d'accès prometteuse pour les futurs systèmes de communication mobile. Contrairement à l'accès multiple orthogonal (OMA), NOMA améliore l'efficacité spectrale et l'équité des utilisateurs en utilisant les mêmes ressources pour desservir chaque NOMA. Le Multi-User Overlay Transport (MUST), anciennement connu sous le nom de NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access), a été adopté par 3GPP pour la technologie Long Term Evolution (LTE). Parmi les différentes variantes de NOMA, le domaine de puissance NOMA est considéré comme le type le plus populaire.

Dans lequel un émetteur envoie des messages qui se chevauchent à plusieurs récepteurs NOMA avec différents niveaux de puissance, en fonction de la priorité de l'utilisateur ou de la qualité du canal.

Du côté du récepteur, NOMA implique une technique appelée annulation d'interférence séquentielle (SIC), où les utilisateurs proches décodent les informations de l'utilisateur distant lors de l'exécution de SIC.

L'objectif de ce mémoire était d'analyser et de comparer les performances de NOMA et de l'accès multiple orthogonal (OMA) en termes de capacité, de probabilité de panne et d'allocation de puissance.

Dans ce mémoire, nous commençons par une étude de la technologie 5G, puis nous examinons la technologie NOMA pour les liens montants et descendants. Nous présentons également les avantages et les inconvénients de NOMA. Enfin, nous analysons les performances du système NOMA, en mettant l'accent sur la capacité, la probabilité de panne et l'allocation de puissance. Les résultats de cette analyse et des simulations montrent que NOMA surpasse OMA en termes de capacité et de probabilité de panne, tandis que NOMA est supérieur à OMA en termes d'allocation de puissance.

En conclusion, il est évident que NOMA offre de meilleurs débits, capacités et une plus grande robustesse de communication par rapport à OMA.

# Bibliographie

- [1] BOUHAFER ASMA DEHEMCHI MARWA. Etude et analyse de méthodes de beamforming pour des systèmes multi-utilisateurs pour la 5g. 2019.
- [2] TARAOUI Djamila MECHKHAR Hakima. Etude et simulation des principaux canaux pour la 5ème génération de la téléphonie mobile. 2021.
- [3] Prinima and J. Pruthi. “*Evolution of Mobile Communication Network: from 1G to 5G*”. 2006.
- [4] Bahria SAHRAOUI Mimouna Messabihi. “*Systèmes d’antennes intelligentes de la 5 ième génération de téléphonie mobile*”. Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, 2019 /2020.
- [5] A. Thomas. “*An Overview of 5G Advanced Evolution in 3GPP Release 18*”. Jan 2022.
- [6] T. Rahman. “*A Smart City Solution with 5G mMTC Technology*”. Jan 2022.
- [7] X. Zhao. “*Available-bandwidth-in-the-mmWave-spectrum-More-than-20-GHz-bandwidth-is-available*”. Jul 2017.
- [8] F. Schaich. “*5g-tout-ce-que-vous-devez-savoir-sur-le-reseau-de-lavenir*”. sept 2018.
- [9] Mary Ashley Canevaro. “*small-cell-attachments-pave-the-way-for-5g-wireless*”. April 2018.
- [10] Robert Akl Robin Chataut. “*Massive MIMO Systems for 5G and beyond Networks—Overview, Recent Trends, Challenges, and Future Research Direction*”. May 2020.
- [11] S. Ahmadi. “*5G NR: Architecture, Technology, Implementation, and Operation of 3GPP New Radio Standards*”. New Delhi, India, academic edition, 2019.
- [12] S. Spadaro F. Agraz A. Pages J. Cabaca P. Neves K. Koutsopoulos G. Bernini, P. G. Giardina and A. Matencio. “*multi-domain orchestration of 5g vertical services and network slices*”. pages 1–6, in Proc.IEEE Int. Conf. Commun, 2020. Workshops (ICC Workshops).
- [13] J. Cabaca. “*5g; system architecture for the 5g system (3gpp ts 23.501 version 15.2.0 release 15)*”. document ETSI TS 123.501, 2018.
- [14] A. Ghosh. “*5G Non Standalone Solution Guide, StarOS Release 21.5*”. cisco, San Jose, CA, USA, 2018.
- [15] Adamu murtala zungeru. *Procedures for the 5G System (5GS)Stage 2 (Release 16), document 3GPP TS 23.502*, volume 16.4.0. 2020.
- [16] F. Schaich. “*5G; NR; Overall description; Stage-2 (Release 15), document 3GPP TS 38.300*”, volume 15.3.1. 2018.
- [17] Ilham Salhane and Mounir Rifi. “*la technologie 5g pour les objets connectés*”. In *Colloque sur les Objets et systèmes Connectés-COC’2021*, 2021.
- [18] C. Goursaud D. Duchemin and J. M. Gorce. “*Code Domain Multiple Access*”. Edition hal edition, Mai 2018.
- [19] K. Zigangirov. “*Theory of code division multiple Acces Communication*”. Anderson, Series Editor, 2006.
- [20] D.Zhiguo Zhaocheng W Sheng Ch et Lajos H. D.Linglong, w.Bichai. “*A Survey of Non-Orthogonal Multiple Access for 5G*”, volume 20. In : IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS TUTORIALS, 2018.

- [21] Gal yna piskonova. “*Transmission OFDM pour la téléphonie*”. Thèse de doctorat, école de technologie supérieur université du Québec édition, 2013.
- [22] Salim et Haddad Khelifi. “*Planification et dimensionnement d’un réseau mobile (4G-LTE)*”. 2018.
- [23] Reda Hacini, Kamel et KHELIFI. “*Transition 2G/3G/4G en communication mobile : cas site université d’ATM Mobilis. s.l.*”. 2019.
- [24] E. Gueguen. “*Etude et optimisation des techniques UWB haut débit multi-bandes OFDM.*”. Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, janvier 2009.
- [25] URL: [https://www.researchgate.net/figure/Successive-interference-cancellation-SIC-algorithm-6\\_fig3\\_334711673](https://www.researchgate.net/figure/Successive-interference-cancellation-SIC-algorithm-6_fig3_334711673) [accessed 5 Jul, 2023].
- [26] A. Marcano. “*Capacity Dimensioning for 5G Mobile Heterogeneous Networks,*” . 2018.
- [27] Octavia A. Dobre S.M. Riazul Islam, Nurilla Avazov and Kyung-Sup Kwak. “*Power-Domain Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in 5G Systems: Potentials and Challenges* ”.
- [28] Necib Abdelbadie et Debbeche Hocine. “*Comparaison des performances entre NOMA et OFDM pour le réseau 5G*”. 2020-2021.
- [29] “performance analysis and design of non-orthogonal multiple access for wireless communications”, june 2019.
- [30] A. Choumane. “*Synthèse d’un canal de propagation par système multi antennes pour la caractérisation de terminaux mobiles à diversité* ”. 2011.
- [31] Muhammet ali karabulut haci ilhan et baharul islam Shahen shah, Ahmed nidham qasim. “*Survey and Performance Evaluation of Multiple Access Schemes for Next-Generation Wireless Communication Systems*”. August 2021.
- [32] Philippe Gugen et Ghais El Zein. “*Les techniques multi-antennes pour les réseaux sans fil*”. GET et Lavoisier, Paris, lavoisier 11, rue lavoisier 750008 paris, isbn 2-7462- 0883-0 édition, 2004.
- [33] URL: <https://blogs.univ-poitiers.fr/f-launay/2021/02/16/cours-2-niveau-master-chap-1-part-1/>.
- [34] Z. Wei. “*Performance Analysis and Design of Non-orthogonal Multiple Access for Wireless Communications*”. The University of New South Wales, 2019.
- [35] Z.Ding. “*NOMA and Its Applications: A Survey*”. International Journal of Emerging Technologies in Engineering Research (IJETER), July 2021.
- [36] J. Lee W. Nam, D. Bai and I. Kang. “*Advanced interference management for 5G cellular networks*”, volume 52. IEEE Communications Magazine, May 2014.
- [37] Y. Saito Y. Kishiyama A. Harada A. Benjebbour, A. Li and T. Nakamura. “*System-level performance of downlink NOMA for future LTE enhancements*”. proc., iee globecom édition, 2013.
- [38] J. Ge J. Men and C. Zhang. “*Performance analysis for downlink relaying aided non-orthogonal multiple access networks with imperfect CSI over Nakagami-m fading*”, volume 5. 2016.

# Résumé

La génération de réseaux de téléphonie mobile, connue sous le nom de 5G et au-delà, se doit de répondre à un ensemble d'exigences cruciales. Parmi celles-ci figurent la capacité de prendre en charge un nombre massif d'appareils connectés, des débits de données extrêmement élevés et des temps de transmission réduits. Cette mémoire se concentre sur l'examen approfondi et l'analyse des capacités de la technologie d'accès multiple non orthogonal (NOMA) qui, en comblant les lacunes de l'accès multiple orthogonal (OMA), permet de répondre aux demandes de cette prochaine génération de réseaux mobiles. L'étude débute par une description des exigences de la cinquième génération (5G) et se poursuit en abordant en détail la technologie NOMA. Enfin, une simulation MATLAB est utilisée pour comparer la capacité, la probabilité de panne et l'allocation de puissance entre l'OMA et le NOMA. Les résultats obtenus mettent en évidence l'extrême utilité de NOMA pour répondre aux besoins des futures générations de réseaux mobiles.

**Mots clés :** NOMA, OMA, SC, SIC, 5G, BER, domaine de puissance PD-NOMA, capacité, MATLAB Simulink, probabilité de panne, domaine de code CD-NOMA .

# Abstract

The next generation of mobile telecommunications networks, known as 5G and beyond, must meet a set of crucial requirements. These include the ability to support a massive number of connected devices, extremely high data rates, and reduced transmission times. This dissertation focuses on the in-depth examination and analysis of the capabilities of non-orthogonal multiple access (NOMA) technology, which addresses the limitations of orthogonal multiple access (OMA) to meet the demands of this next generation of mobile networks. The study begins with a description of the requirements of the fifth generation (5G) and proceeds to discuss NOMA technology in detail. Finally, a MATLAB simulation is used to compare the capacity, beamforming probability, and power allocation between OMA and NOMA. The obtained results highlight the significant usefulness of NOMA in meeting the needs of future generations of mobile networks.

**Keyword:** NOMA ,OMA, SC, SIC, 5G, BER, power domain PD-NOMA, capacity, MATLAB Simulink, outage probability, code domain CD-NOMA .

## الملخص

يجب أن يلبي الجيل القادم من شبكات الاتصالات المتنقلة ، المعروف باسم **5G** وما بعده ، بمجموعة من المتطلبات الحاسمة. وتشمل هذه القدرة على دعم عدد هائل من الأجهزة المتصلة، وسرعة بيانات عالية للغاية ، وتقليل أوقات الإرسال. الهدف من هذه الرسالة هو دراسة وتحليل المتعمق لقدرات تقنية الوصول المتعدد اللا متعامد (**NOMA**) ، المستخدمة للتغلب على عيوب تقنية الوصول المتعدد المتعامد (**OMA**) من أجل لتلبية متطلبات الجيل التالي من شبكات الهاتف المحمول. تبدأ الدراسة بوصف متطلبات الجيل الخامس (**5G**) وبعد ذلك ننتقل لمناقشة تقنية **NOMA** بالتفصيل. أخيرًا ، تم إجراء مقارنة محاكاة **MATLAB** بين **OMA** و **NOMA** من حيث السعة و احتمال الانقطاع و تخصيص الطاقة . تظهر النتائج التي تم الحصول عليها الفائدة الكبيرة لـ **NOMA** في تلبية احتياجات الأجيال القادمة من شبكات المحمول.

### الكلمات المفتاحية :

NOMA,OMA, SC, SIC, 5G, BER, domaine de puissance PD-NOMA, capacité, MATLAB, Simulink, probabilité de panne, domaine de code CD-NOMA .